

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS**  
**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**  
**CAMPUS I – CAMPINA GRANDE**  
**Área de Geotecnia**

**AVALIAÇÃO DO USO DE EMULSÃO ASFÁLTICA NA ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DE  
TRÊS SOLOS DE SERGIPE**

**Por:**

WASHINGTON JOSÉ SANTOS

Dissertação apresentada ao Centro de Tecnologia e Recursos  
Naturais da Universidade Federal de Campina Grande –  
Campina Grande/PB, como parte dos requisitos necessários  
para obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL**

Campina Grande – Paraíba

Julho de 2009

**WASHINGTON JOSÉ SANTOS**

Dissertação apresentada ao Centro de Tecnologia e Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande – Campina Grande-PB, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL**.

Área de Concentração – Geotécnica

Prof. Dr. Erinaldo Hilário Cavalcante  
*(Orientador)*

Campina Grande – Paraíba  
Julho de 2009

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

S237a  
2009

Santos, Washington José.

Avaliação do uso de emulsão asfáltica na estabilização química de três solos de Sergipe / Washington José Santos. — Campina Grande, 2009.  
141f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.

Referências.

Orientador: Prof. Dr. Erinaldo Hilário Cavalcante.

1. Emulsão Asfáltica. 2. Solo-Emulsão. 3. Estabilização de Solos. I.  
Título.

CDU – 624-032.37(043)

## FOLHA DE APROVAÇÃO

Autor: Washington José Santos

**Título:** AVALIAÇÃO DO USO DE EMULSÃO ASFÁLTICA NA ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DE TRÊS SOLOS DE SERGIPE

Dissertação Defendida e Aprovada em: 31,07,2009

Pela Banca Examinadora

(Assinatura): Erinaldo Cavalcante

PROF. Dr. (ORIENTADOR) ERINALDO HILÁRIO CAVALCANTE  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE - UFS/DEC

(Assinatura): J. R. I.

PROF. Dr. (CO-ORIENTADOR) JOHN KENNEDY GUEDES RODRIGUES  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE - UFCG/UAEC

(Assinatura): Alex B. Parreira

PROF. Dr. (EXAMINADOR EXTERNO) ALEXANDRE BENETTI PARREIRA  
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS - USP/EESC

(Assinatura): Adriano Elisio de F. de Lucena

PROF. Dr. (EXAMINADOR INTERNO) ADRIANO ELISIO DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE - UFCG/UAEC

(Assinatura): Milton Bezerra das Chagas Filho

PROF. Dr. (EXAMINADOR INTERNO) MILTON BEZERRA DAS CHAGAS FILHO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE - UFCG/UAEC

*“Um homem se humilha se castram seu sonho  
Seu sonho é sua vida e vida é trabalho  
E sem o seu trabalho um homem não tem honra  
E sem a sua honra se morre se mata  
Não dá pra ser feliz...”*

Gonzaguinha

## DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação primeiramente a Deus,

Aos meus pais Alcino José e Maria Terezinha Santos (In memorian), por fazerem de mim quem eu sou.

A todos os meus familiares de forma geral na pessoa do meu Tio Zé Enedino e à minha madrinha Demê que nunca deixaram de acreditar em mim

À minha esposa Silvia Maria, por seu amor, paciência, incentivo e dedicação.

Aos meus irmãos Zé Hugo, Zé Wellington, Êda , Yeda , Zé Willami, Marleide, Ilda, Simone, Junior e André, pelos exemplos de vida que me dão todos os dias.

Aos meus filhos Wostinho e Ana Victória pela compreensão com relação à minha ausência

Aos meus orientadores professores Erinaldo e Kennedy pela sua dedicação e paciência.

Aos meus colegas amigos Danilo, Saul, Dona Leda, entre outros pelo apoio e força nas horas mais necessárias.

## AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Erinaldo Hilário Cavalcante pela dedicação e orientação desta pesquisa, pelo incentivo, apoio,  
e paciência em todos os momentos deste trabalho.

Ao Professor Dr. John Kennedy Guedes Rodrigues pelo sempre apoio e paciência em saber esperar e acreditar  
nesta realização.

Aos meus pais e irmãos e à minha esposa Sílvia que na minha ausência foram o pai de meus filhos.

Ao meu irmão Zé Willami “Dedéu” Santos, sem a ajuda do qual, não seria possível a realização dos ensaios e  
deste sonho.

À Universidade Federal de Sergipe, DEC (Dep. Eng Civil), Laboratório de Geotécnica e Pavimentação  
(GEOPAV), pela disponibilização dos equipamentos para realização desta pesquisa

A todos os professores do DEC – UFS na pessoa de sua Chefe, a professora Ângela Costa e à Dona Maria,  
nossa Secretária e amiga, pelo sempre presente incentivo, ajuda e apoio.

Ao Centro de Tecnologia e Recursos Naturais (CTRN) da UFCG.

À Rede Asfalto N/NE e à Rede Temática de Tecnologia em Asfalto (CENPES/PETROBRAS), a partir dos quais  
foi possível se instalar parte da infraestrutura de apoio a esse projeto.

Aos estagiários e futuros colegas Tito e Márcio, pela ajuda de sempre.

À Coordenadoria do Curso de Construção Civil e a todos os professores, colegas bolsistas da IFS Campus  
Lagarto, na pessoa do Prof. David de Paiva pela ajuda, compreensão, incentivo e apoio.

À EMURB (Empresa Municipal de Urbanização) nas pessoas do Eng<sup>o</sup> Antonio José Silva, Santos e o técnico  
José de Jesus Silva pela cessão da emulsão asfáltica e pelas orientações.

À Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, em especial a secretária Josete  
de Sousa e ao Prof. Dr. John Kennedy Guedes Rodrigues.

Ao Departamento de Engenharia de Materiais da UFCG, especialmente o LAM – Lab. de Análise Mineral na  
pessoa do Prof José Avelino pela realização dos ensaios especiais MEV, Difração de raios X e Análise química  
das amostras.

Aos amigos da UFCG: Danilo Medeiros, Saul Guedes, Lêda Lucena, Fábio Cunha, Hermes, e outros que deram  
sua contribuição.

Aos funcionários da área de Geotecnia da UFCG, em especial, a Rui Pereira e Sobreira pelos ensinamentos  
passados de técnico para técnico de laboratório.

Aos funcionários da ATECEL, Mano, Eugeniano, Eliane, Marcos e Lelé e pela sempre prontidão e paciência em  
nos atender e ensinar, ao Prof Lucena pela permissão concedida.

À Dona Severina, minha Mãe em Campina Grande e a toda sua família pela acolhida sempre calorosa.

E a todos que contribuíram de alguma forma para realização deste trabalho.

## LISTA DE FIGURAS

### CAPÍTULO 02

Figura 2.1– Foto de uma gota de emulsão ampliada 1.000 vezes (Fonte: Omena e Antoszczem Junior, 2006, adaptado de Gondim, 2008). .....	18
Figura 2.2 – Esquema básico de produção de emulsão asfáltica catiônica (adaptado de Nascimento, 2005). ....	19
Figura 2.3 – Foto de instalações de uma fábrica de produção de emulsão asfáltica (adaptado de Nascimento, 2005).....	19
Figura 2.4 – Especificação Brasileira de emulsões asfálticas catiônicas (adaptado de Benucci, 2007).....	22
Figura 2.5 – Esquema das reações entre os agregados graníticos e as emulsões asfálticas catiônicas e aniônicas (adaptado de Nascimento, 2005). .....	30
Figura 2.6 – Esquema das reações entre os agregados calcários e as emulsões asfálticas catiônicas e aniônicas (adaptado de Nascimento, 2005).....	31
Figura 2.7 – Resistência à compressão simples em função do tempo de aeração (Carvalho et al., 1992 adaptado de Gondim, 2008). .....	32
Figura 2.8 – Trecho antigo de solo-emulsão na RJ 148 no estado de Rio de Janeiro cerca de 20 anos após construção (THULER , 2005).....	34

### CAPÍTULO 03

Figura 3. 1 – Recipiente de acondicionamento da emulsão. ....	36
Figura 3. 2 – Foto do talude de coleta do solo AMJ.....	39
Figura 3. 3 – Foto do talude de coleta do solo JAB. ....	39
Figura 3. 4 – Foto mostrando aspectos do talude onde foi coletada a amostra do solo FRAL.....	40
Figura 3. 5 – Mapa do Estado de Sergipe com a localização do local de coleta das amostras de solo.....	41
Figura 3. 6 – Detalhes dos sacos plásticos usados para acondicionamento das amostras após coleta. ....	42
Figura 3. 7 – Espalhamento para secagem do solo FRAL para posterior destorroamento. ....	43
Figura 3. 8 –Procedimento inicial de repartição de amostras com repartidor de 2”.....	43
Figura 3. 9 – Amostras representativas do solo (AMJ). ....	44
Figura 3. 10 - Amostras representativas do solo (FRAL).....	44
Figura 3. 11 - Amostras representativas do solo (JAB). ....	44
Figura 3. 12 – Da esquerda para a direita, amostras representativas solos FRAL JAB e AMJ, respectivamente. ....	44
Figura 3. 13 – Etapas de uma dosagem solo-emulsão: aplicação da água de dispersão ao solo com posterior homogeneização. ....	47
Figura 3. 14 – Aplicação da emulsão diluída ao solo.....	48
Figura 3. 15 – Fases de homogeneização manual da mistura. ....	48



Figura 3. 16 – Amostra submetida ao procedimento de aeração e aspecto da diferença de cor conferida ao solo (já úmido) pela emulsão (solo AMJ). .....	49
Figura 3. 17 – Compactador eletromecânico utilizado na compactação e ISC.....	51
Figura 3. 18 – Equipamentos utilizados para realização do ensaio de DR-X (Fernandes, 2007).....	52
Figura 3. 19 – Equipamento utilizado para realização do ensaio de MEV (Quintans, 2008) .....	52
Figura 3. 20 - Acondicionamento dos CPs na câmara úmida para o processo de cura. ....	53
Figura 3. 21 – CPs para ensaios de RCS colocados em submersão antes do rompimento. ....	54
Figura 3. 22 – Prensa de Compressão Simples utilizada no rompimento dos CPs de RCS. ....	55
Figura 3. 23 – Compactador automático Marshall e detalhe do sistema de compactação utilizado na RTI. ....	56
Figura 3. 24 – Detalhe dos CPs submetidos à submersão antes de ensaios de RTI. ....	57
Figura 3. 25 – (a) Prensa automática Marshall utilizada nos ensaios de RTI; (b) CP no pórtico de rompimento; (c) aspecto do CP depois do ensaio. ....	58
Figura 3. 26 – Prensa mecânica manual, utilizada para rompimento de CPs de ISC. ....	59
Figura 3. 27 – Etapas envolvendo a obtenção do teor de umidade dos CPs durante ensaios de ISC.....	60
Figura 3. 28 – Representação das deformações sofridas pela amostra submetida ao ensaio triaxial de carga repetida (adaptado de Bernucci <i>et al.</i> , 2007). ....	61
Figura 3. 29 – Modelo de registro dos deslocamentos verticais dos ensaios triaxiais de carga repetida (Medina e Motta, 2005).....	62
Figura 3. 30 – Cilindro bipartido utilizado na moldagem dos CPs para ensaios de MR. ....	63
Figura 3. 31 – Equipamento usado na determinação do Módulo de Resiliência: (a) Módulo de Ensaio; (b) Módulo de Controle. ....	65
Figura 3. 32 – Acondicionamento do CP na câmara triaxial do SIEMBS.....	65

#### CAPÍTULO 04

Figura 4.1 – Curvas granulométricas dos solos empregados nesta pesquisa.....	69
Figura 4.2 – Composição granulométrica dos solos empregados nesta pesquisa.....	70
Figura 4.3 – Difratoograma de Raios-X obtido para a amostra de solo AMJ.....	73
Figura 4.4 – Difratoograma de Raios-X obtido para a amostra de solo JAB. ....	73
Figura 4.5 – Difratoograma de Raios-X obtido para a amostra de solo FRAL.....	74
Figura 4.6 – Microfotografias obtidas do ensaio de MEV para a amostra de solo AMJ (200x e 5.000x).....	74
Figura 4.7 – Microfotografias obtidas do ensaio de MEV para amostra de solo JAB (200x e 5.000x). ....	75
Figura 4.8 – Microfotografias obtidas do ensaio de MEV para amostras de solo FRAL (200x e 5.000x). ....	75
Figura 4.9 – Curvas de compactação do solo AMJ e suas misturas com emulsão.....	78
Figura 4.10 – Curvas de compactação do solo JAB e suas misturas com emulsão.....	79
Figura 4.11 – Curvas de compactação do solo FRAL e suas misturas com emulsão.....	80
Figura 4.12 – Relação entre os valores da $w_{ot}$ e o teor de emulsão dos solos em análise.....	81
Figura 4.13 – Relação entre os valores de $\gamma_{dmax}$ e o teor de emulsão para os solos em análise.....	82

Figura 4.14 – Resultados dos ensaios de RCS do solo AMJ e suas misturas. ....	84
Figura 4.15 – Valores de RCS obtidos para o solo JAB e misturas.....	86
Figura 4.16 – Valores de RCS obtidos para o solo FRAL e misturas. ....	87
Figura 4.17 – Aspectos de CPs do solo FRAL (amostra de solo puro) desintegrados. ....	88
Figura 4.18 – Aspectos dos CPs desintegrados do solo FRAL com 2% (a) e 4% de emulsão (b).....	89
Figura 4.19 – Correlação entre a RCS e a umidade residual para o solo AMJ (cura 7 dias).....	91
Figura 4.20 – Correlação entre a RCS e a umidade residual para o solo JAB (cura 7 dias). ....	91
Figura 4.21 – Correlação entre a RCS e a umidade residual para o solo FRAL (cura 7 dias).....	92
Figura 4.22 – Valores de RTI para o solo AMJ e suas misturas em função do teor de emulsão. ....	94
Figura 4.23 – Valores de RTI obtidos para o solo JAB e para as suas misturas com emulsão.....	96
Figura 4.24 – Variação dos valores da RTI em função do teor de emulsão adicionada ao solo FRAL. ....	97
Figura 4.25 – Valores de ISC sem e com cura para o solo AMJ e suas misturas. ....	100
Figura 4.26 – Valores obtidos dos ensaios de ISC para o solo JAB e suas misturas.....	102
Figura 4.27 – Valores obtidos dos ensaios de ISC para o solo FRAL e suas misturas. ....	103
Figura 4.28 – Valores da relação Sf/Si obtidos nos ensaios de ISC – solo AMJ e suas misturas. ....	105
Figura 4.29 – Valores da relação Sf/Si obtidos nos ensaios de ISC – solo JAB e suas misturas.....	106
Figura 4.30 – Valores da relação Sf/Si obtidos nos ensaios de ISC – solo FRAL e suas misturas. ....	106
Figura 4.31 – Estrutura do pavimento considerada na análise do MR. ....	110
Figura 4.32 – Valores de MR obtidos para solo AMJ e suas misturas.....	111
Figura 4.33 – Valores de MR obtidos para o solo JAB e suas misturas. ....	113
Figura 4.34 – Valores de MR obtidos para o solo FRAL e suas misturas.....	114
Figura 4.35 – Aspectos dos CPs depois dos ensaios de MR AMJ, JAB e FRAL, pós-ensaio: a) 2%; b) 8%. ...	116
Figura 4.36 – Aspectos dos CPs depois dos ensaios de MR: AMJ, JAB e FRAL, com 2% e 8%. ....	117

## LISTA DE TABELAS

### CAPÍTULO 01

Tabela 1.1 – Dados do Anuário Estatístico 1996 – 2000.....	1
--	---

### CAPÍTULO 02

Tabela 2.1 – Resumo dos requisitos de solos a serem estabilizados com materiais betuminosos (adaptado de Miceli Jr., 2006 e Gondim, 2008). .....	26
Tabela 2.2 – Faixa granulométrica para o solo para estabilização betuminosa (DER-SP, 1991, adaptado de Gondim, 2008). .....	27
Tabela 2.3 – Consumo teórico de materiais para estabilização solo-emulsão (adaptado de ABEDA, 2001). .....	29
Tabela 2.4 – Parâmetros de dosagem de solo-emulsão (Miceli Jr., 2006 e Gondim, 2008). .....	29

### CAPÍTULO 03

Tabela 3.1 – Características da emulsão fornecida pela Petrobrás Distribuidora. ....	37
Tabela 3.2 – Características da emulsão fornecida pela Brasquímica. ....	37
Tabela 3.3 – Coordenadas UTM dos pontos de coleta das amostras dos solos .....	41
Tabela 3.4 – Normas empregadas nos ensaios de caracterização das amostras de solos. ....	50
Tabela 3.5 – Valores das tensões usadas na fase de condicionamento: aplicação de 500 ciclos nos pares de tensões indicados. ....	63
Tabela 3.6 - Níveis de tensões no ensaio propriamente dito para obtenção do MR. ....	64

### CAPÍTULO 04

Tabela 4.1– Composição granulométrica e textural (AASHTO) dos solos usados nesta pesquisa.....	69
Tabela 4.2– Informações da análise granulométrica ; Índices de Consistência e Classificação dos solos. ....	70
Tabela 4.3 – Valores de densidade real obtidos para as amostras dos solos. ....	71
Tabela 4.4 – Resultados das análises químicas dos solos desta pesquisa.....	76
Tabela 4.5 – Valores dos índices $K_i$ e $K_r$ para os solos desta pesquisa.....	76
Tabela 4.6 – Parâmetros de compactação obtidos para o solo AMJ e suas misturas.....	78
Tabela 4.7 – Parâmetros de compactação obtidos para o solo JAB e suas misturas. ....	79
Tabela 4.8 – Parâmetros de Compactação solo FRAL e suas misturas.....	80
Tabela 4.9 – Resultados dos ensaios de RCS realizados com o solo AMJ e suas misturas.....	83
Tabela 4.10 – Resultados dos ensaios de RCS do solo JAB e suas misturas. ....	85
Tabela 4.11 – Resultados dos ensaios de RCS do solo FRAL e suas misturas.....	87
Tabela 4.12 – Resumo de resultados de teores ótimos de emulsão e máximas RCS obtidas.....	90
Tabela 4.13 – Comparativo entre a RCS e a umidade residual (Regressão x Experimental). ....	92
Tabela 4.14 – Resultados de RTI, umidades residuais e absorção do solo AMJ suas misturas.....	93
Tabela 4.15 – Resultados de RTI , das umidades residuais e absorção do solo JAB e suas misturas.....	95

Tabela 4.16 – Valores de RTI, das umidades residuais e da absorção do solo FRAL e suas misturas.....	97
Tabela 4.17 – Valores obtidos para os teores considerados ótimos de emulsão e de máximas RTI.....	98
Tabela 4.18 – Valores máximos de RCS e RTI e relação RCS/RTI obtidas para as misturas.....	99
Tabela 4.19 – Valores de ISC e expansão do solo AMJ e suas misturas.....	100
Tabela 4.20 – Valores de ISC e expansão obtidos para os ensaios de ISC com o solo JAB e suas misturas....	101
Tabela 4.21 – Valores de ISC e expansão obtidos para o solo FRAL e suas misturas.....	103
Tabela 4.22 – Valores de teor ótimo <sup>(*)</sup> de emulsão e máximos de ISC obtidas para misturas asfálticas.....	104
Tabela 4.23 – Parâmetros de resiliência e coeficiente de determinação obtidos dos modelos para os ensaios de MR.....	109
Tabela 4.24 – Valores de MR, das umidades residuais e absorção do solo AMJ e suas misturas.....	111
Tabela 4.25 – Valores de MR, das umidades residuais e absorção do solo JAB e suas misturas.....	112
Tabela 4.26 – Valores de MR, das umidades residuais e absorção do solo FRAL e suas misturas.....	114
Tabela 4.27 – Resumo dos valores de teores ótimos de emulsão e máximos valores do MR.....	115
Tabela 4.28 – Valores máximos de MR e RTI e relação MR/RTI obtidas para as misturas.....	118

## LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABEDA	Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADP	Asfalto Diluído do Petróleo
ASTM	American Society for Testing and Material
ATECEL	Associação Técnico-Científica Ernesto Luiz de Oliveira Junior
BBD	BIRD/BNDES/BID
BID	Banco Interamericano de Desenvolvimento
BIRD	Banco Internacional para Reconstrução e Desenvolvimento
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CL	Argila de baixa compressibilidade
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Coordenação de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da UFRJ
CP	Corpo de prova
CTGÁS	Centro de Tecnologias do Gás
DAER	Departamento Autônomo de Estradas e Rodagem
DER-SP	Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo
DETR/CE	Departamento de Edificações, Rodovias e Transportes do Estado do Ceará
DMT	Distância Média de Transporte
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infra-estrutura e Transporte
DRX	Difração de Raios-X
EA	Emulsão Asfáltica
EMURB	Empresa Municipal de Urbanismo de Aracaju
GEIPOT	Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes
HRB	Highway Research Board
IA	Instituto de Asfalto
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IG	Índice de Grupo
Ip	Índice de Plasticidade
ISC/CBR	Índice de Suporte Califórnia/California Bearing Ratio

$k_1, k_2, k_3$	Coeficientes das equações de módulo resiliente
Ki	Relação Sílica-Alumina
kPa	Quilopascal
Kr	Relação Sílica-Sesquióxidos
LAM/UFMG	Laboratório de Análises Mineraias da Universidade Federal de Campina Grande
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
MCT	Miniatura Compactada Tropical
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
mm	Milímetro
MP	Manual de Pavimentação do DNER
MPa	Megapascal
MR	Módulo de Resiliência
NBR	Norma Brasileira Registrada
NL	Não Líquido
NP	Não Plástico
PEASM	Peso Específico Aparente Seco Máximo
pH	Potencial Hidrogeniônico
$R^2$	Coeficiente de determinação
RCS	Resistência à Compressão Simples
RL	Ruptura Lenta
RL-1C	Emulsão Catiônica de Ruptura Lenta
RM	Ruptura Média
RM-1C	Emulsão Catiônica de Ruptura Média
RM-2C	Emulsão Catiônica de Ruptura Média
RR	Ruptura Rápida
RR-1C	Emulsão Catiônica de Ruptura Rápida
RR-2C	Emulsão Catiônica de Ruptura Rápida
RRL	Road Research Laboratory
RTI/RTCD	Resistência à Tração Indireta/Resistência à Tração por Compressão Diametral
SC	Areia argilosa
$S_f$	Grau de saturação final
$S_i$	Grau de saturação inicial
SM	Areia siltosa
$T_{otem}$	Teor ótimo de emulsão
TRB	Transportation Research Board

TSS	Tratamento Superficial Simples
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
UFRN	Universidade Federal do Rio Grande do Norte
UFS	Universidade Federal de Sergipe
USCS	Unified System Classification of Soils
$W_L$	Limite de Liquidez
$w_{ot}$ (%)	Umidade ótima
$W_P$	Limite de Plasticidade
$\gamma_{dmax}$	Peso Específico Aparente Seco Máximo
$\gamma_g$	Peso Específico dos Grãos do Solo
$\epsilon_p$	Deformação permanente ou plástica
$\epsilon_r$	Deformação resiliente
$\sigma_1$	Tensão principal maior
$\sigma_3$	Tensão principal menor ou tensão de confinamento
$\sigma_d$	Tensão desvio atuante

## RESUMO

Nos estados do Norte e Nordeste do Brasil já existe uma grande escassez de materiais de qualidade adequada para a construção de pavimentos rodoviários, principalmente no que se refere aos solos que se enquadrem nas especificações rodoviárias tradicionais para a execução de camadas de base e sub-base, o que encarece, e, às vezes inviabiliza a execução de obras desse tipo, fundamentais como vias de transporte terrestre. Dessa forma, a procura por soluções tecnológicas que minimizem custos construtivos de obras rodoviárias, principalmente as rodovias de baixo volume de tráfego, muito importantes para o escoamento da produção agrícola desde a sua origem até às grandes cidades, é fundamental para promover o desenvolvimento regional e facilitar o transporte de produtos e pessoas, com rapidez, conforto e segurança. O uso de emulsão asfáltica como agente aglutinante, modificador das propriedades dos solos, pode se constituir numa solução tecnicamente viável para tornar alguns solos, descartados do processo, aptos a serem usados em pavimentos. Nesta pesquisa se analisou a viabilidade técnica da estabilização solo-emulsão aplicada a alguns solos comuns na região, um arenoso, um argiloso e um intermediário. Os três solos selecionados são tipicamente encontrados no Estado de Sergipe, os quais foram submetidos à mistura com uma emulsão asfáltica do tipo RL-1C, em percentuais do ligante que variaram entre 2% e 8%. Após as condições de cura estabelecidas, as propriedades dos solos puros e das misturas de solo-emulsão foram avaliadas e comparadas a partir dos ensaios de Índice de Suporte Califórnia, Resistência à Compressão Simples, Resistência à Tração por Compressão Diametral e Módulo de Resiliência. Os resultados indicaram que a emulsão asfáltica promoveu melhorias nas propriedades dos solos escolhidos, entretanto, verificou-se que o teor de emulsão para estabilizar um solo depende do tipo de solo e das condições de cura das misturas. Concluiu-se que a quantidade de emulsão satisfatória para estabilizar o solo arenoso situou-se entre 4% e 6%, maior do que os percentuais que promoveram a estabilização dos solos argilosos, neste caso, entre 2% e 4%.

Palavras chaves: Emulsão Asfáltica, solo-emulsão, estabilização de solos.



## ABSTRACT

In the States of North and Northeast from Brazil, already exist a great scarcity of materials of the good quality for the construction road pavements, mainly in the respect to soils in accordance with to road traditions specifications for layers of base and under base, wich raise the costs and sometimes make economically unfeasible the execution of works this type, fundamentals like terrestrial transportation. This way, the search for technologic solutions that reduce the constructive costs of road works, principally those with low traffic volume, it's very important for flowing of the agricultural products, from origin to the big cities, is fundamental for to promote the regional developing and to facilitate the transportation of products and peoples with comfort and security. The use of asphalt emulsion as agglutinant and modifier agent of soils properties, can be a technical solution for it became same soils, out of process, able to be used in pavements. In this work, was to evaluate the technical viability of the soil stabilization with asphalt emulsion applied in some common soils in region, one sandy , one clayey and one intermediate. The three selected soils, wich are typically founded in the area at Sergipe State, was submitted to mixtures with asphalt emulsion of type RL-1C, in rates of emulsion between 2% and 8%. After the curing condition established, the pure soils and mixtures soil-emulsion properties were evaluated and compared through the Unconfined Compression Test, Tensile Strength by Diametral Compression, California Bearing Ratio and the Resilient Modulus Test. The results indicate that the asphalt emulsion promoted improvements in properties of soils, however it was found that the rate of emulsion for to stabilize soils is dependent of soil type and of the cure conditions mixtures. Finally, the satisfactory quantities emulsion for to stabilize the sandy soil was situated between 4% and 6%, larger than rates emulsion wich promoted to stabilization of the clayey soils, in this case, between 2% and 4%.

Key Words: Asphalt Emulsion, soil-emulsion, soils stabilization.

## S U M Á R I O

CAPÍTULO 01 .....	1
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. Considerações Iniciais – Justificativa da Pesquisa .....	1
1.2. Objetivos.....	4
1.2.1 - Geral .....	4
1.2.2 - Específicos.....	4
1.3. Organização do Trabalho .....	4
 CAPÍTULO 02 .....	 6
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1. Considerações Iniciais.....	6
2.1.1. Estabilização Mecânica.....	8
2.1.2. Estabilização Granulométrica.....	9
2.1.3. Estabilização Química.....	10
2.1.3.1. Estabilização Solo-Cimento.....	10
2.1.3.2. Estabilização Solo-Cal.....	12
2.1.3.3. Estabilização Química com Material Alternativo.....	14
2.1.3.4. Estabilização Solo-Betume (Asfalto) .....	16
2.1.3.5. Estabilização Solo-Emulsão .....	17
2.1.4. Métodos Elétricos e Térmicos .....	17
2.2. A Emulsão Asfáltica.....	17
2.2.1. Tipos de Emulsões.....	19
2.2.2. Ruptura das Emulsões Asfálticas.....	20
2.2.3. Nomenclatura das EA .....	21
2.2.4. Mecanismos da Estabilização do Solo com Emulsão .....	23
2.2.5. Fatores Intervenientes na Estabilização Solo-emulsão.....	25
2.2.5.1. Tipo de Solo .....	25
2.2.5.2. Teor de Água.....	27
2.2.5.3. Quantidade e Tipo de Emulsão Asfáltica.....	28
2.2.5.4. Tempo de Aeração .....	31
2.2.5.5. Cura da Mistura Solo Emulsão.....	32

2.3.	Aplicação da Técnica Solo-Emulsão .....	33
2.4.	Considerações Finais .....	35
CAPÍTULO 03.....		36
3.	MATERIAIS E MÉTODOS .....	36
3.1.	Materiais .....	36
3.1.1.	Emulsão Asfáltica .....	36
3.1.2.	Caracterização das Emulsões .....	37
3.1.3.	Solos.....	38
3.2.	Métodos.....	42
3.2.1.	Atividades de Coleta .....	42
3.2.2.	Preparação das Amostras.....	42
3.2.3.	Procedimentos Adotados na Preparação das Misturas Solo-Emulsão.....	45
3.2.3.1.	Determinação das Quantidades de Materiais para a Mistura.....	45
3.2.4.	Ensaio Realizados.....	49
3.2.4.1.	Ensaio de Caracterização.....	50
3.2.4.2.	Ensaio de Compactação .....	50
3.2.4.3.	Ensaio de Análise Química, Difração de Raios X (DR-X) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) .....	51
3.2.4.4.	Ensaio de Resistência à Compressão Simples (RCS) .....	52
3.2.4.5.	Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTI) .....	55
3.2.4.6.	Ensaio de ISC.....	58
3.2.4.7.	Ensaio Triaxial de Carga Repetida.....	60
3.2.4.7.1.	Módulo de Resiliência – MR .....	60
3.2.4.7.2.	Metodologia utilizada nos ensaios de MR .....	62
3.2.4.7.3.	Interpretação dos dados dos ensaios triaxiais de carga repetida.....	66
3.2.4.7.4.	Modelo para análise do Módulo de Resiliência (MR) .....	66
CAPÍTULO 04.....		68
4.	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	68
4.1.	Introdução.....	68
4.2.	Caracterização dos Solos .....	68
4.2.1.	Caracterização Geotécnica.....	68
4.2.2.	Caracterização Química.....	72

4.2.2.1.	Difração de Raios-X .....	72
4.2.2.2.	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) .....	74
4.2.2.3.	Análises Química Analítica e Quantitativa.....	75
4.3.	Análise do Comportamento Mecânico das Misturas.....	77
4.3.1.	Ensaio de Compactação .....	77
4.3.1.1.	Solo AMJ .....	77
4.3.1.2.	Solo JAB.....	79
4.3.1.3.	Solo FRAL .....	80
4.3.1.4.	Efeitos da Estabilização Solo-emulsão no Ensaio de Compactação.....	81
4.3.2.	Ensaio de Resistência à Compressão Simples (RCS).....	82
4.3.2.1.	Solo AMJ .....	83
4.3.2.2.	Solo JAB.....	85
4.3.2.3.	Solo FRAL .....	86
4.3.2.4.	Análise conjunta dos três solos – teor ótimo de emulsão versus RCS.....	89
4.3.2.5.	Relação da umidade residual com a RCS.....	90
4.3.3.	Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTI).....	93
4.3.3.1.	Solo AMJ – RTI .....	93
4.3.3.2.	Solo JAB – RTI .....	95
4.3.3.3.	Solo FRAL - RTI .....	96
4.3.3.4.	Resumo dos Resultados Teor de Emulsão x RTI.....	98
4.3.4.	Ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC).....	99
4.3.4.1.	Solo AMJ – ISC .....	100
4.3.4.2.	Solo JAB - ISC.....	101
4.3.4.3.	Solo FRAL - ISC .....	102
4.3.4.4.	Resumo das Análises dos Efeitos da Emulsão sobre o ISC .....	104
4.3.5.	Ensaio Triaxiais de Carga Repetida.....	107
4.3.5.1.	Escolha do Nível de Tensões para Análise de Resultados de MR.....	110
4.3.5.2.	Módulo de Resiliência – Solo AMJ .....	110
4.3.5.3.	Módulo de Resiliência – Solo JAB.....	112
4.3.5.4.	Módulo de Resiliência – Solo FRAL .....	113
4.3.5.5.	Resumo dos Resultados do MR.....	115
CAPÍTULO 05.....		119
5.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	119
5.1.	CONCLUSÕES.....	119
5.1.1.	Ensaio de Compactação .....	119

5.1.2.	Ensaio de RCS.....	119
5.1.3.	Ensaio de RTI .....	120
5.1.4.	Ensaio de ISC .....	120
5.1.5.	Ensaio de MR.....	121
5.1.6.	Considerações Finais.....	122
5.2.	SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS .....	122
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	123
	ANEXO A.....	133

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. Considerações Iniciais – Justificativa da Pesquisa

A Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes (GEIPOT), em seu anuário estatístico 1996-2000 mostrava a situação das rodovias no Brasil, cujos dados estão reproduzidos na Tabela 1.1.

Tabela 1.1 – Dados do Anuário Estatístico 1996 – 2000.

Categoria	Brasil (Km)	BR/BR (%)	NE (Km)	NE/BR (%)	NE/NE (%)	SE (Km)	SE/BR (%)	SE/NE (%)	SE/SE (%)
Total de Rodovias	1.724.929	100,00	405.390	23,50	100,00	9.411	0,55	2,32	100,00
Rodovias não pavimentadas	1.559.941	90,44	360.158	20,88	88,84	7.562	0,44	1,87	80,35
Rodovias pavimentadas	164.988	9,56	45.232	2,62	11,16	1.849	0,11	0,46	19,65
Rodovias pavimentadas federais	56.097	3,25	17.734	1,03	4,37	319	0,02	0,08	3,39
Rodovias pavimentadas estaduais	75.974	4,40	22.908	1,33	5,65	1.530	0,09	0,38	16,26
Rodovias pavimentadas municipais	6.993	0,99	1.129	0,07	0,28	-	0,00	0,00	0,00

Fonte: DNER apud GEIPOT(<<http://www.geipot.gov.br/NovaWeb/IndexAnuario.htm>>. Acesso em: 24 maio 2009.)

Os estados do Nordeste possuíam à época, como se pode constatar nos dados da Tabela 1.1, cerca de 90% de sua malha viária constituída por rodovias não pavimentadas, sendo a maioria destas, classificadas como de baixo volume de tráfego. Das rodovias pavimentadas, apenas 0,28% pertencem à rede municipal. Essas rodovias desempenham um papel fundamental no escoamento da produção agrícola (a maioria dos produtos agrícolas da região NE é transportada por estradas vicinais não pavimentadas), na redução de custos operacionais de veículos e na expansão dos serviços públicos das microrregiões por elas atravessadas. Apesar de sua importância, na maioria dos casos, essas rodovias não recebem a atenção devida pelos gestores públicos. A possibilidade da melhoria das mesmas esbarra nos custos elevados de construção dentro dos padrões convencionais. Os custos são maximizados geralmente por causa da escassez de materiais naturais que atendam às propriedades normalmente presentes nas especificações rodoviárias vigentes, para utilização em camadas de base e sub-base de pavimentos. Essa escassez de materiais naturais adequados é atualmente fato comprovado em alguns locais do Brasil, a exemplo do Estado de Sergipe, onde os órgãos rodoviários e as

empresas do setor já se deparam com a falta de materiais naturais de boa qualidade para a construção de pavimentos rodoviários, principalmente para a execução de camadas de base. Isto ocorre tanto pelo nível de exaustão atingido pelas jazidas, quanto pelas limitações impostas pelos órgãos ambientais, que impedem ou dificultam a exploração de jazidas em potencial (COSTA, 2006).

Ao se analisar a situação das estradas, no Estado de Sergipe, com base nos dados mostrados na Tabela 1.1, observa-se que a situação de rodovias não pavimentadas neste Estado está abaixo da média do Brasil e do NE. Percebe-se ainda que a situação das rodovias federais pavimentadas está acima da média nacional, e as rodovias estaduais pavimentadas se encontram em condições melhores que a média do NE. No entanto, quando se focaliza a análise nas estradas municipais, verifica-se que a situação é preocupante. Na Tabela 1.1, observa-se que é nulo o percentual de estradas municipais pavimentadas, lembrando que a maioria destas estradas municipais são vicinais. Costa (2006) cita a ocorrência desde o ano 2000 da pavimentação de alguns poucos trechos de estradas vicinais realizadas com paralelepípedos na região da grande Aracaju.

Visando minimizar os custos referentes às rodovias, principalmente de baixo volume de tráfego, é necessário que técnicos e pesquisadores recorram à pesquisa de novas soluções tecnológicas para ampliar e melhorar a qualidade da malha rodoviária não pavimentada brasileira (COSTA, 2006), contribuindo com a melhoria das condições de vida da população nas áreas mais isoladas do país. A construção de pavimentos e/ou reabilitação da malha viária municipal urbana e rural, além de proporcionar benefícios diretos aos usuários, com a melhora dos níveis de conforto e segurança e redução dos custos operacionais dos veículos, incrementa o progresso socioeconômico da região, repercutindo positivamente na qualidade de vida, estruturação espacial das comunidades, disponibilidade de transporte coletivo, etc. (ABEDA, 2001).

O estudo das potencialidades dos solos naturais com adição de outros materiais convencionais ou alternativos (betume, cal, cimento, entulho de construção civil, etc...), pode viabilizar técnica e economicamente o seu emprego em obras rodoviárias, através da melhoria de suas propriedades mecânicas e hidráulicas (SHERWOOD, 1961; LIMA, 1981; BUENO E LIMA, 1991; FERNANDES, 2000). Isto é capaz de propiciar grandes benefícios diretos no projeto, execução e gerenciamento das rodovias, melhorando a qualidade de vida da população.

Na área metropolitana de Aracaju e em quase todo o Estado de Sergipe, o panorama da construção de rodovias, principalmente de baixo volume de tráfego sejam pavimentadas ou não, é preocupante. A quase totalidade das jazidas outrora existentes, está atualmente em situação de extinção ou exauridas de solos naturais que atendam as especificações para camadas de base e sub-base. Como se não bastasse, a quantidade de jazidas de solos existentes em Sergipe se resume a praticamente uma (01) atualmente, segundo técnicos da Empresa Municipal de Urbanização (EMURB), e está situada a uma distância relativamente grande (90 km) dos principais

escoadouras da produção, o que aumenta o custo de transporte, encarecendo a construção e/ou a melhoria das rodovias estaduais/municipais de baixo volume de tráfego. Por outro lado, é de conhecimento do meio técnico, que o território sergipano é coberto por diversas jazidas de solos tropicais, algumas delas possivelmente de solos lateríticos (COSTA, 2006).

Atualmente a solução mais comumente adotada em Sergipe para suprir a escassez do solo natural de boa qualidade é a estabilização granulométrica através de solo-brita ou solo cimento ou ainda uma junção dos dois métodos.

Uma das alternativas para minimização dos custos anteriormente referidos, é a tentativa de estabilização dos solos localmente abundantes com a adição de produtos químicos, a exemplo de emulsão asfáltica, cal, sais minerais, materiais à base de enzimas ou com materiais não convencionais, tais como os resíduos ambientais (INGLES & METCALF, 1972). Em Sergipe, a experiência de estabilização de solos por adição de produtos químicos é praticamente inexistente. Uma tentativa recentemente feita foi adicionar resíduos de cerâmica vermelha a um solo local. Os resultados mostraram que o ganho de resistência, em termos de ISC (Índice de Suporte Califórnia), foi expressivo (CAVALCANTE et al., 2006).

A possibilidade de uso de solos tropicais locais, que não se enquadram nas metodologias tradicionais de projeto e execução de pavimentos, é parte da solução pensada para o problema da carência de materiais. Entre esses solos, os lateríticos são considerados como de boa potencialidade, quando analisados à luz da metodologia MCT - Miniatura, Compactada Tropical (NOGAMI e VILLIBOR, 1981; 1985; 1998) e/ou da Mecânica dos Pavimentos (MEDINA e MOTTA, 2005). Estudos realizados recentemente por COSTA (2006) indicaram que alguns solos tropicais presentes na faixa costeira de Sergipe têm potencialidade para uso em base e sub-base de pavimentos rodoviários, desde que usados adequadamente.

É em parte desses solos que está focada a presente pesquisa, pois conforme já comentado, no Estado de Sergipe, principalmente nas proximidades da grande Aracaju, é premente a necessidade de pavimentar e/ou reabilitar as estradas vicinais. Todavia, os solos existentes em jazidas próximas geralmente não satisfazem às exigências das normas específicas. Alternativas para a viabilização do uso desses solos devem ser encontradas a partir do desenvolvimento de pesquisas sobre esses materiais. Foi este contexto que motivou a realização da presente pesquisa, buscando uma solução para determinados solos locais, a partir da estabilização destes com emulsão asfáltica. Esta pesquisa também está inserida em um dos Projetos Cooperativos da Rede Asfalto N/NE (PC-03), que trata da avaliação do uso de ligantes betuminosos e rejeitos ambientais para estabilização de bases e sub-bases de pavimentos asfálticos, bem como com o Projeto Rede Temática de Tecnologia em Asfalto (CENPES/PETROBRAS). Estes dois projetos possibilitaram a instalação da infra-estrutura necessária para se atingir os objetivos estabelecidos, a seguir mencionados.



## **1.2. Objetivos**

### 1.2.1. Geral

Avaliar a viabilidade técnica da utilização de emulsão asfáltica catiônica para a estabilização de alguns solos existentes em abundância no Estado de Sergipe.

### 1.2.2. Específicos

- a) Selecionar jazidas de solos locais com potencial para estabilização betuminosa;
- b) Coletar amostras de solos, caracterizá-los e classificá-los geotecnicamente. Selecionar um tipo de emulsão para ser usada como material estabilizante;
- c) Preparar misturas de solo-emulsão, com teores de emulsão 2%, 4%, 6% e 8%;
- d) Analisar possíveis alterações no comportamento mecânico dessas misturas à luz dos resultados dos ensaios de Compactação, ISC (Índice de Suporte Califórnia), RCS (Resistência à Compressão Simples), RTI (Resistência à Tração Indireta) e MR (Módulo de Resiliência);
- d) Avaliar para cada mistura, com base nos diversos ensaios, sob as condições de cura estudadas, o teor de emulsão que proporcionou os melhores resultados.

## **1.3. Organização do Trabalho**

Esta dissertação foi elaborada em volume único, em cinco (05) capítulos, distribuídos da seguinte forma:

Capítulo 01: Introdução – contém a motivação do tema, a justificativa, os objetivos a serem alcançados e a forma da organização do trabalho.

Capítulo 02: Revisão Bibliográfica – é feita uma revisão da literatura que trata dos métodos de estabilização e das principais técnicas empregadas. São ainda abordados os conceitos relacionados às emulsões asfálticas, bem como das peculiaridades relacionadas ao uso da técnica de estabilização solo-emulsão.

Capítulo 03: Materiais e Métodos – são relatados aspectos considerados importantes acerca dos procedimentos dos ensaios executados e a metodologia estabelecida para o desenvolvimento da presente pesquisa.

Capítulo 04: Apresentação e Discussão dos Resultados – são apresentados e discutidos os resultados obtidos durante a fase experimental, tendo como referência a literatura consultada.

Capítulo 05: Conclusões e Sugestões – constam as principais conclusões e são propostas sugestões para futuras pesquisas abordando o tema.

Além dos capítulos mencionados, na seqüência são apresentadas as Referências Bibliográficas e os Anexos.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Considerações Iniciais

O principal propósito deste capítulo é apresentar conceitos relativos à estabilização de solos e abordar as principais técnicas disponíveis na literatura.

Em muitos casos, a Engenharia se defronta com problemas relativos ao uso de solos (fundações, estruturas, pavimentos) nos quais se pode contornar a situação através da mudança de local da obra. Com o aumento da demanda populacional, nos dias de hoje essa alternativa dificilmente pode ser adotada, cabendo à Engenharia encontrar possíveis soluções do problema. Uma alternativa racional é se projetar usando-se o material disponível (problemático), o que significa a convivência com o problema (MEDINA, 1987 ). Esse caminho às vezes pode se tornar inviável devido a outros problemas a serem enfrentados, tais como elevação dos custos e/ou dificuldade operacional para se colocar em prática a solução pretendida. No caso de solos para finalidades rodoviárias, o problema se agrava em virtude da escassez de solos locais com as propriedades exigidas pelas especificações em vigor, além de, em muitos casos, somar-se a isto exigências ambientais restritivas e/ou punitivas.

A busca por solos adequados às especificações para uma determinada aplicação em locais relativamente distantes, torna muitas vezes o empreendimento oneroso ou inviável, devido à distância média de transporte (DMT). Assim, entre outras alternativas para solução do problema, pode-se citar a remoção do solo, com posterior substituição por outro de melhor qualidade, ou sua estabilização para o fim a que se destina, cabendo a esta última prover o solo problemático das propriedades requeridas para a obra em vista.

De acordo com Cristelo (2001), o melhoramento de solos constitui provavelmente a técnica mais antiga existente no meio rodoviário. Há mais de 3.000 anos, o melhoramento de solos já era utilizado na construção de templos da antiga Babilônia. Neste período, os chineses usavam madeira, bambu ou palha para reforço de solo. O ideograma chinês para o termo “Engenharia Civil” significa solo e madeira. O autor cita ainda que a estabilização de solos na construção de pavimentos rodoviários, remonta ao tempo das civilizações Mesopotâmica e Romana, enquanto que as técnicas contemporâneas de estabilização de solos foram iniciadas nos Estados Unidos, em 1906.

Van Impe (1989) apud Specht (2005) classifica os processos de estabilização da seguinte forma:

- Temporários - limitados a um curto espaço de tempo, geralmente à duração da obra, como por exemplo, o rebaixamento de um lençol freático, o congelamento de solos e a eletro-osmose;
- Permanentes, sem adição – são os processos de compactação e o tratamento térmico. Como exemplo, são citadas a compactação superficial mecânica e a compactação com uso de explosivos;
- Permanentes com adição de novos materiais – esse processo normalmente combina a compactação com a adição de um novo material, citando-se como exemplos a estabilização com cal e cimento, injeções de materiais estabilizantes, colunas de brita, pré-carregamento e uso de drenos verticais, reforços com tiras metálicas ou geossintéticos. São procedimentos empregados no melhoramento de solos arenosos fofos e argilas moles.

CRISTELO (2001) relata que os métodos de estabilização de solos são frequentemente classificados em três grupos: métodos de **estabilização mecânica**, nos quais se procura melhorar as características do solo através de uma melhor “arrumação” das suas partículas constituintes e/ou recorrendo a correções da sua composição granulométrica; métodos de **estabilização física**, nos quais se alteram as propriedades do solo através da ação do calor, da electricidade, etc.; e, métodos de **estabilização química**, que modificam permanentemente as propriedades do solo por meio de aditivos químicos.

Com relação às definições para estabilização de solos, Baptista (1976) apud Ferreira (1980) define a estabilização de solos como sendo o processo de natureza física, química ou físico-química que permite conferir propriedades desejáveis aos solos, fazendo que tais propriedades permaneçam estáveis sob a ação de cargas externas e agentes climáticos. Vogt (1971) conceitua estabilização de solos como sendo todo método que visa aumentar de maneira durável, durante todas as estações do ano, a resistência de um material aos esforços desenvolvidos pelo tráfego e aos efeitos destruidores exercidos pelas intempéries. De acordo com Vargas (1977), a estabilização é um processo que confere ao solo uma maior resistência às cargas ou à erosão, por meio de compactação, da correção da granulometria ou da sua plasticidade, ou da adição de substâncias que lhe conferem uma coesão proveniente da cimentação ou da aglutinação de suas partículas.

Segundo Marques (2004), o conceito de estabilização de solos para rodovias e aeroportos envolve conferir ao solo a capacidade de resistir e suportar as cargas e os esforços induzidos pelo tráfego, normalmente aplicados sobre o pavimento, bem como às ações erosivas desencadeadas por agentes naturais, sob as condições mais adversas de solicitação consideradas no projeto. Ainda segundo o autor, a estabilização de solos visa melhorar suas características de resistência mecânica e, ao mesmo tempo, garantir a constância destas melhorias no tempo de vida útil das obras de engenharia.

Com base no que apresenta a literatura, brevemente relatado em parágrafos anteriores, percebe-se que há uma considerável diversidade de métodos de estabilização disponíveis no meio técnico, destacando-se entre eles a

Estabilização Mecânica (Compactação), Estabilização Granulométrica (mistura de materiais de mesma categoria), Estabilização Química (mistura de materiais de categorias diferentes), Estabilização Elétrica e Estabilização Térmica. Além destes, métodos especiais de estabilização também podem ser citados tais como: Solos Reforçados com Geossintéticos; Solo pregado; Colunas Solo-Cal; Colunas Solo-Brita; Compactação Dinâmica; Jet Grouting; Compaction Grouting; Drenos Verticais de Areia; Micro Estacas; Estabilização Via Fenômenos de Condução em Solos (MARQUES, 2004).

