

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

***ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS MÉTODOS
DE COMPACTAÇÃO
NO COMPORTAMENTO RESILIENTE
DE SOLOS***

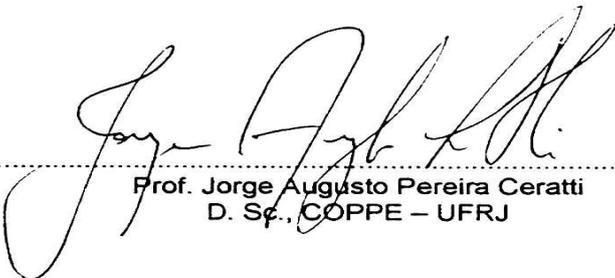
Sirlei Maribel Siconi de Werk

Dissertação apresentada ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de *MESTRE EM ENGENHARIA*.

Porto Alegre, 10 de abril de 2000.

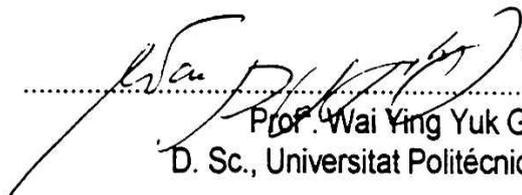
Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de *MESTRE EM ENGENHARIA* e aprovada em sua forma final pelos orientadores e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – CPGEC.

Orientador:

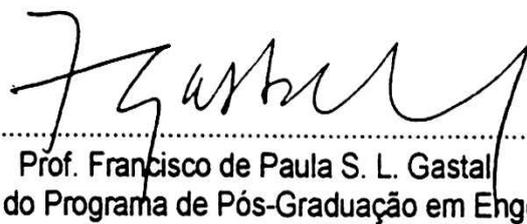


Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti
D. Sc., COPPE – UFRJ

Orientadora:



Prof. Wai Ying Yuk Gehling
D. Sc., Universitat Politècnica Catalunya



Prof. Francisco de Paula S. L. Gastal
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Banca Examinadora:

- Prof. Cezar A. B. Bastos – FURG
D. Sc., PPGEC/UFRGS
- Prof. Luis Antônio Bressani – UFRGS
Ph. D., University of London, UK
- Prof. Washington P. Núñez – UFRGS
D. Sc., PPGEC/UFRGS

*“Dedico este trabalho ao meu marido Eduardo,
aos meus pais Willi e Sirlei, e à minha irmã Fátima.”*

AGRADECIMENTOS

Aos professores Jorge Augusto P. Ceratti e Wai Ying Y. Gehling pela orientação deste trabalho de dissertação.

A todos os professores da área de Geotecnia do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (CPGEC - UFRGS) pelos ensinamentos, auxílio e apoio recebidos.

Aos funcionários do Laboratório de Mecânica dos Solos pela colaboração e amizade, em especial a amiga Ana Paula Martins, aos técnicos Jair F. da Silva e Carlos Ivan Ribas, e ao motorista João Diniz.

Aos colegas de mestrado das turmas de 1995, 1996, da minha turma de 1997 e da turma de 1998 pelos ensinamentos acadêmicos e de vida, em especial a Lia Caterí Rech, Márcia R. de Rodrigues, Bibiana Fogaça, Dalmar Verdade, Isatir Bottin Filho e Paulo Ruwer. E aos amigos do doutorado Cezar Bastos, Flávia Martins, Fernando Mántaras e Rinaldo Pinheiro, pelas explicações, auxílios e ensinamentos que me deram. Agradecimento especial a Pedro Miguel V. Ferreira pela amizade e por toda ajuda despendida a mim em relação ao novo equipamento utilizado nesta pesquisa.

Ao auxiliar de pesquisa Vinícius Aguiar, pela colaboração e esforços empreendidos nos ensaios realizados e nos momentos de dificuldade, sempre com muita dedicação, visão e amizade. E aos auxiliares de pesquisa do laboratório Caroline, Elisandra, Simone, Adriano, Anderson, Fábio, Rodrigo pelo auxílio e pelas horas de descontração.

Ao amigo Volnei pelo esclarecimento dos “bichos de oito cabeças e meia”.

Aos funcionários do Departamento de Pós-Graduação, da Secretaria de Engenharia Civil, da Biblioteca e da Seção dos Periódicos, que durante todo este período me auxiliaram de forma sempre simpática e muito atenciosa.

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

Um agradecimento especial aos meus pais pela força que sempre me deram em todos os momentos difíceis, pela preocupação em ajudar a encontrar alternativas para problemas de percurso, por compartilharem com a mesma empolgação das vitórias, pelo carinho e alegria que sempre me fizeram ir adiante nas minhas conquistas. À minha irmã pelo carinho e preocupação que sempre teve comigo.