No meio rodoviário, os processos de estabilização de solos mais empregados são estabilização mecânica, granulométrica e química, este último mais recente (CRISTELO, 2001).

### **Estabilização Mecânica**

Neste tipo de estabilização, pressupõe-se que a redução de volume de vazios está relacionada ao ganho de resistência mecânica. (SANTOS *et al.*, 1995). O processo visa dar ao solo (ou mistura de solos) uma condição de densificação máxima, que estará relacionada a uma determinada energia de compactação, um peso específico seco máximo ( $\gamma_{dmax}$ ) e a uma umidade ótima ( $w_{ot}$ ). É um método de uso comum mas, obrigatório na execução de quase todas as camadas do pavimento, sendo complementar a outros métodos de estabilização. A compactação mecânica tende a melhorar as propriedades do material, através da compressão do mesmo, por meio de uma determinada energia mecânica. Dentre os principais benefícios, em termos de propriedades geotécnicas adquiridos através desse processo, podem ser citados o aumento da densidade, da resistência ao cisalhamento e da capacidade de suporte, retratadas através do ISC (Índice de Suporte Califórnia). A compactação também reduz o índice de vazios, a contração e a compressibilidade dos solos.

Segundo Hilf (1975), apud Spetch e Wallau (2005), compactação é um processo através do qual uma massa de solo (constituída de partículas sólidas, ar e água) é reduzida em volume pela aplicação de cargas, resultantes de ações de rolamento, socamento ou vibração. O método envolve a expulsão de ar do sistema sem significativas mudanças na quantidade de água presente na massa de solo. Portanto, o teor de umidade do solo é o mesmo para um solo no estado fofo e, após a compactação, no estado compacto. Esse processo pode ser empregado em laboratório e em campo, de forma manual ou mecânica. Em laboratório, usam-se os soquetes compactadores Proctor seja manual ou eletromecânico, enquanto em campo são usados os rolos compactadores de diversos tipos vibratórios ou não. Em locais de acesso restrito como valas de reaterro ou cabeceiras de pontes podem ser utilizadas a compactação manual, pequenos rolos compactadores e compactadores mecânicos de pequeno porte, conhecidos como "sapinhos". Em todos os casos é fundamental manter a compatibilidade entre a energia de compactação que será empregada em campo com aquela usada em laboratório, de acordo com os objetivos do projeto.

## Estabilização Granulométrica

Nesse tipo de estabilização, o objetivo é obter através da mistura de dois ou mais materiais (solo-solo, solo-areia solo-brita, etc) um outro material que atenda às especificações vigentes, no que concerne à granulometria do material. Exemplos dessas exigências podem ser encontrados em DNER-ES 301 (1997) e DNER-ES 303 (1997), respectivamente, com relação a materiais de sub-bases e de bases estabilizadas granulometricamente, destinadas à pavimentação. São adotadas nessas especificações faixas granulométricas, nas quais deverá se enquadrar a curva granulométrica do solo a ser utilizado, que direta ou indiretamente está relacionada aos índices físicos dos solos ( $IG = \text{Índice de Grupo}$ ,  $W_L = \text{Limite de Liquidez}$  e  $W_P = \text{Limite de Plasticidade}$ ) e aos demais aspectos da fração fina do solo considerada normalmente o material passado na peneira de 0,42 mm, que tem sua plasticidade limitada. Caputo (1983) denomina este procedimento de “correção granulométrica” e enumera alguns processos geralmente usados:

- Processo algébrico: trata-se da construção de um sistema de equações com as porcentagens do agregado grosso, (grãos  $> 2$  mm), agregado fino ( $0,074$  mm  $<$  grãos  $< 2$  mm) e material ligante (grãos  $< 0,074$  mm) de diferentes materiais e as porcentagens desejadas para o material (mistura) requerido pela especificação adotada. A resolução do sistema de equações determina as proporções dos materiais componentes para obtenção da mistura;
- Processo do triângulo: a partir dos materiais (agregado grosso, agregado fino e ligante), marcam-se os pontos representativos dos solos a misturar num triângulo equilátero assim como o ponto correspondente ao material que se deseja obter. Unem-se os pontos dos materiais disponíveis e obtêm-se as proporções a serem adotadas;
- Construção gráfica de Rothfuchs: baseia-se na hipótese de que a curva granulométrica desejada é representada pela diagonal de um retângulo em que um dos lados é graduado em porcentagem, de 0 a 100 numa escala linear. A partir desta escala e da diagonal, define-se a escala horizontal, relativa aos diâmetros e que é uma escala proporcional. Sobre este diagrama traçam-se as curvas granulométricas dos materiais substituindo-as, em seguida, por segmentos de retas tais que as áreas por eles compreendidas com as curvas primitivas, sejam compensadas e mínimas em valor absoluto. As extremidades opostas destes segmentos são ligadas, duas a duas, por segmentos, os quais interceptam a curva granulométrica representada pela diagonal em pontos que, finalmente, determinarão as proporções de cada material na mistura desejada.

Observe-se que os processos citados por Caputo (1983) podem não alcançar num primeiro momento os resultados esperados, necessitando sempre de constatação experimental a partir da mistura teórica obtida, através dos ensaios de granulometria e índices requeridos pela especificação. É importante ressaltar que, mesmo usando-se o procedimento experimental, um número máximo de três materiais é o mais comumente empregado para a composição de misturas. O ideal, segundo Specht e Wallau (2005), é que se atinja a

granulometria desejada utilizando-se apenas dois tipos de materiais. Mais que três tipos de materiais no processo de estabilização granulométrica podem resultar em condições pouco econômicas.

### **Estabilização Química**

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

Num passado recente, Aflitos e Ferreira (1986) já chamavam a atenção para o uso da estabilização química como solução de problemas gerados com a rejeição pouco justificada de grandes volumes de materiais, bem como pelo encarecimento de custos de obras devido a distâncias elevadas de transporte em busca de materiais que, muitas vezes, resultavam em não conferir à obra a estabilidade necessária. Os autores citam ainda que a tecnologia da estabilização química, quando devidamente estudada, testada e difundida eliminaria o receio dos órgãos gerenciadores e dos construtores dos empreendimentos com obras de terra, com relação ao uso corrente dessa técnica. Atualmente, os principais aditivos químicos utilizados para estabilização de solos, são o cimento Portland, a cal, os materiais betuminosos, com ênfase nas emulsões asfálticas e as resinas.

Segundo Marques (2004), quando utilizada para solos granulares, a estabilização química promove principalmente a melhoria da resistência ao cisalhamento, devido ao atrito produzido pelos contatos das superfícies das partículas, por meio de adição de pequenas quantidades de ligantes nos pontos de contato dos grãos. Nos solos argilosos (coesivos) se encontram as estruturas floculadas e dispersas, que são mais sensíveis à presença de água, que também influenciam fortemente na resistência ao cisalhamento. É comum a adição de agentes químicos que provoquem a dispersão ou floculação das partículas ou uma substituição prévia de cátions inorgânicos por cátions orgânicos hidrorrepelentes, seguida de uma adição de cimentos. Nos itens seguintes serão apresentadas as principais variantes de estabilização química disponíveis na literatura.

#### **2.1.3.1. Estabilização Solo-Cimento**

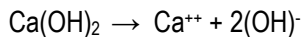
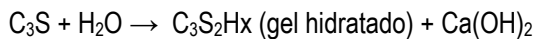
Esse é, provavelmente, o processo de estabilização química de maior uso no Brasil. A utilização de solo-cimento tem diversas aplicações, tais como na pavimentação de ruas e estradas, passeios para pedestres, pisos de quadras esportivas, revestimento de barragens, silo-trincheira, terreiros de café, obras de contenção, canalização e proteção de pontes, habitação (tijolos, blocos, lajotas, paredes monolíticas, fundações e pisos) dentre outras. Para se ter uma idéia deste fato, a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) já citava, em 1958, o uso do solo-cimento para fins rodoviários e aeroportuários, em mais de 1.000 km de rodovias pavimentadas no país, com base de solo-cimento (ABCP, 1958). Pelo que se sabe, a primeira tentativa do emprego de solos com cimento Portland se deu em Salisbury Plain, nos Estados Unidos, em 1916, com o

objetivo de possibilitar o tráfego de veículos de rodas não pneumáticas durante o inverno. No Brasil, os primeiros registros de interesse pela técnica, datam dos anos de 1940 e 1941, com a construção de vários trechos experimentais, dentre os quais a antiga pista de rolamento do Aeroporto Santos Dumont no Rio de Janeiro (ABCP, 1958).

Ainda segundo a ABCP (1958), o solo cimento é o material resultante da mistura homogênea, compactada e curada de solo, cimento e água em proporções adequadas. O produto resultante deste processo é um material com boa resistência à compressão, bom índice de impermeabilidade, baixo índice de retração volumétrica e boa durabilidade.

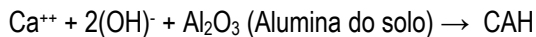
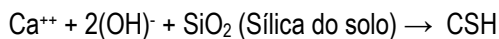
Marques (2004) descreve que o processo de estabilização do solo com o cimento ocorre a partir do desenvolvimento das reações químicas que são geradas na hidratação do cimento (mistura do cimento com água). A partir daí, desenvolvem-se vínculos químicos entre as superfícies dos grãos do cimento e as partículas de solo que estão em contato com o mesmo. Sendo assim, durante o processo de estabilização do solo com cimento, ocorrem dois tipos de reações: i) as reações de hidratação do cimento Portland; e ii) as reações entre os argilominerais e a cal liberada na hidratação do cimento ( $C_3S$ ,  $\beta$ - $C_2S$ ,  $C_3A$ ,  $C_4AF$  +  $H_2O$ ). Estas reações podem ser apresentadas da seguinte forma (MARQUES, 2004):

i) Reações de hidratação do cimento



Se o pH (potencial hidrogeniônico) da mistura diminuir:  $C_3S_2H_x \rightarrow CSH + Cal$

ii) Reações entre a cal gerada na hidratação e os argilominerais do solo:



As duas últimas reações são chamadas pozolânicas e ocorrem sob velocidade mais lenta. O CSH é um composto cimentante semelhante ao  $C_3S_2H_x$ .

PORTO (1958) referindo-se à construção de bases de solo cimento, aponta como finalidades de estabilizar um solo com cimento, aglutinar os grãos de solos arenosos proporcionando maior coesão por meio de seu efeito ligante, diminuir a plasticidade dos solos argilosos por intermédio da cal livre que contém, evitando as variações de volume, e, em ambos os casos, proporcionar maior rigidez à base com eles construídas. Cristelo (2001) aponta como principais objetivos da utilização do cimento na estabilização de solos, a melhoria das características mecânicas e uma maior estabilidade em relação à presença da água, refletida na insensibilidade diante das variações do teor de umidade.



Em princípio, todo solo pode ser estabilizado com cimento, mas na prática são poucos os tipos de solos que permitem a estabilização economicamente. Os solos plásticos exigem para sua estabilização um teor relativamente elevado de cimento. Para resolver esse problema, Porto (1958) aponta dois caminhos: i) adição prévia de cal hidratada e; ii) a correção com areia ou outro solo não plástico ao solo que se pretende estabilizar. Com relação aos tipos de solos, a ABCP recomenda que qualquer tipo de solo pode ser utilizado, entretanto os solos mais apropriados são os que possuem teor de areia entre 45% e 50%. Somente os solos que contêm matéria orgânica em sua composição, geralmente solos da cor preta, devem ser descartados. O cimento entra em uma quantidade que varia de 5% a 10% da massa do solo, o suficiente para estabilizá-lo e conferir as propriedades de resistência desejadas à mistura.

Cristelo (2001) afirma que este tratamento pode ser utilizado em determinados solos pouco plásticos ou não plásticos, com teores de umidade suficientemente elevados, para impedir a sua adequação aos trabalhos de terraplenagens, onde normalmente a percentagem de cimento situa-se entre 5 e 7% nos siltes, 7 a 15%, nas areias e de cerca de 4%, no cascalho. A mistura assim obtida, ainda segundo o autor, é aplicada e compactada, ficando posteriormente a hidratar normalmente durante sete dias em condições de umidade adequadas, verificando-se o seu progressivo endurecimento.

Souza et al. (1998) efetuaram estudo acerca da estabilização com cimento de solos arenosos lateríticos de alta porosidade do Noroeste de São Paulo, variando o teor de cimento, idade de rompimento e ciclos de molhagem e secagem dos CPs. Como conclusão desse estudo, os autores revelaram que o emprego de teores de cimento entre 3 e 5% resultou em razoável influência positiva na resistência, enquanto que os ciclos de molhagem e secagem provocaram decréscimo na RCS principalmente para o teor de 3%.

### **2.1.3.2. Estabilização Solo-Cal**

A adição da cal é uma das mais antigas técnicas utilizadas pelo homem para se obter a estabilização ou a melhoria de solos instáveis. Exemplos do emprego dessa técnica são vários, como na construção da Via Apia, no sul da Itália, construída em 312 a.C. e num dos trechos da Muralha da China datado de 2280 a.C. (GUIMARÃES, 2002, apud GUIMARÃES et al., 2006). O emprego em grande escala desse método de estabilização ocorreu em Missouri, nos Estados Unidos, em 1924, e na antiga União Soviética, em 1926. Apesar do relativo sucesso obtido nos trabalhos pioneiros empregando-se a estabilização solo-cal, seu uso foi pequeno até a Segunda Guerra Mundial. Grande parte do avanço tecnológico deve-se ao *Texas Highway Department*, que a partir de 1945 desenvolveu nessa área um extenso programa de investigação em laboratório e em campo (LIMA et al., 1993 apud GUIMARAES et al., 2006). Cristelo (2001) concorda que foi nos EUA, na década de 40, onde as técnicas de ensaios laboratoriais em solos foram sistematicamente aplicadas para a avaliação de misturas solo-cal, acrescentando que o tratamento de argilas com cal começou no início da década de 50, no *Texas Highway Department*.

Nas reações entre a cal e o solo, fatores como a temperatura, o tempo de cura, o teor de umidade e a natureza dos materiais são apontados como destacados intervenientes no processo. A temperatura, por exemplo, age de forma diretamente proporcional ao aumento da resistência, pois é considerada um catalisador das reações pozolânicas chegando a obter em poucas semanas a resistência obtida após meses de serviço, (LIMA et al., 1993). Com relação à natureza dos dois materiais (solo e cal) envolvidos no processo, a natureza do solo é apontada por Nóbrega (1985, apud GUIMARÃES, 2006) como a mais importante, devido à sua mineralogia e textura. O autor considera de um modo geral que os argilominerais dos grupos da caulinita, haloisita e illita reagem de forma mais lenta com a cal e produzem minerais de neoformação menos diversificados.

França (2003) cita que várias reações químicas ocorrem na estabilização solo-cal. O autor aponta como mais importantes as reações de troca catiônica em que a adição da cal ao solo provoca substituição de cátions monovalentes por cátions bivalentes, a floculação e as reações pozolânicas ou de cimentação quando a reação da sílica e alumina do solo com a cal, formam os agentes cimentantes, que são os responsáveis pelo aumento de resistência na mistura solo-cal. Acrescenta-se ainda que as duas primeiras reações se processam de forma rápida e resultam em alterações imediatas na plasticidade, e em menor grau, na resistência mecânica da mistura. As reações pozolânicas, que se desenvolvem a longo prazo, são responsáveis pela formação de vários compostos cimentantes que aumentam a resistência mecânica e a durabilidade da mistura (LIMA et al., 1993). A carbonatação é outro tipo de reação presente nas misturas solo-cal, considerada de menor importância por diversos autores, dentre eles, Cristelo (2001) e Marques (2004). Neste caso, a cal reage com o dióxido de carbono, originando carbonatos de cálcio e/ou magnésio que são compostos cimentantes fracos.

Com relação aos produtos resultantes deste tipo de estabilização, Bauer e Queiroz de Carvalho (1990), concluíram a partir de oito (08) solos estudados do N/NE brasileiro, que a adição da cal produz a predominante formação de silicato de cálcio e aluminato de cálcio hidratado. Causou surpresa aos autores o fato do estudo, àquela época, ter revelado a formação de produtos envolvendo o ferro como cálcio-silicato-aluminato de ferro, pois o ferro até então, era tido como provável elemento inibidor do processo, ou, que dificultasse a formação de produtos na reação solo-cal (QUEIROZ DE CARVALHO, 1985). Acerca dos solos lateríticos estudados, os produtos formados a partir das reações seguiram o mesmo comportamento de outros solos, que são cálcio, silicatos de cálcio e aluminato, além do fato de se ter identificado a formação de compostos de ferros.

Em se tratando dos solos com maior potencial para estabilização com cal, de modo geral, são mais indicados os solos de granulometria fina, nos quais a cal atua como agente cimentante, estabilizador. Para solos predominantemente argilosos, a estabilização com cal tem como objetivo a melhoria das características de resistência e deformabilidade, para um adequado uso em estruturas de pavimento (CORREIA e NEVES, 1994). No entanto, é fato que a resistência do solo aumenta com o teor da cal para os mais diversos solos. Experiências efetuadas por Pinto e Boskov (1990), por exemplo, com solos saprolíticos e lateríticos, mostraram

boa resposta da parte de ambos em relação à resistência, sendo um pouco mais elevada para o solo saprolítico nas mesmas condições de compactação. O sucesso da estabilização com a cal depende de forma decisiva da quantidade de partículas inferiores a  $60\mu$  presente no solo. Neste caso, essa quantidade deverá ser igual a, no mínimo, 35% da massa de solo a estabilizar (VAN IMPE, 1989 apud CRISTELO, 2001).

No que diz respeito à resistência do solo tratado, este tipo de estabilização pode, em vários casos, ser altamente beneficiado pela adição conjunta de cinzas volantes e outros materiais do gênero. A respeito da adição de cinza volante à cal no processo de estabilização solo-cal, Nardi (1974) e Nardi e Hotzad (2002; 2006) desenvolveram um interessante estudo, no qual os autores atingiram bons resultados. Nardi (1974) usou na estabilização de um solo arenoso, cimento e carbonato de sódio como aditivos à mistura, visando acelerar as reações pozolânicas. Aflitos e Ferreira (1986) utilizaram NaOH (Hidróxido de Sódio) associado à cal (“cal + traços de NaOH”) para a estabilização de um solo laterítico, de onde se obteve resultados “extremamente promissores”, segundo os autores, no que se refere às propriedades analisadas.

Como é de se esperar, a homogeneização da mistura é sempre um fator importante na estabilização de solos, principalmente no tipo solo-cal. Normalmente, a adição da cal para este tipo de estabilização é efetuada iniciando-se com a colocação do pó da cal no solo, em seguida, faz-se a mistura e, finalmente, é adicionada a água (“técnica de solo-cal pó”). Araújo et al. (2008) estudaram a melhoria tecnológica de propriedades do solo referente ao uso da cal também diluída na água de compactação (“técnica de solo-cal pasta”), que é um procedimento prático recente, do qual se percebeu que os resultados revelaram uma resposta melhor, em termos de capacidade de suporte, do que a adição da cal em pó.

Observa-se neste processo, que de forma geral, quanto maior o teor da cal, maior a capacidade de troca catiônica e a formação de produtos cimentantes que resultam numa maior resistência conferida ao solo. Entretanto, não existe um teor ótimo da cal a ser adotado para todos os solos de forma igual. Correia e Neves (1994) recomendam que o estudo de misturas solo-cal deve ser conduzido em laboratório por meio de ensaios, de forma a permitir a definição da quantidade mínima da cal, que, técnica e economicamente, satisfaça às características pretendidas para a mistura. Soliz (2007) aponta a experiência de campo como sendo decisiva para a escolha do teor da cal.

### **2.1.3.3. Estabilização Química com Material Alternativo**

Têm sido muitos os estudos realizados para a estabilização química de solos com materiais alternativos, nas últimas décadas, no Brasil. Guida (1971) e Guida e Medina (1974) estudaram o uso de **ácido fosfórico** com essa finalidade, visando o uso em estradas e aeroportos. Segundo os autores, o processo a ser empregado, principalmente em solos finos lateríticos de regiões tropicais, parte do princípio que o ácido fosfórico possui a propriedade de atacar os minerais argílicos e outros constituintes do solo, produzindo fosfatos de ferro e de

alumínio, que são produtos resistentes e insolúveis em água. Vertamatti (1986) também estudou o **ácido fosfórico em conjunto com a cal**, para fins de estabilização de solos finos da Amazônia, para uso em pistas de aeroportos. O autor concluiu em seu trabalho a maior afinidade de aplicação da técnica em solos lateríticos, pois foi observado que para o solo mais laterizado se verificou o maior ganho de resistência quando tratado com cal e ácido fosfórico.

Machado et al. (2004) citam vários estudos efetuados para estabilização química de solos durante mais de 25 anos, na Universidade Federal de Viçosa, com a aplicação de uma grande quantidade de materiais alternativos para estabilização de solos com fins de uso em pavimentos de estradas florestais. Os materiais utilizados foram: **Vinhoto** (subproduto da indústria açucareira), indicado como estabilizante devido à sua propriedade de retenção de água; **Licor negro de kraft** (resíduo de papel e celulose), que apesar de não funcionar como agente cimentante, funciona como agente fracamente aglutinante; **Alcatrão de madeira de eucalipto** (subproduto da carbonização da madeira), que possui resistência à água e melhora a adesividade; **Escória**, um resíduo sólido oriundo das siderúrgicas, que pode ser utilizada em diversas camadas do pavimento, no reforço do subleito, na base e no revestimento betuminoso, em substituição dos agregados pétreos; **GRITS e lama-de-cal**, que são resíduos sólidos provenientes das indústrias de celulose e papel.

Ensaio de compactação e CBR com amostras de solos, em presença do resíduo sólido industrial GRITS, por exemplo, em diferentes teores, para fins de aplicação na estabilização de estradas florestais, mostrou-se bem próximos aos da lama-cal, e que é promissor como estabilizante químico para determinados tipos de solos, no que se refere às camadas de pavimentos rodoviários. Machado et al. (2004) alertam ainda quanto ao uso destes produtos ou substâncias com relação a algumas desvantagens constatadas como ataque por fungos, para os dois primeiros (**Vinhoto e Licor negro de Kraft**), maior susceptibilidade térmica que os asfaltos para o alcatrão, etc. Acrescentam também que esse tipo de aproveitamento de materiais se constitui numa prática preservacionista e restauradora, com forte argumento ambiental e ecológico.

A partir de um estudo efetuado com estabilização de solos de regiões tropicais empregando-se **hidróxido de sódio**, Alcântara et al. (1995) concluíram que baixos teores deste produto podem ser suficientes para a estabilização de solos, mas colocam restrições associadas ao custo, que pode ser elevado, em virtude dos cuidados especiais que devem ser tomados visando a segurança do usuário na manipulação do referido produto.

Com relação a tratamento com uso de sais, mais especificamente os **cloretos (de cálcio e de sódio)**, na estabilização de solos, Medina e Mota (2004) elencam uma série de vantagens e indicam esse tipo de substância para a estabilização de apenas solos granulares bem graduados. Entretanto, os autores citam alguns inconvenientes resultantes do processo, tais como o efeito corrosivo e a lixiviação causada pela chuva, além de deixar a superfície mais escorregadia.

#### 2.1.3.4. Estabilização Solo-Betume (Asfalto)

De uma forma geral, denomina-se estabilização betuminosa aqueles métodos de construção em que um material betuminoso é adicionado a um solo, ou à mistura de solos, visando a melhoria de suas características (SENÇO, 2001). De acordo com Silva (1968), apud Santos (1995), três são os tipos de estabilização mais usuais empregando-se agentes betuminosos: areia betume, solo betume e pedregulho arenoso-betume.

Conforme já é de domínio público, o uso de materiais betuminosos em conjunto com solos e mistura solos agregados, tem duas finalidade principais: i) a primeira, fornecer coesão à mistura de solo estabilizado, como ocorre no caso das areias ou solos muito arenosos; ii) a segunda, em se tratando de solos finos, o propósito é a impermeabilização com o fim de reduzir os efeitos danosos que a água pode causar ao penetrar neste tipo de solo durante sua vida útil. Em alguns casos, o material betuminoso pode proporcionar ambas as funções: coesão e impermeabilização (FERREIRA, 1980). A força de coesão proporcionada pela estabilização alcança um valor máximo à medida que aumenta o teor de betume, mas, tal força vai decrescendo à medida que o filme de betume vai se tornando mais espesso. Mesmo assim, quanto maior o teor de betume, melhores serão as condições de impermeabilização do solo. Portanto, é racional se buscar o equilíbrio entre a máxima resistência coesiva e a maior impermeabilização, conforme comentado por Ingles & Metcalf (1972).

Segundo Ferreira (1980), a estabilização betuminosa começou a ser empregada quando engenheiros rodoviários, trabalhando nas proximidades de campos petrolíferos, notaram que o espalhamento de óleo cru sobre as estradas de terra reduzia o pó existente, tornando-as mais aptas a resistirem aos rigores do tráfego e do intemperismo. Cita ainda o autor a existência de controvérsias sobre como e quando o processo teve início, visto que alguns autores consideram que foi na Califórnia, em 1904, enquanto outros se reportam a Massachusetts, alguns anos antes. Apesar do desenvolvimento de cutbacks (asfaltos diluídos) de curas rápida e média, no início do século XX, em substituição ao óleo cru, para certos tipos de solos tornava-se difícil o uso deste material. Houve, então, a substituição dos asfaltos diluídos pelas emulsões asfálticas no processo de estabilização de solos. Ferreira (1980) relata ainda que no final da década de 30, devido a iminência da Segunda Guerra Mundial, houve grande interesse em relação à estabilização solo-betume, por ser um método rápido para construção de aeroportos e pavimentos rodoviários.

No Brasil, de acordo com Gondim (2008), a aplicação efetiva de solo-betume em pavimentação teve início depois de 1966. Naquela época, Santana (1976), ao colher elementos para cadastro de rodovias pavimentadas nos estados do Ceará, Piauí e Maranhão, se deparou com 7 km contínuos de tratamento contra-pó em estradas de terra que se apresentava em ótimo estado de conservação, sem passar por qualquer processo de manutenção. Esse tratamento consistia numa imprimação de 3 mm de penetração e de uma capa selante. Com relação à introdução do uso de emulsão asfáltica, a ABEDA (2001) cita que este procedimento foi introduzido no Brasil em 1962, pelo engenheiro químico francês Jean Claude Vogt, sendo, posteriormente, implementado por

outros pesquisadores tais como João Bento Jácome Lopes, Johanes Larsen, Carlos Alberto S Paranhos, Humberto Santana, Raimundo Nonato Araújo, Heber Carlos Ferreira, Francisco Barbosa de Lucena, Ademir Montes Ferreira, Raimundo Leidimar Bezerra, entre outros.

#### **2.1.3.5. Estabilização Solo-Emulsão**

O solo-emulsão é o produto resultante da mistura de solos, geralmente locais, com emulsão asfáltica em geral, catiônica, na presença ou não de filer mineral ativo. A mistura solo-emulsão é realizada em equipamentos apropriados, espalhada e compactada a frio (ABEDA, 2001). É uma solução alternativa para regiões onde existe carência de agregados pétreos e elevado custo de transporte de materiais. Pelo fato deste assunto ser o tema desta dissertação, todo o detalhamento dos materiais e técnicas empregadas no processo será feito em item 2.2.4..

#### **2.1.4. Métodos Elétricos e Térmicos**

Segundo Marques (2004), outros métodos, considerados especiais, ainda podem ser citados como estabilização de solos, são os métodos elétricos e térmicos descritos brevemente a seguir.

##### **2.1.4.1. Estabilização Elétrica**

O método elétrico consiste na passagem de uma corrente elétrica através do solo a estabilizar. As descargas sucessivas de alta tensão são usadas no adensamento de solos arenosos saturados, enquanto descargas de baixa tensão contínua são usadas em solos argilosos, empregando os fenômenos de eletromose, eletroforese e consolidação eletroquímica. Não tem sido utilizada em pavimentos (MARQUES, 2004).

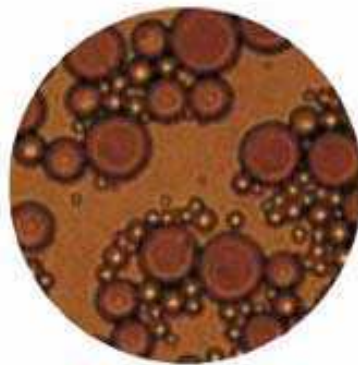
##### **2.1.4.2. Estabilização Térmica**

A estabilização térmica é promovida através do emprego de energia térmica, empregando-se as técnicas de congelamento, aquecimento ou termosose. A solução do congelamento normalmente é temporária, alterando-se a textura do solo. O aquecimento busca rearranjos na rede cristalina dos minerais constituintes do solo. A termosose é uma técnica de drenagem onde se promove a difusão de um fluido em um meio poroso pela ação de gradientes de temperatura. Também não é utilizada em pavimentos (MARQUES, 2004).

## **2.2. A Emulsão Asfáltica**

De acordo com o Instituto de Asfalto - IA (1989) esse produto é a emulsão do cimento asfáltico na água, contendo pequena quantidade de agente emulsificador. É um sistema heterogêneo de duas fases normalmente

imiscíveis (água e asfalto), no qual a água forma a fase contínua ou fase dispersante da emulsão, enquanto os minúsculos glóbulos de asfalto formam a fase descontínua ou fase dispersa. Quando os glóbulos de asfalto são carregados negativamente, a emulsão é denominada aniônica. Por outro lado, a emulsão será catiônica quando os glóbulos forem carregados de eletricidade positiva. Gondim (2008) observa que as emulsões são comumente constituídas por duas fases, sendo uma de natureza polar e outra de natureza apolar. Quando a fase dispersante é constituída pela substância de natureza polar a emulsão é dita direta (O/W- oil in water), caso contrário, é dita inversa (W/O - water in oil). Uma *emulsão asfáltica* é uma emulsão do tipo O/W de cimento asfáltico disperso em uma fase aquosa composta por ácido, emulsificante, água e solvente. A Figura 2.1 ilustra uma gota de emulsão asfáltica ampliada 1.000 vezes, onde podem ser observados os glóbulos de cimento asfáltico dispersos em uma solução aquosa.



**Figura 2.1– Foto de uma gota de emulsão ampliada 1.000 vezes (Fonte: Omena e Antoszczem Junior, 2006, adaptado de Gondim, 2008).**

No Manual de Pavimentação brasileiro, o DNER (1996), define-se emulsão asfáltica (EA) como sendo uma dispersão coloidal de uma fase asfáltica em uma fase aquosa (direta), ou então, uma fase aquosa dispersa em uma fase asfáltica (inversa), com a ajuda de um agente emulsificante. As emulsões são obtidas combinando-se água e Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) aquecido, em um meio intensamente agitado e na presença de agente emulsificante, que tem como objetivos dar estabilidade ao conjunto, favorecer a dispersão e revestir os glóbulos de betume com uma película protetora, mantendo-os em suspensão. Para a fabricação das emulsões, são utilizados equipamentos tais como moinhos de bola, moinhos coloidais, homogeneizadores, agitadores mecânicos e misturadores emulsionadores por injeção. Esses equipamentos promovem uma agitação intensa com o fim de obter dispersões as mais finas e estáveis possíveis. A Figura 2.2 mostra o esquema de produção de EA catiônica, enquanto a Figura 2.3 mostra instalações de uma fábrica produtora de emulsões. Para a fabricação das EA, geralmente são utilizados os asfaltos diluídos e os cimentos asfálticos mais moles, embora com os procedimentos mais recentes se possam usar também os asfaltos mais duros.

O tamanho dos glóbulos de asfalto dispersos na água em uma EA pode variar de 0,001 a 0,02 mm de diâmetro, com a aparência da mistura variando de um líquido de baixa consistência (leite, por exemplo) até a consistência

cremosa (semelhante a mel), sendo a coloração da emulsão geralmente marrom. Historicamente, segundo ABEDA (2001), a produção de emulsão em escala industrial começou em Lutterbacch, em 1905, com o químico Emile Feigel, mas só em 1951 a empresa ESSO colocou o produto à disposição do mercado, na França.

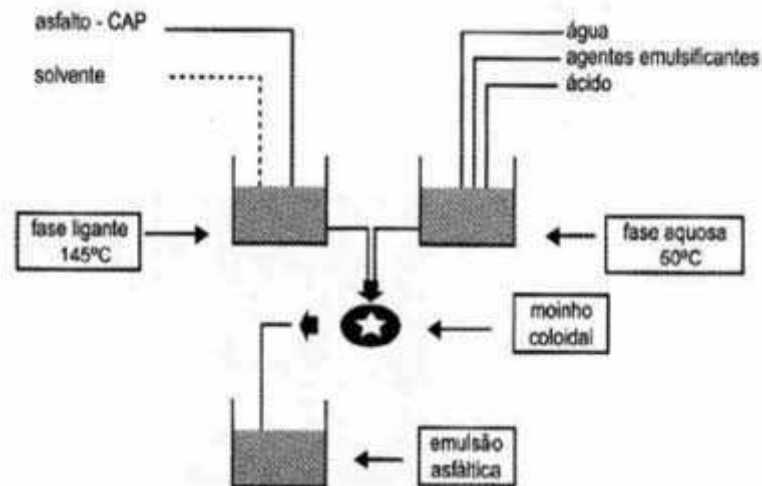


Figura 2.2 – Esquema básico de produção de emulsão asfáltica catiônica (adaptado de Nascimento, 2005).



Figura 2.3 – Foto de instalações de uma fábrica de produção de emulsão asfáltica (adaptado de Nascimento, 2005).

### 2.2.1. Tipos de Emulsões

Os emulsificantes ou produtos tensoativos utilizados na fabricação das emulsões asfálticas são divididos de acordo com seu caráter iônico, em duas grandes categorias: aniônicos e catiônicos. Castro (2003) cita um terceiro tipo, denominado não iônico. Os emulsificantes aniônicos são sabões, onde um anion orgânico está



associado a um álcali, a exemplo do estearato de sódio, que é solúvel no betume e confere aos glóbulos de betume na emulsão uma carga elétrica negativa, mantendo-os separados. As emulsões assim preparadas têm boa adesividade aos agregados do tipo eletropositivo, ou seja, rochas de natureza calcária. As EA assim formadas são chamadas **Emulsões Aniônicas**.

Os emulsificantes catiônicos, que são geralmente os sais de amina, conferem aos glóbulos de betume uma carga elétrica positiva, dando origem as **Emulsões Catiônicas**. As emulsões assim preparadas apresentam boa adesividade aos agregados cujas cargas elétricas superficiais são negativas, tais como os arenitos e granitos, os quais possuem elevada percentagem de sílica.

Os emulsificantes são adicionados em pequena quantidade, da ordem de 1,5% em massa, sobre a emulsão, enquanto que o material betuminoso constitui cerca de 60% do produto. Existem ainda, de acordo com o DNER (1996), as emulsões especiais, que são fabricadas sem carga elétrica (não iônicas).

### **2.2.2. Ruptura das Emulsões Asfálticas**

O termo ruptura, neste caso, define o fenômeno da separação das fases constituintes de uma emulsão asfáltica (material betuminoso-água). Nas emulsões catiônicas, a ruptura ocorre pela reação química entre o emulsificante e o agregado (por exemplo, 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) e por evaporação da água. Nas EA aniônicas a ruptura se dá, principalmente, através da evaporação da água. O sinal de ruptura é geralmente dado pela mudança de cor da EA, passando de marrom para preto.

Utiliza-se da ordem de 33 a 42% de água juntamente com agentes emulsificantes para que a mistura possa ter estabilidade ao bombeamento, transporte e armazenamento em temperatura ambiente (ABEDA, 2001). Em relação à velocidade com que ocorre a ruptura, as EA são classificadas em três tipos: de **Ruptura Rápida (RR)**, **Ruptura Média (RM)** e de **Ruptura Lenta (RL)**. As de ruptura rápida possuem uma porcentagem relativamente baixa de agente emulsificante e são indicadas para pintura de ligação e na construção de revestimentos por penetração. As EA de rupturas média e lenta são indicadas principalmente para misturas com agregados graúdos e miúdos, respectivamente, segundo consta em DNER (1996). O processo de ruptura é fortemente influenciado pelo tipo de agregado e pelo estado da superfície do mesmo (seco ou molhado).

Devido às características dos agregados brasileiros, as emulsões catiônicas são as correntemente empregadas na pavimentação rodoviária. A principal característica desta emulsão é o fato de seu rompimento se dar através de reação de neutralização das cargas negativas dos agregados de natureza ácida, normalmente empregados na construção rodoviária (PETROBRÁS, 1996 apud CASTRO, 2003).

### 2.2.3. Nomenclatura das EA

Conforme o DNER (1996), as EA catiônicas e aniônicas são classificadas de acordo com a ruptura, viscosidade, teor de solvente e o resíduo asfáltico. Na simbologia atual das emulsões, a letra “C” indica que a emulsão é do tipo catiônica, enquanto os números 1 e 2 estão associados à viscosidade, que por sua vez, está associada à quantidade de CAP presente na emulsão. São apresentados a seguir os principais tipos de emulsão disponíveis no mercado:

RR-1C, RR-2C – emulsões asfálticas catiônicas de ruptura rápida.

RM-1C: RM-2C - emulsões asfálticas catiônicas de ruptura média

RL-1C - emulsão asfáltica catiônica de ruptura lenta

RR-1, RR-2 – emulsões asfálticas aniônicas de ruptura rápida.

RM-1: RM-2 – emulsões asfálticas aniônicas de ruptura média

RL-1 – emulsão asfáltica aniônica de ruptura lenta

As EA especiais utilizadas na fabricação de lamas asfálticas (mistura de emulsão e agregado miúdo feita para recuperação funcional de pavimento) têm o símbolo LA seguido de uma ou duas indicações, de acordo com sua ruptura e carga de partícula.

LA-1, LA-2 – emulsões aniônicas de lama asfáltica.

LA-1C, LA-2C – emulsões catiônicas de lama asfáltica.

LA-E – emulsão especial de lama asfáltica.

Outros importantes conceitos, referentes ao emprego de emulsão asfáltica, podem ser encontrados em ABEDA, (2001), Vogt (1971) e Miceli Jr. (2006). Alguns desses conceitos são elencados a seguir:

- **Aglutinação/adesividade:** aptidão do ligante residual para aderir e ficar fixo sobre o agregado que ele recobre, sem perigo de desrevestimento. A ruptura não implica necessariamente na adesividade do ligante residual; uma película de asfalto pode revestir uma pedra sem verdadeira adesividade às vezes em consequência da presença de uma película de água intercalada (caso das emulsões aniônicas). Distingue-se a adesividade ativa e a adesividade passiva. A primeira é a propriedade de um ligante asfáltico deslocar a película de água de um agregado molhado, e a adesividade passiva é a propriedade de um ligante asfáltico, que revestiu um agregado seco, resistir à ação da água;
- **Cura:** transformação química, física ou físico-química de uma emulsão usada numa camada de base ou de revestimento, que as tornam aptas a suportarem o trânsito. A cura de um revestimento à base de emulsão estará completa quando a emulsão estiver completamente rompida (caso das emulsões catiônicas). O fenômeno de cura ocorre como consequência de absorção e evaporação da água e solventes (emulsões, asfalto diluído);

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

As especificações das Emulsões Asfálticas Catiônicas, são regulamentadas pela Resolução do Conselho Nacional de Petróleo (CNP) N° 07/88 (Figura 2.4).

Característica	Métodos		Tipo de Ruptura				
	ABNT	ASTM	Rápida		Média		Lenta
			RR-1C	RR-2C	RM-1C	RM-2C	RL-1C
<b>Ensaio sobre a emulsão</b>							
Viscosidade Saybolt-Furol, s, 50°C	NBR 14491	D 88	20-90	100-400	20-200	100-400	Máx. 70
Sedimentação, % em peso máx.	NBR 6570	D 244	5	5	5	5	5
Peneiração, 0,84mm, % em peso máx.	NBR 14393	D 244	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Resistência à água, % mín. de cobertura	NBR 6300	D 244					
agregado seco			80	80	60	60	60
agregado úmido			80	80	80	80	80
Mistura com cimento, % máx. ou mistura com filler silícico	NBR 6297	D 244	-	-	-	-	2
	NBR 6302		-	-	-	-	1,2 a 2,0
Carga da partícula	NBR 6567	D 244	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva
pH, máx.	NBR 6299	D 244	-	-	-	-	6,5
<b>Destilação</b>							
solvente destilado, % em vol.	NBR 6568	D 244	0-3	0-3	0-12	3-13	nula
resíduo, % em peso mín.			62	67	62	65	60
<b>Desemulsibilidade</b>							
% em peso mín.	NBR 6568	D 244	50	50	-	-	-
% em peso máx.			-	-	50	50	-
<b>Ensaio sobre o solvente destilado</b>							
Destilação, 95% evaporados, °C, máx.	NBR 9619	-	-	-	360	360	-
<b>Ensaio sobre o resíduo</b>							
Penetração, 25°C, 100g, 5s, 0,1mm	NBR 6576	D 5	50-250	50-250	50-250	50-250	50-250
Teor de betume, % em peso mín.	NBR 14855	D 2042	97	97	97	97	97
Dutilidade a 25°C, cm, mín.	NBR 6293	D 113	40	40	40	40	40

**Figura 2.4 – Especificação Brasileira de emulsões asfálticas catiônicas (adaptado de Benucci et al., 2007).**

ABEDA (2001) e Nascimento (2005) enumeram algumas vantagens do uso de emulsões asfálticas para estabilização de solos, se destacando as seguintes:

- Economia de energia (não se utiliza solventes nem há o consumo de combustíveis em sua manipulação, estocagem e emprego na obra);
- Ligante ecologicamente correto (evita-se a contaminação ambiental);

- Possibilidade de produzir grandes volumes em equipamentos de baixo custo e de fácil operação;
- Não há o risco de incêndios e explosões (manuseio seguro);
- Versatilidade frente a climas, materiais (agregados úmidos), transporte, armazenamento e aplicação;
- Elevada adesividade a todos os tipos de agregados eliminando o uso de aditivos “dopes”, normalmente empregados para melhorar a adesividade do cimento asfáltico de petróleo (CAP) com agregados em misturas à quente;
- Possibilidade de empregar técnicas de serviços, como LA e microrevestimento; e
- Permite dosagens baixas e acuradas de ligante, facilitando sua distribuição durante a aplicação.

#### **2.2.4. Mecanismos da Estabilização do Solo com Emulsão**

Mattos et al. (1991) discorrem a respeito dos processos físico-químicos que envolvem o mecanismo da mistura solo-emulsão. Os autores explicam que o sistema solo-emulsão-água pode ser considerado como um sistema fechado, heterogêneo, constituído por três fases e quatro componentes: solo, betume, água e fase aquosa da emulsão (água e soluto tenso-ativo). Das três fases, uma é contínua e duas são descontínuas. São descontínuas as fases constituídas pelo solo e pelos glóbulos de betume, já a fase contínua é constituída pela solução aquosa obtida pela adição de água à fase aquosa da emulsão. Esse sistema solo-emulsão-água apresenta interfaces bem definidas, a saber:

- a. solo-solução aquosa;
- b. solo-betume; e
- c. betume-solução aquosa.

Considerando a primeira interface (solo-solução aquosa), tem-se um subsistema composto por uma substância adsorvente (solo) e uma substância com características de adsorvato (solução aquosa). Ao entrarem em contato, o solo adsorve parte do soluto tensoativo, diminuindo a concentração de soluto na fase aquosa, o que resulta em um desequilíbrio na emulsão. Devido a esse desequilíbrio, inicia-se o processo de ruptura da emulsão, e a conseqüente coalescência (formação de aglomerado) das partículas betuminosas, resultando na formação do filme betuminoso sobre as partículas de solo.

A quantidade de soluto adsorvido é função da sua concentração na solução. Assim, quanto mais diluída estiver a emulsão, haverá menor adsorção de soluto, e a ruptura da emulsão ocorrerá mais lentamente, possibilitando assim uma melhor mistura. Isso explica o fato de ser tão difícil a mistura homogênea de solo com emulsão e ao mesmo tempo porque é mais fácil efetuar a mistura quando o solo está umedecido e/ou a emulsão é submetida a um processo de diluição.

Os autores ainda afirmam que é impossível que haja o envolvimento de todos os grãos do solo pelo ligante betuminoso. Com esse intuito, fizeram algumas simplificações tais como: i) admitiram a constância do equilíbrio entre a emulsão betuminosa diluída e o solo previamente umedecido, e que a espessura mínima de recobrimento da partícula de solo é igual à espessura mínima do ligante; ii) admitindo o valor de 3  $\mu\text{m}$  para os glóbulos de betume presentes na emulsão, e, empregando-se a fórmula de Duriez (Equação 2.1), obtém-se um diâmetro mínimo de 0,075 mm, ou seja, a fração de solo passante na peneira número 200 não pode ser envolvida pelo ligante da emulsão de forma otimizada.

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

onde:

e = espessura da película do ligante (mm)

d = diâmetro médio do grão (mm)

Mattos et al. (1991), em suas considerações, ainda equipararam um grão de solo a um cubo de aresta "a", e, com auxílio da Equação 2.2 obtiveram para uma determinada granulometria de um solo fino uma taxa de ligante igual a 9,7%, para que todos os grãos de solo possam ser envolvidos pelo ligante de uma emulsão:

$$\%_{\ell} = \frac{V_{\ell}}{V_s} \cdot \frac{D_{\ell}}{D_s} \cdot 100 \quad (2.2)$$

onde:

$\%_{\ell}$  = percentagem de ligante em peso;

$V_{\ell}$  = volume de ligante;

$V_s$  = volume de solo;

$D_s$  = Densidade real de solo;

$D_{\ell}$  = Densidade de ligante.

Em termos de emulsão (resíduo de 65% de betume) e no caso de haver 10% de solvente na fase ligante, seria necessária uma taxa de emulsão da ordem de 13,4%, valor considerado inviável na maior parte dos casos. Observa-se, portanto, que o recobrimento de todos os grãos de maneira uniforme é tecnicamente inexecutável para solos finos, e economicamente inviável para solos granulares. Mattos et al. (1991) ainda observam que estes valores foram calculados admitindo-se a estabilidade da emulsão em contato com os grãos do solo, quando na realidade, o que ocorre é a ruptura da emulsão com a coalescência de várias partículas de ligante, formando aglomerados betuminosos de volumes diversos, espalhados pela massa de solo. Quando compactado, este sistema (mistura solo-emulsão-água), dará origem a um outro, formado por uma estrutura de grãos de solo com adsorção superficial do soluto tensio-ativo e ainda com grumos formados pelo ligante betuminoso, funcionando como rótulas. Essas rótulas diminuem o número de contatos grão-grão, o que irá

diminuir a resistência do conjunto aos esforços cisalhantes, mas por outro lado, esses grumos funcionam também como obstruções na rede de capilares criada pela estrutura de grãos de solo formada após compactação.

Caso o sistema obtido por mistura e compactação seja submetido ao processo de perda de umidade em baixos níveis, e, levando novamente o sistema a reabsorver água até à saturação, verifica-se que a quantidade de água absorvida será realmente menor que a absorvida pelo mesmo solo compactado sem emulsão (MATTOS, 1991). O autor conclui que a ação hidrófuga gerada pela adsorção de soluto tensio-ativo no solo e pela obstrução dos capilares causada pelas partículas de betume irá aumentar a resistência do sistema, em razão do menor teor de umidade. Por outro lado, a resistência irá diminuir devido ao sistema multi-rotulado criado. Miceli Jr. (2006), baseado nos resultados de Bueno *et al.* (1991), faz uma ressalva nas conclusões de Mattos (1991), comentando que se a perda de umidade se der de forma rápida ou abrupta, como é o caso de secagem em estufa, a ação hidrófuga descrita não pode ser observada. Sobre o modelo tríplice solo-água-emulsão, Kézdi (1979), apud Miceli Jr. (2006), afirma que deve existir um determinado ponto, para o qual a mistura pode ser preparada com uma quantidade ótima de emulsão que proporcione eficientemente um máximo de resistência ao cisalhamento ao solo.

## **2.2.5. Fatores Intervenientes na Estabilização Solo-emulsão**

O processo de estabilização de solo com o emprego de emulsão é influenciado pelos elementos componentes da mistura tais como tipo de solo, teor de água, tipo de emulsão e, pelos métodos utilizados na preparação da mesma. São apresentados e discutidos a seguir alguns importantes aspectos relacionados à técnica de estabilização solo-emulsão.

### **2.2.5.1. Tipo de Solo**

Parece haver um consenso entre pesquisadores que se dedicam ao tema, que os solos granulares são os mais indicados para o procedimento de estabilização de solos com betume. Vários são os requisitos colocados pelos diversos autores com o intuito de enquadrar os diferentes tipos de solos quanto à sua potencialidade para estabilização betuminosa. Geralmente os requisitos impostos referem-se aos limites máximos dos índices de consistência e às características de granulometria dos solos.

Como exemplo, Ingles & Metcalf (1972), mencionam que a graduação/granulometria dos solos não é restritiva, mas que geralmente o solo deve ter mais de 50% passando na peneira 3/16 polegadas (4,76 mm), entre 10% e 50% passando na peneira N° 200; o  $W_L < 40\%$  e o  $I_P < 18\%$ . No entanto, os próprios autores afirmam que solos finos (argilas) com mais de 75% passando na peneira N°200 e apresentando valores de  $W_L$  maiores que 50%, foram tratados satisfatoriamente tanto com emulsões asfálticas quanto com asfaltos diluídos à época. Os autores

comentam ainda, que areias puras tendem a apresentar uma fraca adesão entre a superfície da sílica e o betume, o que pode causar o desligamento do filme betuminoso quando a mistura for submetida à ação da água. Yoder e Witczak (1975) afirmam que enquanto é satisfatória a estabilização de solos granulares e pedregulhosos, tanto com asfaltos diluídos como com emulsões asfálticas, a estabilização betuminosa de solos argilosos é, em geral, limitada pelas dificuldades encontradas nos processos construtivos. Para esses autores, os solos finos, solos arenosos e as areias pedregulhosas apresentaram diferentes limites para adequação da utilização da técnica solo-betume. Um resumo com os requisitos apresentados por alguns autores, referente ao assunto, é mostrado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Resumo dos requisitos de solos a serem estabilizados com materiais betuminosos (adaptado de Miceli Jr., 2006 e Gondim, 2008).

Tipo de Solo	$W_L/W_P$	% passante n°200	Fonte
Areias	$I_P$ máximo de 12%	25 % máximo	Yoder e Witczak (1975)
Pedregulhos e Areias Pedregulhosas	$I_P$ máximo de 12%	15 % máximo	
Solos Finos	$I_P$ máximo de 18% $W_L$ máximo de 40%	35 % máximo	
Solos em Geral	$I_P$ máximo de 18% $W_L$ máximo de 40%	Entre 10 % e 50%	TRB (1946)
Solos em Geral	$I_P$ máximo de 14%	5 % mínimo	Vogt (1971)
Solos arenosos		35 % máximo	DER-SP (1991)
Solos argilosos	$I_P$ máximo de 6% $W_L$ máximo de 30%	35 % máximo	
Matérias Britados		15 % máximo	ABEDA (2001)
Solos em Geral	$I_P$ máximo de 8%	20 % máximo	ASTM (2006)
Solos em Geral		25 % máximo	

Observe-se que o Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (DER-SP, 1991), exige que além dos limites mostrados na Tabela 2.1, que a granulometria dos solos destinados à preparação de solo-emulsão deva se enquadrar na faixa granulométrica descrita na Tabela 2.2.

Nota-se das Tabelas 2.1 e 2.2 que os critérios eleitos pelos diversos autores apresentados constam basicamente das características físicas dos solos, como a granulometria e os limites de consistência, já mencionados.

Tabela 2.2 – Faixa granulométrica para o solo para estabilização betuminosa (DER-SP, 1991, adaptado de Gondim, 2008).

Abertura da peneira (mm)	% passante, em peso
25,0	80 a 100
4,8	50 a 100
2,0	35 a 100
0,42	15 a 75
0,075	0 a 35

Jacinto (2005), apud Gondim (2008), adverte que os processos de estabilização são também fortemente influenciados pelas constituições químicas e mineralógicas dos solos, bem como pela superfície específica dos grãos, ressaltando a importância do conhecimento das propriedades químicas e mineralógicas, que indiquem a potencialidade de uma amostra de solo em ser estabilizada com materiais betuminosos. Neste contexto, Kézdi (1979) apud Miceli Jr. (2006), com base em ensaios físico-químicos realizados com vários solos, chegou à conclusão de que alguns aspectos da microestrutura do solo a ser estabilizado podem influenciar no resultado do processo. Dos aspectos mais relevantes, destacam-se os seguintes, conforme apresentado por Gondim (2008):

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

### 2.2.5.2. Quantidade de Água

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

- a) Água de dispersão - existe um teor mínimo de água do solo abaixo do qual não é possível dispersar a emulsão no solo, mesmo quando ela está diluída. Este teor é geralmente da ordem de 3 a 5%. O solo deverá ser então, antes de mais nada, umedecido;
- b) Água de diluição - necessária devido às emulsões serem muito viscosas e também porque as emulsões diluídas rompem-se mais lentamente, o que facilita a dispersão na massa do solo;
- c) Água de compactação – deve corresponder ao fluido total: soma do asfalto sob forma de emulsão e de água.



Os principais autores que estudaram a estabilização solo-emulsão concordam que a emulsão asfáltica não deve ser misturada diretamente a solos secos ou solos com baixo teor de umidade (JACINTHO, 2005). Ferreira (1980) recomenda a adição e homogeneização prévia de água ao solo, para posterior adição do material asfáltico, pois esta adição impede a ruptura prematura das emulsões, facilitando o processo de mistura. Araújo et al. (1982) diluíram a emulsão em parte da água a ser adicionada ao solo (na proporção de 1:1), sendo o restante da água a ser adicionada misturada ao solo antes da emulsão diluída.

Segundo Yoder e Witczak (1975), a quantidade de água necessária para estabilizar um solo com material betuminoso é, em geral, menor do que o teor ótimo obtido nos ensaios de compactação na energia do Proctor Normal para o solo natural. No entanto, nos estudos realizados por Araújo *et al.* (1982) foi encontrada exceção com relação a essa afirmação. Soliz (2007) destaca que uma quantidade de água de compactação correspondente ao teor de umidade próximo do teor ótimo mostrou-se adequado para a homogeneização e moldagem dos corpos-de-prova, sendo as massas específicas obtidas inferiores às dos solos puros.

### **2.2.5.3. Quantidade e Tipo de Emulsão Asfáltica**

A escolha do teor de ligante ótimo para a estabilização de um solo a partir da adição de emulsão asfáltica é um fator que precisa ser analisado com bastante cautela, uma vez que à medida que a resistência do solo diminui quando se utiliza teores muito altos de emulsão devido ao efeito lubrificante da mesma, a impermeabilidade parece ser favorecida. Baixos teores de betume tendem a gerar misturas com maior resistência, ao passo que uma melhor impermeabilização é observada com a adição de maiores teores de material asfáltico. Além disso, a densidade máxima das misturas solo-betume também se mostra dependente do teor de emulsão empregado, e nem sempre o teor que conduz à máxima resistência coincide com o teor responsável para a máxima densidade (GONDIM, 2008).

O Road Research Laboratory – RRL (1962), apud Ferreira (1980), cita que para obter a máxima resistência possível à deformação, o material deve conter ligante suficiente para dar coesão e para permitir uma compactação adequada, observando que esse teor é geralmente mais baixo do que o empregado na prática, devido a considerações referentes à durabilidade e permeabilidade.

MOREIRA (2002) utilizou como critério de dosagem para a construção de um trecho experimental com material estabilizado com EA, apenas a máxima densidade e a máxima resistência. Esse autor relata o bom estado da obra submetida ao tráfego regional sem que houvesse intervenções num período de cinco anos e meio, em cujo período apareceram apenas alguns buracos em pontos aleatórios. Esses poucos defeitos são creditados pelo autor aos seguintes fatores:

- Trecho exposto a fortes chuvas, incomuns na região;

- Aumento do tráfego; e
- Deficiência na mistura da emulsão com o solo, devido à falta de experiência da equipe.

Gondim (2008) comenta a possibilidade de que essas falhas tenham sido provocadas por uma má determinação do teor ótimo, que possivelmente tenha resultado em um material pouco resistente às ações da água, por exemplo. ABEDA (2001) afirma ser necessário um projeto de dosagem para determinar as quantidades ótimas de solo e emulsão a serem empregados a fim de garantir a impermeabilidade da mistura e boas condições de mistura e compactação na umidade ótima para se atingir adequada estabilidade e resistência estrutural. De acordo com ABEDA (2001), existe um consumo teórico de materiais, conforme mostrado na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Consumo teórico de materiais para estabilização solo-emulsão (adaptado de ABEDA, 2001).

Tipo de materiais	Taxa (l/m <sup>2</sup> /cm)
Solo	15,00
*Emulsão RL-1C ou LA-E	1,14

(\*) – Considerando a emulsão asfáltica sem diluição e, em média, peso específico de 1 kg/ℓ

Percebe-se que, talvez por causa do pouco desenvolvimento científico envolvendo a técnica solo-betume, parece que até o momento não há um método normatizado para definição do teor de emulsão a ser utilizado. Nas poucas pesquisas nas quais houve a preocupação com a determinação de um teor ótimo, foram desenvolvidos métodos próprios de dosagem, não havendo uma uniformidade nos processos. Gondim (2008) apresenta na Tabela 2.4 os diversos parâmetros de dosagem utilizados por algumas fontes consultadas.

Tabela 2.4 – Parâmetros de dosagem de solo-emulsão (Miceli Jr., 2006 e Gondim, 2008).

Fonte	Parâmetro de dosagem
DER 3.07/1991 (1991)	MVS (Moisture Vapor Susceptibility) e Hubbard – Field
ASTM D 4223 (2006)	Estabilidade Marshall, MR e Resistência à Tração Indireta
Lucena et al., (1982)	Resistência à Compressão Simples, Resistência à Tração Indireta
Mattos et al., (1991), Guarçoni et al., (1988)	CBR e Mini-CBR
Araujo et al., (1983)	Ensaio Triaxial UU

Observa-se na Tabela 2.4 que a maioria dos parâmetros de dosagem arbitrados consiste de ensaios já em desuso há algum tempo, a exemplo dos ensaios de Hubbard-Field, ou constitui-se de ensaios inadequados para a avaliação de misturas estabilizadas, como tem se mostrado o ensaio de ISC. Falta ainda um procedimento de dosagem que considere os conceitos da Mecânica dos Pavimentos (baseado no módulo de resiliência), da

Mecânica dos Solos parcialmente saturados (efeitos da sucção) e dos avanços recentemente alcançados com o sistema de classificação para solos tropicais, o MCT (Nogami e Villibor, 1985). Observa-se ainda que quase a totalidade dos procedimentos de dosagem é oriunda de outros países, os quais não consideram as peculiaridades típicas dos solos tropicais, ou utilizam ensaios não adequados, como o ensaio CBR (MICELI Jr., 2006).

Com relação ao tipo de emulsão mais adequada para uso em estabilização, se uma emulsão rompe muito rápido, isso impede que a penetração seja alcançada e é por isto que as emulsões de ruptura rápida não são aconselháveis para uso uma vez as mesmas já rompem no contato com o solo (INGLES e METCALF, 1972). Mattos et al. (1991) aconselham a utilização no campo de emulsões de ruptura lenta, pois após a mistura com o solo estas apresentam maior facilidade de homogeneização. ABEDA (2001) enumera entre as vantagens da utilização das emulsões asfálticas catiônicas, a sua afinidade com todos os tipos de agregados, indicando que essas emulsões também formam um filme betuminoso sobre a superfície de agregados eletropositivos, conforme já comentado. Acrescenta-se ainda que geralmente os materiais são estabilizados in loco com emulsões asfálticas do tipo RL-1C, embora a bibliografia relate que, dependendo da quantidade de finos reativos e/ou plásticos passando na peneira N° 200, poderá ser empregada emulsão não iônica tipo LAE e/ou filler (cal ou cimento Portland). Soliz (2007) apresenta como conclusão de sua pesquisa, com emulsões do tipo RL-1C e RM-1C, que de forma geral, ocorre maior facilidade de mistura com os solos arenosos-siltosos e pedregulhosos do que com o argiloso, e ainda que a emulsão RL-1C proporcionou melhor trabalhabilidade do que a RM-1C. Ainda tratando da explicação referente aos motivos pelos quais as EA catiônicas se mostram indicadas para uma maior variedade de materiais do que as EA aniônicas, Nascimento (2005) mostra esquematicamente o processo de reação entre os agregados graníticos e calcários com as emulsões catiônicas e aniônicas, por meio das Figuras 2.5 e 2.6.

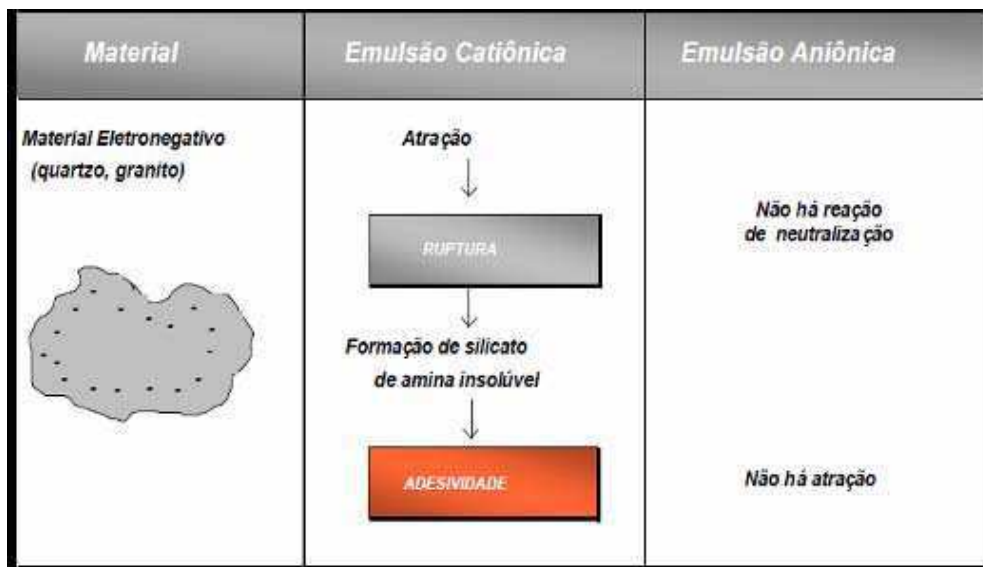


Figura 2.5 – Esquema das reações entre os agregados graníticos e as emulsões asfálticas catiônicas e aniônicas (adaptado de Nascimento, 2005).

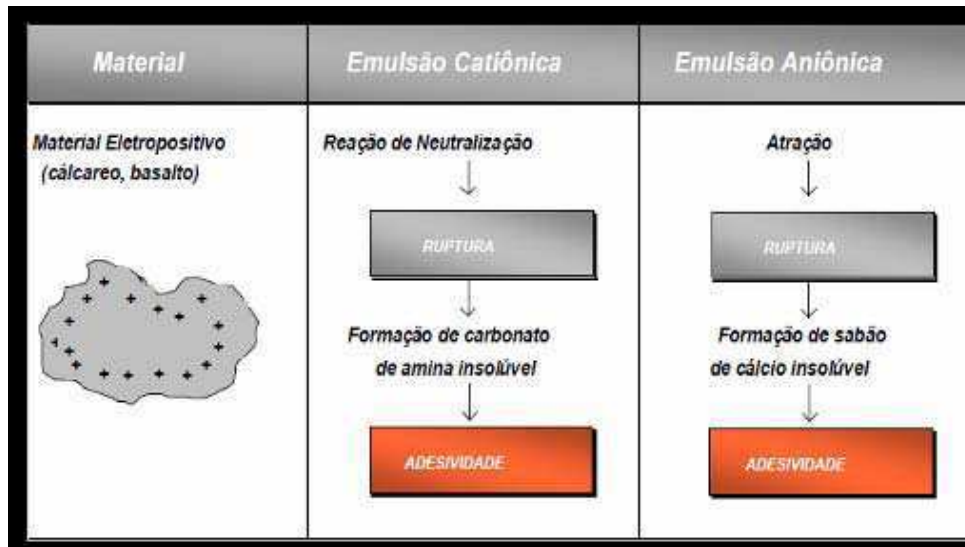


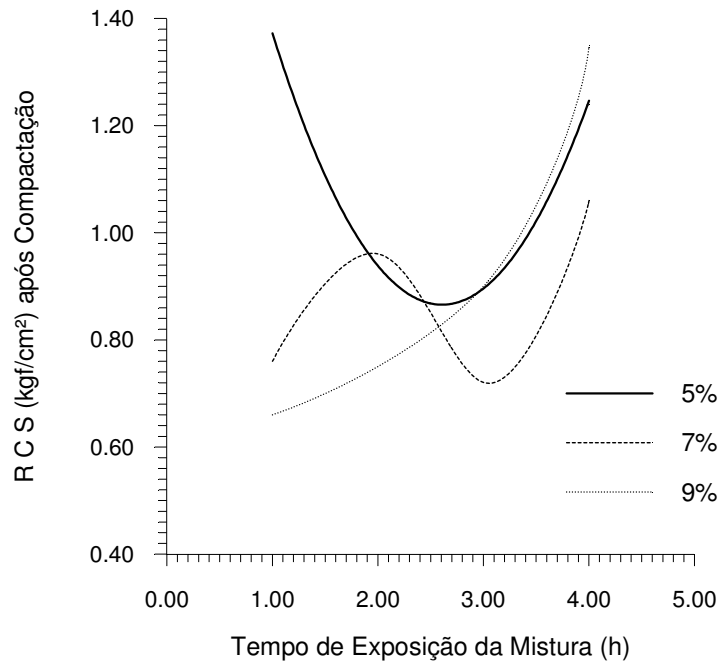
Figura 2.6 – Esquema das reações entre os agregados calcários e as emulsões asfálticas catiônicas e aniônicas (adaptado de Nascimento, 2005).

Nestas figuras pode-se perceber o que já foi comentado, ou seja, que as EA catiônicas reagem bem com os dois tipos de materiais, enquanto que as EA aniônicas sofrem restrições com relação aos materiais eletronegativos (quartzo e granito). Gondim (2008) conclui que as emulsões catiônicas podem ser utilizadas para a estabilização de solos tanto ácidos quanto alcalinos, enquanto as emulsões aniônicas só se mostram efetivas ao serem aplicadas em agregados alcalinos.

#### 2.2.5.4. Tempo de Aeração

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

Numa tentativa em se identificar o tempo de aeração ótimo de uma mistura solo-betume, Carvalho *et al.* (1992) apud Gondim (2008) analisaram a influência do tempo de aeração variando entre 1h e 4h, sobre a resistência à compressão simples (RCS) dos solos estabilizados com emulsão, nos teores de 5%, 7% e 9%. Os resultados da pesquisa estão reproduzidos na Figura 2.7.



**Figura 2.7 – Resistência à compressão simples em função do tempo de aeração (Carvalho *et al.*, 1992 adaptado de Gondim, 2008).**

Baseando-se somente nos valores dos resultados de RCS mostrados na figura 2.7, observou-se uma maior resistência para os teores de 7% e 9%, após 4 horas de aeração, enquanto que para o teor de 5%, a maior resistência se deu com 1 hora de aeração apenas. Além disso, a variação da resistência com relação à variação do tempo de aeração não obedeceu a um mesmo padrão de comportamento, conforme pode ser verificado na figura. Esses resultados indicaram que as misturas solo-emulsão são susceptíveis ao tempo de aeração, mas não se encontraram subsídios para determinação do tempo ótimo.

Jacintho (2005), ao avaliar este parâmetro com base em ensaios de resistência à compressão simples de três solos diferentes, concluiu que os acréscimos de resistência observados se relacionaram geralmente com a variação de umidade, e não com o fator aeração. Desta forma, verifica-se a importância do monitoramento da perda de umidade durante o processo de aeração, para que se possam obter conclusões mais expressivas sobre o assunto.

#### **2.2.5.5. Cura da Mistura Solo Emulsão**

Segundo Ferreira (1980) e Jacintho (2005), o processo de cura é uma etapa necessária em trabalhos de estabilização betuminosa, pois é durante esta fase que o teor de água é reduzido, facilitando a cobertura da superfície mineral com o asfalto base. O segundo autor citado considera inclusive, que a máxima perda de água durante a cura, é mais importante para a durabilidade da mistura do que a obtenção da massa específica aparente seca na compactação. Opinião semelhante é encontrada em ABEDA (2001), que considera entre

outros fatores, fundamental para a qualidade e desempenho da mistura a adoção de “adequado tempo de secagem da mistura compactada até o menor conteúdo de umidade possível”.

Mattos (1991) afirma que na estabilização de solos com betume, se não houver secagem não há estabilização. Com relação à temperatura de cura, Dunn e Salem (1973) apud Ferreira (1980), relatam ter percebido em seus estudos o aumento de resistência com o aumento da temperatura de cura em estufa, mas, que acima de 60°C o incremento na resistência ao cisalhamento tornava-se cada vez menor. Pesquisadores do assunto (por ex. MICELI Jr. 2006, CARVALHO, 1992 apud GONDIM, 2008), observaram incrementos de resistência da ordem de 600% a 1.000% das misturas solo-emulsão após a secagem em estufa a 40°C, se comparados à resistência obtida pelas misturas rompidas logo após a moldagem. Miceli Jr. (2006), ao avaliar a resistência dos solos após os períodos de 7 dias e de 28 dias de cura, verificou que a resistência das misturas tende a aumentar com o prolongamento do período de secagem. Ferreira (1980) ensaiou corpos de prova após cura em estufa, a 60°C, por 24 horas. Esse pesquisador concluiu que o processo de cura empregado mostrou-se satisfatório, podendo ser indicado para trabalhos futuros.

O tipo de cura empregado também exerce grande influência sobre a qualidade da mistura solo-emulsão. Miceli Jr. (2006) submeteu as amostras por ele testadas a dois diferentes tipos de cura: i) em câmara úmida; e ii) cura seca ao ar. O autor concluiu que o processo de cura úmida, ao contrário da cura seca, não possibilita melhorias no comportamento mecânico das misturas. Diante do exposto, deduz-se que o processo de cura das misturas solo-emulsão deve, necessariamente, independente do tipo de cura ou local, envolver a perda de água, para que ocorram reações inerentes a esta técnica. Por este motivo, segundo Gondim (2008), o Road Research Laboratory (1951) indica a utilização da técnica solo-emulsão em regiões de clima seco, visto que este clima não impede a perda de umidade da camada, ao contrário do que ocorre em climas temperados. No entanto, afirma-se que em climas secos há uma maior dificuldade em se controlar a perda de água, devendo os técnicos responsáveis aumentar a atenção com relação a este aspecto do método construtivo.

### **2.3. Aplicação da Técnica Solo-Emulsão**

Acerca de aplicações da técnica solo-emulsão, Alcântara (1995) cita que a estabilização dos solos com asfalto compreende a utilização de produtos asfálticos procedentes da destilação e refinamento do petróleo bruto ou asfaltos naturais e resíduos da destilação destrutiva de materiais orgânicos–alcatrão, atualmente em desuso. A forma mais comum de incorporação destes produtos aos solos é na forma de emulsão ou diluídos com um solvente apropriado. Castro (2003) comenta que a emulsão asfáltica se tornou uma excelente alternativa para pavimentação urbana e rural. Na opinião do autor, isso se dá em virtude das suas características de manuseio à temperatura ambiente e a versatilidade com que pode ser utilizada na produção de materiais básicos para a camada de rolamento, revestimento impermeabilizante, rejuvenescimento de estrutura de pavimento, camada

intermediária em revestimentos asfálticos espessos e pintura de ligação, associados à facilidade de armazenamento. A seguir são listados alguns casos do uso de solo-emulsão.

Santana (1971) apud Soliz 2007 relata aplicações de solo-emulsão para construção de segmentos no Nordeste, na década de 60, cuja técnica proposta por ele foi de escarificar 4 cm no topo da camada de revestimento primário, misturar com emulsão asfáltica, compactar e logo após executar uma capa selante com espalhamento de emulsão e areia. A emulsão utilizada nos segmentos realizados pelo autor foi do tipo ruptura lenta (RL) para o solo escarificado e na capa selante foi usada emulsão de ruptura rápida (RR). A construção de mais de 200 km de estabilização asfáltica de solo com este procedimento resultou em relativo sucesso. Posteriormente, Santana (1978) concluiu que era difícil escarificar somente 4 cm, ficando a maioria dos trechos com 6 cm de espessura estabilizada com asfalto, além de que era necessário umedecer o solo acima da umidade ótima para facilitar a escarificação e o espalhamento da emulsão, que era diluída na proporção 1:1. Assim, aquele autor realizou uma experiência que consistiu na escarificação de 4 a 6 cm do revestimento primário, incorporação de emulsão de ruptura lenta, mistura, cura e compactação. Alguns trechos experimentais foram realizados com muito sucesso, para que, em seguida, a técnica fosse utilizada em grande escala com a construção de cerca de 200 km entre 1974 e 1976, nos Estados do Piauí e Maranhão.

Thuler (2005) relata experiência realizada no Estado do Rio de Janeiro, na década de 70, com implantação de alguns segmentos de solo com emulsão em rodovias estaduais. Na Figura 2.8 são apresentadas fotos de um destes trechos, obtidas pelo citado autor, decorridos cerca de 20 anos após a construção. Essa mistura de solo-emulsão foi feita na pista e compactada após algum tempo de estocagem em leiras no local. Não se prosseguiu com esta técnica no estado do Rio de Janeiro após estas primeiras experiências, e não foi possível saber quantos quilômetros foram construídos, mas cabe ressaltar que o pavimento construído com esta técnica segundo o autor, foi um sucesso.



**Figura 2.8 – Trecho antigo de solo-emulsão na RJ 148 no estado de Rio de Janeiro cerca de 20 anos após construção (THULER , 2005).**

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

Gondim (2008) cita em seu trabalho uma entrevista realizada em novembro de 2007, com o Engenheiro Francisco Baima Barbosa, do Estado do Ceará, um dos engenheiros que trabalharam na mesma equipe que o Engenheiro Humberto Santana, durante a década de 70 e metade da década de 80. Foi revelado que esta equipe realizou obras de pavimentação com solo-emulsão em mais de 2.000 km, nos estados do Rio de Janeiro, Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte, Ceará, Piauí, Maranhão e Pará. Ao contrário do que era apresentado na literatura, foi visto por essa equipe que o comportamento das misturas de solo argiloso com emulsão apresentava resultados melhores que as misturas de solo arenoso com emulsão. Essa observação foi ainda enaltecida pelo entrevistado quando relatou um trecho construído no Piauí pelo DNER (atual DNIT) com um solo argiloso e lama asfáltica, que após 12 anos sujeito ao tráfego, e sem receber manutenção, apresentava ainda bom desempenho.

#### **2.4. Considerações Finais**

Neste capítulo buscou-se fazer um levantamento de informações sobre estabilização de solos de forma geral, e mais particularmente no uso da estabilização solo-betume com ênfase na técnica solo-emulsão assunto deste trabalho. Foram discutidos assuntos relativos às peculiaridades inerentes a esta técnica, onde procurou-se entender os processos físicos e químicos que influem na estabilização de solos por meio da adição de emulsão asfáltica, com o objetivo de criar subsídios para o estudo da presente pesquisa.

Conclui-se haver um campo bastante promissor no que tange a utilização das emulsões asfálticas como estabilizantes de solos na pavimentação rodoviária. No entanto foi observada a ausência de uma metodologia, que seja capaz de delinear de forma plena os diversos parâmetros aos quais a técnica de estabilização solo-emulsão deva se enquadrar, principalmente no que se refere à determinação do teor ótimo de emulsão nas misturas. Esta deficiência pode ser explicada pelo grande número de variáveis que influenciam nas características das misturas, tornando desaconselhável a generalização de soluções pontuais como soluções de utilização universal.



### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. Materiais

Os materiais utilizados nesta pesquisa foram uma emulsão asfáltica catiônica, do tipo RL-1C, e três tipos de solos colhidos em jazidas do estado de Sergipe, sendo um solo arenoso, um predominante argiloso e um terceiro de características intermediárias.

##### 3.1.1. Emulsão Asfáltica

A emulsão asfáltica utilizada nesta pesquisa foi do tipo ruptura lenta, de carga elétrica de partícula positiva, ou seja, emulsão catiônica RL-1C, fornecida pela Petrobrás Distribuidora S/A por meio do Pólo Petroquímico de Camaçari, instalado no Estado da Bahia. Devido ao consumo além do previsto nesta pesquisa, foi necessário obter uma quantidade adicional de emulsão do mesmo tipo, sendo esta obtida de um lote fabricado pela Brasquímica Ltda, adquirido pela EMURB – Empresa Municipal de Urbanismo de Aracaju, e gentilmente cedida para a continuidade dos ensaios. Cabe frisar que ambas as amostras foram acondicionadas em recipientes de aproximadamente cinco litros, conforme mostrado na Figura 3.1.



Figura 3. 1 – Recipiente de acondicionamento da emulsão.

### 3.1.2. Caracterização das Emulsões

As características das amostras de emulsões asfálticas utilizadas neste trabalho foram fornecidas pelos fabricantes da emulsão citados, através de certificados de qualidade das mesmas junto com as normas técnicas seguidas. A parte do certificado de qualidade da Petrobrás Distribuidora com os resultados de ensaios consta da Tabela 3.1. As características da emulsão fornecida pela Brasquímica Ltda., através de certificado de análise encontram-se na Tabela 3.2. A primeira emulsão citada foi usada para preparação das misturas piloto e experiências prévias, enquanto que a emulsão fornecida pela Brasquímica foi utilizada para os ensaios efetivamente válidos.

Tabela 3.1 – Características da emulsão fornecida pela Petrobrás Distribuidora.

Característica	Unidade	Especificação		Resultado	Método
		Lim Inf.	Lim Sup.		
Resíduo (% mínimo)	%	60	-	60,4	NBR-14376
Viscosidade Saybolt Furol , a 50°C	s	-	70	21	NBR-14491
Peneira – retido na malha 20 (0,84 mm)	%	-	0,1	0,0	NBR-14393

Tabela 3.2 – Características da emulsão fornecida pela Brasquímica.

Característica	Especificação	Resultado (*)	Método ABNT
	ABNT/IBP		
Viscosidade Saybolt Furol , s a 25°C	Max 70	23	P-MB-581
Sedimentação após 5 dias	% em peso max 5,0	2,7	NBR-6570
Peneiração – retido na N° 20	% em peso max 0,1	0,02	P-MB-609
Carga de partícula	Positiva	+	NBR-6567
pH máximo da emulsão	Max 6,5	1,9	NBR-6299
Resíduo por destilação	% em peso min 60	60,3	NBR-6568
Mistura com cimento	< 2,0 %	0,3	NBR-6569
Densidade	25°C	1010	-

(\*) Média de dois ensaios

Com relação aos resultados de ensaios apresentados, podem-se fazer os seguintes comentários:

- Viscosidade Saybold Furol: mede as propriedades de consistência das emulsões asfálticas;
- Sedimentação: detecta a tendência dos glóbulos de asfalto de se precipitar durante a estocagem das emulsões asfálticas;

- Carga da partícula: trata-se de um ensaio de identificação de emulsões asfálticas catiônicas de ruptura rápida e média;
- Destilação: é usado para determinar as proporções relativas de cimento asfáltico e água na emulsão asfáltica. Alguns tipos de emulsão também contêm um destilado de óleo, cuja quantidade também é fornecida por este ensaio.

### 3.1.3. Solos

A posição geográfica, propicia ao Estado de Sergipe um clima tropical que varia de úmido, sub-úmido ao semi-árido, onde as temperaturas são elevadas durante todo o ano, com médias térmicas anuais em torno de 24° C.

O relevo com suas baixas altitudes, principalmente em sua porção leste, faz com que os ventos aliseos que vêm do Atlântico avancem no continente provocando precipitações pluviométricas mais elevadas na área costeira (1200 mm a 1600 mm), diminuindo à proporção que se encaminha para o interior (500 mm a 800 mm), conforme cita COSTA (2006). O relevo do território sergipano é pouco heterogêneo, sendo composto das seguintes divisões: litoral, tabuleiros, pediplano sertanejo e serras.

A geologia do Estado de Sergipe é formada por três províncias estruturais: i) **A província do São Francisco**, composta por rochas de idades arqueana a paleoproterozóica, em parte retrabalhadas no Ciclo Transamazônico. Formada por rochas gnáissicas, migmatíticas e granitóides cuja organização não obedece a uma estratigrafia formal, compreende os municípios de Riachão dos Dantas, Boquim, Itabaianinha e Cristinápolis (embasamento do cráton) e pelos sedimentos pouco deformados das regiões de Lagarto, Palmares e Tobias Barreto (EMBRAPA, 1999); ii) **A Província Borborema** - composta de numerosas unidades litológicas que datam do Pré-Cambriano ao Paleozóico, corresponde à região de Dobramentos Nordeste, representada em Sergipe pela Faixa de Dobramentos Sergipanos e caracteriza-se pela presença de plutonismo granítico e extensas zonas de cisalhamento; e iii) **A Província Costeira e Margem Continental** - constituída pelas bacias sedimentares costeiras e suas extensões submersas, representadas pela Bacia Sedimentar de Sergipe e extensões da Bacia de Tucano (COSTA, 2006).

Uma formação geológica superficial que está presente em todo o litoral brasileiro, a formação Barreiras, que cobre boa parte do Estado Sergipe, é uma formação continental constituída de areias grossas e cascalhos quartzosos, geralmente não consolidados, cimentados por material argiloso de cor variegada, intercalados com argilas amarelas, avermelhadas, plásticas e não calcíferas (COSTA, 2006). Os perfis dessa formação geralmente apresentam estratificação irregular e indistinta. Os principais solos relacionados a essa Formação são os Latossolos Amarelos, Podzólicos Amarelos, Podzólicos Vermelhos, Podzóis e Areias Quartzosas, que geralmente não se enquadram nas especificações rodoviárias tradicionais, com necessidade de estudos especiais para sua aplicação.

Para a escolha das jazidas desta pesquisa, buscou-se contemplar, além dos aspectos geológicos e pedológicos mencionados nos parágrafos anteriores, a proximidade da capital Aracaju e as características expeditas examinadas (exame tátil-visual dos solos), escolhendo-se solos típicos da região, mas diferentes na composição granulométrica e textura, de forma ampliar a abrangência da pesquisa com os solos locais.

Para tanto, foram escolhidos três solos, que receberam as denominações AMJ (**AM**arelão da **JAB**otiana), JAB (**JAB**otiana), e FRAL (**F**azenda **R**ancho **A**legre). O primeiro, é um material classificado como areia argilosa. O segundo, uma areia argilo-siltosa, e o terceiro, uma argila siltosa. Os dois primeiros são provenientes do município de São Cristóvão, localizado na chamada grande Aracaju, no Bairro denominado Jabotiana. Por isso, os nomes adotados para esses solos. O terceiro solo foi proveniente de uma localidade situada no município de Itaporanga D'Ájuda, também situada na área da grande Aracaju, cuja jazida pertence à fazenda Rancho Alegre, distante cerca de 20 km da Capital. Fotos com imagens das três jazidas onde foram coletadas as amostras podem ser vistas nas Figuras 3.2, 3.3 e 3.4, respectivamente.



**Figura 3. 2 – Foto do talude de coleta do solo AMJ.**



**Figura 3. 3 – Foto do talude de coleta do solo JAB.**



**Figura 3. 4 – Foto mostrando aspectos do talude onde foi coletada a amostra do solo FRAL.**

A Figura 3.5 mostra um mapa com as indicações dos locais de coleta das amostras, enquanto na Tabela 3.3 estão apresentadas as coordenadas topográficas UTM (Universal Transverse Mercator) de onde estão situadas as jazidas. Cabe ressaltar que Costa (2006) realizou uma extensa pesquisa com solos de diversos locais do Estado de Sergipe, incluindo jazidas próximas às que estão sendo exploradas neste trabalho. Aquele autor efetuou a caracterização de grande parte dos solos típicos da faixa litorânea sergipana.

As três amostras de solos coletadas pertencem à Formação Superficial Barreiras predominante na área de estudo. Segundo Costa (2006), o termo Barreiras teve origem na literatura geológica em Branner (1902) para designar “as camadas variegadas que afloram nas diversas barreiras ao longo da costa”. A classificação estratigráfica evoluiu segundo diversos autores para série, depois formação e finalmente grupo, conforme proposto por Bigarrela e Andrade (1964), justificada pela subdivisão estabelecida por alguns autores, que identificaram distintas formações, embora estas unidades mostrem apenas caráter local, não permitindo a sua extensão regional.



Figura 3.5 – Mapa do Estado de Sergipe com a localização do local de coleta das amostras de solo.

Tabela 3.3 – Coordenadas UTM dos pontos de coleta das amostras dos solos

Amostra	Coordenadas (Zona 24)	
	Abcissas -E (m)	Ordenadas -N (m)
AMJ	701.657	8.784.330
JAB	701.749	8.784.285
FRAL	683.215	8.785.408

A Formação Barreiras nasce na zona pré-litorânea do Estado de Sergipe, predomina na área dos tabuleiros costeiros e avança em direção ao interior chegando até 70 km em direção a região central do estado. A espessura do Barreiras é variável, atingindo localmente até 150 m. Apresenta estratificação irregular, indistinta. A idade do grupo Barreiras é atribuída à idade Plioceno, baseado em raros vestígios fossilíferos. Seus sedimentos são compostos granulometricamente por areias silto-argilosas, classificadas pedologicamente como podzólicos vermelho-amarelos ou amarelos e areias quartzosas distróficas (Costa, 2006). É a litologia regionalmente predominante da área onde foram coletadas as amostras objeto deste estudo, constituindo as feições de

topografia mais elevada, sob forma de extensos planaltos dispostos em patamares ligeiramente inclinados em direção à costa, correspondentes aos Tabuleiros Costeiros.

## **3.2. Métodos**

### **3.2.1. Atividades de Coleta**

As amostras foram coletadas numa quantidade individual de aproximadamente 300 kg para cada local, nos respectivos taludes de cada jazida, empregando-se como ferramentas pá e picareta. As amostras foram etiquetadas e acondicionadas em sacos plásticos e de nylon, com capacidade para armazenar amostras com massa entre 50 kg e 60 kg. A Figura 3.6 mostra detalhes do recipiente utilizado na coleta e transporte das amostras de solos.



**Figura 3. 6 – Detalhes dos sacos plásticos usados para acondicionamento das amostras após coleta.**

### **3.2.2. Preparação das Amostras**

Após a coleta, as amostras de solos foram conduzidas ao Laboratório de Geotecnia e Pavimentação da UFS (GEOPAV-UFS), onde foram expostas para secagem ao ar livre, de forma que se atingisse a condição de destorroamento dos solos. Detalhes dos procedimentos de espalhamento para secagem das amostras podem ser vistos na Figura 3.7.



**Figura 3. 7 – Espalhamento para secagem do solo FRAL para posterior destorroamento.**

Após o destorroamento, as amostras de solo foram repartidas em repartidores de amostras com aberturas de 2", (utilizado para repartição inicial - Figura 3.8), 1",  $\frac{3}{4}$ " ou  $\frac{1}{2}$ ", dependendo do tamanho e da quantidade desejada para a obtenção de amostras representativas correspondentes a aproximadamente 8 kg, 6 kg ou 2 kg. As Figuras 3.9 a 3.12 mostram fotos de amostras representativas obtidas para os ensaios.



**Figura 3. 8 –Procedimento inicial de repartição de amostras com repartidor de 2".**





**Figura 3. 9 – Amostras representativas do solo (AMJ).**



**Figura 3. 10 - Amostras representativas do solo (FRAL).**



**Figura 3. 11 - Amostras representativas do solo (JAB).**



**Figura 3. 12 – Da esquerda para a direita, amostras representativas solos FRAL JAB e AMJ, respectivamente.**

### 3.2.3. Procedimentos Adotados na Preparação das Misturas Solo-Emulsão

#### 3.2.3.1. Determinação das Quantidades de Materiais para a Mistura

A determinação das quantidades de materiais a serem utilizados numa mistura de solo-emulsão implica no conhecimento de determinados parâmetros que influenciam neste tipo de mistura, sobretudo no que se refere aos teores de água envolvidos. Três são os elementos que compõem a dosagem das misturas de solo-emulsão: o solo, a emulsão e a água a ser adicionada. Entretanto, a determinação da quantidade de água a ser aplicada na mistura deve levar em consideração não apenas a umidade higroscópica do solo, mas também a quantidade de água contida na emulsão.

Para o cálculo da quantidade de água a ser adicionada para se atingir um determinado teor de umidade são necessários os seguintes passos:

a- Determinação da massa de solo seco de amostra ( $M_d$ ), por meio do uso da expressão 3.1.

$$M_d = \frac{M_w}{(100 + w_{hig})} \quad (3.1)$$

Onde:

$w_{hig}$  = umidade higroscópica, expressa em percentual.

$M_w$  = Massa de solo úmido (com umidade higroscópica) a ser usado na mistura

b- Determinação da quantidade de emulsão ( $M_{em}$ ) calculada em relação ao solo seco é dada pela equação 3.2:

$$M_{em} = \% \text{ de emulsão} \times M_d \quad (3.2)$$

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

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

d- Cálculo da quantidade de água total a adicionar ( $A_{tad}$ ) para obtenção de determinada umidade:

$$A_{tad} = \frac{(w_{ot} - w_{hig})}{100} M_d \quad (3.4)$$

Onde neste trabalho,  $w_{ot}$  é o teor de umidade ótima encontrada para cada teor de emulsão num solo.

e- Determinação da quantidade de água a ser acrescentada à mistura solo-emulsão ( $A_m$ ):

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

Cuidados especiais são requeridos para que o processo de mistura dos três elementos seja satisfatório. Para a obtenção de uma mistura homogênea, deve-se levar em consideração a dificuldade de dispersão da emulsão no solo e a avidez do solo seco (ou somente com sua  $w_{nig}$ ) por água.

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

Pelo fato do solo ser considerado um material hidrófilo, a adição de uma emulsão asfáltica diretamente no solo seco ou com teor de umidade baixo, pode acelerar o processo de ruptura da emulsão. Visando evitar tal acontecimento, deve-se aplicar certa quantidade de água ao solo, aumentando sua umidade antes da aplicação da emulsão. Essa água é designada água de dispersão ( $A_{disp}$ ).

O somatório da água de diluição e da água de dispersão deve compor a quantidade de água a ser acrescida à mistura ( $A_m$ ). Lucena et al.(1982), apud Soliz (2007), recomendam que a diluição seja feita por uma parte de água para uma parte de emulsão asfáltica, e o restante da água a ser acrescida deve ser utilizada como água de dispersão.

Desse modo, a água de diluição é calculada:

$$A_{dil} = M_{em} \quad (3.6)$$

E a água de dispersão é calculada como:

$$A_{disp} = A_{tad} - (A_{dil} + A_{em}) \quad (3.7)$$

É importante destacar que neste trabalho nem sempre foi possível executar a proporção sugerida por Lucena et al (1982). Existiram casos em que a quantidade de emulsão asfáltica foi maior que a quantidade de água a ser aplicada ao solo. Isso ocorre geralmente quando se deseja aplicar ao solo elevados teores de emulsão, ou quando se tem baixas umidades ótimas de compactação. Nesta pesquisa, este tipo de dificuldade foi detectada com os solos AMJ e JAB, com teores de 6% e 8% de emulsão, em que se constatou que o valor obtido através da Equação 3.7 resultava em valor negativo para a água de dispersão. Neste caso, parte da água de diluição era “desviada” para a água de dispersão com a retirada de cerca de 1/3 da água de diluição em prol da água de dispersão, ou uma quantidade que fosse suficiente para que o solo antes da adição da emulsão ficasse com pelo

menos 3% de umidade (conforme citado por VOGT,1971, apud SOLIZ, 2007). Este procedimento foi adotado para evitar que houvesse a ruptura prematura da emulsão e esta impedisse a boa homogeneidade da mistura e, por conseguinte levasse à mudanças nos parâmetros de compactação das misturas. De posse da dosagem, aplicava-se o procedimento de execução da mistura ilustrado conforme as Figuras 3.13 a 3.15, a seguir apresentadas.



**Figura 3. 13 – Etapas de uma dosagem solo-emulsão: aplicação da água de dispersão ao solo com posterior homogeneização.**



Figura 3. 14 – Aplicação da emulsão diluída ao solo.



Figura 3. 15 – Fases de homogeneização manual da mistura.

Após a preparação da mistura, era retirada uma amostra da mesma para a determinação do teor de umidade de moldagem. Em seguida, a mistura era devidamente acondicionada e lacrada em sacos plásticos e levada à câmara úmida. Transcorrido o tempo suficiente para a determinação da umidade de moldagem, colocava-se ou retirava-se por meio de secagem natural, a água necessária para se atingir a umidade ótima (caso a mesma diferisse da requerida). Procedia-se então a aeração da mistura pelo tempo de uma hora (Figura 3.16). Após esse período, determinava-se a água perdida durante a aeração, fazia-se a reposição da mesma, retirava-se nova amostra para umidade de moldagem e procedia-se a moldagem do CP para os diversos tipos de ensaios.



**Figura 3. 16 – Amostra submetida ao procedimento de aeração e aspecto da diferença de cor conferida ao solo (já úmido) pela emulsão (solo AMJ).**

#### **3.2.4. Ensaios Realizados**

Foram realizados ensaios para estudos das propriedades físicas, mecânicas e químicas tais como: Ensaios de caracterização dos solos (Análise granulométrica com sedimentação, Densidade real,  $W_L$  e  $W_P$ ), Compactação, Resistência à Compressão Simples (RCS), Índice de Suporte Califórnia (ISC), Resistência à Tração por

Compressão Diametral (RTCD/RTI), Ensaio Triaxial Dinâmico, (determinação do Módulo de Resiliência - MR), ensaios de Análise Química, Difração de Raios X e o ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

### 3.2.4.1. Ensaios de Caracterização

Para conhecimento e identificação dos solos e confirmação das diferenças de características e posteriormente efetuar as classificações segundo a TRB (Transportation Research Board ) e USCS (Unified Soil Classification System), foram feitos os ensaios de caracterização das amostras em seu estado natural. Para execução dos ensaios foram seguidos procedimentos preconizados nas normas da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) e DNER/DNIT, apresentadas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Normas empregadas nos ensaios de caracterização das amostras de solos.

Ensaio	Norma ABNT/DNER/DNIT
Análise Granulométrica com Sedimentação	NBR 7181/84
Densidade Real	DNER – ME 093/94
$W_L$	NBR 6459/84
$W_P$	NBR 7180/84

### 3.2.4.2. Ensaio de Compactação

Os ensaios foram efetuados com amostras não trabalhadas conforme a NBR 7182 (1986), com um compactador automático mostrado na Figura 3.17, sob a energia do Proctor Intermediário. Foi adotada o uso desta energia de compactação devido ao que consta nas Normas DNER ME 301 (1997) e DNER ME 303 (1997) que facultam a escolha da energia de compactação para sub-base e bases de acordo com as especificações do projeto como do Proctor Intermediário ou Modificado. A segunda norma citada acrescenta que o proctor modificado deve ser utilizado quando o tráfego previsto para o projeto no período, ultrapassar o valor de  $N = 5 \times 10^6$ , o que não é o nosso caso. Além disto o presente trabalho é parte de um projeto maior da Rede Asfalto N/NE, o PC-03, intitulado *Avaliação do Uso de Ligantes Betuminosos e Rejeitos Ambientais para Estabilização de Bases e Sub-bases de Pavimentos Asfálticos*, em que foi definido que a energia a ser utilizada seria a do Proctor Intermediário.

Convém frisar que, em princípio, era planejado se determinar a umidade ótima ( $w_{ot}$ ) e o peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{dmax}$ ) dos solos naturais, para em seguida utilizar esses parâmetros na moldagem dos corpos de prova, tanto dos solos puros quanto das misturas solo-emulsão, em seus diversos teores. No entanto, percebeu-se no decorrer das moldagens dos corpos de prova da mistura solo-emulsão para os ensaios de RCS e ISC, principalmente, que não se estava conseguindo atingir o  $\gamma_{dmax}$  (principalmente solos AMJ e FRAL), apesar de se

verificar que se alcançavam valores muito próximos da  $w_{ot}$  determinada para o solo sem adição de emulsão. Dessa forma, foi necessária a determinação de  $w_{ot}$  e  $\gamma_{dmax}$  para cada teor de emulsão (2%, 4%, 6% e 8%) para os três solos. Cabe ressaltar que as amostras após a mistura solo úmido-emulsão, antes de serem submetidas à fase de compactação passaram pelo processo de aeração ao ar livre por um período de uma (01) hora.