E um agradecimento todo especial ao meu amado marido, pelo amor, carinho, alegria, força, companheirismo, amizade, puxões de orelha, cuidados diversos, confiança, incentivo, presença em todos os momentos, mesmo que eu não compreendesse a forma, pela enorme paciência que sempre teve nas minhas “neuras” em diversas áreas e situações, pelos ensinamentos de vida, pelo exemplo de pessoa, e por estar sempre comigo me ajudando a crescer.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABELAS.....	xi
LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS.....	xii
RESUMO.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
<u>CAPÍTULO 1.....</u>	<u>1</u>
INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	
1.1 INTRODUÇÃO.....	1
1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA.....	3
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	3
<u>CAPÍTULO 2.....</u>	<u>5</u>
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	
2.1 INTRODUÇÃO.....	5
2.2 MÉTODOS DE COMPACTAÇÃO.....	5
2.2.1 INTRODUÇÃO.....	5
2.2.2 FATORES QUE INFLUENCIAM A COMPACTAÇÃO DE SOLOS.....	7
2.2.3 COMPACTAÇÃO DINÂMICA OU POR IMPACTO.....	10
2.2.4 COMPACTAÇÃO ESTÁTICA OU POR PRESSÃO.....	10
2.2.5 COMPACTAÇÃO POR PISOTEAMENTO OU POR AMASSAMENTO.....	11
2.2.6 RELAÇÕES ENTRE OS DIFERENTES MÉTODOS DE COMPACTAÇÃO.....	12
2.3 MÓDULO DE RESILIÊNCIA.....	15
2.3.1 INTRODUÇÃO.....	15
2.3.2 FATORES QUE INFLUENCIAM O MÓDULO DE RESILIÊNCIA.....	17
2.4 SOLOS NÃO SATURADOS.....	19
2.4.1 INTRODUÇÃO.....	19
2.4.2 SUCCÃO.....	20
2.4.3 MÉTODOS DE MEDIDA DE SUCCÃO.....	21
2.4.3.1 Método do Papel Filtro.....	21
2.4.3.2 Método do Transdutor de Pressão de Alta Capacidade.....	23
2.4.4 CURVA CARACTERÍSTICA DO SOLO.....	25
2.4.5 FATORES QUE INFLUENCIAM A SUCCÃO.....	27

2.5 RELAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE COMPACTAÇÃO – MÓDULO DE RESILIÊNCIA – SUCCÃO.....	29
<u>CAPÍTULO 3.....</u>	<u>35</u>
EQUIPAMENTO DESENVOLVIDO	
3.1 INTRODUÇÃO.....	35
3.2 CÂMARA TRIAXIAL.....	36
3.3 SISTEMA DE APLICAÇÃO DE PRESSÕES.....	36
3.4 INSTRUMENTAÇÃO.....	37
3.5 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS E CONTROLE DE ENSAIO.....	37
<u>CAPÍTULO 4.....</u>	<u>40</u>
CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS E METODOLOGIA DE ESTUDO	
4.1 INTRODUÇÃO.....	40
4.2 PROCEDÊNCIA DOS SOLOS ESTUDADOS.....	40
4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS ESTUDADOS.....	40
4.4 PROCEDIMENTOS PARA A PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	44
4.4.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA COMPACTAÇÃO.....	45
4.4.2 COMPACTAÇÃO DINÂMICA OU POR IMPACTO.....	46
4.4.3 COMPACTAÇÃO ESTÁTICA OU POR PRESSÃO.....	47
4.4.4 COMPACTAÇÃO POR PISOTEAMENTO OU POR AMASSAMENTO.....	48
4.4.5 OBTENÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA.....	50
4.4.6 ENSAIO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA.....	52
4.4.6.1 Procedimento para Montagem da Câmara Triaxial para Realização do Ensaio de Carregamento Repetido.....	55
4.4.7 MEDIÇÃO DA SUCCÃO DURANTE O ENSAIO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA.....	55
4.4.7.1 Procedimento para Instalação do Transdutor de Pressão de Alta Capacidade para Realização do Ensaio de Carregamento Repetido com Medição da Succão.....	56
<u>CAPÍTULO 5.....</u>	<u>59</u>
APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	
5.1 INTRODUÇÃO.....	59
5.2 COMPACTAÇÃO DINÂMICA.....	59
5.2.1 CURVA CARACTERÍSTICA.....	59
5.2.2 RELAÇÃO ENTRE MÓDULO DE RESILIÊNCIA E SUCCÃO.....	61