**Figura 3. 17 – Compactador eletromecânico utilizado na compactação e ISC.**

#### **3.2.4.3. Ensaios de Análise Química, Difração de Raios X (DR-X) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)**

Na caracterização das propriedades químicas e mineralógicas, foram realizados ensaios relativos aos constituintes químicos e à microestrutura dos solos, tais como, Análise Química, Difração de Raios-X (DR-X) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Análises Mineraias (LAM), e no Laboratório de Caracterização de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande e no Laboratório do Centro de Tecnologias do Gás (CTGÁS) em Natal/RN, respectivamente. Na análise química foram utilizados basicamente os procedimentos de gravimetria, fotometria de chama e volumetria. No ensaio de DR-X a amostra foi submetida à análise com a utilização do equipamento Shimadzu XDR-6000 (Figura 3.18) utilizando radiação Cuka com contador cintilador, tensão de 40 kV, corrente de 30 mA, varredura de  $2^\circ < 2\theta < 30^\circ$ ,  $\lambda = 1,54 \text{ \AA}$  e velocidade de varredura de  $2^\circ/\text{min}$ . Para o ensaio de MEV, as amostras foram preparadas com a utilização do equipamento Metalizador Shimadzu IC-50, (Figura 3.19 a) e o ensaio foi efetuado com o equipamento Shimadzu, Modelo SSX-550 (Figura 3.19 b), voltagem de aceleração VA igual a 20 KV.

A partir destes ensaios foi determinada a composição química dos solos, que possibilitou a obtenção da relação sílica/sesquióxidos dos mesmos, uma vez que este índice pode ser utilizado como parâmetro indicativo de comportamento laterítico dos solos, conforme consta na Norma DNIT ES98 (2007). Juntamente com os ensaios



de DR-X e MEV, pode-se ter conhecimento da microestrutura dos solos estudados mais de perto na identificação dos constituintes mineralógicos presentes na fração fina dos solos (porcentagem passando na peneira n° 200) . A análise da microscopia eletrônica por meio de microfotografias dos solos estudados podem revelar o padrão típico “pipoca” característico dos solos lateríticos, nos quais, por se encontrarem num estágio avançado de evolução, não é possível identificar as feições originais dos argilominerais constituintes dos mesmos (SUÁREZ, et al., 2008). Os equipamentos utilizados nos ensaios DR-X e MEV são vistos nas figuras 3.18 e 3.19 respectivamente.



Figura 3. 18 – Equipamentos utilizados para realização do ensaio de DR-X (Fernandes, 2007).



Figura 3. 19 – Equipamentos utilizados para realização do ensaio de MEV (Quintans, 2008)

#### 3.2.4.4. Ensaios de Resistência à Compressão Simples (RCS)

As misturas foram preparadas para os ensaios de Compressão Simples, com o tempo de aeração de uma hora, após a qual, eram moldados três CPs para cada teor. Para que não houvesse perda de umidade durante a moldagem dos CPs, as quantidades de cada um dos três eram acondicionadas em pequenas sacolas plásticas, as quais eram pesadas e colocadas em repouso no interior de uma câmara úmida.

Em virtude da inexistência de uma norma específica para a dosagem solo-emulsão, as normas DNER-IE 004 (1994), DNER-ME 201 (1994) e DNER-ME 202 (1994) foram utilizadas em conjunto e, com as necessárias adaptações. As moldagens foram realizadas empregando-se moldes cilíndricos de aço, com diâmetro de aproximadamente 50 mm e altura de cerca de 100 mm, em três camadas de espessuras aproximadamente iguais, sendo uma parte compactada por método dinâmico e parte por compactação estática. As três camadas foram executadas da seguinte forma: a primeira era subdividida em duas camadas onde eram aplicados cerca de trinta golpes vigorosos com um soquete semelhante ao utilizado na moldagem de CPs de argamassa. Em seguida, o CP era conduzido à prensa de CBR, onde era amassado estaticamente até que se atingisse 1/3 da altura do CP. Logo a seguir, a superfície era escarificada e a próxima camada (segundo terço do CP), era executada subdividindo-a em três (03) subcamadas, as quais eram compactadas dinamicamente, e, novamente eram acomodadas estaticamente, conforme já descrito, até se atingir 2/3 da altura do CP. A terceira e última camada, iniciada após a escarificação do topo da segunda, era subdividida em 5 subcamadas compactadas dinamicamente e amassadas para se atingir a altura do molde plenamente.

Para cada teor de emulsão, foram moldados:

- a) três CPs para serem rompidos imediatamente após moldagem;
- b) três CPs para serem rompidos após o tempo de cura de sete dias, em câmara úmida (ilustrado na Figura 3.20); e
- c) três CPs, que depois da referida cura, eram submetidos à imersão em água (Figura 3.21) por quatro horas, sendo logo em seguida submetidos à ruptura. Vale ressaltar que para os procedimentos de cura, com posterior imersão, nos teores de 0% de emulsão para os três solos analisados, bem como de 2% e 4% para o solo FRAL, não foi possível a obtenção de resultados neste tipo de ensaio, visto que os CPs se desintegraram completamente. Com 0% de emulsão, por exemplo, a desintegração ocorreu em cerca de 30 segundos, no caso do solo AMJ, em 60 segundos, para o solo JAB e aproximadamente 30 minutos, para o solo FRAL, o mais argiloso.



**Figura 3. 20 - Acondicionamento dos CPs na câmara úmida para o processo de cura.**



**Figura 3. 21 – CPs para ensaios de RCS colocados em submersão antes do rompimento.**

Para aceitação dos CPs, além dos critérios mencionados no item anterior, os resultados dos três CPs moldados, deveriam estar dentro do limite de  $\pm 10\%$  da média dos mesmos. Caso algum dos CPs não atendesse aos critérios estabelecidos, o mesmo era excluído do cálculo e a média era determinada entre os dois restantes, e refeita a consideração do limite proposto. Caso a exigência não fosse cumprida, a moldagem de outros três CPs era realizada.

Quanto aos procedimentos de ruptura dos CPs, os ensaios foram realizados sob deformação controlada, utilizando-se a velocidade de 1 mm/min, nas prensas de compressão simples (Figura 3.22) e de ISC.

Convém registrar que a prensa de compressão simples foi utilizada para romper os CPs das misturas para os casos sem cura e após submersão de todos os solos, e também, para os CPs do solo AMJ submetidos à cura. A prensa de ISC foi utilizada para romper os CPs dos solos JAB e FRAL que sofreram o processo de cura e foram rompidos sem imersão, para se precaver do risco de se ultrapassar a capacidade do anel dinâmico da prensa de compressão simples.



Figura 3. 22 – Prensa de Compressão Simples utilizada no rompimento dos CPs de RCS.

#### 3.2.4.5. Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTI)

No estudo da estabilização solo-emulsão é importante a resistência à tração indireta, pois o solo assim estabilizado, quando utilizado como elemento estrutural do pavimento, corre o risco de que as deformações radiais a ele impostas, possam ultrapassar o valor desta resistência. Se esse elemento estrutural não tem a espessura calculada para reduzir as deformações radiais, o resultado é uma rápida propagação de trincas após um curto tempo de serviço (FERREIRA, 1980). Esse autor relata à época a verificação de ocorrências deste tipo de problema nas rodovias de baixo volume de tráfego do Estado da Paraíba, onde o sistema solo-emulsão foi utilizado. Assim, com a finalidade de investigar o comportamento dos solos e suas misturas com emulsão quando submetidos ao esforço de tração imposto por esse teste, foi realizado este ensaio. Os CPs foram moldados para se atingir os parâmetros de compactação ( $w_{ot}$  e  $\gamma_{dmax}$ ) com o solo em seu estado natural e em cada porcentagem de emulsão considerada para fins comparativos. Como não há nenhuma norma específica com relação a esse procedimento para solos, foi adotado um procedimento semelhante ao que existe na norma DNIT-ME 138 (1994), que trata de misturas betuminosas – determinação da resistência à tração por compressão diametral, com as devidas adequações.

Os CPs de cada solo foram moldados (três para o solo “in natura” e para cada teor de emulsão) e compactados em uma camada nos cilindros Marshall, com diâmetro de cerca de 100 mm. Para isso, foi utilizado o compactador automático Marshall mostrado na foto da Figura 3.23, aplicando-se uma quantidade de golpes em

cada lado do cilindro, determinada previamente para cada teor de emulsão, de modo que a altura do CP ficasse em torno de 45 mm e que atendesse aos parâmetros de compactação considerados. Esta altura foi adotada para que houvesse economia de material e ao mesmo tempo o atendimento ao que preconiza a norma DNER-ME 138 (1994) que especifica a altura dos CPs entre 35 mm e 65 mm.

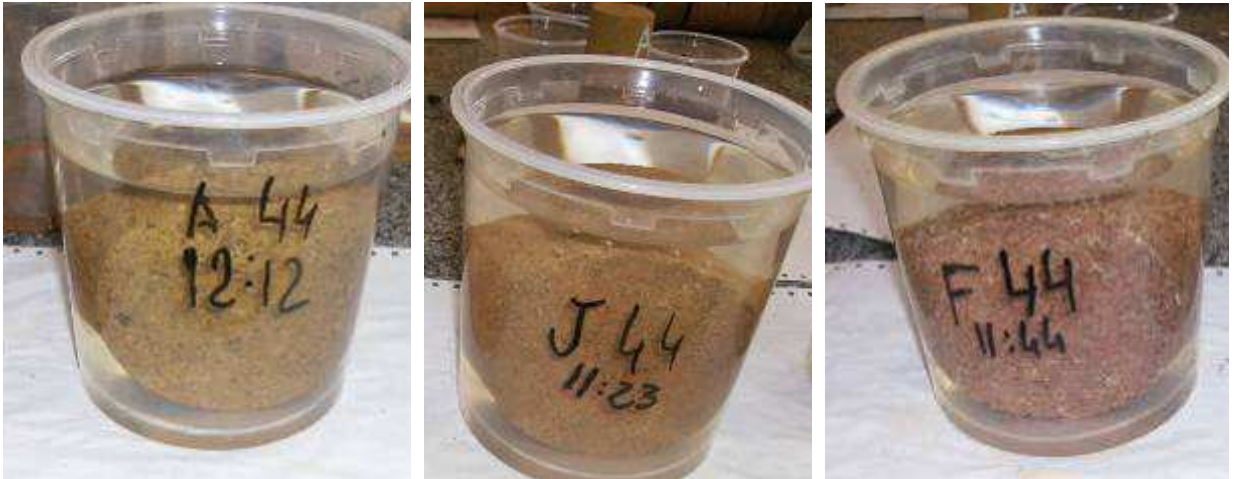


**Figura 3. 23 – Compactador automático Marshall e detalhe do sistema de compactação utilizado na RTI.**

Para o solo puro e para cada teor de emulsão foram moldados os seguintes quantitativos de amostras:

- a) três CPs para serem rompidos imediatamente após moldagem;
- b) três CPs para serem rompidos após cura em câmara úmida nas condições já mencionadas; e
- c) três CPs, que após cura em câmara úmida, eram submetidos à imersão em água durante quatro horas (Figura 3.24) e, logo após, rompidos.

Ressalta-se ainda que para o solo em seu estado natural (0% de emulsão), assim como aconteceu na moldagem para os outros ensaios, não foi possível obtenção de resultados uma vez que os referidos CPs se desintegraram.



**Figura 3. 24 – Detalhe dos CPs submetidos à submersão antes de ensaios de RTI.**

Os critérios adotados para a aceitação dos corpos de prova para os ensaios de RTI foram os seguintes:

- a) Altura de 45 mm, com limite de  $\pm 0,5$  mm;
- b) Grau de Compactação de moldagem entre 99 e 100%;
- c) Umidade de moldagem com  $\pm 0,5$  % em torno da  $w_{ot}$ ; e
- d) Os três CPs moldados deveriam apresentar resultados com limites numa faixa de  $\pm 10\%$  em torno da média. Caso contrário, se aceitaria a média  $\pm 10\%$  dos dois remanescentes. Se não houvesse satisfação deste critério, moldavam-se outros três CPs.

A ruptura dos corpos de prova foi realizada na prensa Marshall eletromecânica mostrada na Figura 3.25, com velocidade de deformação igual a 0,8 mm/s. Os valores da RTI foram obtidos conforme a Equação 3.8:

$$\sigma_R = \frac{2F}{100\pi DH} \quad (3.8)$$

Onde:

$\sigma_R$  - resistência a tração indireta, MPa.

F – carga de ruptura , N.

D – diâmetro do CP, cm.

H – altura do CP, cm.



(a)



(c)



(b)

**Figura 3. 25 – (a) Prensa automática Marshall utilizada nos ensaios de RTI; (b) CP no pórtico de rompimento; (c) aspecto do CP depois do ensaio.**

#### 3.2.4.6. Ensaio de ISC

Os ensaios de ISC foram realizados de acordo com a NBR 9895 (1987), sendo os CPs moldados em condições as mais próximas das de compactação, no que se refere aos parâmetros  $w_{ot}$  e  $\gamma_{dmax}$ , compactados sob o mesmo nível de energia (intermediária). Após a mistura solo-emulsão em seus diversos teores, a amostra era submetida à aeração por 1 hora, conforme já foi citado. Como havia a perda de umidade durante esse procedimento, houve sempre a necessidade de se proceder a reposição da massa de água evaporada antes da moldagem do CP, que foi realizada utilizando compactador automático mostrado na Figura 3.17, buscando um rigoroso controle no processo de moldagem.

Visando-se atingir esse controle, adicionalmente foi adotado um procedimento estatístico como critério de aceitação de cada CP, de acordo com os parâmetros de avaliação seguintes:

- a) Se GC estiver entre 99 e 101%, corpo de prova aceito; e
- b) Se a variação da umidade ótima foi menor ou igual a  $\pm 0,5\%$ , corpo de prova aceito.

Se algum dos critérios acima não fosse atendido, o corpo de prova era rejeitado.

Para se ter uma idéia do comportamento com e sem emulsão dos solos estudados, foram moldados CPs para o ensaio de ISC com o solo em seu estado natural e nos teores de emulsão (2%, 4% 6% e 8%), sendo todos os corpos de prova ensaiados sem cura e com cura de sete (07) dias. No procedimento sem cura, o CP era ensaiado conforme prescreve a NBR 9895 (1987), ou seja, logo após a moldagem do mesmo, era feita a submersão em água potável por um período de quatro (04) dias, e após esse intervalo de dias o CP era rompido na prensa de ISC, operada manualmente (Figura 3.26).



**Figura 3. 26 – Prensa mecânica manual, utilizada para rompimento de CPs de ISC.**

No processo com cura, cada CP após ser moldado, era submetido à espera de sete (07) dias em câmara úmida, com umidade relativa monitorada, numa faixa entre 80 e 90%, com temperatura ambiente entre 27,0 e 29,0°C. Após os sete dias, o CP era então imerso durante os quatro dias, conforme recomenda a norma do ensaio de ISC. Durante a cura, a perda de umidade foi acompanhada diariamente, através da pesagem dos CPs. Para se ter uma idéia de comportamento dessa variável, era sempre determinado o teor de umidade pós cada ensaio, nas extremidades e no meio do CP (Figura 3.27).





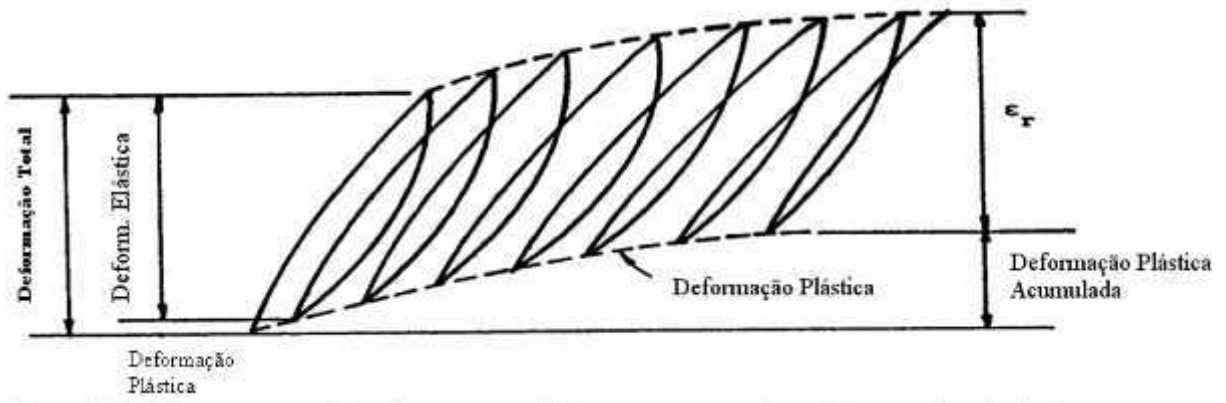
**Figura 3. 27 – Etapas envolvendo a obtenção do teor de umidade dos CPs durante ensaios de ISC.**

### 3.2.4.7. Ensaio Triaxial de Carga Repetida

#### 3.2.4.7.1. Módulo de Resiliência – MR

Os solos e as misturas solo-emulsão estudados neste trabalho foram submetidos ao ensaio triaxial de carga repetida, com o objetivo de se descrever o comportamento resiliente destes materiais, ou seja, sob comportamento elástico. Os ensaios tradicionalmente aplicados em pavimentação (ISC e RCS, principalmente) consistem na aplicação de uma carga lenta e crescente, não representando de forma real a condição de carregamento observada em campo. Os ensaios de carga repetida se constituem numa tentativa mais racional de se aproximar, com amostras em escala de laboratório, da real condição de carregamento de um pavimento. O ensaio consiste em determinar o comportamento de um material sob confinamento, após a aplicação de repetidos ciclos de carga e descarga, cujo objetivo é simular as ações do tráfego sobre a estrutura do pavimento. Durante o ensaio de carga repetida, o material se deforma a cada ciclo de carga. Cessado o carregamento, apenas uma parte dessa deformação se mantém, sendo considerada uma deformação permanente ou plástica ( $\epsilon_p$ ). A deformação que retorna depois de cessado o carregamento, é dita deformação recuperável ou deformação resiliente ( $\epsilon_r$ ). Com o aumento no número de repetições de carga, as deformações permanentes vão

se reduzindo, de forma que após um determinado número de repetições de carga, a deformação é praticamente toda recuperada. Neste ponto, a deformação denominada resiliente, ocorre de forma elástica. A Figura 3.28 mostra um gráfico que representa as deformações sofridas pelo corpo de prova durante o ensaio de Módulo de Resiliência.



**Figura 3. 28 – Representação das deformações sofridas pela amostra submetida ao ensaio triaxial de carga repetida (adaptado de Bernucci *et al.*, 2007).**

Correlacionando-se as deformações resilientes obtidas nos ensaios com as respectivas tensões que as ocasionaram, tem-se o Módulo de Resiliência, que é, de fato, o módulo de elasticidade do material obtido em ensaio triaxial de carga repetida, conforme está apresentado na Equação 3.9.

$$MR = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\epsilon_r} \quad (3.9)$$

Onde:

MR : Módulo de Resiliência;

$\sigma_d$  : tensão desvio aplicada repetidamente sobre o corpo de prova;

$\sigma_1$  : tensão principal maior;

$\sigma_3$  : tensão principal menor, ou tensão de confinamento e

$\epsilon_r$  : deformação resiliente.

Durante o ensaio, a aplicação do pulso de tensão é semi-senoidal, com o intuito de reproduzir o efeito da passagem de uma roda sobre o pavimento. O tempo total de um ciclo de carga e descarga é de 1 segundo, sendo 0,1 segundo para a aplicação da carga e 0,9 segundos de repouso, conforme mostra a Figura 3.30.

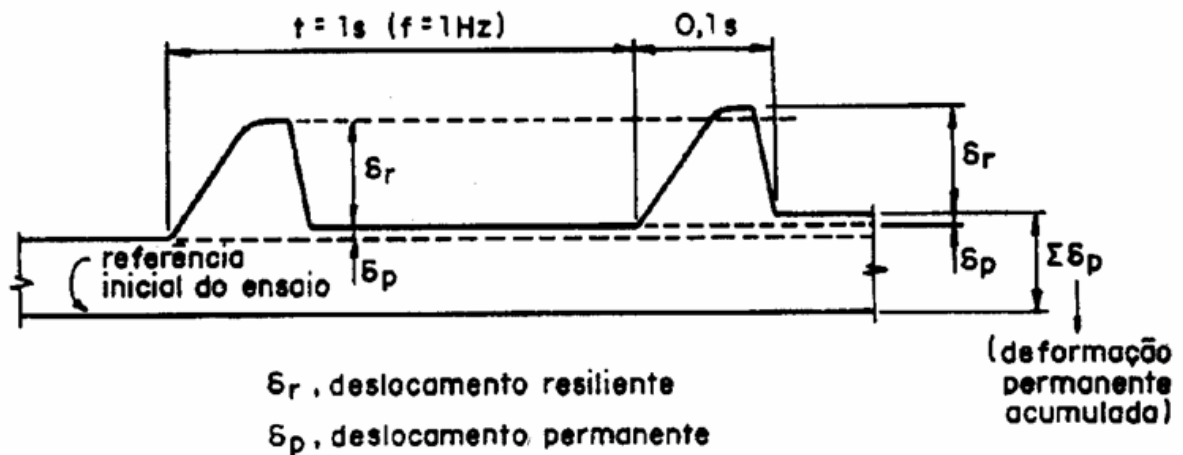


Figura 3. 29 – Modelo de registro dos deslocamentos verticais dos ensaios triaxiais de carga repetida (Medina e Motta, 2005).

O ensaio triaxial de carga repetida se divide em duas fases: i) condicionamento e ii) de ensaio propriamente dito. A fase de condicionamento do corpo de prova é realizada com o objetivo de se reduzir a influência das deformações plásticas e minimizar os efeitos decorrentes da história de tensões sobre a amostra, enquanto no ensaio propriamente dito são realizados os registros das deformações para diferentes níveis de tensão de confinamento e tensão desvio.

#### 3.2.4.7.2. Metodologia utilizada nos ensaios de MR

Para realizar os ensaios de Módulo de Resiliência, foram moldados três corpos de prova dos solos “in natura” e das misturas solo-emulsão, obedecendo aos parâmetros de compactação determinados no ensaio Proctor Intermediário. Os corpos de prova foram moldados em cinco (05) camadas, usando um cilindro bipartido (Figura 3.30) com dimensões de aproximadamente 100 mm diâmetro e 200 mm de altura. Os procedimentos de moldagem dos corpos de prova seguiram o que prescreve a norma DNER ME 131 (1994), que recomenda uma relação altura/diâmetro (H/D), próxima de 2. Para a compactação dos CPs foi utilizado o compactador eletromecânico (o mesmo empregado nos demais ensaios de compactação), com exceção das duas últimas camadas, que foram compactadas manualmente, uma vez que o compactador automático não possuía curso suficiente para alcançar essas camadas no molde.



**Figura 3. 30 – Cilindro bipartido utilizado na moldagem dos CPs para ensaios de MR.**

O método empregado na execução do ensaio e determinação do Módulo de Resiliência das amostras usadas na presente pesquisa foi o procedimento recomendado pela COPPE/UFRJ, tanto no que se refere ao condicionamento do CP quanto aos valores das tensões desvio e confinantes aplicadas. Esse procedimento pode ser encontrado em Medina e Mota (2005). A adoção do citado procedimento se justifica pelo fato do mesmo se aplicar a qualquer tipo de solo, visto que os níveis de tensão aplicados no condicionamento e durante o ensaio propriamente dito, não tendem a ultrapassar a condição de comportamento elástico dos corpos de prova. Os incrementos de tensão desvio e confinantes utilizados estão reproduzidos nas Tabelas 3.5 e 3.6.

Tabela 3.5 – Valores das tensões usadas na fase de condicionamento: aplicação de 500 ciclos nos pares de tensões indicados.

Par de tensões	$\sigma_3$ (kPa)	$\sigma_d$ (kPa)	Nº de ciclos	$\sigma_1/\sigma_3$
1	20,7	20,7	500	2
2	68,9	68,9	500	2
3	103,4	309,0	500	4

Tabela 3.6 - Níveis de tensões no ensaio propriamente dito para obtenção do MR.

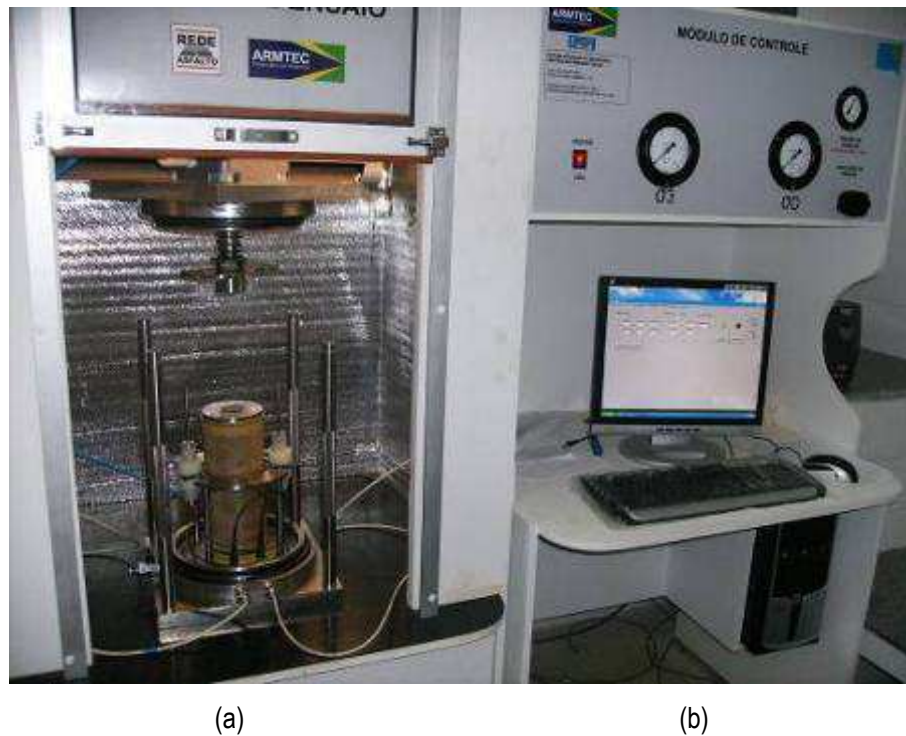
Par de tensões	$\sigma_3$ (kPa)	$\sigma_d$ (kPa)	Nº de ciclos	$\sigma_1/\sigma_3$
1	20,7	20,7	10	2
2		41,4	10	3
3		62,1	10	4
4	34,5	34,5	10	2
5		68,9	10	3
6		102,9	10	4
7	50,4	50,4	10	2
8		102,9	10	3
9		155,2	10	4
10	68,9	68,9	10	2
11		137,9	10	3
12		206,8	10	4
13	102,9	102,9	10	2
14		206,8	10	3
15		309,0	10	4
16	137,9	137,9	10	2
17		274,7	10	3
18		412,0	10	4

Assim como nos demais ensaios, foi estabelecido que para ser aceito, cada CP deveria atender às exigências a seguir apresentadas:

- a) Corpo de prova com GC entre 99 e 101%;
- b) Variação no teor de umidade ótima menor ou igual a  $\pm 0,5\%$ .

Os ensaios foram realizados logo após a moldagem, após a cura de sete dias e após cura e imersão durante 4 horas. Da mesma forma como ocorreu com os CPs dos outros ensaios, cabe ressaltar que também os CPs moldados para a determinação do MR, referentes a 0% se desintegraram (solos AMJ e JAB) ou ficaram sem condições de realização do ensaio (solo FRAL) após imersão. O equipamento utilizado para a realização dos ensaios de MR foi o SIEMBS – Sistema Integrado de Ensaio para Misturas Betuminosas e Solos, versão 1.1, fabricado pela empresa ARMTEC – Tecnologia em Robótica, sediada na cidade de Fortaleza. O equipamento, que possui sistema pneumático de aplicação de tensões, pertence ao GeoPav/UFS, e com ele, é possível se

realizar três tipos de ensaios: MR de solos, MR e vida de fadiga de misturas asfálticas. Fotos do sistema estão mostradas nas Figuras 3.31 e 3.32.



**Figura 3.31 – Equipamento usado na determinação do Módulo de Resiliência: (a) Módulo de Ensaio; (b) Módulo de Controle.**



**Figura 3.32 – Acondicionamento do CP na câmara triaxial do SIEMBS.**

### 3.2.4.7.3. Interpretação dos dados dos ensaios triaxiais de carga repetida

Para se efetuar análises sobre os parâmetros elásticos dos solos determinados a partir de ensaios triaxiais de carga repetida, existem vários modelos de comportamento resiliente disponíveis, devendo-se escolher aquele que seja o mais adequado para o tipo de solo, existindo modelos para solos arenosos e para solos argilosos. O ideal é o emprego de um modelo adequado a ambos, visto que as misturas solo-emulsão ora analisadas podem se comportar simultaneamente das duas formas, pela natureza dos solos e do material estabilizante utilizado.

Como o valor de MR depende do nível de tensões atuantes, ou seja, do par tensão confinante e tensão desvio é razoável se adotar um determinado nível de tensões para que se possa efetuar a análise dos solos e suas respectivas misturas.

### 3.2.4.7.4. Modelo para análise do Módulo de Resiliência (MR)

Para modelagem do MR com o estado de tensões, foram avaliados entre outros a aplicabilidade de três modelos para análise. Esses modelos relacionam o MR com as tensões de confinamento e desvio, seja de forma isolada, como está nas Equações 3.10 e 3.11, seja de forma simultânea, com  $\sigma_3$  e  $\sigma_d$  presentes na mesma Equação, como faz o modelo composto (MACÊDO, 1996) apresentado na forma da Equação 3.12.

$$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \quad (3.10)$$

$$MR = k_1 \cdot \sigma_d^{k_2} \quad (3.11)$$

$$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3} \quad (3.12)$$

Onde:

MR - Módulo de Resiliência

$\sigma_3$  - Tensão confinante

$\sigma_d$  - Tensão desvio

$k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$  - Parâmetros de resiliência do solo/mistura ensaiado.

A escolha dos três modelos deveu-se, entre outros motivos, à natureza diversificada que têm os três solos utilizados nesta pesquisa. Como o solo AMJ é predominantemente arenoso, em princípio, se adaptaria melhor ao modelo expresso pela Equação 3.10, visto que os solos arenosos têm normalmente maior dependência da tensão confinante. O solo FRAL, que é predominantemente argiloso, se enquadra melhor no modelo

representado pela Equação 3.11, pois, nesses tipos de solos a tensão desvio tem maior influencia. A Equação 3.12, por sua vez, seria adequada ao solo JAB, uma vez que o mesmo tem composição granulométrica mista, entre arenoso e argiloso, sendo também um modelo adotado com sucesso em outras pesquisas realizadas no Brasil, usando materiais semelhantes aos do presente estudo (GONDIM, 2008; SUÁREZ, 2009).



## **4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**

### **4.1. Introdução**

No presente capítulo são apresentados e analisados os resultados dos ensaios executados com as três amostras de “solo in natura”, bem como com as misturas solo-emulsão nos diferentes teores de 2%, 4%, 6% e 8% do ligante asfáltico, conforme apresentado nas metodologias estabelecidas, descritas no capítulo anterior.

Inicialmente, são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização dos solos, tais como granulometria, densidade real e limites de Atterberg, com os quais se procedeu a classificação dos solos, segundo os métodos da “American Association of State Highway and Transportation Officials/Transportation Research Board” (AASHTO/TRB) e “Unified System Classification of Soils” (USCS). Em seguida, são também apresentados os resultados de ensaios para conhecimento da microestrutura dos solos realizados com as amostras, tais como, Difração de Raios-X, Microscopia Eletrônica de Varredura e Químicos analítico-quantitativos.

Por fim, são analisadas as variações que os diferentes teores de emulsão produzem nas propriedades mecânicas dos solos em estudo, tendo-se como parâmetros de avaliação os resultados dos ensaios de compactação Proctor Intermediário, Resistência à Compressão Simples, Índice de Suporte Califórnia, Resistência à Tração por Compressão Diametral e Módulo de Resiliência. Com base na análise destes parâmetros, concluiu-se para cada tipo de solo utilizado na pesquisa, o teor de emulsão que resultou nos melhores desempenhos das misturas.

### **4.2. Caracterização dos Solos**

Nesta etapa da pesquisa foram efetuados os principais ensaios de caracterização geotécnica, bem como alguns ensaios especiais, importantes para se ter uma identificação dos minerais e/ou argilominerais e os constituintes químicos presentes na micro-estrutura dos solos.

#### **4.2.1. Caracterização Geotécnica**

A Tabela 4.1 apresenta um resumo da composição granulométrica e textural dos solos utilizados nesta pesquisa. Da tabela se observa que os três solos apresentam composições texturais bastante distintas. Os dados revelam que a amostra AMJ é constituída de um material com forte predominância de areia, o solo JAB possui

composição mista (areno-argilosa), enquanto o solo FRAL apresenta-se como um material de textura argilo-siltosa, com predominância da fração argila. Essa mesma constatação se pode observar nas respectivas curvas granulométricas que estão apresentadas nas Figuras 4.1 e, para uma melhor visualização, no histograma das frações presentes (pedregulho, areia, argila e silte) da Figura 4.2. Deve-se observar que os resultados contidos na Tabela 4.1 representam a média encontrada a partir de dois ensaios efetuados em cada solo, que podem ser visualizados por meio das curvas granulométricas da Figura 4.1. É importante ressaltar que a escolha dos três solos relativamente diferentes para esta pesquisa teve um caráter proposital, pois esses materiais são tipicamente semelhantes à maioria dos solos encontrados no Estado de Sergipe, como se pode depreender do trabalho de Costa (2006).

Tabela 4.1– Composição granulométrica e textural (AASHTO) dos solos usados nesta pesquisa.

Frações (%)	SOLOS		
	AMJ	JAB	FRAL
Pedregulho	2,43	1,86	0,13
Areia	79,84	58,71	7,54
Silte	1,86	8,36	37,43
Argila	15,87	31,07	54,9

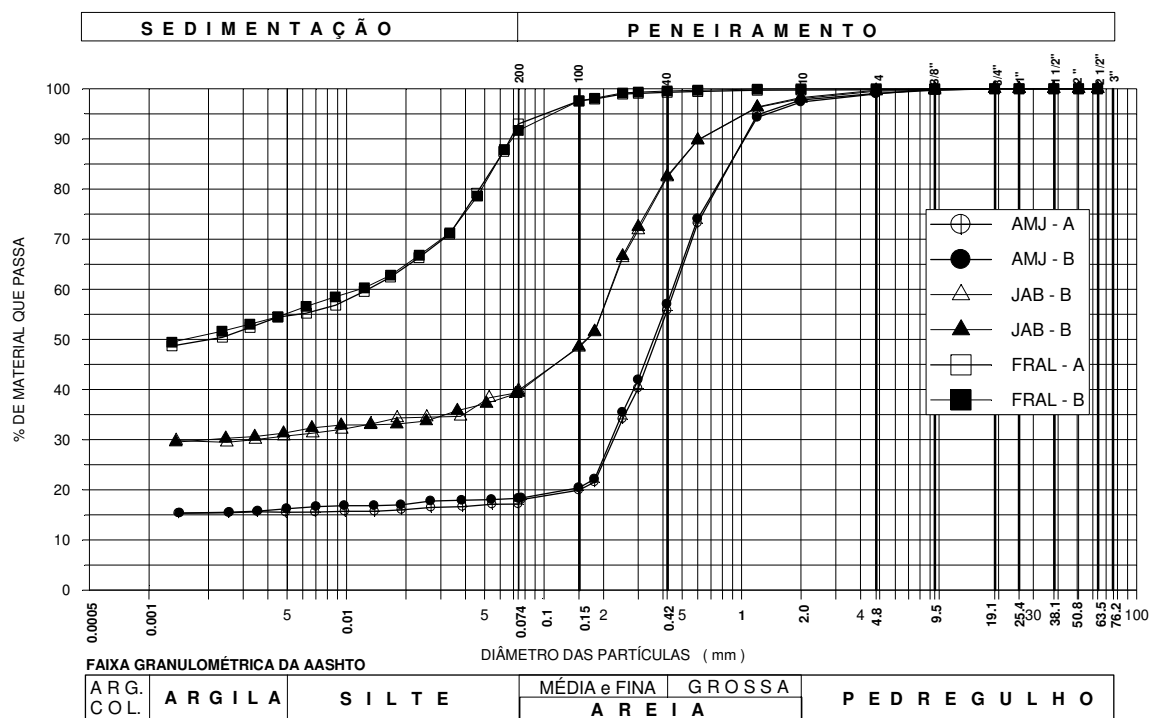
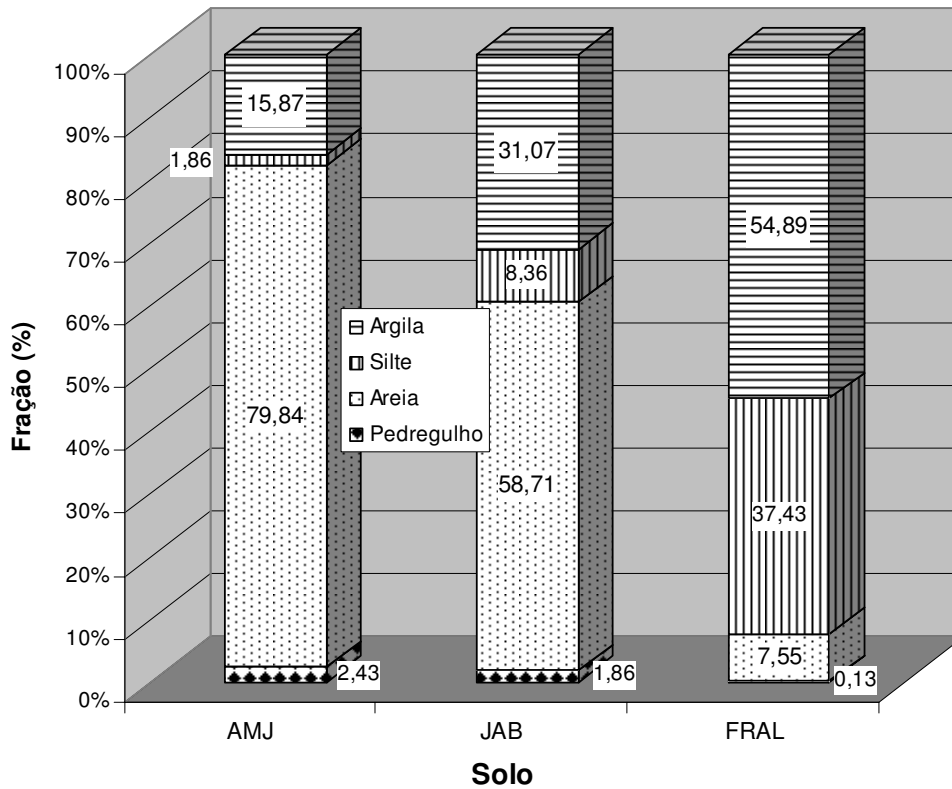


Figura 4.1 – Curvas granulométricas dos solos empregados nesta pesquisa.



**Figura 4.2 – Composição granulométrica dos solos empregados nesta pesquisa.**

A Tabela 4.2 apresenta os dados referentes às porcentagens de material passando nas peneiras N<sup>o</sup>. 4 (abertura de malha 4,8 mm), N<sup>o</sup>. 10 (2,0 mm), N<sup>o</sup>. 40 (0,42 mm) e N<sup>o</sup>. 200 (0,075 mm). Além disso, a tabela mostra os resultados dos ensaios de limites de Atterberg, Índice de Grupo (IG) e a classificação dos solos segundo os sistemas AASHTO/TRB e USCS. Pode-se observar da referida tabela que a amostra AMJ se trata, de fato, de uma areia, cujos limites de Atterberg obtidos para esse solo foram NL (não líquido) e NP (não plástico), ao contrário do que foi obtido para as duas outras amostras.

Tabela 4.2– Informações da análise granulométrica ; Índices de Consistência e Classificação dos solos.

Solo	Composição Granulométrica				W <sub>L</sub> (%)	I <sub>p</sub> (%)	IG	Classificação AASHTO/TRB	Classificação USCS
	(%)% que passa nas peneiras								
	# 4	# 10	# 40	# 200					
<b>AMJ</b>	99,0	97,5	57,5	17,5	NL	NP	0	A-2-4	SM
<b>JAB</b>	99,6	98,0	82,5	39,0	22	7	1	A-4	SC-SM
<b>FRAL</b>	100,0	100,0	99,5	92,5	46	25	15	A-7-6	CL

De acordo com os parâmetros do sistema de classificação da AASHTO, a qualidade do desempenho de um solo como material de subleito é inversamente proporcional ao seu índice de grupo (IG), a partir do que se constata

que as amostras AMJ e JAB podem ser adequadas para essa finalidade sem necessidade de estabilização, enquanto que a amostra FRAL apresenta-se como de baixa qualidade para ser usada nessa condição. É cabível frisar que dos três solos empregados, apenas o solo AMJ se enquadrou numa das faixas (Faixa "F") preconizadas pelo DNER-ES 303 (1997), para fins de uso em bases estabilizadas granulometricamente.

Os valores da densidade real dos materiais estão mostrados na Tabela 4.3. Observa-se que este parâmetro é uma característica associada à natureza mineralógica das partículas dos solos, pois depende dos minerais componentes e seus percentuais de ocorrência em uma amostra.

Tabela 4.3 – Valores de densidade real obtidos para as amostras dos solos.

Solo	Densidade Real
AMJ	2,667
JAB	2,638
FRAL	2,663

O valor da densidade real do solo JAB pode ser considerado baixo, sendo relativamente menor que a massa específica do quartzo ( $2,65 \text{ g/cm}^3$ ), o que pode indicar, segundo Gondim (2008), a predominância de minerais secundários, resultantes da fragmentação de rochas pela ação do intemperismo, a presença de minerais mais leves como caulinita e feldspato-K ou, ainda, uma pequena incidência de minerais pesados, como o ferro. A densidade real do solo FRAL apresentou o maior valor, assemelhando-se aos valores característicos de argilo-minerais como as montmorilonitas, muscovitas, e cloritas e do feldspato-Na-Ca.

No que se refere à estabilização betuminosa, verifica-se com base nas recomendações postas no Capítulo 2 (Tabelas 2.1 e 2.2), que o solo AMJ atende a todos os requisitos granulométricos e de consistência recomendados por vários autores, excetuando-se apenas Yoder e Witczak (1975), mesmo se esse material fosse considerado um pedregulho ou areia pedregulhosa, o que para esse solo não se confirma, com base na análise dos dados granulométricos obtidos.

No caso do solo denominado JAB, apenas para o método da AASHTO/TRB (1946), Kezdi (1979) e Vogt (1971), esse solo teria plenos requisitos para ser submetido à estabilização betuminosa. Mas, é importante atentar para o fato de que sob a ótica dos requisitos ligados à consistência ( $W_L/W_P$ ), o solo JAB teria condições de estabilização, de acordo com a maioria dos autores, exceto ABEDA (2001) e ASTM (2006). Essas incoerências estão relacionadas aos requisitos granulométricos referentes ao material passante na peneira N° 200 (maioria dos autores) e na peneira N° 40 (DER-SP, 1991).

O solo FRAL, por sua vez, *não* poderia ser submetido à estabilização com emulsão, uma vez que não possui os requisitos necessários, seja com relação à granulometria, seja com relação à consistência, para este tipo de estabilização, conforme as recomendações da grande maioria dos autores consultados (exceto VOGT, 1971, restringindo a porcentagem passante na peneira N° 200). Mas, como cita Mattos (1991 p. 89), “[...] A bibliografia é um elemento importante para a pesquisa, mas o pesquisador é, em princípio um incrédulo, e por isso pretende sempre confirmar as conclusões já obtidas por outros. [...]”

#### **4.2.2. Caracterização Química**

Com o apoio do Laboratório de Análises Mineraias (LAM/UFMG), do Laboratório de Caracterização de Materiais do Departamento de Materiais (DEMA-UFMG) e do Centro de Tecnologias do Gás (CTGÁS) do Rio Grande do Norte, foram realizados ensaios visando identificar os componentes microestruturais dos solos em estudo, no que se refere aos tipos de minerais e argilominerais presentes em cada um, bem como a composição química desses solos. Nos itens seguintes serão apresentados os resultados.

##### **4.2.2.1. Difração de Raios-X**

Os difratogramas de Raios-X obtidos para as três amostras, realizados a uma velocidade de varredura de 2° por minuto, estão apresentados na seqüência de Figuras 4.3, 4.4 e 4.5, para os solos AMJ, JAB e FRAL, respectivamente. Nestas figuras se observa a presença de quartzo, identificado pela observação de picos bem acentuados, estreitos, simétricos e intensos, o que indica material com estrutura cristalina bem definida e um razoável percentual desse mineral na amostra, já esperado devido à predominância da fração areia, sendo esses picos mais acentuados para as amostras mais arenosas. Observa-se ainda no difratograma do solo em análise a presença do argilomineral caulinita. Estes resultados se mostraram compatíveis com as indicações do ensaio de densidade real anteriormente apresentado. A caulinita identificada nas amostras possui picos pouco intensos e relativamente mais largos, o que indica uma provável pequena participação na constituição das amostras.

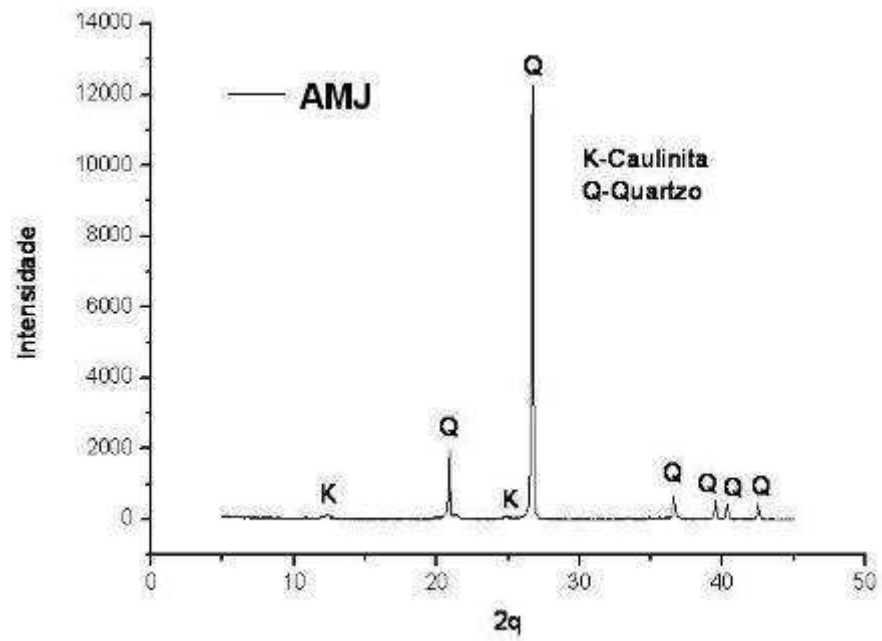


Figura 4.3 – Difratoograma de Raios-X obtido para a amostra de solo AMJ.

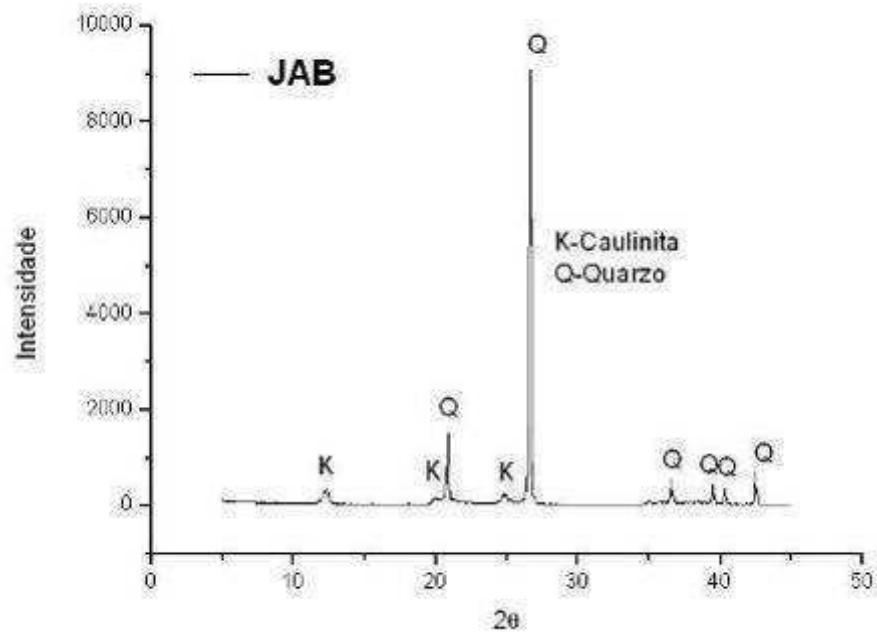


Figura 4.4 – Difratoograma de Raios-X obtido para a amostra de solo JAB.

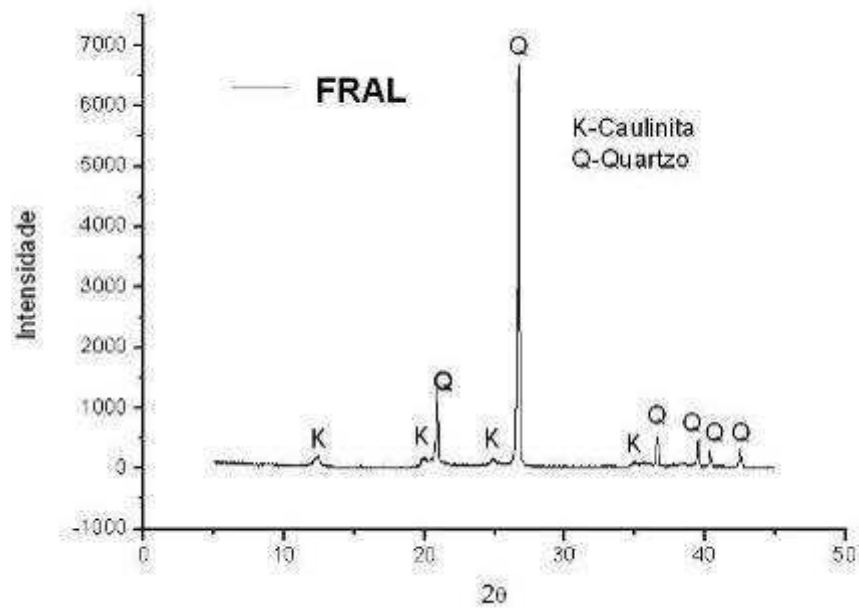


Figura 4.5 – Difratoograma de Raios-X obtido para a amostra de solo FRAL.

#### 4.2.2.2. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As imagens obtidas dos ensaios de MEV para as três amostras estão apresentadas na seqüência de Figuras 4.6, 4.7 e 4.8, para os solos AMJ, JAB e FRAL, respectivamente. Das imagens se observa a presença marcante dos grãos hexagonais de quartzo, de modo semelhante nas amostras AMJ e JAB (solos com predominância de areia), enquanto que para a amostra de argila siltosa (FRAL), a imagem revela a presença de placas e estruturas floculadas. Observe-se ainda, uma maior evolução do solo JAB e a improvável classificação dos solos como lateríticos, uma vez que as microfotografias não apresentaram o padrão típico conhecido como “*pipoca*”, característico dos citados solos, quando não é possível identificar as feições originais dos argilominerais constituintes.

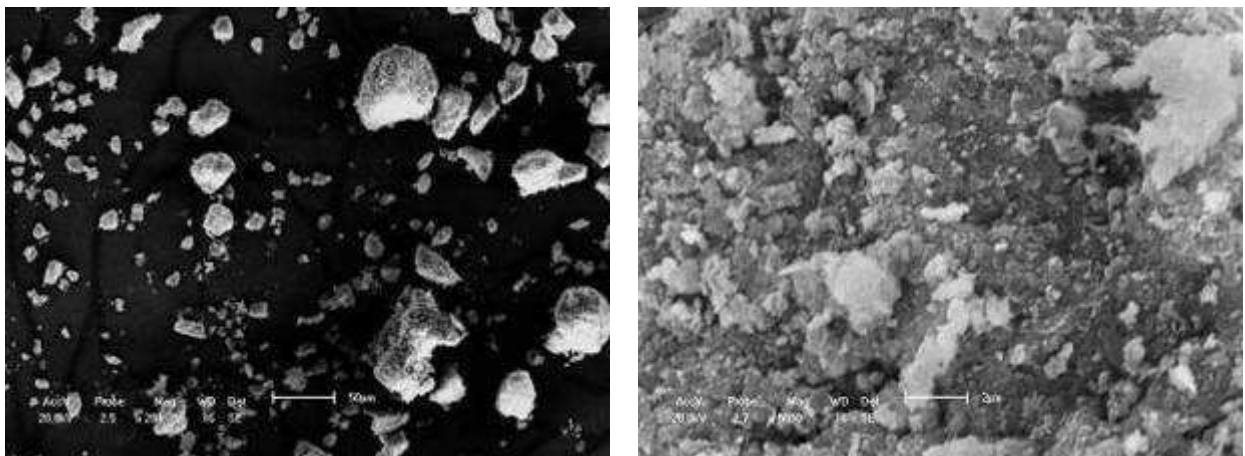
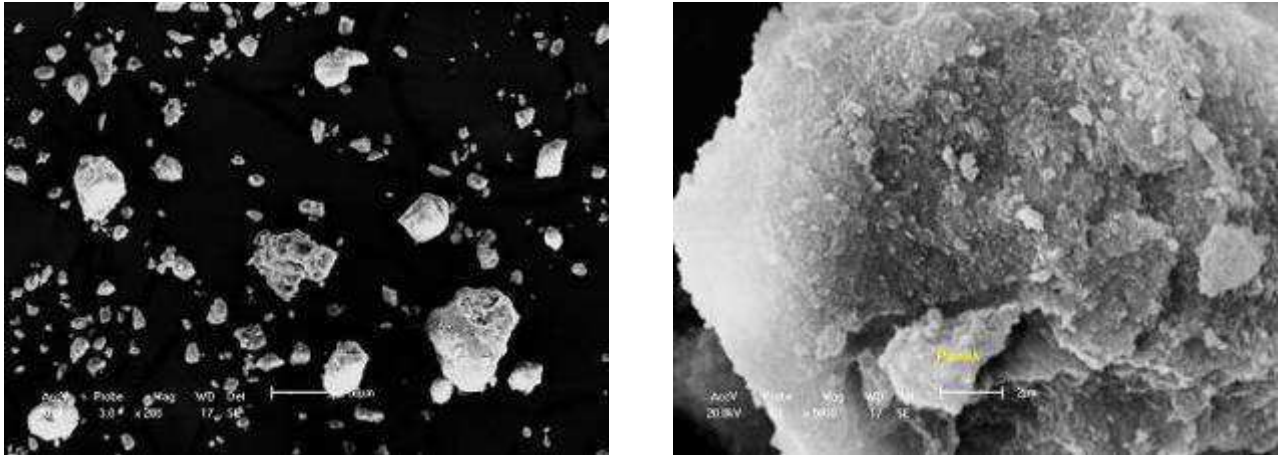
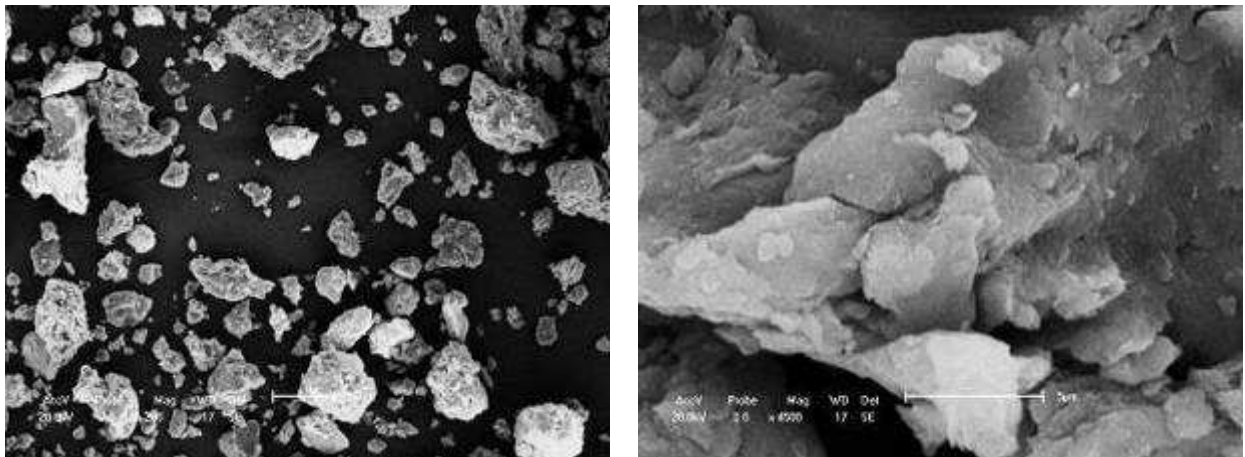


Figura 4.6 – Microfotografias obtidas do ensaio de MEV para a amostra de solo AMJ (200x e 5.000x).



**Figura 4.7 – Microfotografias obtidas do ensaio de MEV para amostra de solo JAB (200x e 5.000x).**



**Figura 4.8 – Microfotografias obtidas do ensaio de MEV para amostras de solo FRAL (200x e 5.000x).**

#### 4.2.2.3. Análises Química Analítica e Quantitativa

A Tabela 4.4 mostra os resultados dos ensaios químicos analíticos e quantitativos obtidos para as amostras de solo em estudo, enquanto que na Tabela 4.5 são apresentados os valores de alguns parâmetros empregados na avaliação do grau de intemperismo ou de laterização dos solos.

Da Tabela 4.4 se observa a predominância dos óxidos de silício e de alumínio na composição química dos três solos analisados, sendo as maiores quantidades de trióxido de ferro e sílica presentes no solo mais argiloso, um dos que apresenta tonalidade avermelhada.

Com base nas análises químicas, podem ser calculados alguns índices usados como parâmetros auxiliares da classificação de solos tropicais, tais como a relação sílica/alumina ( $K_i$ ) e a relação sílica/sesquióxidos ( $K_r$ ). Baptista *et al.* (1998) afirmam que os solos altamente intemperizados caracterizam-se pela remoção de sílica e



bases do perfil, com posterior acúmulo de Alumínio. De acordo com Costa (1973) apud Gondim (2008) e Baptista *et al.* (1998), a razão entre os teores de sílica e alumina e a razão entre os teores de sílica e sesquióxidos podem ser utilizadas como indicadores da evolução dos solos. A relação sílica/alumina é obtida conforme a Equação (4.1), enquanto a relação sílica sesquióxidos é calculada de acordo com a Equação (4.2).

$$K_i = \frac{\%Si_2O_3 \times 1,7}{\%Al_2O_3} \quad (4.1)$$

$$K_r = \frac{\%Si_2O_3 \div 60}{(\%Al_2O_3 \div 102 + \%Fe_2O_3 \div 160)} \quad (4.2)$$

Em relação a estes dois índices, na especificação DNIT- ES 098 (2007 p.2) encontra-se o seguinte texto: [...]“materiais constituintes são solos lateríticos de graduação graúda, entendendo-se como tais aqueles cuja relação molecular sílica-sesquióxidos, determinada pelo Método DNER-ME 030 (1994), seja menor que 2.”

Tabela 4.4 – Resultados das análises químicas dos solos desta pesquisa.

Composto químico	Denominação	Percentual na amostra (%)		
		AMJ	JAB	FRAL
Pr	Perda ao rubro	8,12	10,93	5,50
SiO <sub>2</sub>	Óxido de Silício	66,56	47,20	69,66
RI	Resíduo Insolúvel	4,74	3,30	3,32
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Trióxido de Ferro	3,20	4,45	7,82
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Trióxido de Alumínio	17,00	31,01	13,63
C <sub>a</sub> O	Óxido de Cálcio	Traços	Traços	Traços
M <sub>g</sub> O	Óxido de Magnésio	Traços	Traços	Traços
Na <sub>2</sub> O	Óxido de Sódio	0,20	0,08	0,04
K <sub>2</sub> O	Óxido de Potássio	0,10	0,07	0,03

Tabela 4.5 – Valores dos índices Ki e Kr para os solos desta pesquisa.

Índice	Solo		
	AMJ	JAB	FRAL
Ki	6,66	2,59	8,69
Kr	5,94	2,37	6,36

Enfim, depreende-se que quanto menores forem os valores de  $K_i$  e  $K_r$ , mais intemperizado será o solo, pois menor será a concentração de sílica e maiores as concentrações de óxidos de ferro e alumínio. Em outras palavras, baixos valores de  $K_i$  e  $K_r$  indicam que ocorreu remoção parcial e/ou total da sílica e posterior concentração do ferro e do alumínio. Valores de  $K_i$  e  $K_r$  menores que 2 indicam alto grau de intemperismo. Além disso, os índices permitem se obter alguma indicação referente ao fato do solo ser ou não laterítico.

Os resultados apresentados na Tabela 4.5 indicam que os solos AMJ e FRAL sofreram pouco intemperismo, enquanto o solo JAB apresenta maior grau de evolução pedológica, embora com os índices  $K_i$  e  $K_r$  acima de 2. Os resultados indicam ainda que os solos estudados provavelmente não são lateríticos (valores de  $K_r$  acima de 2), o que corrobora com os resultados dos ensaios de MEV, onde não foi observada a forma típica “pipoca” das partículas. Pode-se inferir também, conforme consta no item 2.2.5.1 (Capítulo 2), que as amostras AMJ e FRAL precisariam de uma maior quantidade de emulsão para uma estabilização satisfatória do que o solo JAB, devido à maior presença de sílica em sua composição mineralógica.

### **4.3. Análise do Comportamento Mecânico das Misturas**

Para a análise do comportamento mecânico dos solos e das misturas solo-emulsão, foram realizados ensaios de Compactação, RCS, ISC, RT e MR. Os ensaios tiveram como objetivos obter parâmetros para investigar a influência no comportamento dos solos decorrentes da adição de emulsão, nos teores programados. Com base nesse estudo, se buscou encontrar o teor considerado ótimo de emulsão para cada solo em cada ensaio. Observe-se que devido às várias condições em que os CPs das misturas, nos diversos ensaios (RCS, ISC, RTI e MR) foram submetidos, tem-se para cada condição e em cada ensaio seus respectivos teores ótimos, elegendo-se dentre estes, o maior valor para cada ensaio e cada solo como teor ótimo.

#### **4.3.1. Ensaios de Compactação**

Conforme comentado no capítulo anterior, os ensaios de compactação foram realizados com a energia correspondente ao Proctor Intermediário. Foram determinadas a umidade ótima ( $w_{ot}$ ) e o peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{dmax}$ ) para cada solo em seu estado natural e para as misturas solo-emulsão nos teores de 2%, 4%, 6% e 8% de emulsão. Estes dois parâmetros de compactação foram de grande importância neste trabalho, uma vez que serviram de base no controle da moldagem dos CPs de todos os ensaios, com vista à determinação das resistências. A seguir são apresentados e analisados os resultados obtidos para cada solo.

##### **4.3.1.1. Solo AMJ**

Os resultados do ensaio de compactação para esse solo sem adição de emulsão e com os teores já citados, estão contidos na Tabela 4.6, enquanto as respectivas curvas de compactação são mostradas na Figura 4.9.

Tabela 4.6 – Parâmetros de compactação obtidos para o solo AMJ e suas misturas.

Teor de Emulsão (%)	$w_{ot}$ (%)	$\gamma_{dmax}$ (kN/m <sup>3</sup> )
0	10,6	19,80
2	10,2	19,89
4	8,6	19,88
6	8,7	19,95
8	8,4	19,77

Observa-se da Figura 4.9 que a curva de compactação varia de acordo com o teor de emulsão. Para esta amostra, à medida que se aumenta o teor de emulsão, a umidade ótima da mistura diminui, de forma que a umidade ótima para mistura do solo AMJ com 8% de emulsão sofreu um decréscimo superior a 2%, em valores absolutos, em relação ao solo AMJ puro.

No que se refere à  $\gamma_{dmax}$ , notou-se que as misturas apresentaram valores muito próximos (diferença menor que  $\pm 1\%$ ) ao obtido para o solo puro. Essa variação é pequena, podendo ser considerado que a emulsão asfáltica praticamente não modificou essa propriedade do solo AMJ.

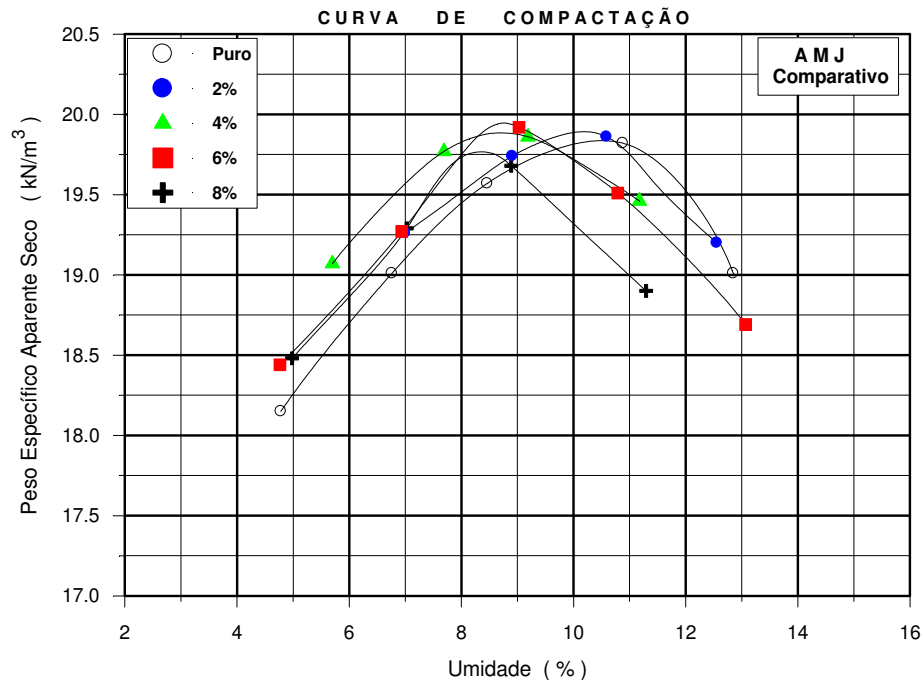


Figura 4.9 – Curvas de compactação do solo AMJ e suas misturas com emulsão.

#### 4.3.1.2. Solo JAB

Os resultados dos ensaios de compactação obtidos para o solo JAB estão contidos na Tabela 4.7, e as respectivas curvas de compactação estão apresentadas na Figura 4.10.

Tabela 4.7 – Parâmetros de compactação obtidos para o solo JAB e suas misturas.

Teor de Emulsão (%)	$w_{ot}$ (%)	$\gamma_{dmax}$ (kN/m <sup>3</sup> )
0	11,2	19,82
2	11,2	19,62
4	11,4	19,16
6	11,2	19,18
8	9,9	18,81

Neste caso, dos valores mostrados na Tabela 4.7 e seus correspondentes gráficos apresentados na Figura 4.10, pode-se inferir que as curvas de compactação praticamente se mantêm constantes no que se refere aos valores de umidade ótima (aproximadamente igual a 11,2%), com a adição de emulsão. A única exceção foi a curva correspondente a 8% de emulsão, quando há uma variação de -1,3% (valores absolutos) no valor da umidade ótima em relação ao solo puro. Em relação aos valores de  $\gamma_{dmax}$ , observa-se uma tendência ao decréscimo no valor deste parâmetro à medida que se aumenta o teor de emulsão, com a diferença para o peso específico aparente seco máximo com adição de 8% de emulsão, atingindo uma variação superior a 5% em relação ao solo JAB natural.

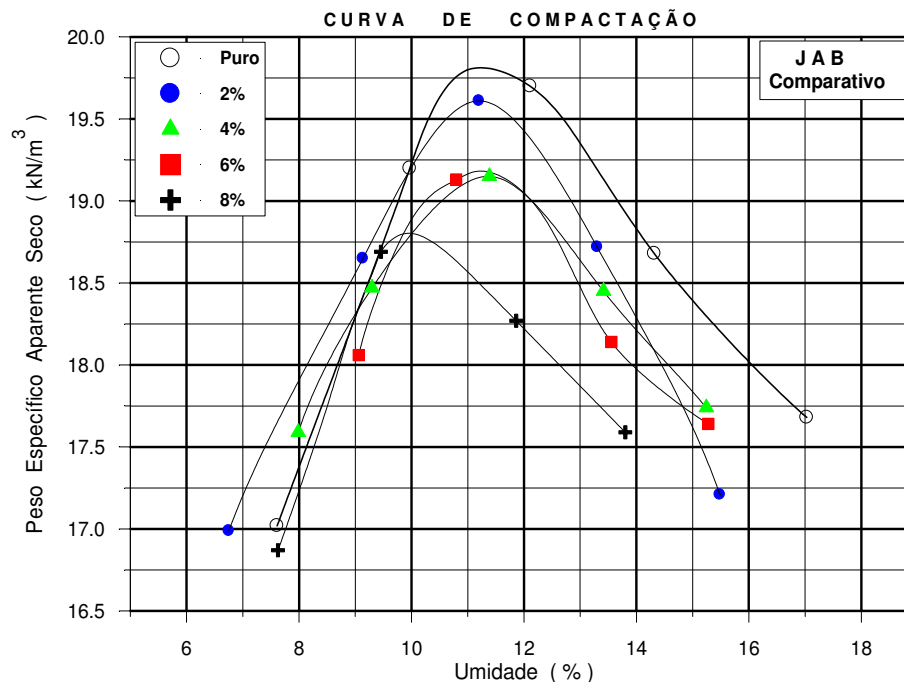


Figura 4.10 – Curvas de compactação do solo JAB e suas misturas com emulsão.

#### 4.3.1.3. Solo FRAL

São apresentados na Tabela 4.8, os valores, e na Figura 4.11 os gráficos correspondentes aos resultados dos ensaios de compactação realizados com o solo FRAL.

Tabela 4.8 – Parâmetros de Compactação solo FRAL e suas misturas.

Teor de Emulsão (%)	$w_{ot}$ (%)	$\gamma_{dmax}$ (kN/m <sup>3</sup> )
0	16	18,22
2	15,7	18,17
4	16,2	17,90
6	15	18,02
8	15,9	17,55

Para este solo, dos valores apresentados na Tabela 4.8 e dos gráficos mostrados na Figura 4.11, pode-se notar que as curvas de compactação se comportam de tal maneira que os valores de umidade ótima praticamente se mantêm constantes para as misturas solo-emulsão. Uma exceção é para a mistura preparada com 6% de emulsão, em que ocorre uma variação de apenas -1% (valor absoluto) no valor da umidade ótima em relação ao solo puro, comportamento semelhante ao solo JAB.

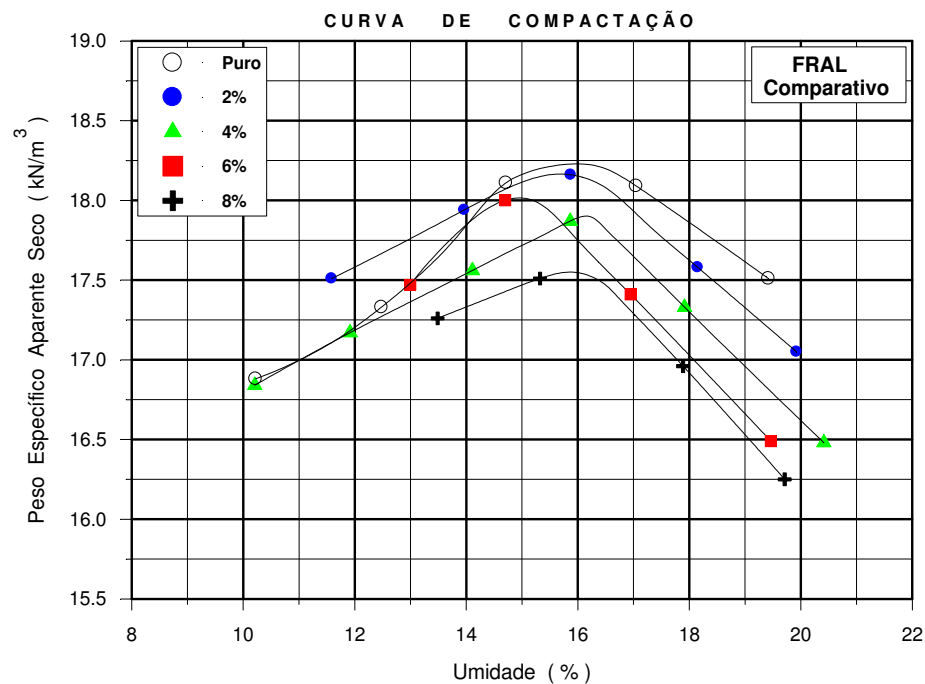


Figura 4.11 – Curvas de compactação do solo FRAL e suas misturas com emulsão.

Quanto ao comportamento dos valores de  $\gamma_{\text{dmáx}}$ , observa-se também uma tendência ao decréscimo deste parâmetro com o aumento do teor de emulsão no solo. Comparando o valor do peso específico aparente seco máximo obtido com a mistura de solo com 8% de emulsão com o seu correspondente do solo natural, observa-se uma diferença de cerca de 4% para menos.

Convém observar o fato de as curvas de compactação referentes às misturas do solo FRAL com emulsão revelarem tendência de se tornarem mais agudas em torno da umidade ótima, à medida que se aumentou o teor de emulsão, apresentando-se mais fechadas. Por esta razão, o controle de compactação desse material exige uma maior atenção, uma vez que pequenas variações na umidade tendem para maiores alterações do peso específico da mistura.

#### 4.3.1.4. Efeitos da Estabilização Solo-emulsão no Ensaio de Compactação

Para uma melhor visualização das variações dos parâmetros de compactação a partir da adição de emulsão, são mostrados nas Figuras 4.12 e 4.13 os gráficos relacionando a umidade ótima com o teor de emulsão e peso específico aparente seco máximo (PEASM) versus teor de emulsão, respectivamente. Observa-se que os solos em análise não apresentaram um padrão único como resposta à adição de emulsão, mas, foi detectada uma razoável semelhança de comportamento entre os solos JAB e FRAL, no que se refere ao peso específico, os quais apresentaram tendência de decréscimo dos parâmetros de compactação em função do aumento do teor de emulsão.

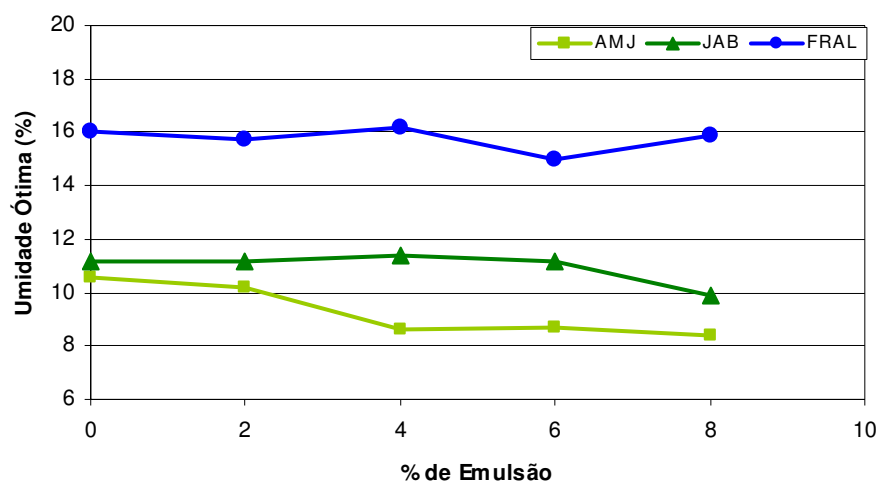
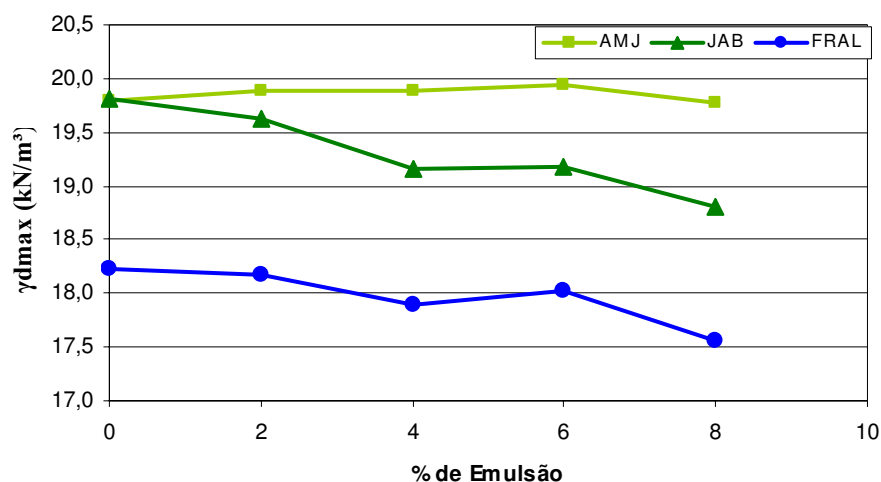


Figura 4.12 – Relação entre os valores da  $w_{ot}$  e o teor de emulsão dos solos em análise.



**Figura 4.13 – Relação entre os valores de  $\gamma_{dmax}$  e o teor de emulsão para os solos em análise.**

O decréscimo do peso específico aparente seco máximo da mistura em relação ao solo natural pode ser atribuído ao menor valor da densidade da emulsão em relação ao solo, ao mesmo tempo em que esse ligante passa a atuar na condição de aglutinante (até um certo patamar), facilitando a compactação. A dificuldade reside em se mensurar estas influências quando um desses efeitos se sobrepõe ao outro. A ausência de um padrão definido para este ensaio à luz dos resultados obtidos (e da própria bibliografia consultada) revelou a necessidade e a importância da determinação do peso específico aparente seco máximo e da umidade ótima para cada solo e para cada teor de emulsão a ser utilizado.

#### 4.3.2. Ensaios de Resistência à Compressão Simples (RCS)

Conforme comentado no Capítulo 3, os ensaios de Compressão Simples foram efetuados com os solos puros, num primeiro momento, e com as misturas solo-emulsão, numa etapa posterior. Inicialmente os ensaios foram realizados imediatamente após a moldagem dos corpos de prova.

Como na literatura parece haver um consenso de que, para haver um melhoramento no solo tratado com betume deve haver um processo de cura, os CPs moldados com as misturas em seus diversos teores foram submetidos ao processo de cura por um período de 7 dias em câmara úmida, tentando-se manter as condições mais estáveis possíveis. Ocorre que o solo natural também tem sua resistência acrescida quando ocorre o processo de secagem, como consequência da perda de umidade. Dessa forma, também foi efetuado esse tipo de ensaio com os solos puros para que se pudesse mensurar com mais detalhes o efeito da adição real da emulsão sobre o solo neste ensaio.

A literatura (SOLIZ, 2007; SUÁREZ, 2009), tem mostrado a susceptibilidade que há para os diversos tipos de solos quando os mesmos são submetidos a um processo de umedecimento. Na tentativa de medir a influência

desta variável, os CPs foram ensaiados após o processo de cura e também com a imersão por um período de 4 horas, tanto de amostras de solos in natura quanto das misturas.

São apresentados e analisados a seguir, os resultados de RCS referentes aos CPs dos solos preparados nas diversas condições propostas neste trabalho. Junto com os resultados da RCS são apresentados também os valores das umidades residuais ( $w_{res}$ ) quando da execução de ensaio (após cura 7 dias), além da umidade após a imersão dos CPs ( $w_{romp}$ ), quando os mesmos foram levados a prensa para ruptura, bem como a absorção, inferida das umidades residuais, e a umidade extraída após a ruptura. Cabe ressaltar que os valores das citadas umidades estão apresentados em porcentagem, relativos às umidades de moldagem (% de  $w_m$ ). Assim por exemplo, se um solo foi moldado com 10% ( $w_m = 10\%$ ) e o resultado da umidade residual após cura em relação a  $w_m$  (% de  $w_m$ ) foi de 1,3%, significa que esse solo se encontrava com  $w_{res} = 0,13\%$ .

#### 4.3.2.1. Solo AMJ

Os resultados dos ensaios de RCS estão apresentados na Tabela 4.9. A Figura 4.14 mostra graficamente os resultados obtidos para o solo AMJ nas três condições: ensaio efetuado imediatamente após moldagem (*sem cura*), após cura de 7 dias em câmara úmida, após cura de 7 dias seguida de imersão por 4 horas antes do ensaio (*com cura + imersão*).

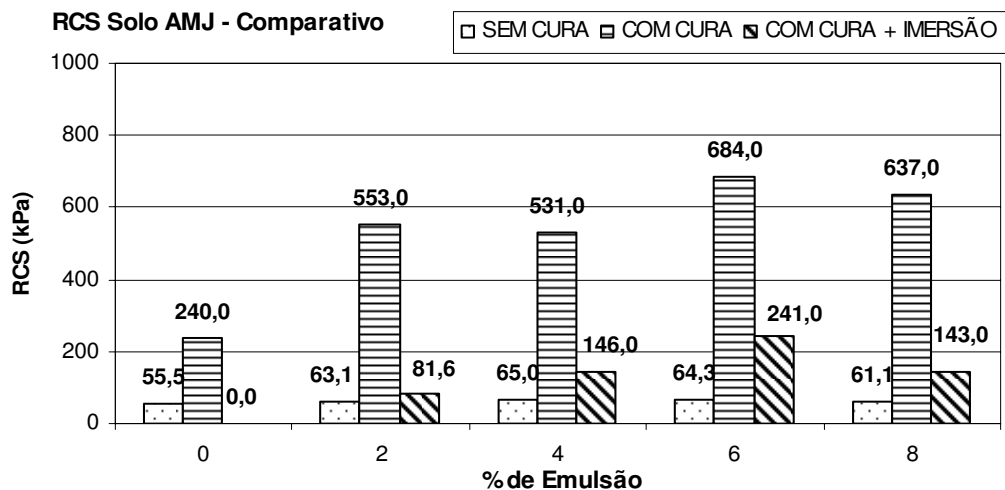
Tabela 4.9 – Resultados dos ensaios de RCS realizados com o solo AMJ e suas misturas.

Teor de Emulsão (%)	SEM CURA	COM CURA		COM CURA + IMERSÃO			
	RCS (kPa)	RCS (kPa)	$w_{res}$ (% de $w_m$ )	RCS (kPa)	$w_{res}$ (% de $w_m$ )	$w_{romp}$ (% de $w_m$ )	Absorção (% de $w_m$ )
0	55,5	240,0	0,0	0,0 <sup>(*)</sup>	0,2	—	—
2	63,1	553,0	1,3	81,6	3,2	81,0	77,8
4	65,0	531,0	5,3	146,0	6,4	80,9	74,5
6	64,3	684,0	4,8	241,0	4,1	58,4	54,3
8	61,1	637,0	3,7	143,0	5,3	62,5	57,2

(\*) – Considerado o valor zero, pois os CPs de solo sem adição de emulsão se desintegraram.

Comparando os valores obtidos em todos os tipos de estudo efetuados (com cura sem cura e até mesmo com cura e imersão durante 4 horas), nota-se que houve melhorias para esse solo em todos os casos, em relação ao valor obtido para o solo sem emulsão, com o uma tendência de aumento da resistência quando se aumenta o teor de emulsão. Observa-se que o maior ganho de resistência ocorreu para o solo após cura de 7 dias na câmara úmida, evidenciando a necessidade do processo de cura.





**Figura 4.14 – Resultados dos ensaios de RCS do solo AMJ e suas misturas.**

Nota-se para esse solo, que a emulsão funciona como agente impermeabilizante e coesivo, fato evidenciado pelos valores apresentados de umidade residual e absorção em relação à umidade de moldagem. Observa-se a partir dos dados, que há também uma maior retenção de umidade pelas misturas durante a cura do que para o solo puro. Revela-se ainda a tendência de que foi menor a absorção sofrida pelo solo após a cura, o que quase sempre resulta em umidade menor em relação à umidade de moldagem no momento do rompimento do CP, e, maior será a RCS.

Em termos de RCS, parece haver uma tendência de o teor ótimo de emulsão situar-se em torno de 6% (nesse caso coincidente com o maior valor do peso específico aparente seco máximo obtido), para os ensaios efetuados com cura e com cura e imersão. Para o ensaio realizado sem cura (imediate), observa-se que a ação da emulsão já se faz presente (embora de forma tímida), pois os CPs já apresentaram melhoria na resistência. O teor de 4% foi responsável pelo maior aumento no valor da RCS, com um acréscimo de cerca de 17% em relação ao solo puro. Com relação ao caso do solo com cura, observa-se uma melhora para o teor ótimo obtido de cerca de 185% em relação ao valor correlato (com cura) para o solo puro, enquanto que para o solo ensaiado imediatamente, com o mesmo teor de emulsão, houve um incremento de quase 11 vezes (963%) após o processo com cura.

No tocante aos ensaios efetuados com este solo e suas misturas na condição com cura + imersão, deve ser lembrado que os CPS (cilíndricos  $\Phi = 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ ) moldados de solo puro se desintegraram totalmente (em cerca de 30 segundos), impossibilitando então uma análise comparativa com as misturas. Este fato enfatiza ainda mais a importância da estabilização solo-emulsão. Para o teor de 6% considerado ótimo, neste caso, houve um aumento mesmo após a imersão, próximo de 275% em relação ao seu correlato (6% sem cura), e em torno de 335% em relação ao CP de solo puro ensaiado após moldagem. Cabe destacar que,

surpreendentemente, nesta condição, o valor da RCS (241 kPa) para o solo com cura e imersão em seu teor ótimo (6%), superou (ainda que por pequena margem), o valor alcançado pelo solo puro com cura (240 kPa).

#### 4.3.2.2. Solo JAB

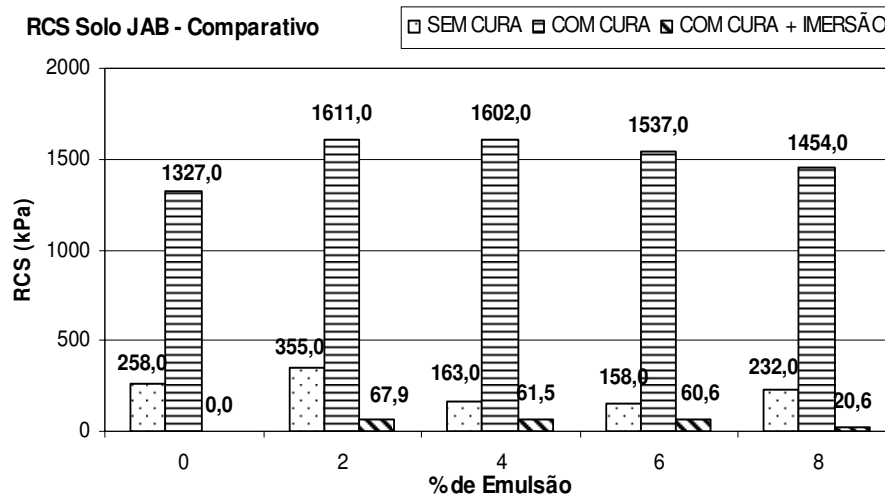
Os resultados dos ensaios de RCS para o solo de granulometria intermediária estão apresentados na Tabela 4.10, enquanto que na Figura 4.15 são mostrados graficamente os resultados obtidos com os CPs nas três condições a que todos foram submetidos: sem cura, com cura de 7 dias e com cura e imersão.

Tabela 4.10 – Resultados dos ensaios de RCS do solo JAB e suas misturas.

Teor de Emulsão (%)	SEM CURA	COM CURA		COM CURA + IMERSÃO			
	RCS (kPa)	RCS (kPa)	$w_{res}$ (% de $w_m$ )	RCS (kPa)	$w_{res}$ (% de $w_m$ )	$w_{romp}$ (% de $w_m$ )	Absorção (% de $w_m$ )
0	258,0	1327,0	14,8	0,0	13,9	—	—
2	355,0	1611,0	19,4	67,9	17,9	102,6	84,7
4	163,0	1602,0	19,3	61,5	21,8	111,9	90,1
6	158,0	1537,0	20,9	60,6	18,4	125,2	106,8
8	232,0	1454,0	15,7	20,6	16,8	173,7	156,9

(\*) – Considerado o valor zero, pois os CPs de solo sem adição de emulsão se desintegraram.

Observando os valores mostrados na Tabela 4.10 e os gráficos da Figura 4.15, constata-se que houve ganhos de resistência em todos os casos, quando são comparados os valores de RCS obtidos das misturas com os do solo sem emulsão. Analisando-se apenas os valores de RCS das misturas, percebe-se uma tendência de queda nos valores de resistência a partir de 2%, à medida que se aumenta o teor de emulsão. Constata-se uma vez mais que os maiores incrementos de resistência ocorrem somente após os 7 dias de cura. Pode-se concluir também que mesmo tendo-se obtido valores de RCS para as misturas com cura e imersão (5ª coluna da Tabela 4.10) inferiores aos verificados para os do solo puro ensaiado sem cura (2ª coluna da Tabela 4.10), os CPs do solo puro, com cura e imersão (5ª coluna) se desintegraram, o que prova que houve melhoria na mistura motivada pela presença da emulsão.



**Figura 4.15 – Valores de RCS obtidos para o solo JAB e misturas.**

Verifica-se que para o solo JAB os efeitos da emulsão como agente impermeabilizante e coesivo aparecem em um grau bem menor que para o solo AMJ. A impermeabilização se reflete no fato de as misturas com cura e imersão não terem se desintegrado. No entanto, constata-se que a partir de 2% de emulsão no solo, a umidade residual tende a decrescer, conforme ocorrido com o solo AMJ, enquanto a absorção tende a se elevar, do que se pode deduzir que isto conduziu a valores decrescentes de resistência.

Analisando-se os valores da resistência à compressão simples, pode-se considerar que para esse solo o teor ótimo de emulsão é 2% (embora *não* correspondente ao máximo valor do peso específico aparente seco máximo obtido), para os ensaios efetuados em todas as condições. Observa-se que a ação da emulsão já se faz presente imediatamente após moldagem dos CPs, pois os mesmos apresentaram melhora de forma imediata para depois decrescerem. No teor de 2%, indicado como ótimo para esse solo, a melhoria ficou em torno de 37%, (misturas sem cura), 21% (misturas com cura) e 524% se for comparado a mistura de 2% com cura, em relação aos CPs do solo puro sem cura, não se podendo estabelecer um comparativo no caso de cura e imersão devido ao fato já comentado, referente a desestruturação física dos CPs..

#### 4.3.2.3. Solo FRAL

A Tabela 4.11 contém os resultados dos ensaios de RCS realizados com CPs do solo FRAL, bem como os valores de umidade residual e absorção, enquanto que na Figura 4.16 são mostrados os respectivos gráficos.

Os parâmetros obtidos para esse solo mostram respostas diferentes nas três condições analisadas. Para o caso dos CPs ensaiados de forma imediata (pós-moldagem), observa-se que a adição da emulsão no solo não provocou qualquer melhoria, uma vez que os valores de RCS decresceram sempre em relação ao aumento de teor de emulsão. Isso provavelmente foi causado pela elevação da parcela plástica acrescida pela emulsão, o

que Mattos et al. (1991) denomina sistema multi-rotular. Em casos de solos argilosos, como o FRAL, o fenômeno provoca uma maior compressibilidade e a diminuição da resistência da mistura.

Tabela 4.11 – Resultados dos ensaios de RCS do solo FRAL e suas misturas.

Teor de Emulsão (%)	SEM CURA	COM CURA		COM CURA + IMERSÃO			
	RCS (kPa)	RCS (kPa)	$w_{res}$ (% de $w_m$ )	RCS (kPa)	$w_{res}$ (% de $w_m$ )	$w_{romp}$ (% de $w_m$ )	Absorção (% de $w_m$ )
0	618,0	1550,0	35,4	0,0	—	—	—
2	592,0	2658,0	41,7	0,0	—	—	—
4	558,0	2464,0	45,7	0,0	—	—	—
6	555,0	2304,0	40,4	8,7	40,5	161,3	120,8
8	357,0	1701,0	33,6	11,5	34,7	155,0	120,3

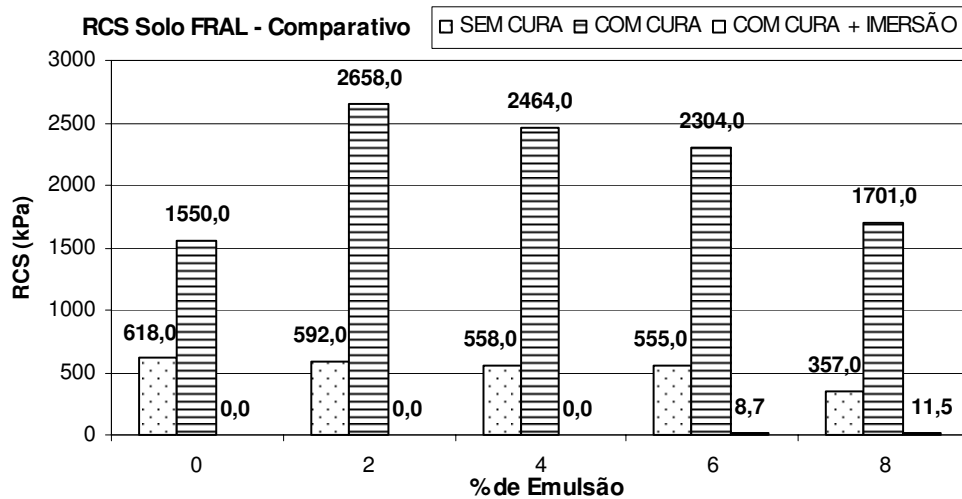


Figura 4.16 – Valores de RCS obtidos para o solo FRAL e misturas.

Para este solo, a cura por um período de 7 dias resultou em ganho de resistência para todos os teores de emulsão, em relação aos valores de RCS obtidos para o solo puro. Entretanto, quando são comparadas as misturas entre si, é percebida uma tendência de decréscimo de resistência a partir de 2% de emulsão. Sob essa condição de cura, o teor de 2% seria considerado o teor ótimo para a mistura.

Para a condição de cura e imersão, apenas os CPs moldados com 6% e 8% de emulsão puderam ser ensaiados (com resultados muito baixos de RCS), pois os outros se desintegraram ou ficaram sem condições de manuseio. A Figura 4.17 mostra aspectos dos CPs submersos para o solo puro, enquanto que a Figura 4.18 mostra como ficaram os CPS moldados com 2% e 4% de emulsão na presença da água. À medida que o teor cresce os CPs ganham maior resistência com relação à susceptibilidade à presença da água, inferindo-se deste fato a ação

impermeabilizadora da emulsão. Nota-se nestas figuras que a ação danosa da água inicia-se pela parte superior do CP, que na moldagem é normalmente menos confinada e se espalha para todo CP, de cima para baixo, principalmente onde há as divisões de camadas (Figura 4.18, teor de 4%). Parece provável que para a presente situação, um teor de emulsão maior que os ora praticados neste trabalho teria que ser utilizado para esse solo. Para esta condição, este fato está corroborando a opinião de outros autores (MATTOS et al 1991, por exemplo), que afirmam não ser viável economicamente a estabilização de solos argilosos com materiais betuminosos.



**Figura 4.17 – Aspectos de CPs do solo FRAL (amostra de solo puro) desintegrados.**



**Figura 4.18 – Aspectos dos CPs desintegrados do solo FRAL com 2% (a) e 4% de emulsão (b).**

No que se refere às umidades residuais obtidas, nota-se que as mesmas crescem até o teor de 4% de emulsão, a partir do qual inicia a queda, revelando que o solo retém mais água quando está com emulsão, exceto para o caso do teor de 8%.

Constata-se em relação à resistência, que o valor do teor de emulsão que mais contribui para o aumento de RCS foi 2% (que nesse caso não corresponde ao valor do peso específico aparente seco máximo). Observa-se que a ação da emulsão é marcante para os CPs ensaiados após a cura, mesmo levando-se em conta se tratar de um solo predominantemente argiloso, do qual se tem conhecimento que o processo de secagem resulta em melhorias no incremento de RCS do solo puro, como se pode constatar nos resultados apresentados. Para o teor de 2%, o ganho de resistência foi da ordem de 70%, em relação aos CPs do solo puro com cura, e de 330%, em relação aos CPs de solo puro sem cura.

#### **4.3.2.4. Análise conjunta dos três solos – teor ótimo de emulsão versus RCS**

A Tabela 4.12 apresenta um resumo dos valores máximos de RCS ( $RCS_{max}$ ) e os seus teores considerados ótimos de emulsão ( $T_{otem}$ ) correspondentes, para cada solo nas condições de cura estabelecidas.

Os dados mostrados na Tabela 4.12 revelam que o solo mais arenoso, apresentou de forma geral, os menores valores de RCS, enquanto o solo argiloso apresentou os maiores valores para este parâmetro, como era de se esperar, visto que a RCS é função da coesão do material. É importante destacar que os resultados também mostram que essa tendência desaparece quando os CPs foram submetidos à condição de cura e imersão, pois o solo AMJ leva vantagem de forma preponderante (3,5 vezes e 20 vezes respectivamente) em relação aos solos JAB e FRAL, invertendo completamente a tendência revelada anteriormente. Observou-se ainda que esse valor (0,241 MPa) é praticamente o mesmo valor obtido para o solo AMJ puro e com cura (0,240 MPa), o que

novamente evidencia a ação impermeabilizante/coesiva introduzida neste solo com a estabilização solo-emulsão.

Tabela 4.12 – Resumo de resultados de teores ótimos de emulsão e máximas RCS obtidas.