5.3 COMPACTAÇÃO ESTÁTICA.....	64
5.3.1 CURVA CARACTERÍSTICA.....	64
5.3.2 RELAÇÃO ENTRE MÓDULO DE RESILIÊNCIA E SUCCÃO.....	65
5.4 COMPACTAÇÃO POR PISOTEAMENTO.....	68
5.4.1 CURVA CARACTERÍSTICA.....	68
5.4.2 RELAÇÃO ENTRE MÓDULO DE RESILIÊNCIA E SUCCÃO.....	69
5.5 RELAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE COMPACTAÇÃO E MÓDULO DE RESILIÊNCIA.....	72
5.6 COMPARAÇÃO ENTRE SUCCÃO MEDIDA POR PAPEL FILTRO E POR TRANSDUTOR DE PRESSÃO.....	82
<u>CAPÍTULO 6.....</u>	86
CONCLUSÕES E SUGESTÕES	
6.1 CONCLUSÕES.....	86
6.2 SUGESTÕES.....	87
<u>ANEXOS.....</u>	89
<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</u>	96

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 : Energia de compactação necessária para obter peso específico seco máximo. (BELL,1977).....	8
Figura 2.2: Efeito da energia de compactação na estrutura de um solo argiloso compactado sob diferentes teores de umidade e densidades seca máxima. (LAMBE, 1958).....	9
Figura 2.3: Efeito do método de compactação (estático e por pisoteamento) nas características tensão-deformação. (a) amostras preparadas no ramo seco; (b) amostras preparadas no ramo úmido. (MITCHELL, 1964).....	13
Figura 2.4: Efeito do método de compactação sobre a deformabilidade. (BELL,1977).....	14
Figura 2.5: Tensiômetro Imperial College Suction Probe utilizado na medição da sucção durante os ensaios triaxiais. (RIDLEY e BURLAND, 1995).....	24
Figura 2.6: Detalhes da instalação indicada para um mini-transdutor de pressão. (HIGHT, 1982).....	25
Figura 2.7: Curva característica de uma amostra calcárea. (CRONEY et al. (1952), apud NETO e CARVALHO (1995)).....	26
Figura 2.8: Efeito da textura na sucção do solo. (MARSHALL (1958), apud RODRIGUES (1997)).....	27
Figura 2.9: Efeito da estrutura na sucção do solo. (HILLEL (1971), apud RODRIGUES (1997)).....	28
Figura 2.10: Curvas características experimentais de um corpo poroso. (POULOVASSILIS (1962) apud RöhM (1997))	29
Figura 2.11: Curva de compactação média por impacto e amassamento. (SVENSON, 1980).....	30
Figura 2.12: Módulo resiliente x tensão desvio. Compactação: impacto e amassamento – ponto A. (SVENSON, 1980).....	31
Figura 2.13: Módulo resiliente x tensão desvio. Compactação: impacto e amassamento – ponto B. (SVENSON, 1980).....	31
Figura 2.14: Módulo resiliente x tensão desvio. Compactação: impacto e amassamento – ponto C. (SVENSON, 1980).....	32

Figura 2.15: Curvas de compactação e sucção x teor de umidade. (MOU e CHU, 1981)....	33
Figura 3.1: Câmara Triaxial preparada para ensaio de Compressão Triaxial com Carga Repetida.....	36
Figura 3.2: Visualização da tela de rotina utilizada no ensaio para Mr.....	38
Figura 3.3: Visualização da tela de rotina utilizada no ensaio para medição de sucção com transdutor de pressão de alta capacidade.....	39
Figura 4.1: Análise Granulométrica com Defloculante	42
Figura 4.2: Curvas de Compactação (Proctor Normal).....	43
Figura 4.3: Relação entre sucção e grau de saturação para o solo residual de arenito e para a argila.....	44
Figura 4.4: Molde e soquete utilizados na Compactação Dinâmica.....	47
Figura 4.5: Prensa utilizada na Compactação Estática.....	48
Figura 4.6: Soquete utilizado na Compactação por Pisoteamento.....	49
Figura 4.7: Anel de PVC com e sem camada de solo compactado para a medição da sucção através do método do papel filtro.....	50
Figura 4.8: Transdutor de pressão de alta capacidade.....	57
Figura 4.9: Corpo de prova com transdutor de pressão instalado.....	58
Figura 4.10: Corpo de prova montado com transdutor de pressão sobre base da câmara triaxial.....	58
Figura 5.1: Relação entre teor de umidade e sucção por compactação dinâmica.....	60
Figura 5.2: Relação entre módulo de resiliência e sucção para $\sigma_c = 13,8$ kPa - CD.....	62
Figura 5.3: Relação entre módulo de resiliência e sucção para $\sigma_c = 27,6$ kPa - CD.....	63
Figura 5.4: Relação entre módulo de resiliência e sucção para $\sigma_c = 41,4$ kPa - CD.....	63
Figura 5.5: Relação entre teor de umidade e sucção por compactação estática.....	64
Figura 5.6: Relação entre módulo de resiliência e sucção para $\sigma_c = 13,8$ kPa - CE.....	66
Figura 5.7: Relação entre módulo de resiliência e sucção para $\sigma_c = 27,6$ kPa - CE.....	67
Figura 5.8: Relação entre módulo de resiliência e sucção para $\sigma_c = 41,4$ kPa - CE.....	67