Solo	Condição					
	Sem cura		Com cura		Cura e Imersão	
	T <sub>otem</sub> (%)	RCS (MPa)	T <sub>otem</sub> (%)	RCS (MPa)	T <sub>otem</sub> (%)	RCS (MPa)
AMJ	4,0	0,065	6,0	0,684	6,0	0,241
JAB	2,0	0,355	2,0	1,611	2,0	0,068
FRAL	2,0(*)	0,618	2,0	2,658	8,0(**)	0,012 (**)

(\*) entre as misturas, pois o valor para o solo puro foi o maior nessa condição.

(\*\*) resultado obtido apenas para os teores de 6% e 8% de emulsão.

Ficou evidenciada a importância do processo de cura na estabilização solo-emulsão, pois se viu que os maiores valores da RCS obtidos para cada solo foram alcançados na condição de cura após sete dias. Quanto ao teor ótimo de ligante (6%, 2% e 2% respectivamente para os solos AMJ, JAB e FRAL), percebe-se uma tendência deste situar-se em torno de 2% para os dois solos mais coesivos, mas, de forma geral, não há uma unanimidade em termos de teores ótimos de emulsão para cada condição de cura estabelecida, e para cada solo, reforçando a idéia de que uma análise individual para cada solo e para cada situação parece ser o mais indicado.

#### 4.3.2.5. Relação da umidade residual com a RCS

Gondim (2008), analisando os valores de RCS versus umidade residual, efetuou em seu trabalho uma avaliação acerca da relação entre esses dois parâmetros para solos submetidos ao processo de cura, e encontrou, quando usou linhas de tendência de modelos exponencial e parabólicas relativos aos solos utilizados em sua pesquisa, resultados considerados relevantes, com apenas algumas ressalvas. Analogamente, na presente pesquisa foi feito um estudo semelhante. Os resultados obtidos para os solos AMJ, JAB e FRAL encontram-se apresentados nas Figuras 4.19, 4.20 e 4.21, respectivamente. Os três solos tiveram um ajuste melhor quando foi utilizado o modelo parabólico. São mostradas nas figuras as equações de regressão dos modelos e os valores de coeficiente de determinação ( $R^2$ ) obtidos, de onde se pode inferir que as correlações resultantes para os solos com ajuste parabólico alcançaram valores considerados de bom (solo FRAL) a ótimo (solo JAB) para as condições sob as quais os solos e as misturas foram submetidas (cura de sete dias em câmara úmida).

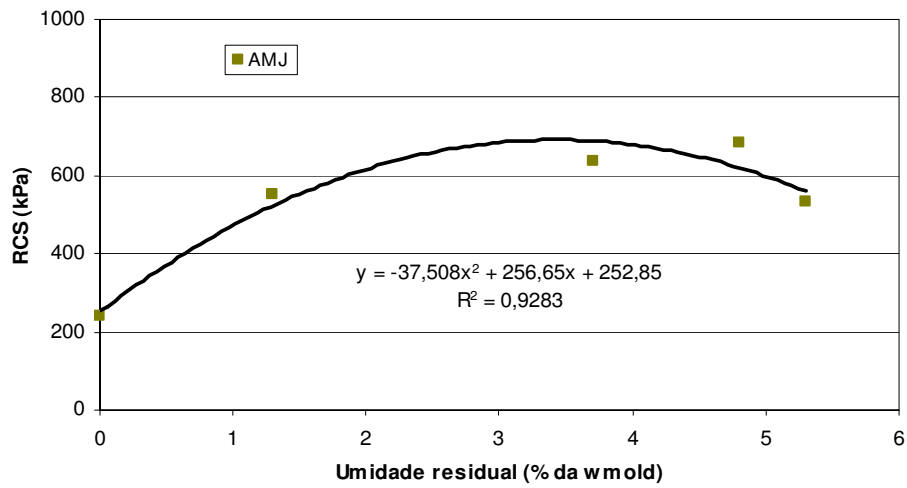


Figura 4.19 – Correlação entre a RCS e a umidade residual para o solo AMJ (cura 7 dias).

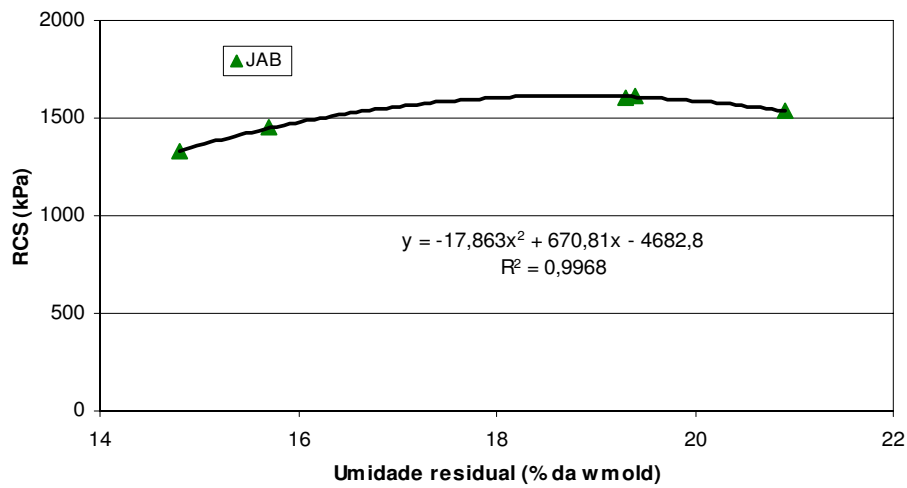
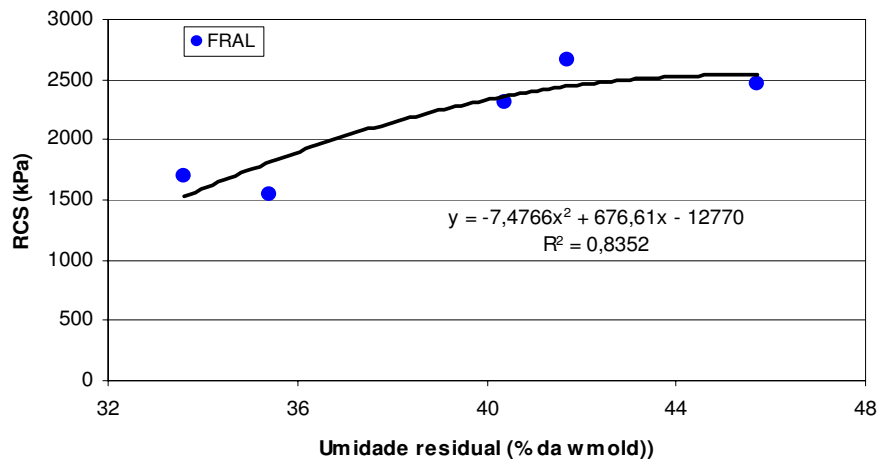


Figura 4.20 – Correlação entre a RCS e a umidade residual para o solo JAB (cura 7 dias).





**Figura 4.21 – Correlação entre a RCS e a umidade residual para o solo FRAL (cura 7 dias).**

Conforme Gondim (2008), na presente pesquisa se pode fazer uma análise baseada nos resultados das Figuras 4.19 a 4.21, ainda que de forma preliminar. Nota-se que para os modelos obtidos há um ponto de máximo de resistência ( $RCS_{max}$ ) para uma determinada umidade residual ótima ( $w_{resot}$ ) para os três solos, melhor definido para os solos AMJ e JAB. Para o caso dos modelos parabólicos apresentados, a umidade residual ótima pode ser encontrada por meio da derivada primeira da equação de regressão, enquanto que a resistência máxima será o valor da RCS correspondente.

Procedendo-se conforme dito ao final do parágrafo anterior, foram encontrados os valores constantes da Tabela 4.13, onde são vistos também os valores obtidos experimentalmente, para efeitos de comparação.

**Tabela 4.13 – Comparativo entre a RCS e a umidade residual (Regressão x Experimental).**

Solo	$w_{resot}$ (%)		$RCS_{max}$ (kPa)		$R^2$
	Regressão	Experimental	Regressão	Experimental	
AMJ	3,4	4,8	690	684	0,928
JAB	18,8	19,4	1615	1611	0,997
FRAL	45,2	41,7	2538	2658	0,835

Observando-se os valores mostrados na Tabela 4.13, percebe-se que há uma boa aproximação entre os resultados obtidos experimentalmente e os valores obtidos através dos modelos de regressão, detectando-se como única discrepância (acima de 10%) os valores de  $w_{resot}$ , para o solo AMJ. Com base nestes dados, conclui-se que há uma boa probabilidade de haver relação entre esses dois parâmetros, sugerindo que a secagem das amostras em seu processo de cura, para as condições estabelecidas nesta pesquisa, tem um valor de umidade ( $w_{resot}$ ) para o qual se alcança uma RCS máxima.

### 4.3.3. Ensaios de Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTI)

Normalmente não se faz essa medida em solos puros, pois estes apresentam baixa resistência à tração. A Resistência a Tração obtida por Compressão Diametral para materiais utilizados em camadas de pavimentos constitui um parâmetro de grande importância, pois a tensão de tração na base da camada solicitada, corresponde a um esforço crítico a ser suportado pelo material empregado. Como este trabalho tem o objetivo de verificar as potencialidades dos solos e das misturas solo-emulsão para utilização em estruturas de pavimentos, principalmente como camada de base, foi executado esse tipo de ensaio para se avaliar os efeitos da emulsão em relação à RTI.

Os CPs para os ensaios de RTI foram moldados com as dimensões mencionadas no Capítulo 3 deste trabalho, nas condições ótimas de compactação, empregando-se a energia do Proctor Intermediário, e submetidos às três condições de cura já mencionadas. Na seqüência, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos para os solos em seu estado puro e as misturas nos diferentes teores de emulsão desta pesquisa.

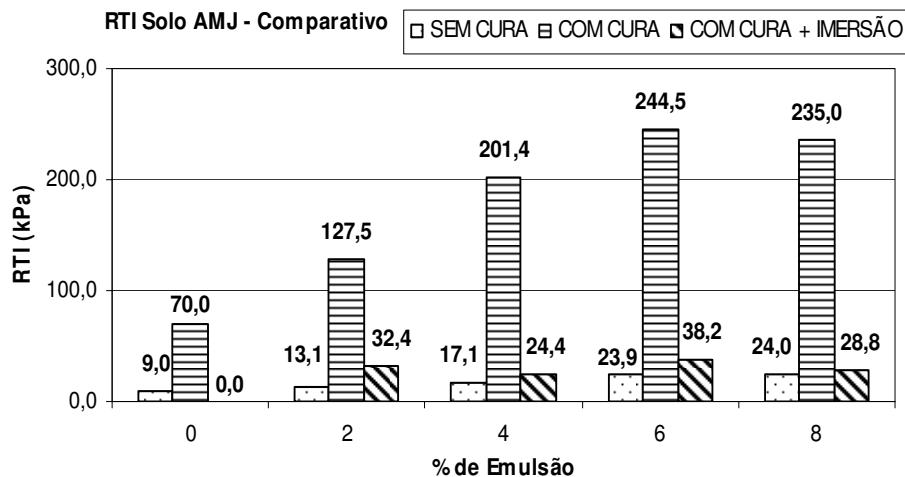
#### 4.3.3.1. Solo AMJ – RTI

Os resultados da RTI e das umidades residuais dos corpos de prova do solo AMJ puro e das suas misturas com emulsão asfáltica, além dos valores de umidade residual e absorção dos CPs, para as condições de cura desta pesquisa, são apresentados na Tabela 4.14 e na respectiva Figura 4.22.

Tabela 4.14 – Resultados de RTI, umidades residuais e absorção do solo AMJ suas misturas.

Teor de Emulsão (%)	SEM CURA	COM CURA		COM CURA + IMERSÃO			
	RTI (kPa)	RTI (kPa)	$w_{res}$ (% de $w_m$ )	RTI (kPa)	$w_{res}$ (% de $w_m$ )	$w_{romp}$ (% de $w_m$ )	Absorção (% de $w_m$ )
0	9,0	70,0	22,8	0,0 <sup>(*)</sup>	22,7	—	—
2	13,1	127,5	19,8	32,4	19,8	60,1	40,3
4	17,1	201,4	19,5	24,4	19,5	94,8	75,3
6	23,9	244,5	18,6	38,2	18,6	64,4	45,8
8	24,0	235,0	25,6	28,8	25,6	78,4	52,8

(\*) – Considerado o valor zero, pois os CPs de solo sem adição de emulsão se desintegraram.



**Figura 4.22 – Valores de RTI para o solo AMJ e suas misturas em função do teor de emulsão.**

Ao analisar os resultados apresentados, observa-se que para as três condições de cura houve crescimento nos valores da RTI das misturas em relação aos valores obtidos para o solo puro, com uma tendência de crescimento da resistência até o teor de 6% de emulsão, após o qual uma discreta queda nos valores da RTI.

Observam-se aumentos relativos de cerca 165%, e da ordem de 249% para as condições sem cura e com cura, respectivamente. Para a condição de cura e imersão não foi possível mensurar o aumento, pois os CPs do solo puro se desintegraram ao serem imersos. Mais uma vez evidenciou-se a importância da cura no ganho de resistência das misturas solo-emulsão. Se for comparado o valor obtido nesta condição com os dos CPs de solo sem cura, constata-se um aumento de 27 vezes na RTI, além de ter obtido o maior ganho em termos absolutos, chegando-se ao patamar de 0,24 MPa (saiu de 0,009 MPa, para o solo puro sem cura), sendo o maior em termos de ganho relativo.

Com relação ao teor ótimo de emulsão para a obtenção da máxima RTI, os resultados dos ensaios indicaram a superioridade do teor de 6% (e corresponde ao maior valor do peso específico aparente seco máximo) sobre os demais teores nas condições cura e cura e imersão, praticamente se igualando ao valor obtido na condição sem cura com o teor de 8%. Nota-se neste teor ótimo, semelhança ao que foi obtido para RCS, exceto também para o caso sem cura, onde se pode lembrar que apesar de ser obtido um teor ótimo de 4%, o valor para 6% estava também praticamente igual ao obtido para o teor de 4%. Nos dois casos, a opção é pelo menor teor devido à análise de viabilidade econômica (seriam gastos 1/3 a menos para alcançar o mesmo resultado). Constata-se ainda pelos valores de umidades apresentadas na Tabela 4.13, que foi neste teor ótimo (6%) em que foi obtida a menor umidade residual e o menor teor de absorção que os CPs sofreram.

Em caso de dúvida sobre qual teor deva ser utilizado para projeto, deve ser analisado o tipo de solicitação ao qual o material será submetido. Se, por exemplo, a intenção é empregar este solo estabilizado em camada de

base de rodovias, a solicitação de maior importância será a tensão vertical. Desta forma, o teor ótimo de emulsão da mistura deverá ser aquele que conduz aos maiores valores de RCS. Se por outro lado, o material for servir como camada de revestimento, a tensão horizontal no fundo desta camada como já comentado, é o parâmetro crítico de resistência (GONDIM, 2008). Essa tensão horizontal é suportada pela resistência à tração indireta e, portanto, o teor escolhido para a mistura deve ser aquele capaz de suportar as maiores tensões horizontais, ou seja, deve ser o teor que apresente a maior RTI. Para a estabilização deste solo visando seu emprego em camada de revestimento, o teor ótimo de emulsão apontado seria 6%.

#### 4.3.3.2. Solo JAB – RTI

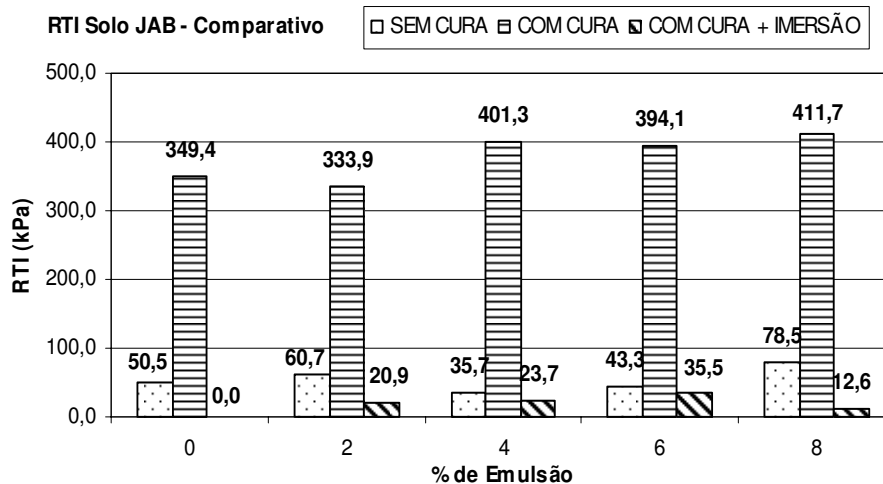
Os resultados da RTI e das umidades residuais dos corpos de prova do solo JAB puro e das suas misturas com emulsão, bem como dos valores de umidade residual e absorção dos CPs nas condições de cura desta pesquisa, apresentados na Tabela 4.15 e na Figura 4.23.

Tabela 4.15 – Resultados de RTI, das umidades residuais e absorção do solo JAB e suas misturas.

Teor de Emulsão (%)	SEM CURA	COM CURA		COM CURA + IMERSÃO			
	RTI (kPa)	RTI (kPa)	$W_{res}$ (% de $w_m$ )	RTI (kPa)	$W_{res}$ (% de $w_m$ )	$W_{romp}$ (% de $w_m$ )	Absorção (% de $w_m$ )
0	50,5	349,4	50,0	0,0 <sup>(*)</sup>	50,0	—	—
2	60,7	333,9	46,0	20,9	46,0	101,3	55,3
4	35,7	401,3	42,6	23,7	41,5	94,5	53,0
6	43,3	394,1	42,7	35,5	41,0	93,8	52,8
8	78,5	411,7	42,9	12,6	43,1	131,4	88,3

(\*) – Considerado o valor zero, pois os CPs de solo sem adição de emulsão se desintegraram.

Os dados mostrados na tabela e na Figura 4.23 revelam que o solo JAB obteve modestos ganhos de resistência com a presença da emulsão. Para o caso sem cura, observou-se crescimento da ordem de 10% na RTI, com a mistura contendo 2% de emulsão, em relação ao solo puro, depois uma queda em 4% e 6%, e, finalmente, novamente um aumento com 8% de emulsão. Na condição dos CPs com cura, nota-se uma queda para o teor de 2% e depois uma acréscimo na RTI para 4%, mantendo-se praticamente constantes (em torno de 0,4 MPa) até o teor de 8%. A constância também se verifica nos valores da umidade residual para os CPs com cura. Os CPs moldados com cura e imersão foram os únicos que mantiveram um padrão regular, uma vez que constatou-se aumento no valor da RTI até 6%, seguido de uma queda relativamente brusca em seu valor. Dos dados obtidos, conclui-se que, em termos de RTI, o teor ótimo situa-se entre 4% e 6%, a depender da condição de cura considerada (com ou sem imersão). Convém observar foi com percentual de 6% de emulsão no qual foram obtidos os menores valores de umidade residual e absorção.



**Figura 4.23 – Valores de RTI obtidos para o solo JAB e para as suas misturas com emulsão.**

Conforme comentado no Capítulo 2 deste trabalho, quanto maior o teor de sílica num solo, maior deve ser o teor de betume para estabilizá-lo. É o que se constata com os dados obtidos para este solo. Cumpre novamente ressaltar a importância da cura na resistência das misturas solo-emulsão também para o solo JAB. Embora em relação ao solo puro com cura, o incremento alcançado tenha atingido o patamar de cerca de 18% (em termos relativos), quando a comparação é feita com o solo puro sem cura, esse percentual se eleva para 715%. Finalmente, cabe ressaltar que uma extrapolação dos resultados obtidos em laboratório para uma situação da prática conduz a uma análise de viabilidade econômica. Neste caso, seria mais racional o uso do teor de 4% em detrimento do teor de 8%, levando-se em conta a relação custo/benefício, por não haver tanta diferença de resistência entre as misturas com estes teores, enquanto ocorre uma economia de 50% na quantidade de emulsão a ser empregada.

#### 4.3.3.3. Solo FRAL - RTI

São apresentados na Tabela 4.16 os resultados dos ensaios de RTI e os valores das umidades residuais dos corpos de prova deste solo puro e das suas misturas com emulsão asfáltica, além dos valores de umidade residual e absorção dos CPs para as condições estudadas. Na Figura 4.24 são mostrados os gráficos relacionando as RTI obtidas e os percentuais de emulsão utilizados nas misturas, sem e com cura.

Um primeiro fato a destacar nos dados de RTI diz respeito aos valores obtidos para os CPs preparados com 2% e 4% de emulsão, na condição com cura e imersão, que contrariam o que foi encontrado no ensaio de RCS utilizando-se estes mesmos percentuais de emulsão nas misturas, o que significa que os CPs se mantiveram íntegros. Este fato pode provavelmente ser explicado pela forma com a qual foram moldados os CPs para os ensaios de RTI, que foram com apenas uma única camada compactada dos dois lados, o que deve evitar zonas

susceptíveis à entrada da água nas interfaces das camadas, o que desencadeia o processo de degradação (ver Figura 4.18b, CP de 4%). Neste caso, observa-se que a mistura com maior teor de umidade residual (2%, com cura) e um menor valor de absorção (8%, com cura e imersão), foram as que apresentaram o maior valor de RTI.

Tabela 4.16 – Valores de RTI, das umidades residuais e da absorção do solo FRAL e suas misturas.

Teor de Emulsão (%)	SEM CURA	COM CURA		COM CURA + IMERSÃO			
	RTI (kPa)	RTI (kPa)	$w_{res}$ (% de $w_m$ )	RTI (kPa)	$w_{res}$ (% de $w_m$ )	$w_{romp}$ (% de $w_m$ )	Absorção (% de $w_m$ )
0	103,5	574,7	61,8	0,0 <sup>(*)</sup>	61,9	—	—
2	113,0	597,4	63,2	108,7	64,9	94,0	29,1
4	95,5	580,4	58,7	119,6	59,5	89,2	29,7
6	108,0	568,0	58,4	107,5	59,1	91,8	32,7
8	77,3	455,2	63,8	138,9	64,5	87,1	22,6

(\*) – Considerado o valor zero, pois os CPs de solo sem adição de emulsão se desintegraram.

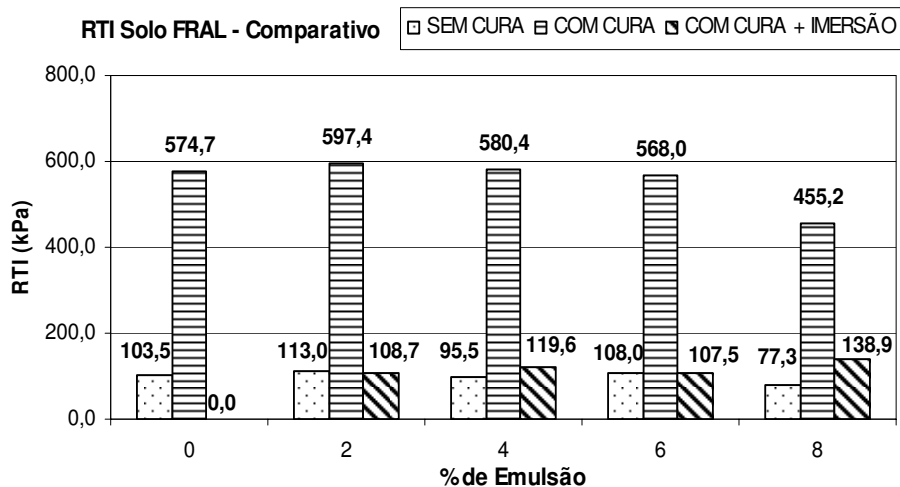


Figura 4.24 – Variação dos valores da RTI em função do teor de emulsão adicionada ao solo FRAL.

A Figura 4.24 mostra que existe um padrão mais uniforme no comportamento deste solo e das misturas, em praticamente todas as condições de cura. Observa-se para os procedimentos sem e com cura, a tendência dos valores da RTI atingir um máximo (113,0 kPa e 597,4 kPa, respectivamente) com 2% de emulsão, diminuindo levemente a resistência para os teores de 4% e 6% (os valores ficam relativamente próximos). Em seguida, ocorre uma diminuição mais acentuada para o teor de 8%, indicando que a emulsão passa a ser um fator negativo na composição da mistura, ficando os valores de RTI inferiores aos do solo puro. Constata-se ainda, para a condição com cura, uma tendência de maiores valores de umidade residual resultar em maiores valores

de RTI. Para a condição de cura e imersão, percebe-se que o máximo valor se deu com 8% de emulsão, um aumento de cerca de 34% em relação ao solo puro.

Na condição de cura sem imersão, para este solo os maiores valores absolutos de RTI (alcançando até 0,60 MPa), mas verifica-se neste caso, de forma mais acentuada ainda que para o solo JAB, que a parcela de resistência causada pela estabilização é relativamente menor que para os outros dois solos analisados. Em relação ao solo puro, nesta condição de cura o teor de emulsão eleito como ótimo (2%), o acréscimo foi de cerca de apenas 4%, mas uma análise em relação ao solo puro sem cura essa melhoria atinge os 477%.

Levando-se em consideração os valores máximos de RTI obtidos, os teores de emulsão ótimos seriam 2%, 2% e 8%, respectivamente, para as condições sem cura, com cura e cura e imersão, se observando que não há coincidência com o maior valor obtido do peso específico aparente seco máximo. A mistura com teor de 2% tem  $\gamma_{dm\acute{a}x}$  bastante próximo do valor obtido para o solo puro. No entanto, em se tratando do teor de 8%, observa-se que o valor do peso específico aparente seco máximo para esse teor foi o menor obtido dentre todas as misturas, o que contradiz o observado anteriormente, mostrando a não unanimidade da regra, o que indica que o peso específico aparente seco máximo deve ser determinado para cada mistura.

#### 4.3.3.4. Resumo dos Resultados Teor de Emulsão x RTI

A Tabela 4.17 apresenta um resumo de resultados, onde estão mostrados os teores considerados ótimos de emulsão ( $T_{otem}$ ) e os correspondentes valores máximos de RTI obtidos para cada solo nas condições de cura analisadas nesta pesquisa.

Tabela 4.17 – Valores obtidos para os teores considerados ótimos de emulsão e de máximas RTI.

Solo	Condição					
	Sem cura		Com cura		Cura e Imersão	
	$T_{otem}$ (%)	RTI (MPa)	$T_{otem}$ (%)	RTI (MPa)	$T_{otem}$ (%)	RTI (MPa)
AMJ	8,0	0,024	6,0	0,245	6,0	0,038
JAB	8,0	0,079	8,0	0,401	6,0	0,036
FRAL	2,0	0,113	2,0	0,597	8,0	0,139

Conforme se pode observar da tabela, o solo mais arenoso puro apresentou os menores valores de RTI (exceto na condição cura e imersão), enquanto o solo argiloso apresentou valores para este parâmetro de acordo com o previsto, ou seja, maiores valores de RTI, visto que este parâmetro depende muito da coesão apresentada pelos solos. Observa-se que nos solos AMJ e FRAL mesmo após imersão, o solo estabilizado apresentou valor

máximo acima daquele estabilizado sem cura, evidenciando a ação impermeabilizadora e coesiva da emulsão, principalmente para o solo AMJ. Verifica-se também neste caso, a importância do processo de cura na estabilização solo-emulsão, à medida que se observou que os maiores valores da RTI para cada solo foi alcançado na condição de cura após sete dias.

Uma análise acerca dos valores contidos na tabela, e, mesmo particularizando para os maiores valores nos teores ótimos de forma geral, 6%, 8% e 2% (respectivamente solos AMJ, JAB e FRAL com cura), mostra que não há uma uniformização em termos de teores ótimos de emulsão para cada condição de cura e tipo de solo, reforçando uma vez mais a necessidade de se fazer uma análise individual para cada solo e para cada condição de cura.

A Tabela 4.18 mostra os valores das resistências máximas obtidas nos dois ensaios e a relação entre RTI e RCS. Observa-se que estes valores são da mesma ordem de grandeza obtidos por Gondim (2008) para solos de características semelhantes aos estudados nesta pesquisa e por Suarez (2009) para o solo laterítico argiloso analisado por esse autor para as mesmas condições de cura (7 dias com cura sem imersão).

Tabela 4.18 – Valores máximos de RCS e RTI e relação RCS/RTI obtidas para as misturas.

Solo	RCS (MPa)	RTI (MPa)	RTI/RCS
AMJ	0,684	0,245	0,36
JAB	1,611	0,411	0,25
FRAL	2,658	0,597	0,22

#### 4.3.4. Ensaios de Índice de Suporte Califórnia (ISC)

Para realização dos ensaios de ISC, os CPs do solo puro e das misturas foram moldados em cilindros específicos de ISC, na condições ótimas de compactação, sob a energia do Proctor Intermediário. Os CPs foram ensaiados nas condições sem cura e com cura, antes de serem imersos pelo período padronizado de quatro dias. De acordo com Gondim (2008), ensaios de ISC não são considerados adequados para a verificação do comportamento de misturas estabilizadas quimicamente, visto que o método de dimensionamento empírico para tais misturas leva em consideração normalmente os resultados dos ensaios de RCS. Entretanto, interessa à presente pesquisa verificar os resultados obtidos, uma vez que o dimensionamento das camadas de pavimento no Brasil ainda, na maioria dos casos é feito com base nos valores de ISC. Além disso, os valores encontrados podem resultar em discussões importantes na confrontação com os dados existentes na literatura. Por esse motivo, a seguir serão apresentados os resultados obtidos nesta pesquisa.



#### 4.3.4.1. Solo AMJ – ISC

Os valores de ISC e expansão obtidos sem e com cura, para o solo AMJ e suas misturas com emulsão asfáltica são apresentados na Tabela 4.19. Os valores de ISC são também apresentados graficamente na Figura 4.25.

Tabela 4.19 – Valores de ISC e expansão do solo AMJ e suas misturas.

Teor de Emulsão (%)	Sem cura		Com cura (7 dias)	
	ISC (%)	Expansão (%)	ISC (%)	Expansão (%)
0	65	-0,01	70	0,02
2	51	-0,06	62	0,04
4	47	0,00	52	0,04
6	31	0,00	33	-0,02
8	24	0,00	27	0,03

Obs.: valores negativos significam retração na submersão e podem ser considerados iguais a zero

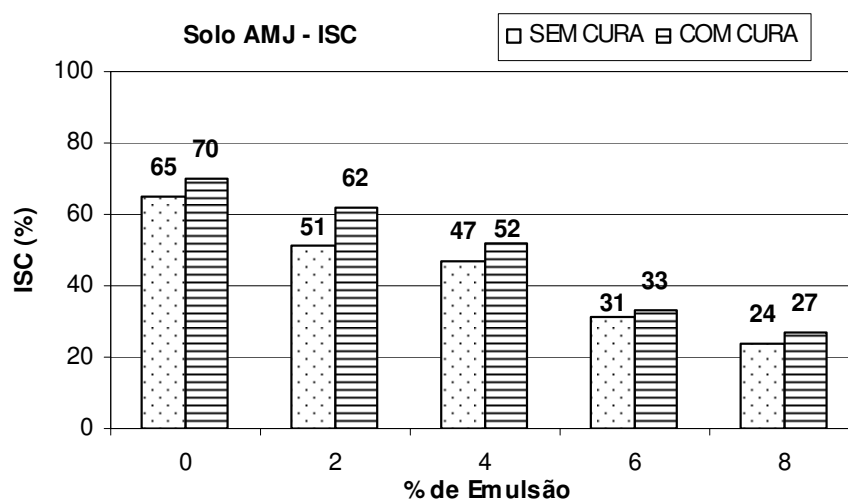


Figura 4.25 – Valores de ISC sem e com cura para o solo AMJ e suas misturas.

Analisando os resultados da tabela e observando a figura, verifica-se que as misturas do solo AMJ com emulsão possuem valores de ISC inferiores aos alcançados pelo solo sem adição de emulsão nas duas condições de cura. Observa-se um padrão bem definido de decréscimo do valor de ISC à medida que o teor de emulsão cresce. Nota-se ainda que todos os CPs das misturas submetidos ao processo de cura sofreram um acréscimo em seu valor, quando se compara com os resultados obtidos dos CPs ensaiados sem cura, demonstrando que houve uma ação da estabilização da emulsão, embora de pequena magnitude, visto que os valores ainda ficaram abaixo do valor obtido para o solo sem emulsão.

Com relação aos valores de expansão contidos na Tabela 4.20, observa-se também que estes praticamente não variam, sendo detectado apenas uma leve tendência a que o solo tenha uma menor possibilidade de retração com adição da emulsão.

Não foi identificado nos resultados de ISC deste solo um teor ótimo de emulsão que conduzisse a uma máxima capacidade de suporte, uma vez que as misturas estabilizadas apresentaram valores de ISC menores que o valor observado para o solo puro. Como o teor de 2% de emulsão é aquele que é responsável pelo maior valor obtido entre as misturas, este será considerado para as duas condições do ensaio como o teor ótimo.

Portanto, de acordo com os ensaios de ISC, observou-se que a emulsão asfáltica não foi capaz de melhorar a amostra do solo AMJ embora, a análise da RCS e RTI para este solo tenha conduzido à conclusão contrária. Pode-se atribuir a este fato, as condições de realização deste ensaio com CPs saturados nas duas condições de cura estabelecidas, enquanto os ensaios de RCS e RTI tiveram os valores de cura sem saturação. Isto leva a crer que as misturas do solo AMJ com emulsão foram susceptíveis à ação da água, sendo recomendável a utilização dessas misturas em rodovias que não estarão sujeitas às condições de saturação ou que tenham sistemas de drenagem eficientes.

#### 4.3.4.2. Solo JAB - ISC

Estão apresentados na Tabela 4.20 os valores de ISC e da expansão obtidos para solo JAB, enquanto que na Figura 4.26 são mostrados os gráficos gerados com os valores de ISC em função do teor de emulsão.

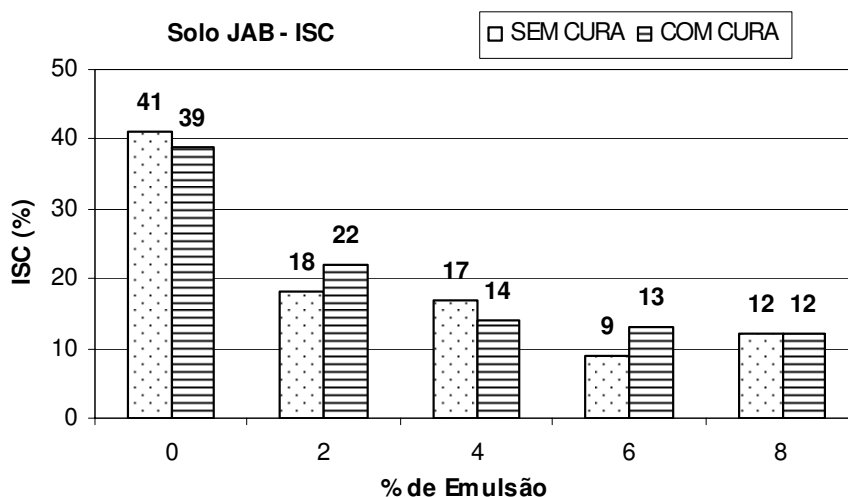
Tabela 4.20 – Valores de ISC e expansão obtidos para os ensaios de ISC com o solo JAB e suas misturas.

Teor de Emulsão (%)	Sem cura		Com cura (7 dias)	
	ISC (%)	Expansão (%)	ISC (%)	Expansão (%)
0	41	0,04	39	0,23
2	18	0,10	22	0,12
4	17	0,17	14	-0,06
6	9	-0,06	13	0,03
8	12	0,1	12	0,34

Obs.: valores negativos significam retração na submersão e podem ser considerados iguais a zero.

A avaliação dos resultados apresentados na Figura 4.26, a exemplo do que foi mostrado na Figura 4.25 (solo AMJ), indica que a adição de emulsão asfáltica também não produziu melhorias na capacidade de suporte do solo. O padrão de comportamento das misturas nas duas condições de cura é semelhante ao solo AMJ, com

tendência ao decréscimo do valor de ISC à medida que o teor de emulsão aumenta. Pode-se também observar que para alguns teores de emulsão, os ensaios do solo sem cura resultaram em valores maiores que aqueles obtidos para o solo com cura, cujo resultado até então ainda não havia sido encontrado nesta pesquisa.



**Figura 4.26 – Valores obtidos dos ensaios de ISC para o solo JAB e suas misturas.**

Com relação aos valores de expansão constantes da Tabela 4.21 observa-se pequena variação, com uma leve tendência de aumento desse parâmetro para a condição com cura, em relação à condição sem cura, o que pode ter ocorrido motivado por uma pequena retração do solo durante os sete dias de cura e com a imersão e conseqüente absorção de água, o CP tende a retornar à sua altura original.

Com base nos valores de ISC, para essa amostra de solo também não se pode definir um teor ótimo que conduza aos melhores resultados, uma vez que praticamente não se observou melhorias nesse parâmetro de resistência a partir da adição de emulsão

#### 4.3.4.3. Solo FRAL - ISC

Os resultados do ensaio de ISC e expansão referentes ao solo FRAL e suas misturas estão apresentados na Tabela 4.21. Para um análise mais detalhada, os valores de ISC também são mostrados na Figura 4.27.

Tabela 4.21 – Valores de ISC e expansão obtidos para o solo FRAL e suas misturas.

Teor de Emulsão (%)	Sem cura		Com cura (7 dias)	
	ISC (%)	Expansão (%)	ISC (%)	Expansão (%)
0	10	2,26	11	2,84
2	11	1,07	13	1,09
4	8	0,45	11	2,19
6	7	2,08	10	1,17
8	7	1,48	9	1,79

Analisando-se o comportamento do solo FRAL, constata-se que a adição da emulsão promoveu melhoras em sua capacidade de suporte (ao contrário dos solos AMJ e JAB), tanto na condição sem cura, quanto na condição com cura, sendo observado um padrão bem definido e comum para as duas condições de cura, ou seja, aumento no valor de ISC até o percentual de 2% de emulsão, seguido de um decréscimo a partir deste. Observa-se ainda que na condição com cura, apenas o teor de 8% ficou abaixo do ISC para o solo puro, enquanto que para o solo sem cura somente o teor de 2% alcançou valor superior ao do solo sem adição de emulsão, confirmando novamente a importância da cura nesse tipo de estabilização.

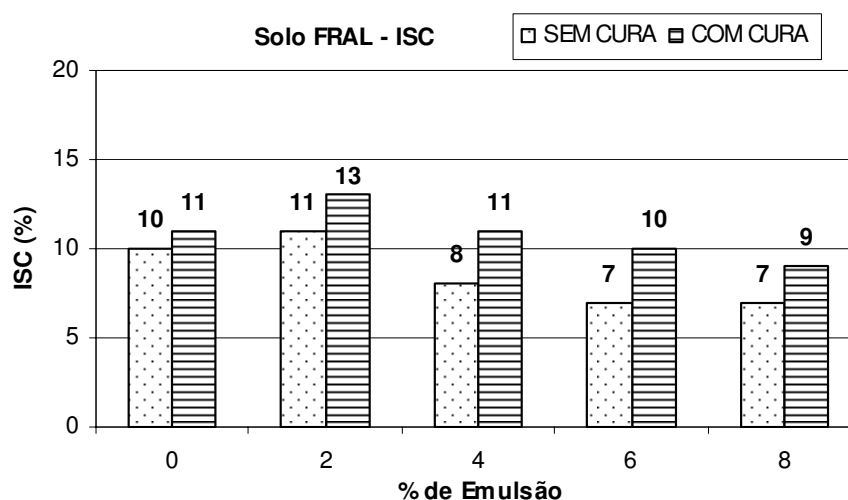


Figura 4.27 – Valores obtidos dos ensaios de ISC para o solo FRAL e suas misturas.

Convém lembrar que os solos argilosos quando são comprimidos e perdem umidade tendem a aumentar a resistência, mas quando úmidos e/ou submetidos à saturação, podem se tornar muito plásticos e perder consideravelmente sua resistência. Deduz-se desta pesquisa com esse solo, que a ação impermeabilizante da emulsão asfáltica parece ter agido como um filme protetor nas partículas deste, impedindo que a saturação influenciasse na deformabilidade do material.

Com relação à expansão, observou-se uma tendência de diminuição nos seus valores com o aumento do teor de emulsão. Para o teor de 2% de emulsão houve uma redução na expansão de aproximadamente 53% (CPs sem cura) e 63% (CPs com cura). Assim, mesmo no processo com cura, quando se sabe que normalmente cresce a absorção e, em consequência, para um solo argiloso se esperava uma maior expansão (ocorreu para o solo puro), a estabilização efetuada se mostrou eficiente no sentido de diminuir o processo expansivo do solo.

Portanto, com base nos resultados dos ensaios de ISC realizados com o solo FRAL, a estabilização com emulsão indica alguma melhoria na capacidade de suporte das misturas testadas. A secagem dos CPs em câmara úmida pelo período de 7 dias antes da imersão resultou em aumentos da ordem de 18% em relação ao seu correlato puro, e 30% em relação ao solo puro sem cura, enquanto que a condição sem cura melhorou em cerca de 10% o valor suporte em relação ao solo puro. Assim, é possível definir o teor de 2% de emulsão como sendo o teor ótimo para esse solo, para as duas condições de cura analisadas.

#### 4.3.4.4. Resumo das Análises dos Efeitos da Emulsão sobre o ISC

A análise conjunta dos dados de ISC obtidos para as três amostras indica que os solos apresentaram comportamentos diferentes entre si, ressaltando-se a inaplicabilidade do ensaio de ISC na avaliação do comportamento de misturas estabilizadas quimicamente, e lembrar que os ensaios de ruptura para medidas dos parâmetros de resistência mecânica analisados anteriormente (RCS e RTI) indicaram os efeitos positivos da adição de emulsão asfáltica sobre as amostras de solo testadas. A Tabela 4.22 mostra o resumo dos melhores resultados obtidos de ISC para os três solos e seus respectivos teores de emulsão.

Tabela 4.22 – Valores de teor ótimo<sup>(\*)</sup> de emulsão e máximos de ISC obtidas para misturas asfálticas.

Solo	Sem Cura		Com Cura	
	T <sub>otem</sub> (%)	ISC (%)	T <sub>otem</sub> (%)	ISC (%)
AMJ	2,0 <sup>(*)</sup>	51	2,0 <sup>(*)</sup>	62
JAB	2,0 <sup>(*)</sup>	18	2,0 <sup>(*)</sup>	22
FRAL	2,0	11	2,0	13

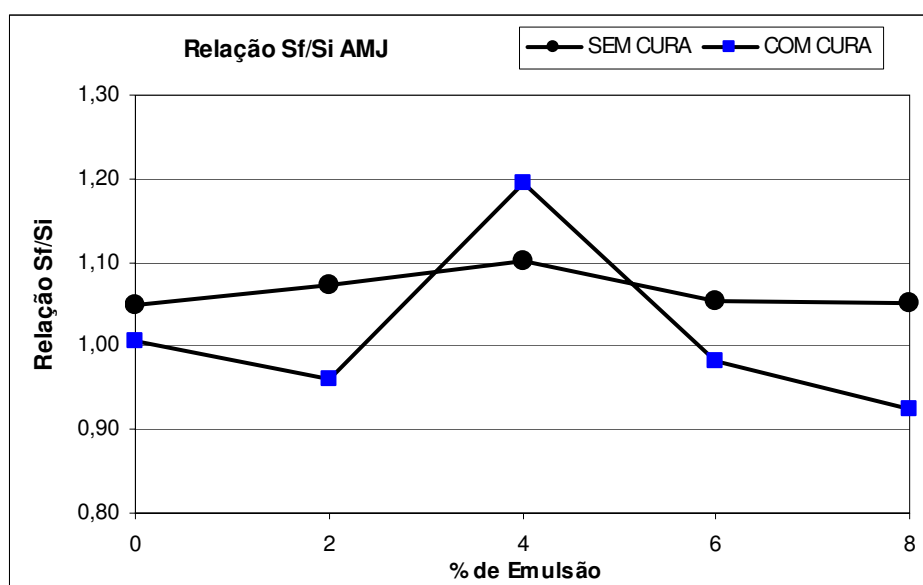
(\*) – Maiores valores obtidos

De forma geral, apenas o solo FRAL apresentou melhora em sua capacidade de suporte com a presença da emulsão, podendo-se creditar a isso às condições de realização deste tipo de ensaio, ou seja, a condição de saturação.

Verifica-se ainda que todas as misturas preparadas como o solo AMJ (e solo JAB 2% com cura) apresentam valores de ISC acima do valor apontado para sub-base (20%). No caso do teor de 2% (valor com cura) para o solo AMJ, o mesmo supera por exemplo, o valor preconizado pelo DNER-ES 303 (1997) ou seja, de ISC limite de 60% para bases estabilizadas granulometricamente para rodovias com tráfego abaixo do valor de  $N = 5 \times 10^6$ .

O solo FRAL, que apresentou melhorias em sua capacidade de suporte, originalmente não poderia ser utilizado nem mesmo como subleito, pois, segundo Benucci et al. (2007), o valor da expansão aceitável seria 2%, enquanto que para reforço de subleito o valor limitante é 1%. Portanto, por uma pequena diferença (0,09%), quando se considera o valor de teor ótimo de emulsão, esse material que puro seria inservível, estabilizado com adição de emulsão poderia ser utilizado até como reforço de sub-leito.

Para se verificar a ação impermeabilizadora da emulsão neste solo, foi feita a determinação da umidade média ao final do ensaio de ISC, com a retirada de amostras das partes superior, inferior e do centro do CP logo após o rompimento. Observou-se que, salvo raras exceções, o teor de umidade da parte superior (onde é feita a penetração do pistão), foi o de maior valor. A partir da umidade final média do CP e da respectiva umidade de moldagem, determinou-se o grau de saturação inicial ( $S_i$ ) e final ( $S_f$ ) dos CPs, levando-se em consideração que o peso específico dos grãos do solo ( $\gamma_g$ ) não sofreu variação com a adição da emulsão. Os gráficos provenientes da relação  $S_f/S_i$  x teor de emulsão estão apresentados nas Figuras 4.28, 4.29 e 4.30



**Figura 4.28 – Valores da relação  $S_f/S_i$  obtidos nos ensaios de ISC – solo AMJ e suas misturas.**

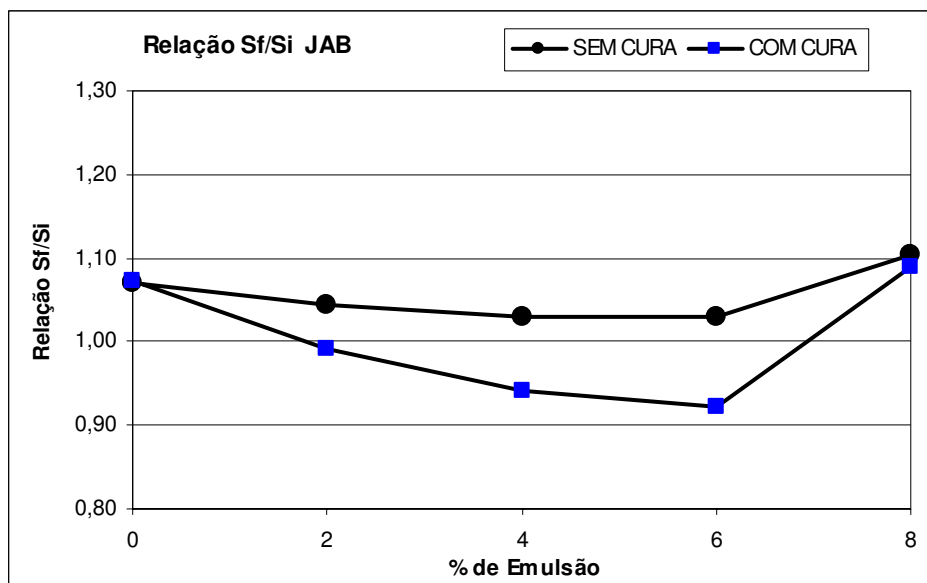


Figura 4.29 – Valores da relação Sf/Si obtidos nos ensaios de ISC – solo JAB e suas misturas.

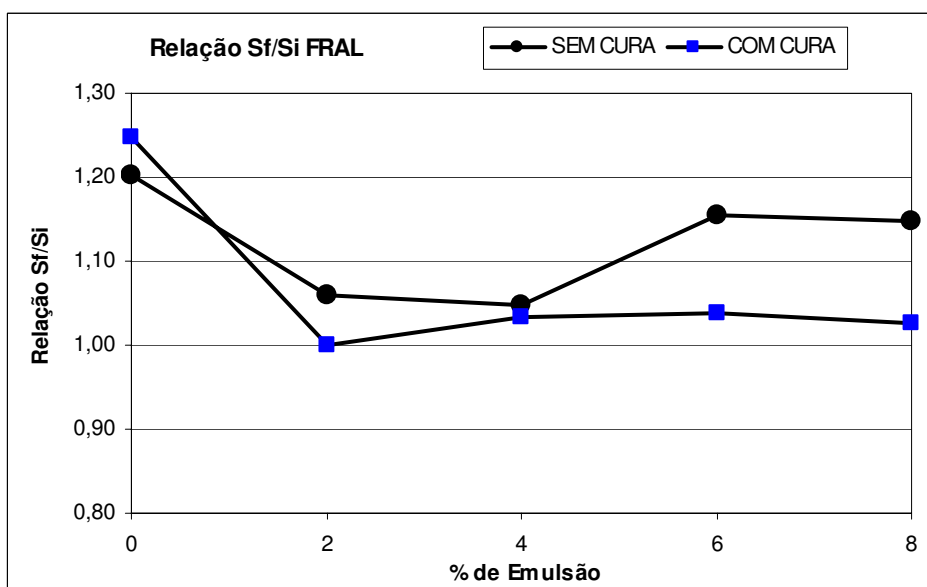


Figura 4.30 – Valores da relação Sf/Si obtidos nos ensaios de ISC – solo FRAL e suas misturas.

Analisando-se as figuras, se percebe que apesar do processo de cura produzir, em princípio, um aumento no grau de saturação das misturas, por causa da maior absorção, salvo com o teor de 4% para o solo AMJ e pelos solos puros (como era esperado), os valores da relação Sf/Si se situaram sempre abaixo da linha Sf/Si do processo sem cura. Este fato revela a tendência da saturação final (mesmo com secagem prévia do CP com cura) ser sempre menor, o que prova que a emulsão não deixa que a água perdida seja reabsorvida, conforme sugere Mattos (1991), o que pode explicar o fato do solo FRAL se manter num patamar maior de resistência.

Discutindo acerca da condição de imersão numa estabilização solo-betume, Inglês e Metcalf (1972), apud Gondim (2008), comentam que os efeitos benéficos da estabilização betuminosa em areias puras podem ser prejudicados se houver penetração de água nas misturas, e assim, a água desfazer a fraca aderência entre o betume e a superfície das partículas silicosas. Desta forma, amostras com concentração elevada de sílica tenderiam a perder os efeitos da estabilização quando imersas em água, o que pode ser o motivo dos solos AMJ e JAB não terem tido uma boa resposta com relação a este ensaio. Jacintho (2005), apud Gondim (2008), ao estudar os efeitos da estabilização betuminosa sobre o ISC de três amostras de solo de diferentes composições granulométricas, constatou também comportamentos heterogêneos com as amostras analisadas por aquele autor, com base em ensaios de ISC.

Portanto, os resultados da análise realizada neste item também apontam para o fato da concentração de sílica nas amostras dos solos desta pesquisa ter sido um fator inibidor dos efeitos benéficos da estabilização com emulsão, especialmente em casos onde os materiais estarão sujeitos à saturação. No caso do solo FRAL, que experimentou ganho de resistência, mesmo possuindo teor elevado de sílica, pode ter sido afetado em sua melhoria pela maior quantidade de material coesivo que possui, em contrapartida aos outros dois solos que são predominantemente arenosos. O autor desta dissertação sente a necessidade de se realizar estudos mais aprofundados, com uma maior quantidade de amostras para reforçar estas conclusões.

#### **4.3.5. Ensaios Triaxiais de Carga Repetida**

Os ensaios triaxiais de carga repetida foram realizados para se avaliar o comportamento dos solos e das misturas solo-emulsão, com base na análise dos valores do Módulo de Resiliência, um parâmetro obtido a partir da aplicação de carregamentos repetidos sobre a amostra, sob baixos níveis de deformação, ou seja, no regime elástico do material.

Para ser realizar os ensaios triaxiais de carga repetida, foram moldados corpos de prova com as dimensões e os procedimentos já mencionados no Capítulo 3, obedecendo aos parâmetros de compactação determinados para cada mistura. Os ensaios para determinação do MR foram efetuados com amostras submetidas às mesmas condições de cura dos ensaios anteriormente apresentados. A fase de condicionamento da amostra na célula triaxial do equipamento SIEMBS, e o ensaio propriamente dito, foram realizados conforme também descrito no capítulo anterior.

A partir dos resultados experimentais obtidos (Gráficos no Anexo A), nos ensaios de MR, foi feito um tratamento dos mesmos usando o programa Excel para os parâmetros de resiliência e o coeficiente de determinação, para as Equações 3.10 e 3.11. Para o modelo composto (Equação 3.12), os parâmetros de resiliência e o coeficiente



de determinação foram obtidos através de programa para tratamento e análise de dados experimentais, o Lab Fit Ajuste de Curvas, desenvolvido por pesquisadores da UFCG (SILVA, W. e SILVA, C. 2003-2004 versão 7.2.19).

Os parâmetros de resiliência dos solos e suas misturas, para os modelos analisados conforme as Equações (3.10), (3.11) e (3.12), referentes aos solos AMJ, JAB e FRAL, assim como os coeficientes de determinação obtidos para cada um, são apresentados na Tabela 4.23.

Analisando-se os parâmetros dos diferentes modelos, mostrados na referida tabela, verifica-se que ora os solos e suas misturas se adaptam a um modelo, ora se adequam melhor a outro. De forma geral, o solo AMJ se adequou bem ao modelo dependente da tensão confinante (Equação 3.10), tendo com exceção, o ensaio com cura, onde os coeficientes  $R^2$  foram relativamente menores. O modelo composto forneceu resultados bem mais promissores.

O solo JAB, em todas as condições de cura, se mostrou bem adequado ao modelo composto, pois, mesmo quando esse modelo deu resultados de  $R^2$  abaixo de 0,7, ainda foi muito melhor que o seu similar apresentado pelos outros dois modelos.

No caso do solo FRAL, pode-se observar uma boa correlação de MR com a tensão desviadora na condição sem cura, e, de forma geral, também na condição com cura, exceto para o solo puro. Entretanto, na condição com cura e imersão, os valores de  $R^2$  foram bem menores, principalmente para a mistura com o teor de 8% de emulsão. Observa-se que também para esse solo, os coeficientes  $R^2$  referentes ao modelo composto sempre apresentaram melhores resultados que os dois outros modelos em todas as condições de cura analisadas.

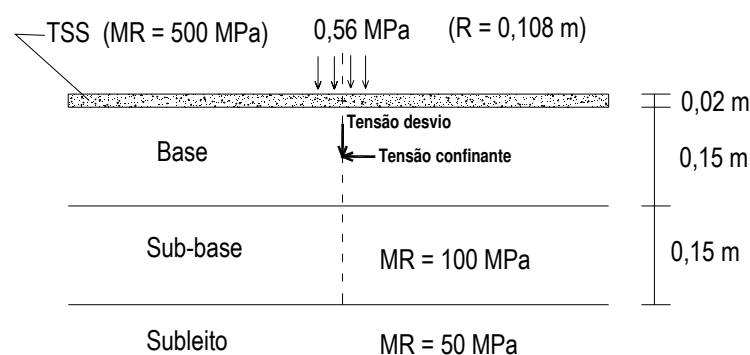
Portanto, com base nos valores de  $R^2$  obtidos dos ensaios realizados com todos os solos e misturas, optou-se pela adoção do modelo composto, aquele que apresentou o melhor desempenho, na opinião deste autor.

Tabela 4.23 – Parâmetros de resiliência e coeficiente de determinação obtidos dos modelos para os ensaios de MR.

Ensaio	Modelo	Teor (%)	Solo											
			AMJ				JAB				FRAL			
			k1	k2	k3	R <sup>2</sup>	k1	k2	k3	R <sup>2</sup>	k1	k2	k3	R <sup>2</sup>
SEM CURA	MR = $k_1\sigma_3^{k_2}$	0	238,1	0,525	-	0,88	157,8	0,221	-	0,73	22,4	-0,292	-	0,73
		2	244,5	0,501	-	0,86	172,1	0,258	-	0,76	24,8	-0,281	-	0,73
		4	253,3	0,501	-	0,87	166,7	0,204	-	0,71	17,6	-0,311	-	0,82
		6	196,3	0,464	-	0,85	167,1	0,239	-	0,69	30,0	-0,021	-	0,75
		8	200,5	0,446	-	0,81	150,4	0,165	-	0,68	19,7	-0,298	-	0,79
	MR = $k_1\sigma_d^{k_2}$	0	137,9	0,423	-	0,86	120,5	0,160	-	0,58	28,2	-0,267	-	0,92
		2	145,2	0,403	-	0,84	125,3	0,186	-	0,59	31,2	-0,254	-	0,89
		4	150,2	0,403	-	0,85	130,0	0,148	-	0,56	23,9	-0,259	-	0,86
		6	123,9	0,384	-	0,87	122,5	0,165	-	0,49	36,4	-0,018	-	0,82
		8	124,1	0,352	-	0,76	129,8	0,143	-	0,77	25,5	-0,253	-	0,86
	MR = $k_1\sigma_3^{k_2}\sigma_d^{k_3}$	0	240,6	0,320	0,271	0,98	166,1	0,191	0,080	0,78	25,4	-0,099	-0,190	0,92
		2	250,1	0,291	0,282	0,96	184,8	0,216	0,086	0,80	29,0	-0,100	-0,163	0,89
		4	256,3	0,300	0,264	0,97	174,5	0,167	0,067	0,75	19,4	-0,181	-0,124	0,92
		6	196,3	0,246	0,283	0,96	180,1	0,217	0,060	0,74	32,9	-0,103	-0,095	0,85
		8	218,1	0,288	0,244	0,93	147,6	-0,074	0,107	0,81	21,3	-0,159	-0,133	0,90
COM CURA	MR = $k_1\sigma_3^{k_2}$	0	249,4	0,249	-	0,64	507,4	0,322	-	0,67	166,4	0,714	-	0,10
		2	196,5	0,198	-	0,47	369,4	0,275	-	0,52	260,9	0,183	-	0,43
		4	313,2	0,259	-	0,57	419,7	0,293	-	0,55	393,6	0,304	-	0,55
		6	302,8	0,235	-	0,52	491,8	0,319	-	0,60	269,0	0,215	-	0,49
		8	200,9	0,162	-	0,43	436,2	0,271	-	0,55	241,9	0,222	-	0,45
	MR = $k_1\sigma_d^{k_2}$	0	212,6	0,245	-	0,93	404,1	0,307	-	0,92	183,1	0,132	-	0,50
		2	182,0	0,217	-	0,84	329,4	0,297	-	0,92	251,1	0,214	-	0,88
		4	273,4	0,267	-	0,92	362,1	0,306	-	0,90	340,6	0,320	-	0,94
		6	275,2	0,255	-	0,91	412,1	0,325	-	0,94	246,2	0,232	-	0,86
		8	193,4	0,188	-	0,88	384,1	0,286	-	0,93	228,6	0,255	-	0,90
	MR = $k_1\sigma_3^{k_2}\sigma_d^{k_3}$	0	229,6	0,013	0,264	0,94	483,3	0,059	0,315	0,94	150,0	-0,170	0,259	0,72
		2	184,2	-0,047	0,283	0,88	334,3	-0,056	0,378	0,94	233,6	-0,089	0,296	0,93
		4	285,5	-0,234	0,318	0,93	372,5	-0,046	0,380	0,92	355,1	-0,037	0,389	0,95
		6	274,2	-0,048	0,315	0,93	424,7	-0,033	0,383	0,95	251,2	-0,041	0,295	0,88
		8	182,0	-0,076	0,257	0,92	394,0	-0,030	0,337	0,94	214,2	-0,097	0,350	0,93
COM CURA E IMERSÃO	MR = $k_1\sigma_3^{k_2}$	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		2	237,4	0,567	-	0,83	111,2	-0,190	-	0,51	21,3	-0,217	-	0,75
		4	136,1	0,261	-	0,71	140,0	0,263	-	0,64	46,2	-0,074	-	0,36
		6	-	-	-	-	170,5	0,299	-	0,71	33,8	-0,135	-	0,60
		8	-	-	-	-	123,6	0,284	-	0,21	74,3	-0,036	-	0,16
	MR = $k_1\sigma_d^{k_2}$	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		2	132,7	0,460	-	0,82	90,7	0,150	-	0,48	25,7	-0,193	-	0,89
		4	112,2	0,245	-	0,94	104,5	0,204	-	0,58	49,3	-0,065	-	0,41
		6	-	-	-	-	122,6	0,232	-	0,64	39,2	-0,105	-	0,55
		8	-	-	-	-	122,0	0,354	-	0,48	80,9	-0,008	-	0,01
	MR = $k_1\sigma_3^{k_2}\sigma_d^{k_3}$	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		2	244,3	0,345	0,301	0,97	117,5	0,122	0,110	0,62	22,7	-0,073	-0,154	0,93
		4	125,4	0,054	0,227	0,94	153,5	0,185	0,141	0,75	46,6	-0,031	-0,051	0,46
		6	-	-	-	-	189,0	0,216	0,152	0,81	133,8	-0,099	-0,047	0,68
		8	-	-	-	-	116,7	-0,307	0,729	0,70	71,9	-0,087	0,049	0,30

#### 4.3.5.1. Escolha do Nível de Tensões para Análise de Resultados de MR

Para se efetuar as análises das alterações provocadas pela adição da emulsão aos solos em estudo, torna-se necessário selecionar o nível de tensões, mais especificamente os valores do par tensões  $\sigma_3$  e  $\sigma_d$ . Benucci et al (2007) indicam, a partir de retroanálises (pela interpretação das bacias de deformação), que para a determinação de módulos de elasticidade de camadas de pavimentos e subleito, seria adequado o valor de 5,65 kgf/cm<sup>2</sup> (0,565 MPa) para o carregamento vertical externo. Aproximadamente este valor (0,56 MPa) foi utilizado por Gondim (2008) e Suárez (2009), cujo carregamento, corresponde à ação do eixo simples padrão de 8,2 tf (pressão de 5,6 kgf/cm<sup>2</sup>, aplicada numa área de raio igual a 10,8 cm), sendo desconsideradas as tensões gravitacionais, valor este, também adotado neste trabalho.



**Figura 4.31 – Estrutura do pavimento considerada na análise do MR.**

Para a camada de TSS (tratamento superficial simples), foi adotado o valor de MR igual a 500 MPa conforme Miceli Jr (2006), Soliz (2007), Gondim (2008), enquanto para a camada de sub-base e subleito foram adotados valores próximos aos adotados pelos autores citados anteriormente e por Suárez e Parreira (2008) conforme a Figura 4.31. A partir da estrutura do pavimento e carregamento externo esquematizados na Figura 4.31, com o auxílio do programa ELSYM 5, foi determinado o nível de tensões ( $\sigma_3$  e  $\sigma_d$ ), no centro da camada de base. Estes valores resultaram em uma tensão confinante média de aproximadamente 0,048 MPa e tensão desvio média de cerca de 0,362 MPa.

Baseado nos valores admitidos para  $\sigma_d$  e  $\sigma_3$ , bem como no modelo resiliente composto, usando-se os parâmetros apresentados na Tabela 4.23, foram calculados os valores de MR, que serviram de base para as análises a seguir efetuadas.

#### 4.3.5.2. Módulo de Resiliência – Solo AMJ

Os resultados do MR do solo AMJ e suas misturas obtidos conforme proposto neste trabalho, constam na Tabela 4.24, sendo graficamente apresentados na Figura 4.32. Na Tabela 4.24 também são mostrados dados acerca das condições de umidade a que os CPs foram ensaiados, tais como os valores de umidade residual (CPs com

cura), absorção durante a imersão e umidade dos CPs no ensaio ( $w_{ens}$ ) com cura e imersão, em relação à umidade de moldagem ( $w_m$ ). Os gráficos resultantes dos ensaios realizados em função das tensões confinantes e tensão desvio encontram-se no Anexo A.

Tabela 4.24 – Valores de MR, das umidades residuais e absorção do solo AMJ e suas misturas.

Teor de Emulsão (%)	SEM CURA	COM CURA		COM CURA + IMERSÃO		
	MR (MPa)	MR (MPa)	$w_{res}$ (% de $w_m$ )	MR (MPa)	$w_{ens}$ (% de $w_m$ )	Absorção (% de $w_m$ )
0	69,1	168,9	47,6	0,0 (*)	—	—
2	77,6	159,4	51,1	63,1	83,6	32,5
4	78,8	420,6	40,4	84,5	108,5	68,1
6	69,8	230,3	50,0	—	101,2	51,2
8	71,0	176,4	39,8	—	94,0	54,2

(\*) – CPs se desintegraram na imersão

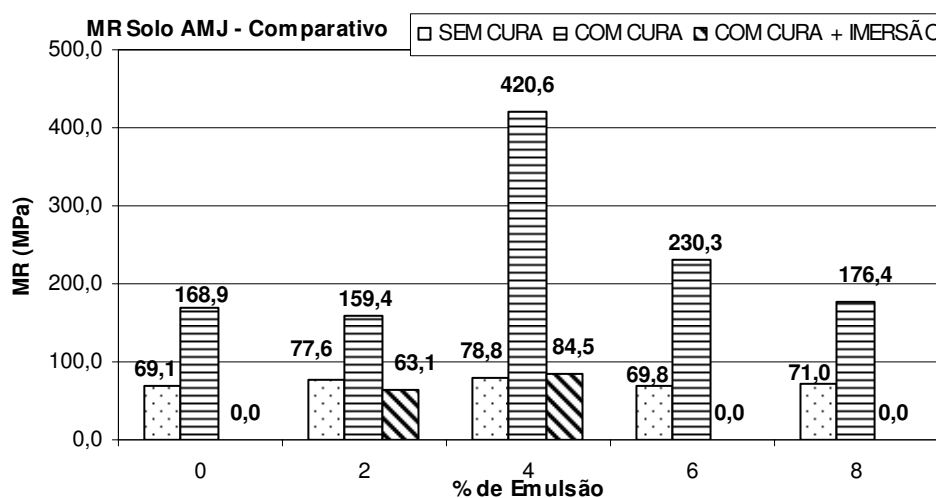


Figura 4.32 – Valores de MR obtidos para solo AMJ e suas misturas.

Verifica-se que para o solo AMJ, na condição sem cura (exceto para o teor de 6%), os parâmetros de resiliência mostram uma influência maior da tensão confinante (como era de se esperar, pois o solo é arenoso), enquanto que para as condições com cura e cura e imersão, de forma geral, a influência maior passa a ser da tensão desviadora (exceção 2% cura e imersão), ou seja, os dados indicam que a cura tornou o solo mais susceptível às variações da tensão desvio.

Em geral, observa-se que o solo AMJ experimenta uma melhoria no seu comportamento resiliente provocada pela estabilização, em todas as condições de cura adotadas nos ensaios. Observa-se na Figura 4.32 uma

tendência de crescimento do valor do MR com o teor de emulsão até 4%, seguida de um significativo decréscimo para as condições de ensaio sem e com cura. Para a condição de cura e imersão, apenas as misturas com 2% e 4% puderam ser testados, pois os CPs de solo puro se desintegraram, como aconteceu em outros ensaios, enquanto que aqueles com 6% e 8% de emulsão não suportaram o condicionamento, e algumas vezes não suportaram até o final do ensaio.

Quanto ao suposto teor ótimo de emulsão para esse solo, os melhores resultados foram obtidos com os teores de 4%, para todas as condições de ensaio. Consta-se que esses percentuais coincidem com o menor valor de umidade residual (cura) e com o maior valor de absorção (cura e imersão). Novamente se constata que a melhoria causada pela emulsão no solo se deu a partir do ensaio na condição com cura, em que o incremento no valor de MR (com cura), em relação ao solo puro, foi de cerca de 149%. Para o solo puro, sem cura, esse aumento foi de aproximadamente 509%. Ainda que de forma tímida, na condição sem cura houve aumento para o teor ótimo em relação ao solo puro em torno de 14%. A mesma análise não se pode fazer com as misturas na condição de cura e imersão pelos motivos já mencionados.

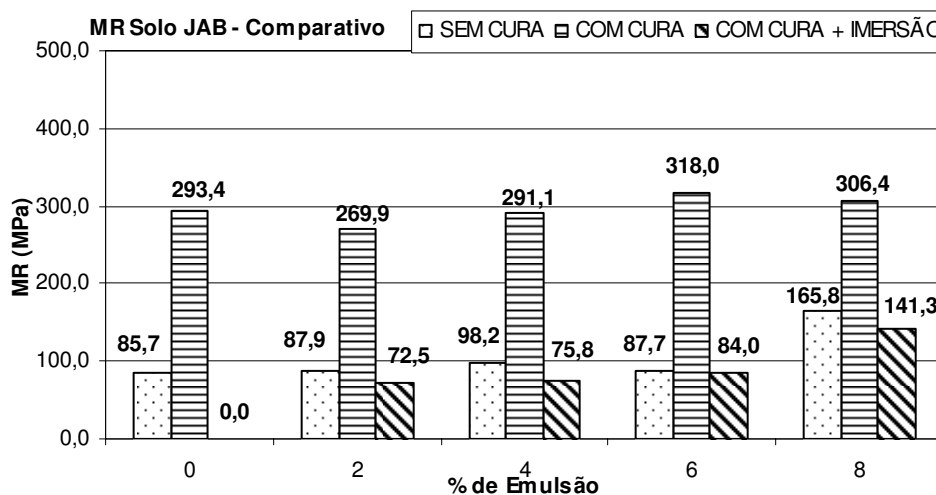
#### 4.3.5.3. Módulo de Resiliência – Solo JAB

Para o solo JAB, os valores de MR obtidos para o nível de tensões e o modelo resiliente adotados, encontram-se na Tabela 4.25 e na Figura 4.33. A Tabela 4.25 mostra também as condições de umidade dos ensaios, com os valores de umidade residual (misturas com cura), absorção durante a imersão e umidade dos CPs no ensaio com cura e imersão em relação à umidade de moldagem. Os gráficos dos ensaios realizados em função das tensões confinantes e tensão desvio podem ser observados no Anexo A.

Tabela 4.25 – Valores de MR, das umidades residuais e absorção do solo JAB e suas misturas.

Teor de Emulsão (%)	SEM CURA	COM CURA		COM CURA + IMERSÃO		
	MR (MPa)	MR (MPa)	$w_{res}$ (% de $w_m$ )	MR (MPa)	$w_{romp}$ (% de $w_m$ )	Absorção (% de $w_m$ )
0	85,7	293,4	62,5	0,0 (*)	—	—
2	87,9	269,9	61,9	72,5	92,8	31,9
4	98,2	291,1	59,6	75,8	91,2	31,6
6	87,7	318,0	62,2	84,0	90,1	27,9
8	165,8	306,4	56,6	141,3	118,2	61,6

(\*) – CPs se desintegraram na imersão



**Figura 4.33 – Valores de MR obtidos para o solo JAB e suas misturas.**

Os dados mostrados na Tabela 4.25 e na Figura 4.33 revelam que, de forma geral, houve melhoria nos valores do MR das misturas do solo JAB, quando comparados com o solo puro, mas se percebe uma queda nos valores de MR do solo com emulsão (com cura), quando são comparados os valores de MR para as misturas nos teores de 2%, e 4% de emulsão. Apenas as misturas preparadas com o teores de 6% e 8% de emulsão ultrapassaram o valor obtido para o solo puro. Entretanto, convém destacar que apesar do solo puro ter alcançado um patamar acima de algumas das misturas nesta condição, os CPs quando imersos se desintegram por completo, perdendo toda sua resistência em poucos minutos.

Percebe-se que os maiores valores absolutos de MR foram obtidos na condição com cura, que no caso da mistura de solo preparada com 6% de emulsão chega a superar em 271% o MR do solo puro, sem cura. A melhoria já se faz presente logo após a moldagem, uma vez que os CPs de teor ótimo, sem cura nesse caso, tiveram um aumento em relação ao solo puro sem cura de 93%. Até mesmo os CPs sob imersão que não podem ser comparados com o solo puro em seu teor ótimo, chegaram a uma melhoria de cerca de 65% se comparado ao solo puro sem cura.

#### **4.3.5.4. Módulo de Resiliência – Solo FRAL**

Os resultados obtidos de MR através do modelo composto e para o nível de tensões adotado para o solo FRAL encontram-se na Tabela 4.26 e na Figura 4.34. Da mesma forma como foi feito para os demais solos, a Tabela 4.26 apresenta também as condições de umidade sob as quais os CPs foram ensaiados, no que se refere aos valores de umidade residual (misturas com cura), absorção durante a imersão e umidade no ensaio com cura e imersão em relação à umidade de moldagem. Os gráficos resultantes dos ensaios realizados em função das tensões confinantes e tensão desvio constam do Anexo A.

Tabela 4.26 – Valores de MR, das umidades residuais e absorção do solo FRAL e suas misturas.

Teor de Emulsão (%)	SEM CURA	COM CURA		COM CURA + IMERSÃO		
	MR (MPa)	MR (MPa)	$W_{res}$ (% de $w_m$ )	MR (MPa)	$W_{romp}$ (% de $w_m$ )	Absorção (% de $w_m$ )
0	41,6	193,2	69,4	0,0 (*)	—	—
2	46,3	226,4	71,5	33,1	98,1	26,6
4	38,1	267,6	76,4	53,9	101,2	24,8
6	49,5	211,0	71,3	189,6	101,3	30
8	39,6	201,2	70,8	89,1	83,2	12,4

(\*) - Se desintegraram na imersão

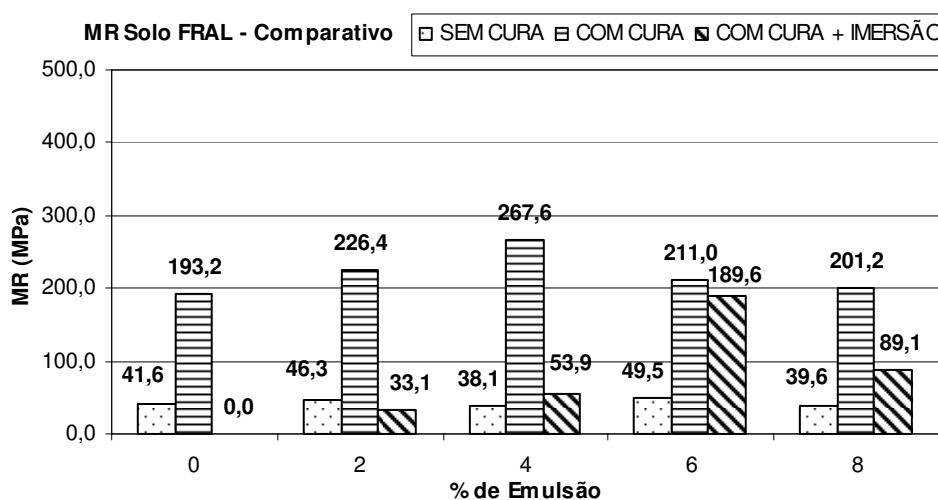


Figura 4.34 – Valores de MR obtidos para o solo FRAL e suas misturas.

Os dados apresentados na Tabela 4.26 e na Figura 4.34 revelam que houve melhoria nos valores de MR das misturas preparadas com o solo FRAL. Para as condições sem cura e cura e imersão, a tendência mostrada é de crescimento do MR com o aumento do teor de emulsão, até 6%, seguido de um decréscimo no valor de MR para o teor de 8% de emulsão. Na condição com cura, a tendência observada é de aumento do MR até 4%, a partir do qual os valores de MR iniciam o decréscimo até os 8% de emulsão. É importante destacar que na condição com cura, todas as misturas apresentaram valores do MR acima do valor obtido do solo puro na mesma condição.

É interessante destacar também a variação sofrida em termos do MR com relação à umidade residual, na condição com cura. O comportamento é definido pelo aumento do MR com o aumento da umidade residual, à medida que cresce o teor de emulsão e se constata que foi na maior umidade residual que se obteve o maior valor do MR.

Os teores supostamente ótimos são de 6%, 4% e 6%, para as condições sem cura, com cura e cura e imersão, respectivamente. O maior valor absoluto em resistência ficou para a condição com cura, assim como aconteceu para os demais solos, onde o aumento do MR em relação ao solo puro com cura foi de cerca de 39%, atingindo-se em torno de 543% de aumento, quando comparado ao solo puro sem cura. A melhoria já se faz presente logo após a moldagem, uma vez que os corpos de prova com o teor ótimo (6%), sem cura nesse caso, tiveram um aumento em relação ao solo puro sem cura de 19%. Percebeu-se que nenhum dos três teores considerados ótimos corresponde ao maior valor de  $\gamma_{dm\acute{a}x}$ , obtido para esse solo, sendo que o valor de 4% de emulsão corresponde ao segundo menor valor obtido de peso específico aparente seco máximo, sugerindo mais uma vez que nem sempre a maior resistência corresponde ao maior  $\gamma_{dm\acute{a}x}$  na estabilização solo-emulsão.

Foi marcante o comportamento apresentado pelas misturas na condição de cura e imersão, que não podem ser comparados com o solo puro em seu teor ótimo (desintegração dos corpos de prova de solo puro), mas chegaram a um ganho próximo de 356%, quando comparados ao solo puro sem cura, ficando bem próximo ao valor apresentado pelo solo puro com cura. Vale ressaltar ainda que nesta condição, para o solo FRAL, apenas a mistura de solo com o teor de 2% de emulsão apresentou MR abaixo do solo puro sem cura.

#### 4.3.5.5. Resumo dos Resultados do MR

A Tabela 4.27 mostra um resumo com os teores considerados ótimos de emulsão ( $T_{otem}$ ) e os respectivos valores do MR alcançados nos ensaios triaxiais de carga repetida, sob o nível de tensões empregado e adotando-se o modelo resiliente composto.

Tabela 4.27 – Resumo dos valores de teores ótimos de emulsão e máximos valores do MR.

Solo	Condição					
	Sem cura		Com cura		Cura e Imersão	
	$T_{otem}$ (%)	MR (MPa)	$T_{otem}$ (%)	MR (MPa)	$T_{otem}$ (%)	MR (MPa)
AMJ	4	78,8	4	420,6	4	84,5
JAB	8	165,8	6	318,0	8	141,3
FRAL	6	49,5	4	267,6	6	189,6

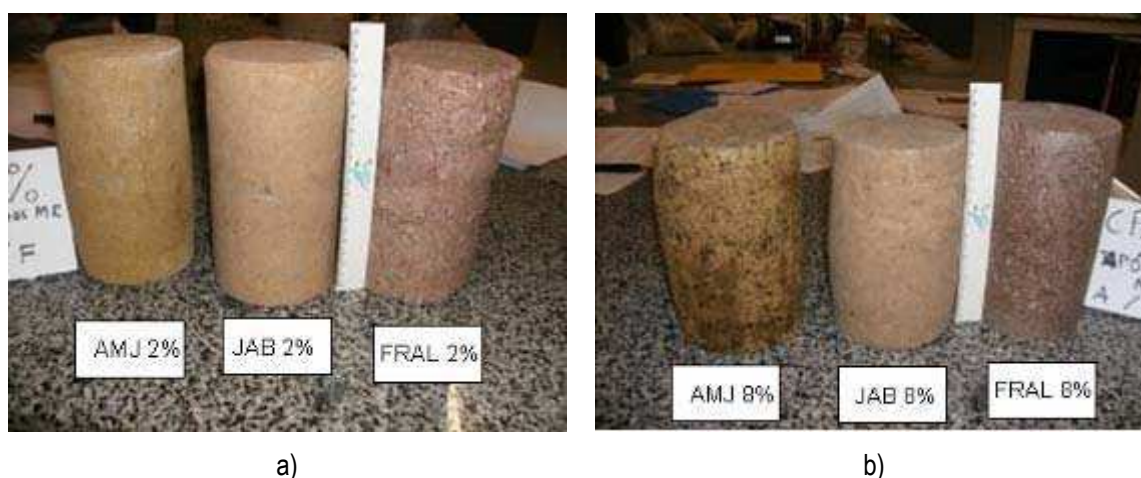
Os resultados mostraram que os valores dos teores considerados ótimos de emulsão, obtidos a partir dos ensaios de MR, não coincidem com os maiores valores de  $\gamma_{dm\acute{a}x}$  obtidos para todos os solos. Este fato corrobora resultados encontrados por outros autores, em trabalhos recentemente publicados sobre o tema (GONDIM 2008, SUÁREZ, 2009).



Os ensaios de MR revelaram tendência de melhorias em todos os solos e em todas as condições de cura adotadas, sendo que o maior valor absoluto de MR foi obtido para o solo AMJ, com cura, enquanto que o menor valor foi obtido com o solo FRAL, sem cura.

Foi observado durante os ensaios de MR que apesar do solo FRAL sofrer uma deformação plástica maior na fase de condicionamento, parece haver uma recuperação deste tipo de deformação bem melhor que os solos AMJ e JAB. As Figuras 4.35 e 4.36 mostram os aspectos de deformabilidade experimentados pelos CPs dos três solos, para as misturas preparadas com os teores extremos de emulsão (2% e 8%) após os ensaios com imersão.

Observam-se na Figura 4.35 (a) três dos CPs relativos a 2% de emulsão. Na figura se percebe que os solos AMJ e JAB tiveram deformação semelhante ao solo FRAL. Na figura 4.35 (b) estão três dos CPs relativos a 8% de emulsão, onde se verifica a diferença de deformação permanente destacada entre os CPs dos três solos com o solo FRAL, mostrando uma deformabilidade menor em relação aos os solos AMJ e JAB, os quais apresentam sinais de “embarrigamento”.



**Figura 4.35 – Aspectos dos CPs depois dos ensaios de MR AMJ, JAB e FRAL, pós-ensaio: a) 2%;  
b) 8%.**



**Figura 4.36 – Aspectos dos CPs depois dos ensaios de MR: AMJ, JAB e FRAL, com 2% e 8%.**

A Figura 4.36 permite se ter uma melhor percepção da deformação permanente sofrida pelos CPs, onde são apresentados os pares dos corpos de prova dos solos AMJ, JAB e FRAL, com 2% e 8% de teor de emulsão. Da figura, se constata que para o solo FRAL, a diferença de deformação é relativamente pequena, entre os dois CPs, enquanto que a diferença é bastante acentuada para os dois CPs dos solos AMJ e JAB. Esse parece ser o que causou, na condição cura e imersão, a inversão da tendência com o solo FRAL, passando a ter um valor maior de MR, enquanto o solo AMJ teve um valor menor do MR, pois, como as Figuras 4.35 e 4.36 denotam, a deformação permanente do solo argiloso passou a ser menor do que a dos solos arenosos ou seja esse solo adquiriu maior rigidez nesta condição. Isso pode ser explicado com base no que já se comentou nesta dissertação, ou seja, a lavagem das partículas envolvidas pelo filme betuminoso produzido com a adição da emulsão compromete alguma resistência coesiva proporcionada nos solos mais arenosos, enquanto o solo argiloso, por conter mais partículas aglutinantes, evitou essa espécie de “lavagem”, adquirindo uma rigidez que não lhe é própria, motivada pela adição da emulsão.

Deve-se observar os altos teores de umidade residual apresentados pelos CPs após a cura, nos ensaios de carga repetida, ficando a média próxima de 46% , 61% e 72%, respectivamente, para os solos AMJ, JAB e FRAL. Conforme ficou comprovado, os CPs com cura alcançaram sempre os melhores resultados. Coincidentemente, os CPs seguem em seus valores do MR com cura na ordem inversa das umidades residuais, ou seja, quanto maior a  $w_{res}$  menor o valor de MR obtido nesta condição. Os valores das umidades residuais mostram que provavelmente, os CPs poderiam ter ainda um acréscimo em seus valores de MR, uma vez que teriam ainda a possibilidade de perda de umidade, o que provocaria algum incremento nos valores do MR com o prolongamento da cura.

Vale ressaltar que esta tendência verificada neste trabalho para RCS tem um limite ( $w_{resot}$ ), que conforme discutido na seção 4.3.2.5, está relativamente longe de ser alcançado pelos três solos. Acerca deste limite, Gondim (2008), por exemplo, detectou decréscimos de resistência dos CPs após 28 dias de cura em relação aos CPs com cura de 7 dias.

Outro fato observado nesta pesquisa foi que a susceptibilidade à água dos três solos parece desprezível nas misturas testadas (exceto para os solos puros e AMJ onde inclusive os CPs de 6% e 8% foram à ruptura), pois se verificou nos valores do MR sem cura e com cura e imersão uma proximidade bem maior que para os ensaios de RCS e RTI.

Observa-se também neste ensaio, que não há uma unanimidade quanto à adoção do teor ótimo de emulsão a usar entre os solos, entre as condições de cura testadas. Cada solo apresentou um determinado teor de emulsão que resultou num máximo valor de MR, a depender da condição de cura. Finalmente, cabe lembrar que um aspecto comum foi a ocorrência de melhoria nos valores do MR com a adição de emulsão para os três solos em todas as condições testadas, mostrando a potencialidade da emulsão para melhorar esse parâmetro resiliente.

A Tabela 4.28 contém os maiores valores de RTI, os maiores valores de MR alcançados e a relação MR/RTI para os respectivos solos. Bernucci et al., (2007) cita que essa relação (MR/RTI) vem sendo usada como um indicador da vida de fadiga de misturas betuminosas uma vez que agrega informações relativas à rigidez e a resistência, sendo desejável um valor pequeno da referida relação, pois com frequência se busca: i) baixa rigidez para evitar elevada absorção de tensões que podem levar ao trincamento prematuro do revestimento.; ii) alta resistência a tração uma vez que em geral uma alta resistência na ruptura é também associada a uma maior resistência à fadiga.

Tabela 4.28 – Valores máximos de MR e RTI e relação MR/RTI obtidas para as misturas.

Solo	MR (MPa)	RTI (MPa)	MR/RTI
AMJ	378,5	0,245	1545
JAB	364,2	0,411	886
FRAL	306,0	0,597	513

O autor relaciona uma série de valores para MR/RTI obtidos para diversos tipos de misturas betuminosas sendo que os valores da relação variam 1751 a 7755. Observando-se a Tabela 4.28 percebe-se que o maior valor obtido para MR/RTI das misturas solo-emulsão é inferior ao mínimo relacionado por Bernucci et al., (2007) e, que o solo FRAL obteve o menor resultado para a relação. Observe-se que os valores da relação MR/RTI fornecidos pelo autor citado, não engloba valores para misturas solo-emulsão, não se podendo, portanto, retirar conclusões de ordem mais apurada no que se refere ao bom ou mau desempenho das misturas efetuadas neste trabalho baseado nos valores da relação referenciada, ficando a informação da Tabela 4.28 como uma contribuição a mais para formação de um banco de dados referente ao assunto.

### 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Neste capítulo são apresentadas, inicialmente, as principais conclusões obtidas acerca do comportamento mecânico dos solos e das respectivas misturas solo-emulsão, baseadas na análise dos resultados do programa experimental executado. Em seguida, são apresentadas as principais sugestões para pesquisas futuras sobre o tema.

#### 5.1. CONCLUSÕES

##### 5.1.1. Ensaio de Compactação

A adição da emulsão nos solos provocou alterações nos valores do  $\gamma_{dm\acute{a}x}$  e da umidade ótica das amostras de solo, mas não houve um padrão único de comportamento nas amostras analisadas. Os valores do  $\gamma_{dm\acute{a}x}$  se mantiveram praticamente constantes para o solo mais arenoso (AMJ), enquanto que para os outros dois (JAB e FRAL), que possuem um teor de argila mais acentuado, esse parâmetro reduziu-se de forma considerável. Com relação à umidade ótica, o solo mais arenoso sofreu redução deste parâmetro, enquanto que para o solo argiloso ele se manteve praticamente constante. O solo de composição granulométrica intermediária (JAB) sofreu uma redução de maior magnitude na umidade ótica, apenas quando submetido ao maior teor de emulsão experimentalizado (8%).

Os resultados deste ensaio indicam não ser recomendável a utilização dos parâmetros de compactação do solo in natura como guia para preparação das misturas solo-emulsão. Para cada solo e para cada teor de emulsão, os parâmetros de compactação devem ser previamente determinados.

##### 5.1.2. Ensaio de RCS

Sob as três condições sob as quais os solos e as misturas solo-emulsão foram ensaiados (sem cura, com cura e cura e imersão), houve melhoria na RCS de quase todos os solos, exceto o solo mais argiloso, sem cura.

Com relação à influência do teor de emulsão sobre a RCS das misturas, foi constatada a existência de um teor considerado ótimo, acima do qual o teor de emulsão causa a diminuição no valor da resistência. De forma geral, a amostra de solo mais arenoso exigiu uma maior quantidade de emulsão para se atingir uma estabilização mais satisfatória que a dos solos mais coesivos. Não houve um teor ótimo comum a todos os solos, mas sim, um para

cada condição de cura. Os solos mais coesivos apresentaram o teor de 2% como ótimo em praticamente todas as condições, com exceção do solo FRAL, com cura e imersão.

Foi constatado que os maiores valores da RCS obtidos para todos os solos se deram para a condição de cura após os sete dias, em câmara úmida. Foi também observado que para esta condição há uma umidade residual para a qual se alcança uma RCS máxima para cada solo, cuja relação se ajustou bem num modelo parabólico para os três solos.

Não se encontrou relação direta nos resultados dos ensaios de RCS, entre os maiores valores do  $\gamma_{dm\acute{a}x}$  de cada solo ou mistura solo-emulsão e os máximos valores de RCS obtidos para todos os solos. A relação só foi detectada para os ensaios realizados com o solo mais arenoso.

### **5.1.3. Ensaio de RTI**

Os valores de RTI revelaram que a emulsão provocou melhorias nos três solos, para todas as condições de cura testadas. Observou-se que para o caso do solo mais argiloso, a condição de cura com imersão resultou em maiores valores da RTI do que na condição sem cura.

Os maiores valores da RTI foram alcançados após o processo de cura por sete dias em câmara úmida, semelhante ao que ocorreu com os resultados dos ensaios de Compressão Simples. Da mesma forma, os CPs de solo puro se desintegraram quando submetidos à inundação, indicando o não uso destes solos sem estabilização.

Existe um teor considerado ótimo de emulsão para a obtenção da máxima RTI de cada amostra de solo. Nos dois solos de granulometrias extremas, usados nesta pesquisa (AMJ e FRAL), os valores do teor ótimo de emulsão indicado para a máxima RTI coincidiram com os teores obtidos para a máxima RCS (6% para o solo AMJ e 2% para o solo FRAL).

Análogo ao que ocorreu com os resultados de RCS, também não se encontrou correspondência plena, em todos os ensaios de RTI, entre os maiores valores do  $\gamma_{dm\acute{a}x}$  de cada solo ou mistura solo-emulsão e os máximos valores de RTI obtidos.

### **5.1.4. Ensaio de ISC**

Os resultados de ISC mostraram que apenas o solo mais argiloso (FRAL) apresentou melhoras devido à emulsão, em relação ao solo natural, onde a expansão da mistura foi reduzida à metade do valor obtido para o solo puro.

A saturação comprometeu a estabilização dos solos AMJ e JAB, os quais apresentaram valores de ISC iguais ou inferiores aos obtidos com as amostras de solos puros nas duas condições de ensaio. Neste caso, somente o solo FRAL pode ter um teor considerado ótimo de emulsão cujo valor foi de 2%.

Uma análise efetuada acerca do quociente entre os graus de saturação final e inicial ( $S_f/S_i$ ) indicou que para as misturas, os valores dessa relação se mantiveram, em geral, em patamares inferiores aos seus correspondentes, obtidos na situação sem cura.

Há indícios de que quanto maior a concentração de sílica nos solos (principalmente os arenosos) menor a adesividade entre a emulsão asfáltica e as partículas do solo, tornando-as mais susceptíveis à ação da água.

Em virtude da incompatibilidade de comportamento dos resultados dos ensaios de ISC com os dos demais ensaios, conclui-se que este ensaio não pode ser usado para a avaliação da estabilização solo-emulsão.

#### **5.1.5. Ensaio de MR**

A análise dos resultados de MR obtidos nesta pesquisa revelou que o modelo resiliente composto foi o mais adequado para descrever o comportamento dos solos e das misturas solo-emulsão testados.

De acordo com os dados interpretados com base no modelo e do nível de tensões adotados, verificou-se melhorias no comportamento resiliente das misturas em relação ao solo puro, para todas as condições de cura estabelecidas.

Avaliando-se a influência do par de tensões ( $\sigma_3$  ;  $\sigma_d$ ) nos valores do MR, há uma concordância entre os três solos, quando são analisados os resultados dos ensaios dos CPs sem cura, para o qual a tensão confinante prevalece, e no processo com cura, que tem a tensão desviadora predominando, enquanto que no processo com cura e imersão, ora a tensão confinante é mais influente, ora é a tensão desviadora.

Existe um teor considerado ótimo de emulsão a se adicionar ao solo a partir do qual o MR se reduz com o aumento da quantidade de emulsão no solo. O teor ótimo obtido para todos os solos e misturas foi sempre alcançado com os ensaios realizados depois do processo de cura de sete dias. Não houve concordância, em se tratando do teor ótimo, com os correspondentes valores obtidos dos ensaios de RCS e RTI.

Novamente, não se encontrou correspondência plena, em todos os ensaios de MR, entre os maiores valores do  $\gamma_{dm\acute{a}x}$  de cada solo ou mistura solo-emulsão e os máximos valores de MR obtidos.

### **5.1.6. Considerações Finais**

Consciente de que mais pesquisas são necessárias para reforçar as conclusões ora encontradas, pode-se concluir desta pesquisa que a estabilização dos solos utilizados com emulsão asfáltica de cura lenta, se apresentou satisfatória, com potencialidades na melhoria do comportamento mecânico dos solos testados, com finalidades de uso como material para a construção de pavimentos. Percebe-se que o teor de emulsão para estabilizar o solo é função do tipo de solo. Os resultados obtidos (sob a condição cura) mostraram que para se estabilizar um solo mais arenoso precisa-se de um teor de emulsão maior (no presente trabalho ficou entre 4% e 6%) do que o teor para estabilizar um solo argiloso, que neste caso ficou entre 2% e 4%. Os valores de ISC não se revelaram parâmetros indicadores de estabilização dos solos testados.

### **5.2. SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS**

Analisar as variações de umidade residual versus resistência máxima, realizando-se mais ensaios com CPs moldados sob essa umidade. Acelerar o processo procedendo-se a secagem em estufa.

Investigar com mais dados a influência do teor de sílica na adesividade entre a emulsão e as partículas de solo, bem como na susceptibilidade de misturas solo-emulsão à ação da água.

Avaliar o comportamento das misturas solo-emulsão com os solos não destorroados, para aproximar mais o procedimento laboratorial do que pode ocorrer em campo.

Investigar comparativamente a impermeabilização dos solos provocados pela adição de emulsão.

Avaliar o comportamento de solo-emulsão com resultados de ISC sem imersão

Construir trechos experimentais com base de solo-emulsão, sendo uma parte revestida, parte não revestida com imprimação, e parte diretamente sujeita ao tráfego, para avaliação do comportamento da mistura sob essas três condições.

Avaliar os efeitos da estabilização com emulsão betuminosa para uma maior quantidade de solos da região, com o objetivo de elaborar um banco de dados sobre as potencialidades dos diferentes tipos de solos presentes.

Investigar a adoção de pequena quantidade de cimento (máximo de 0,5%) em conjunto com a emulsão asfáltica, para avaliar a possibilidade de maior redução da susceptibilidade à água demonstrada.

Efetuar ensaios com os solos locais, visando classificá-los de acordo com a metodologia MCT.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE ASFALTOS – ABEDA. *Manual Básico de Emulsões Asfálticas - Soluções para pavimentar sua Cidade*, Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND APLICAÇÕES - ABCP. *Curso Intensivo de Solo-cimento*. Anais do II Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos, Recife-PE e Campina Grande-PB, 1958,

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND APLICAÇÕES - ABCP (2005). *Aplicações de Solo-cimento*. Disponível em: <[http://www.abcp.org.br/basico\\_sobre\\_cimento/solo\\_cimento.shtml](http://www.abcp.org.br/basico_sobre_cimento/solo_cimento.shtml)>. Acesso em 10 Nov. 2008

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 6459. *Solo – Determinação do Limite de Liquidez*. Rio de Janeiro, 1984.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 7180. *Solo – Determinação do Limite de Plasticidade*. Rio de Janeiro, 1984.

\_\_\_\_\_. NBR 7181. *Solo – Análise Granulométrica*. Rio de Janeiro, 1984.

\_\_\_\_\_. NBR 7182. *Solo – Ensaio de Compactação*. Rio de Janeiro, 1986.

\_\_\_\_\_. NBR 9895. *Solo – Índice de Suporte California*. Rio de Janeiro, 1987.

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

AFLITOS, A. O. e FERREIRA, H. C. *Estabilização química de um solo laterítico com cimento*. In: VIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, Porto Alegre/RS, 1986.

ARAUJO, R. N. A.; FERREIRA, H. C., LUCENA, F. B.; *Estabilização de solos lateríticos com emulsão asfáltica catiônica RM-1C*. Anais do VII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações. Olinda/Recife. Setembro (1982)

ARAÚJO, A. F., BARROSO, S. H. A., RABÊLO, A. N. e VASCONCELOS, M. A. G. *O uso da técnica Solo-Cal para melhoramento das propriedades tecnológicas de um solo da região do Baixo Jaguaribe no Estado do Ceará*. In: Anais do XIV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Búzios, Rio de Janeiro, RJ, 2008.



BAPTISTA, C. N. *Pavimentação*, Tomo II, Editora Globo, 1976

BAPTISTA, G. M. M.; NETTO, J. S. M.; MENESES, M. R. (1998). *Determinação da relação Sílica - Alumina a partir dos dados do sensor AVIRIS (JPL/NASA), para discretização espacial do grau de intemperismo de Solos Tropicais*. Anais IX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Santos, SP. p. 1345-1355.

BAUER, G.; QUEIROZ DE CARVALHO, J. B. Q. *Estabilização de solos lateríticos com cal: Propriedades geotécnicas, reações e produtos formados*. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, 9, 1990, Rio de Janeiro, ABMS, 1990, p. 207-211.

BERNUCCI, L. L.B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. (2007) *Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros*. Petrobrás: Abeda. Rio de Janeiro.

BEVIS, P. I., *Bituminous Stabilization, Importance of the Soil-Clay Fraction and the Influence of the Orthofosforic Acid as a Secondary Additive*, Tese de Ph.D., Universidade de Leeds, 1973

BIGARELLA, J. J., ANDRADE, G. O., 1964. *Considerações Sobre a Estratigrafia dos Sedimentos Cenozóicos em Pernambuco (Grupo Barreiras)*. Arq. Inst. Ciênc. Terra, n. 2 p. 2-14, Recife/Pe.

BRANNER, J. C., 1902, *Geology Along the Pernambuco Coast South of Recife* B. Geol. Soc. Amer., v.13, p. 58-92.

BUENO, B. S. *Estudo Experimental em Laboratório de Solos Estabilizados com Betume*. Anais da 25ª Reunião Anual de Pavimentação, São Paulo, SP, 1991.

BUENO, B. S.; LIMA, D. C. *Técnicas de estabilização de solos com fins rodoviários*. In: Anais do I Simpósio Brasileiro sobre Exploração e Transporte Florestal, 1., 1991, Viçosa: Sociedade de Investigação Florestal, SIF, 1991. p. 143-183.

CAPUTO, H. P. *Mecânica dos Solos e suas aplicações*. 5 Ed. Rio de Janeiro: Editora LTC – Livros Técnicos Científicos, 1983. 1v em 2.

CARVALHO, C.A.B.; DOURADO FILHO, J. E ESPÍRITO SANTO, N.R. (1992). *Uma Análise de Desgaste e de Resistência à Compressão Simples – Mistura de Solo-Betume*. Anais da 26ª Reunião Anual de Pavimentação, Aracaju, SE.

CASTRO, L. N., *Reciclagem a frio "in situ" com espuma de asfalto*. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2003.

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

CAVALCANTE, E. H., GONÇALVES JR. L. A. e CARDOSO, G. (2006), *Estudos para Aproveitamento de Resíduos de Cerâmica Vermelha de Sergipe na Pavimentação Rodoviária*, em CD, 37ª RAPv / 11º ENACOR, Goiânia.

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

CORREIA, A. G. e NEVES, J. M. C. *Estabilização com cal de solos da geologia de Lisboa na Construção Rodoviária*. X Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, Foz do Iguaçu, PR, 1994.

COSTA, J. H. (2006), *Caracterização geotécnica dos solos finos, da faixa litorânea costeira do Estado de Sergipe, visando aplicação em pavimentos de baixo volume de tráfego*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco –UFPE, CTG. Engenharia Civil, 2006.

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

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO DER-SP (1991). *Manual de Normas: Pavimentação*. DER-SP. São Paulo, 1991.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM, IE 004/94. *Solos coesivos – determinação da compressão simples de amostras indeformadas*. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. , ME 030/94. *Solos – Determinação das relações sílica-alumina e sílica-sesquióxidos em solos – Método de Ensaio*. Rio de Janeiro, DNER, 1994.

\_\_\_\_\_. , ME 093/94. *Solos – determinação da densidade real*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1994.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM, ME 131/94. *Solos – Módulo de resiliência de amostras compactadas*. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. , ME 138/97. *Misturas Betuminosas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral*. Rio de Janeiro, DNER, 1994.

\_\_\_\_\_. , ME 201/94. *Solo-cimento – compressão axial de corpos-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. , ME 202/94. *Solo-cimento – moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. , *Manual de Pavimentação*. Rio de Janeiro, DNER, 1996. 320 p.

\_\_\_\_\_. , ES 301/97. *Pavimentação – Sub-base estabilizada granulometricamente - Especificação de Serviço*. Rio de Janeiro, 1997.

\_\_\_\_\_. , ES 303/97. *Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente – Especificação de Serviço*. Rio de Janeiro, DNER, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES, DNIT 098/2007 – ES, *Pavimentação – base estabilizada granulometricamente com utilização de solo laterítico – Especificação de serviço*. Rio de Janeiro, DNIT, 2007

DUNN, C. S., SALEM, M. N. *Temperature and time effects on the shear strength of sand stabilized with cationic bituminous emulsion*, Highway Research Record n° 442, 1973.

EMBRAPA, T.B., EMBRAPA, S. A., *Levantamento de Reconhecimento de Média Intensidade dos Solos da Região dos Tabuleiros Costeiros e da Baixada Litorânea do Estado de Sergipe*. Empresa Brasileira de Agropecuária - EMBRAPA, Rio de Janeiro/RJ. 1999.

ENDERSBY, V. A.; KRYNINE, D. P.; HOLMES, A. (1942) *Fundamental Reseach in Betuminous Soil Stabilization*. Highway Research Board Proceedings vol 22, p. 442-459.

FERNANDES M. W. Q. *Utilização de resíduos sólidos no estudo da susceptibilidade à presença d'água*. Dissertação de Mestrado, Engenharia Civil e Ambiental, UFCG, 2007.

FERNANDES, D. C. M. *Viabilidade do uso de alcatrão de madeira de eucalipto na estabilização de solos residuais para fins rodoviários*. 2000.. Dissertação de Mestrado em Ciência Florestal - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2000. 124 p.

FERREIRA, A. M. *Estudo de três solos estabilizados com uma emulsão asfáltica catiônica*. Dissertação de Mestrado, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, PB, 1980. 99p.

FERREIRA, A. M., BEZERRA, L. R; *Estabilização de três solos com emulsão asfáltica catiônica*. Anais do VII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações. Olinda/Recife. Setembro (1982)

FRANÇA, F. C. *Estabilização Química de Solos para fins rodoviários: Estudo de caso com o produto "RBI Grade 81"*. 2003. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2003. 104 p.

GEIPOT Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes. *Anuário Estatístico 1999-2000*. Rio de Janeiro, Brasil, 2000. Disponível em <<http://www.geipot.gov.br/NovaWeb/IndexAnuario.htm>>. Acesso em: 24 maio 2009.

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

GRECO, J. A. S., *Materiais para pavimentação – Materiais betuminosos*, Minas Gerais: Universidade Federal de Minas Gerais, [2006]. 13 p. Notas de aula da disciplina ETG033 – Construção de Estradas e Vias Urbanas. Disponível em: <<http://etg.ufmg.br/~jisela/pagina/materiais%20betuminosos.pdf>>. Acesso em: 22 out. 2008.

GUARÇONI, D. S.; GOMES DE MATTOS, A. B.; GONÇALVES, N. R. (1988). *Estabilização de Solos com Betume Técnicas de Execução*. Anais da 23ª Reunião Anual de Pavimentação. Florianópolis, SC.

GUIDA, H. N. (1971). *Estabilização de um solo laterítico fino pelo ácido fosfórico*. Dissertação de Mestrado, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.

GUIDA, H. N. e MEDINA, J (1974) – *Estabilização de solos lateríticos com ácido fosfórico*. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, COBRAMSEF, 5, 1974, Rio de Janeiro, ABMS, Tema 4, p 1-16.

GUIMARÃES, J. E. P. *A cal – Fundamentos e aplicações na engenharia civil*. 2. ed., São Paulo: Pini, 2002. 341p.

GUIMARÃES, R. C., FERREIRA, C. J., ROSA, J. B. *Estabilização de solos com cal para uso em pavimentação e barragens*. 2006. UEG, Anápolis, GO, 23p. Disponível em: <[http://www.prp.ueg.br/06v1/ctd/dstq/2007/ds\\_20070112\\_002.pdf](http://www.prp.ueg.br/06v1/ctd/dstq/2007/ds_20070112_002.pdf)>. Acesso em: 19 set. 2008.

IA – INSTITUTO DE ASFALTO. *Manual de Asfalto*. Serie do Manual n. 4 (MS-4), Rio de Janeiro: IA, 1989

INGLES, O.G. & METCALF, J.B. (1972) *Soil Stabilization Principles and Practice*. Butterworths, Sydney, Australia, 374 p.

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

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

LIMA, D. C. *Algumas considerações relativas a aspectos da estabilização dos solos, em particular à estabilização solo-cal*. 1981. 171 f. Dissertação de Mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 1981.

LIMA, D. C.; RÖHM, S. A.; BARBOSA, P. S. A. *Estabilização dos solos III – mistura solo-cal para fins rodoviários*. 1. ed., Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1993. 46 p.

LUCENA, F., FERREIRA, H.B., ARAÚJO, R.N. *Uso de emulsão catiônica na estabilização de solos lateríticos*. In: 17º Reunião Anual de Pavimentação, p. IV67-IV91, Brasília. Julho, 1982.

MACEDO, J. A. G.. *Interpretação de Ensaio Deflectométrico para Avaliação Estrutural de Pavimentos Flexíveis – A Experiência com FWD no Brasil*, Tese de Doutorado, PEC, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro/RJ, 1996.

MACHADO, C. C., et al. *Materiais alternativos para estabilização de solos para pavimentos de estradas florestais*. [2004]. Disponível em: <<http://www.comciencia.br/200404/reportagens/14.shtml>>. Acesso em: 18 set. 2008

MARQUES, G. L. de O. Capítulo 4 – *Estabilização dos solos para fins de pavimentação*. Minas Gerais: Universidade Federal de Juiz de Fora, [2004]. 26 p. Notas de aula da disciplina TRN 32 – Pavimentação. Disponível em: <<http://www.pavimentacao.ufjf.br/Cap4.pdf>>. Acesso em: 20 out. 2008.

MATTOS, A. B. G. et al (1991) *Estabilização de Solo com Betume*. Anais da 25ª Reunião Anual de Pavimentação. São Paulo, SP.

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

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

MEDINA, J. ; MOTTA, L. M. G. (2005), *Mecânica dos Pavimentos*, 2ª Edição. Editora da COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro.

MICELI JR, G. (2006) *Comportamento de Solos do Estado do Rio de Janeiro Estabilizados com Emulsão Asfáltica*. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, 2006.

MOMM, L., *Uso de emulsão catiônica na estabilização de solos*. In: 18º Reunião anual de pavimentação, p. 553-577, Porto Alegre, RS. Setembro, 1983.

MOREIRA, E. D. (2002). *Estabilização Betuminosa de uma Base ou Revestimento Primário como Alternativa para Pavimentação de Rodovias de Baixo Volume de Tráfego*. Revista Vias Gerais, n.03. DER/MG. Disponível no site <[http://www.assender.com.br/trabalhos/viasgerais3/estabilizacao\\_betuminosa.pdf](http://www.assender.com.br/trabalhos/viasgerais3/estabilizacao_betuminosa.pdf)>. Acesso em 31 dez 2008.

MUIR, L.; HUGHES, W.; BROWNING, G. (1938) *Bitumionous Stabilization Practices in the United States*. Highway Research Board Proceedings vol. 18, part II, p. 306-313.

NARDI J. V. *Estudo do efeito de aditivos na estabilização de solo arenoso com cal e cinza volante*. In Anais do V COBRAMSEG - Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, São Paulo, SP, Out. 1974. Vol II, p.283-291

NARDI J. V. e HOTZAD, D. *Determination of Composition of Pozzolanic Waste Mixtures with Optimized Compressive Strenght*. In: XV CBECIMAT Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais, Natal, RN, 2002. Disponível em: <<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd43/nardi.pdf>>. Acesso em 14/09/2008.

NARDI J. V. e HOTZAD, D. *Maximização da resistência mecânica em cimento de misturas de cal e cinza volante*. In: XVII CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais. Foz do Iguaçu, PR, 2006. Disponível em: <<http://www.metallum.com.br/17cbecimat/resumos/17cbecimat-114-018.pdf>>. Acesso em: 14/09/2008.

NASCIMENTO, H. R. C., *Tecnologia dos ligantes betuminosos-emulsões (Apresentação)*. Simpósio Brasileiro de Pavimentação, Brasília, Jun/2005. Disponível em: <<http://www.inovarbrasil.com.br/simposio/palestras/tecnologiadosligantesbetuminosos.pdf>>. Acesso em: 10 Out 2008

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. (1985). *Peculiarities of fine grained stabilized lateritics soils. Tropical LS'85, ABMS*, p. 327-337.

NOGAMI, J. S. ; VILLIBOR, D.F. (1981). *Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias*. Anais Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia. Vol. 1, p. 30-41. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

NOGAMI, J. S. ; VILLIBOR, D.F. (1985). *Identificação de Solos Tropicais: Dificuldades e proposta de um método preliminar*. Anais XX RAPv. Vol. 1, p. 115-134. Rio de Janeiro.

NOGAMI, J. S. ; VILLIBOR, D.F. (1998), *Considerações geotécnicas sobre o bom desempenho de pavimentos envolvendo solos lateríticos*. Anais XI COBRAMSEG. Vol. 1, p. 615-622. Brasília-DF.

OMENA, W. ; ANTOSCZEZEM JUNIOR, J. A. (2006). *Emulsão Asfáltica Uma Boa e Velha Companheira. Fatos e Asfaltos* – Informativo Trimestral Greca Asfaltos. Ano 2, n. 6, p. 8.

PETROBRÁS DISTRIBUIDORA S.A., *Manual de Serviços de Pavimentação*, 1996.

PINTO C. S. ; BOSKOV M. E. G. *Estudo comparativo de estabilização com cal de um solo saprolítico e de um solo laterítico*. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, 9, 1990, Salvador, BA, Rio de Janeiro, ABMS, 1990, p 227-234.

PORTO, T. F. A. *Construção de bases de solo cimento*. Anais do II Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos, Recife-PE e Campina Grande-PB, 1958,

QUEIROZ DE CARVALHO, J. B., *Amorphous Constituents in Red Tropical Soils: State of the Art and their Significance to Geotechnical Properties*, 1985, Publicado por A Sing e RC Joshi, Geotechnical Academia, Jodhpur, Índia, Vol. 1, Cap. G-1.

QUINTANS, A. L. L. *Estudos das propriedades mineralógicas, físicas e mecânicas de um solo arenoso fino laterítico (SAFL) utilizado na pavimentação do complexo aeroportuário da grande Natal-RN/NE*. 2008. Dissertação de Mestrado, Engenharia Civil e Ambiental, UFCG, 2008.

ROAD RESEARCH LABORATORY – RRL (1951). *Mecânica dos Solos para Engenheiros Rodoviários*. V II, Edgar Blücher Editora, São Paulo, SP.

ROAD RESEARCH LABORATORY - RRL - *Bituminous Material in Road Construction*, Her Majesty's Stationery Office, Londres, 1962.

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

SANTANA, H., *Estabilização betuminosa de revestimentos primários*. In: 1ª Reunião de Técnicos em Manutenção de Estradas de Rodagem - 1º REMETER. Fortaleza, CE, 1976.

SANTOS, M. F., LIMA, D. C., BUENO, B. S, *Estabilização dos solos com cal e betume*. In: 6º Reunião de pavimentação urbana, p.74 – 97, Santos – São Paulo, Abril, 1995.

SENÇO, W. DE. (2001). *Manual de técnicas de pavimentação*. Ed. Pini, São Paulo, SP.

SHERWOOD, P. T. *Soil stabilization by the use of chemical admixtures*. Roads and Road Constructions, s.l., p. 102-110, 1961.

SILVA, D.P. *Estudo do comportamento reológico de solos estabilizados com cimento: processos gerais de estabilização*. Relatório final, Lisboa, Ministério das Obras públicas, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 343 p., 1968.

SILVA, Wilton P. ; SILVA, Cleide M. D. P. S, *LAB Fit Ajuste de Curvas (Regressão não-Linear e Tratamento de Dados) V 7.2.19 (2003-2004)*, online, Disponível em: <[http://www.angelfire.com/rnb/labfit/index\\_p.htm](http://www.angelfire.com/rnb/labfit/index_p.htm)>. Acesso em 01 de junho de 2009.

SOARES, J. B. (2006). *Emulsões Asfálticas. Notas de Aula da Disciplina Materiais Betuminosos*, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, UFC, Fortaleza, CE.

SOARES, J. B.; MOTTA, L. M.; BRANCO, J. V. C. *Análise de bacias deflectométricas para o controle de construção de pavimentos de pavimentos asfálticos*. In. XIV ANPET Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Gramado/RS –Brasil, 2000.

SOLIZ, V. V. P. *Estudo de três solos estabilizados com emulsão asfáltica*. 2007. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007. 182 p.

SOUZA, A.; CARVALHO, D. ; BARROSO, F. S. *Estudo da estabilização do solo superficial arenoso do Estado de São Paulo com utilização de cimento*. In: Anais do XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Brasília, DF, 1998.

SPECHT, L. P. ; WALLAU, J. R. *Avaliação da técnica de estabilização granulométrica como revestimento primário de estradas não pavimentadas*. [2005] UNIJUÍ, RS, 7p. Disponível em: <<http://www2.unijui.tche.br/~specht/rodo2/artigo.pdf>>. Acesso em: 18 set. 2008.

SUAREZ, D. A. A. *Estudo do comportamento mecânico de dois solos lateríticos do Estado de São Paulo com adição de emulsão asfáltica*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2009. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18143/tde-23042009-115341/>> Acesso em: 01 de junho de 2009

SUAREZ, D. A. A., PARREIRA, A. B., FERNANDEZ Jr, J. S. *Estudo de dois solos lateríticos do Estado de São Paulo com adição de emulsão asfáltica*. 39ª RAPv/13º ENACOR, Recife/PE - Brasil, Setembro 2008.



SUAREZ, D. A. A., PARREIRA, A. B. *Estudo da resistência e do módulo de resiliência de solos lateríticos com adição de emulsão asfáltica*. XXII ANPET, Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes. Fortaleza/CE - Brasil, Novembro 2008.

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

VAN IMPE, W. F. V. *Soil Improvement techniques and their evolution*. Rotterdam, A. Balkema, 1989, 125 p.

VARGAS, M. *Introdução à Mecânica dos Solos*, 1 ed. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1977.

VERTAMATTI, E. – *Análise de alternativas para estabilização de solos finos na Amazonia*. VIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, Porto Alegre/RS, 1986.

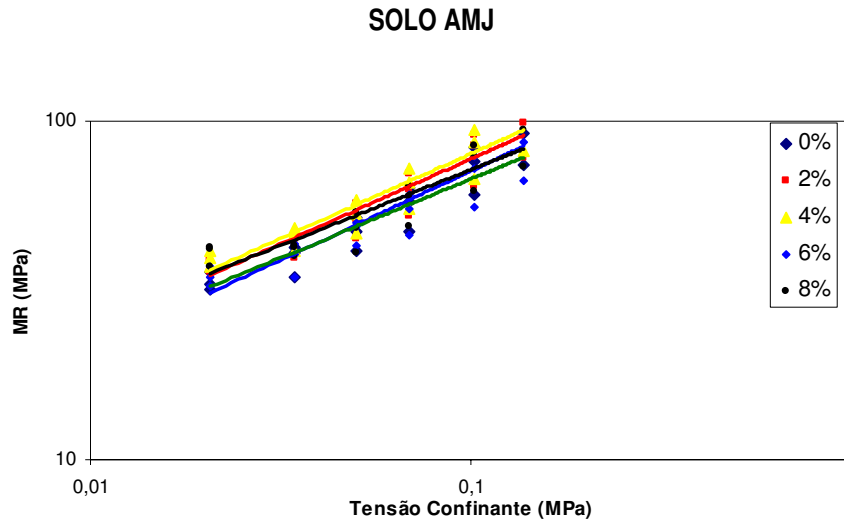
VILLIBOR, D. F., NOGAMI, J. S., CINCERRE, J. R. SERRA, P. R. M. , ZUPPOLINI NETO, A. *Pavimentos de baixo custo para vias urbanas*. 1 Ed. São Paulo. Ed. Arte e Ciência, 2007.

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

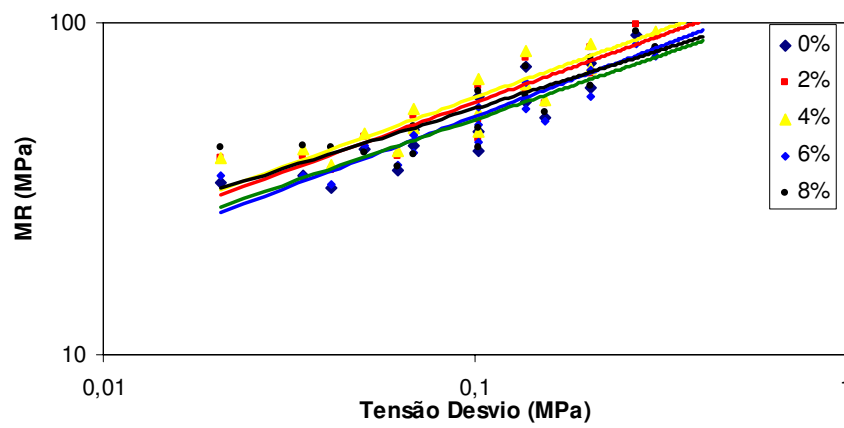
WEATHERS, H. C. (1937). *Sand Bituminous Stabilization*. Highway Research Board Proceedings, vol. 17, part I, p. 521-530.

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

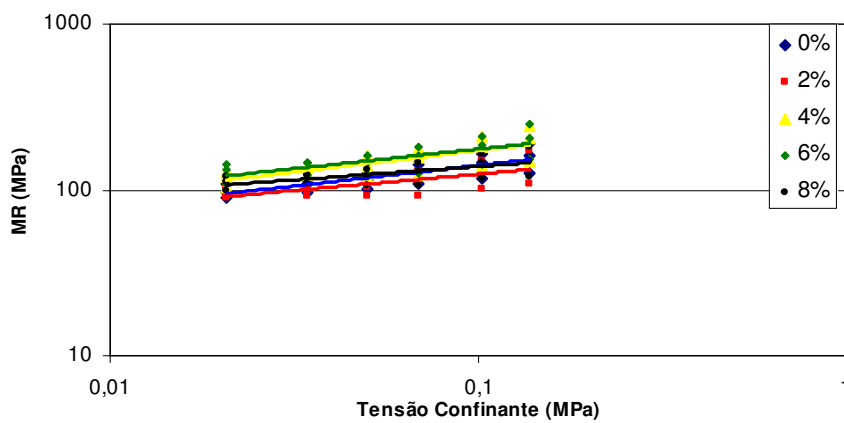
**ANEXO A - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA DOS SOLOS ESTUDADOS**  
**GRÁFICOS TENSÃO CONFINANTE X MR**  
**GRÁFICOS TENSÃO DESVIO X MR**  
**GRÁFICOS TENSÃO CONFINANTE X TENSÃO DESVIO X MR PARA OBTENÇÃO DE  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$  NO**  
**MODELO COMPOSTO UTILIZADO (EXEMPLOS )**



**Fig. A.1 – Tensão Confinante x MR - Solo AMJ sem cura.**



**Fig. A.2 – Tensão Desvio x MR - Solo AMJ sem cura.**



**Fig. A.3 – Tensão Confinante x MR - Solo AMJ com cura.**

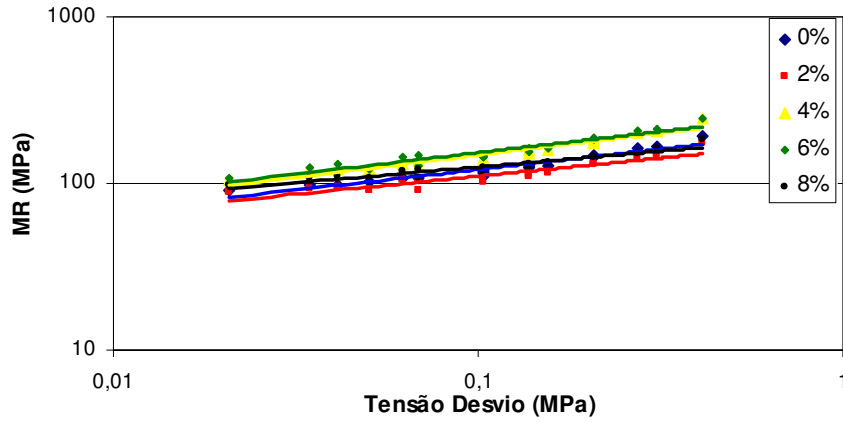


Figura A.4 – Tensão Desvio x MR – Solo AMJ com cura.

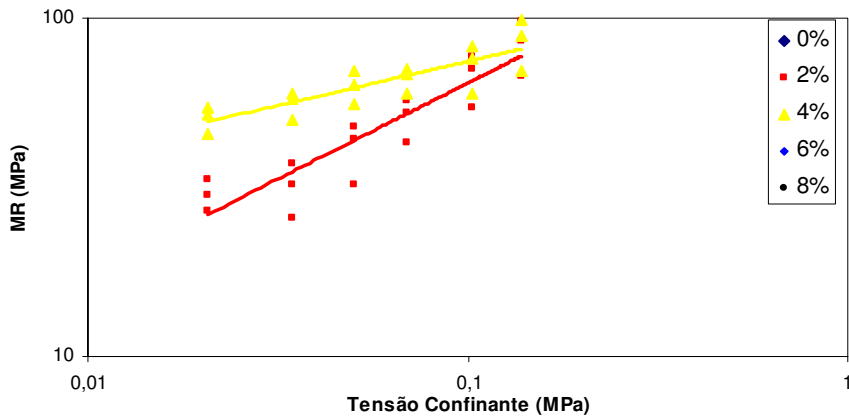


Figura A.5 – Tensão Confinante x MR – Solo AMJ cura + imersão.

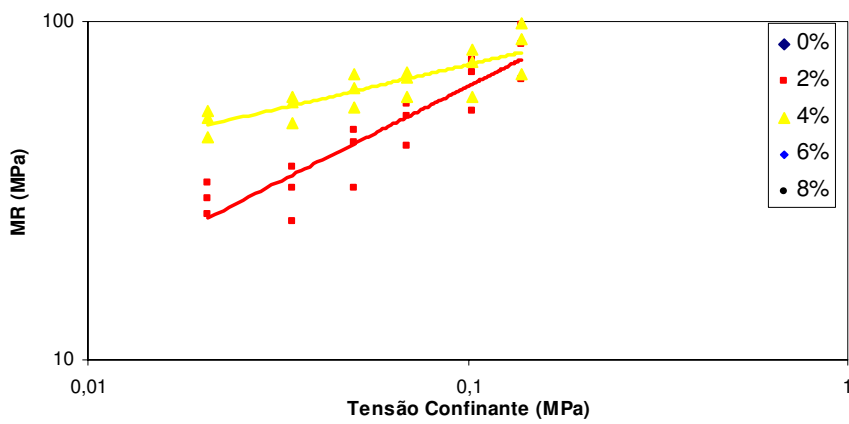


Figura A.6 – Tensão Confinante x MR – Solo AMJ cura + imersão.

## SOLO JAB

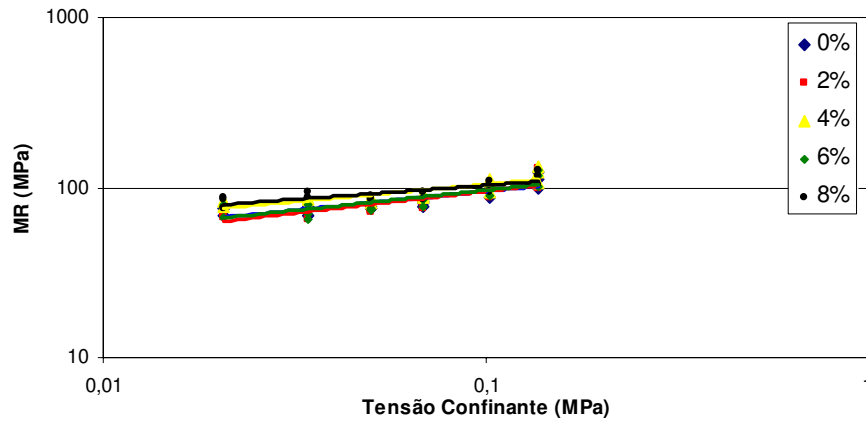


Figura A.7 – Tensão Confinante x MR – Solo JAB sem cura.

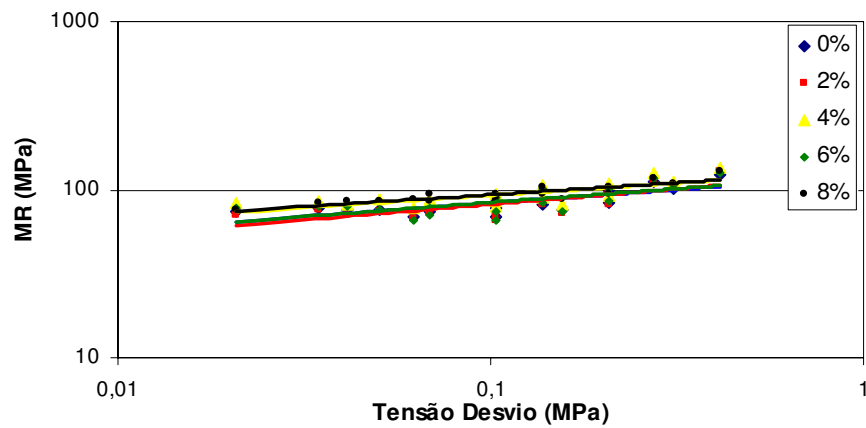


Figura A.8 – Tensão Desvio x MR – Solo JAB sem cura.

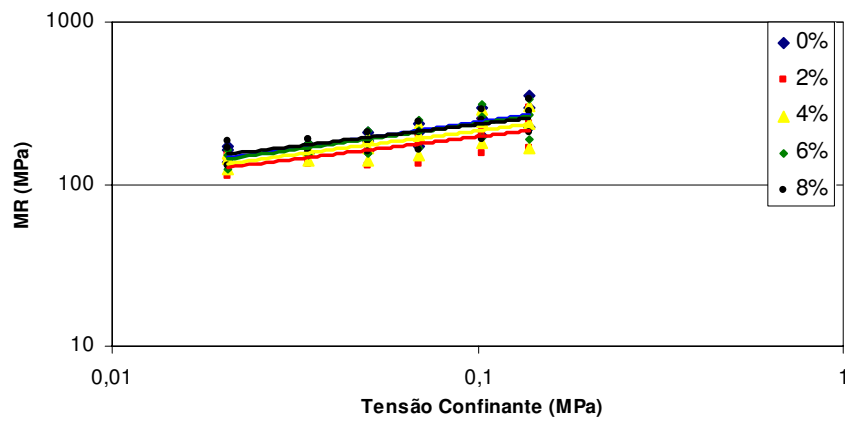


Figura A.9 – Tensão Confinante x MR – Solo JAB com cura.

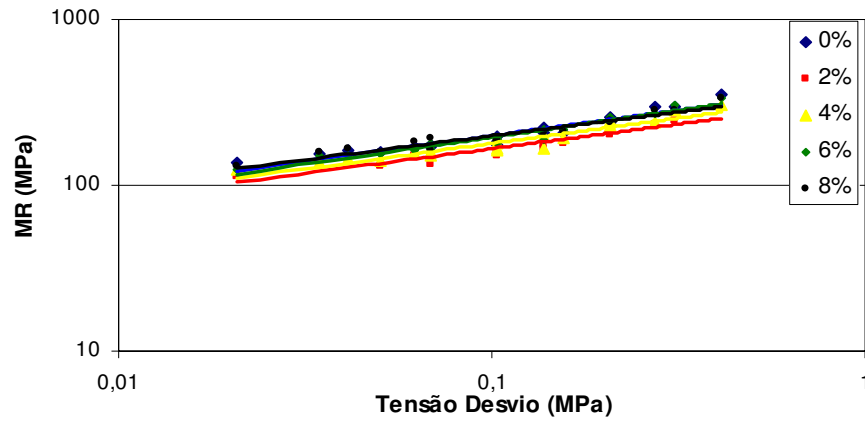


Figura A.10 – Tensão Desvio x MR – Solo JAB com cura.

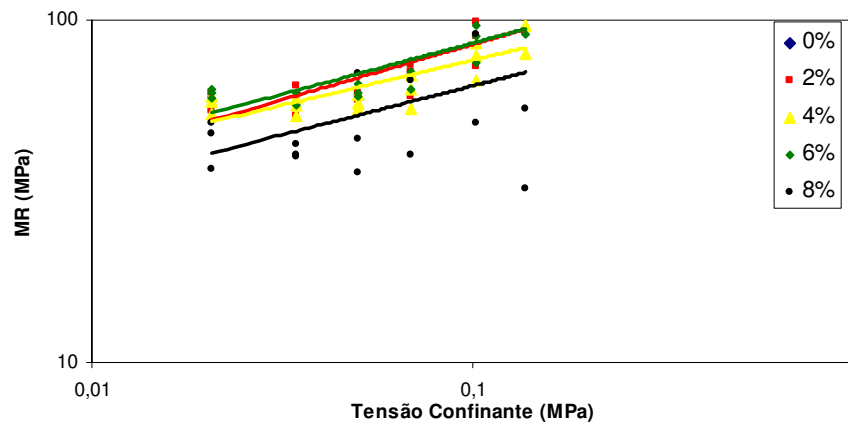


Figura A.11 – Tensão Confinante x MR – Solo JAB cura + imersão.

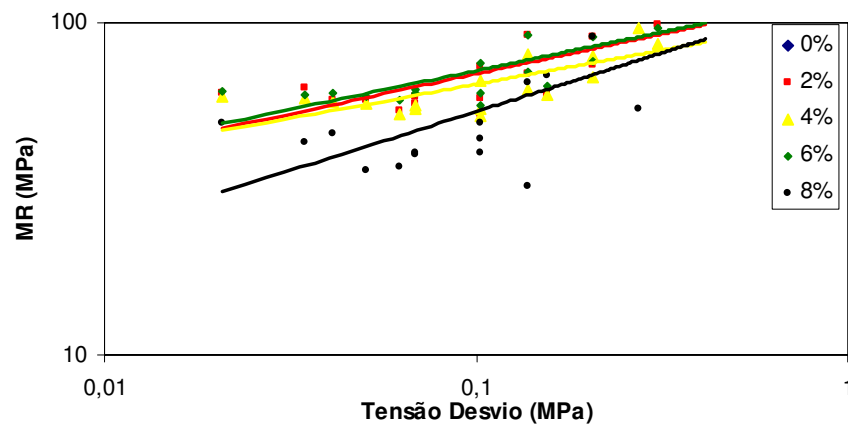


Figura A.12 – Tensão Desvio x MR – Solo JAB cura + imersão.

## SOLO FRAL

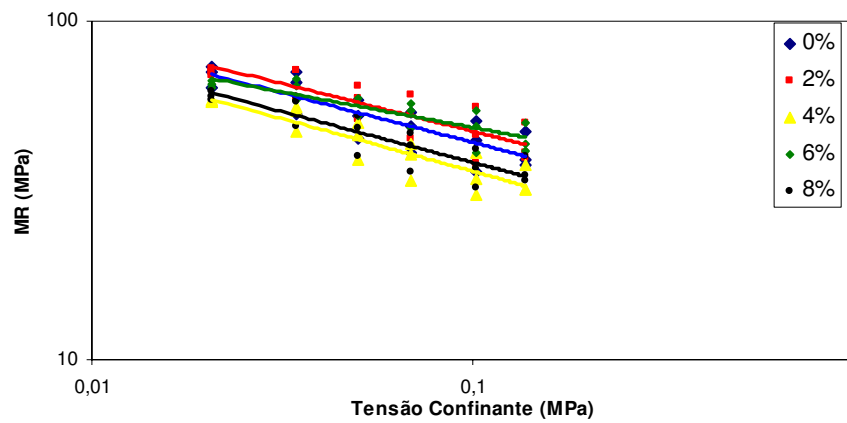


Figura A.13 – Tensão Confinante x MR – Solo FRAL sem cura.

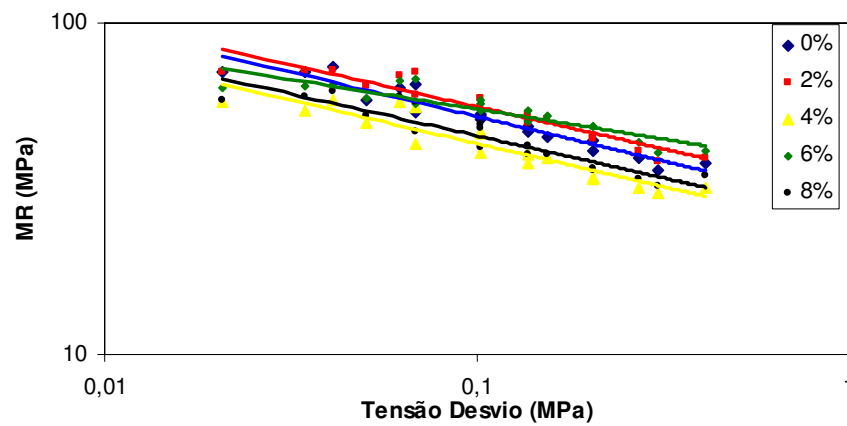


Figura A.14 – Tensão Desvio x MR – Solo FRAL sem cura.

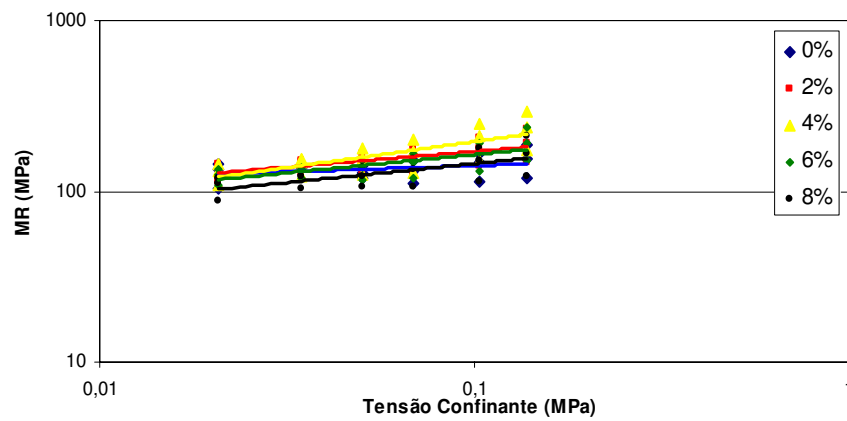


Figura A.15 – Tensão Confinante x MR – Solo FRAL com cura.

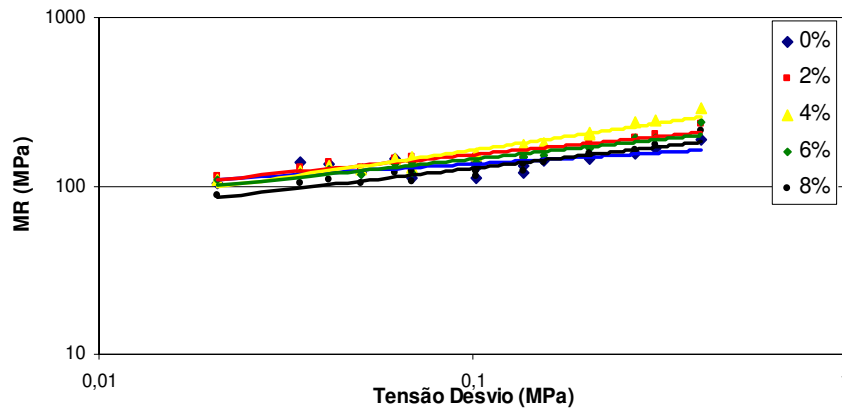


Figura A.16 – Tensão Desvio x MR – Solo FRAL com cura.

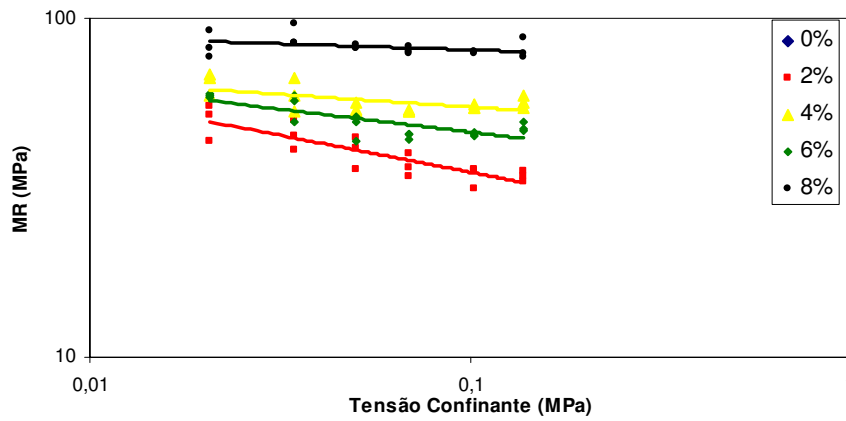


Figura A.17 – Tensão Confinante x MR – Solo FRAL cura + imersão.

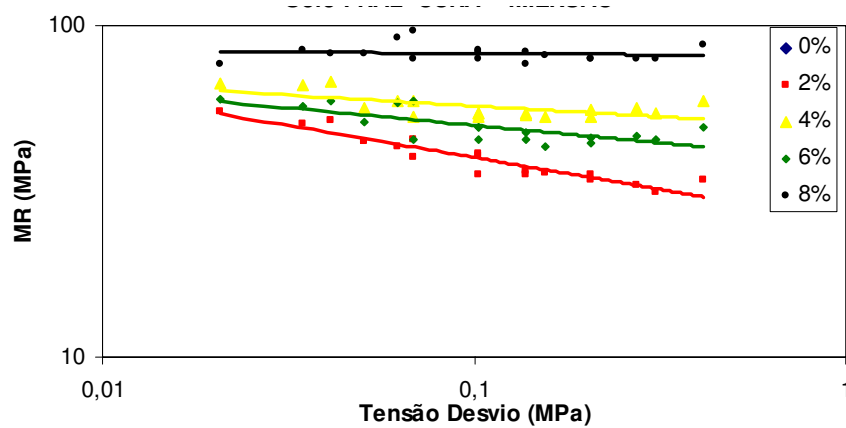
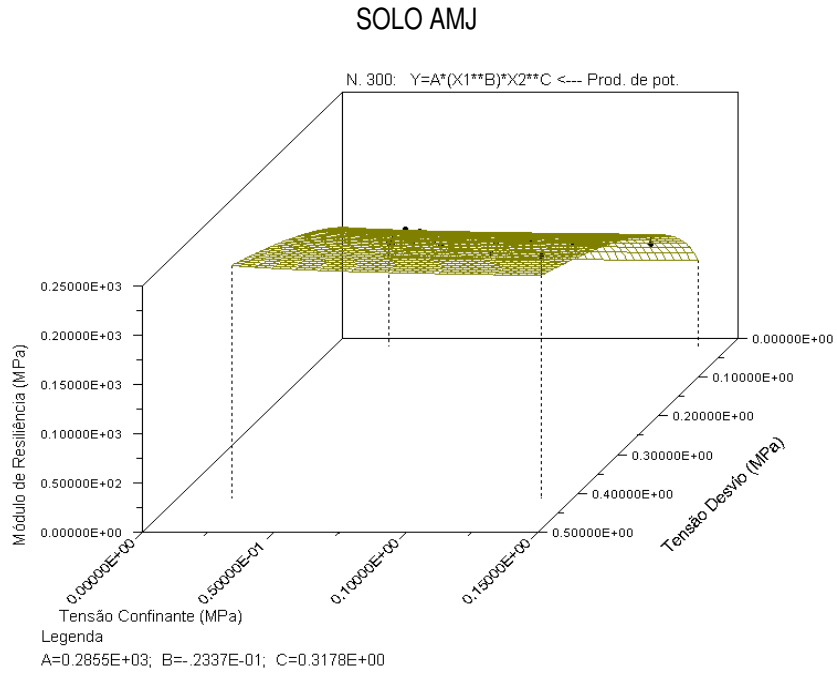


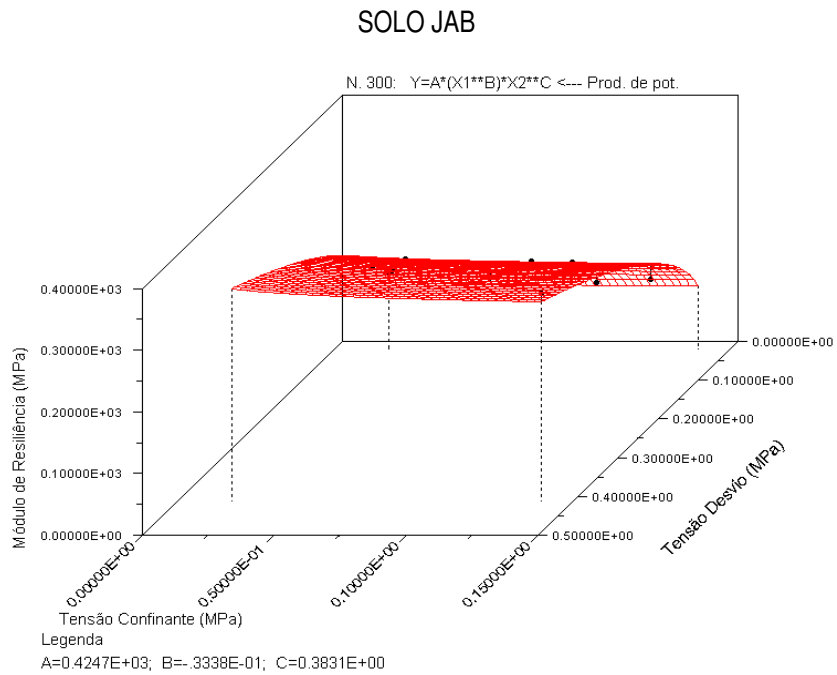
Figura A.18 – Tensão Desvio x MR – Solo FRAL cura + imersão.



**EXEMPLOS DE GRÁFICOS PARA OBTENÇÃO DOS PARAMETROS k1, k2 e k3 NO MR PARA O MODELO COMPOSTO.**

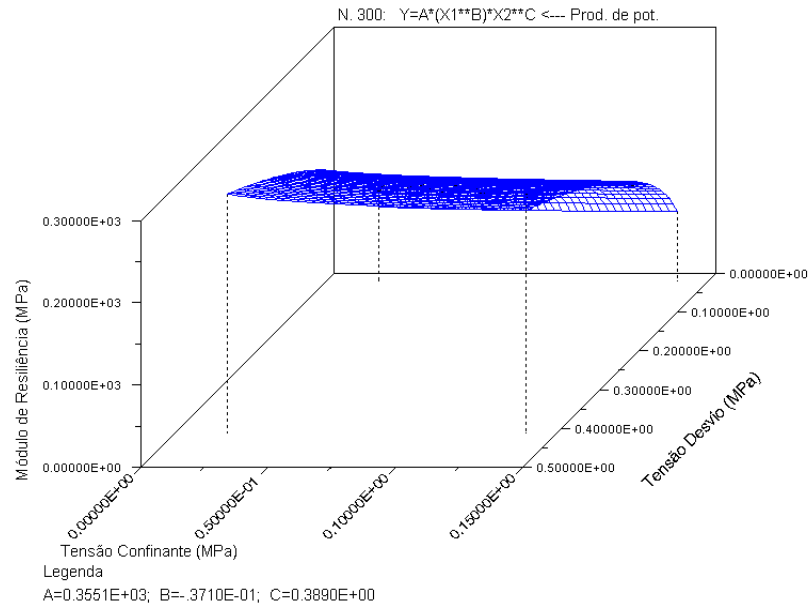


**Figura A.19– Tensão Confinante x Tensão Desvio x MR - Solo AMJ com cura 4% de emulsão.**



**Figura. A.20– Tensão Confinante x Tensão Desvio x MR - Solo JAB com cura 6% de emulsão.**

## SOLO FRAL



**Figura A.21– Tensão Confinante x Tensão Desvio x MR - Solo FRAL com cura 4% de emulsão.**