Figura 5.9: Relação entre teor de umidade e sucção por compactação por pisoteamento.....	68
Figura 5.10: Relação entre módulo de resiliência e sucção para $\sigma_c = 13,8$ kPa - CP.....	70
Figura 5.11: Relação entre módulo de resiliência e sucção para $\sigma_c = 27,6$ kPa - CP.....	71
Figura 5.12: Relação entre módulo de resiliência e sucção para $\sigma_c = 41,4$ kPa - CP.....	71
Figura 5.13: Relação entre M_r e σ_d – para $\sigma_c = 13,8$ kPa e $w_{ót.} -4\%$	73
Figura 5.14: Relação entre M_r e σ_d – para $\sigma_c = 13,8$ kPa e $w_{ót.} -2\%$	73
Figura 5.15: Relação entre M_r e σ_d – para $\sigma_c = 13,8$ kPa e $w_{ót.}$	74
Figura 5.16: Relação entre M_r e σ_d – para $\sigma_c = 13,8$ kPa e $w_{ót.} +2\%$	74
Figura 5.17: Relação entre M_r e σ_d – para $\sigma_c = 13,8$ kPa e $w_{ót.} +4\%$	75
Figura 5.18: Relação entre M_r e σ_d – para $\sigma_c = 27,6$ kPa e $w_{ót.} -4\%$	75
Figura 5.19: Relação entre M_r e σ_d – para $\sigma_c = 27,6$ kPa e $w_{ót.} -2\%$	76
Figura 5.20: Relação entre M_r e σ_d – para $\sigma_c = 27,6$ kPa e $w_{ót.}$	76
Figura 5.21: Relação entre M_r e σ_d – para $\sigma_c = 27,6$ kPa e $w_{ót.} +2\%$	77
Figura 5.22: Relação entre M_r e σ_d – para $\sigma_c = 27,6$ kPa e $w_{ót.} +4\%$	77
Figura 5.23: Relação entre M_r e σ_d – para $\sigma_c = 41,4$ kPa e $w_{ót.} -4\%$	78
Figura 5.24: Relação entre M_r e σ_d – para $\sigma_c = 41,4$ kPa e $w_{ót.} -2\%$	78
Figura 5.25: Relação entre M_r e σ_d – para $\sigma_c = 41,4$ kPa e $w_{ót.}$	79
Figura 5.26: Relação entre M_r e σ_d – para $\sigma_c = 41,4$ kPa e $w_{ót.} +2\%$	79
Figura 5.27: Relação entre M_r e σ_d – para $\sigma_c = 41,4$ kPa e $w_{ót.} +4\%$	80
Figura 5.28: Relação entre teor de umidade e sucção comparando resultados obtidos através do método do papel filtro e transdutor de pressão.....	82
Figura 5.29: Curva característica para o solo residual de arenito (S.R.A.) e para argila através dos métodos de compactação empregados.....	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Caracterização dos solos em estudo.....	42
Tabela 4.2 - Resultados de sucção e grau de saturação para o solo residual de arenito e argila considerando-se o teor ótimo de umidade alcançado.....	44
Tabela 4.3 - Seqüência de ensaio para solos de subleito – AASHTO -TP46-94 (1996)....	54
Tabela 5.1 - Resultados de sucção e grau de saturação para teores de umidade mínimo, ótimo e máximo para CD.....	61
Tabela 5.2 - Resultados de máximo módulo de resiliência para CD.....	62
Tabela 5.3 - Resultados de sucção e grau de saturação para teores de umidade mínimo, ótimo e máximo para CE.....	65
Tabela 5.4 - Resultados de máximo módulo de resiliência para CE.....	66
Tabela 5.5 - Resultados de sucção e grau de saturação para teores de umidade mínimo, ótimo e máximo para CP.....	69
Tabela 5.6 - Resultados de máximo módulo de resiliência para CP.....	70
Tabela 5.7 - Resultados de sucção medidas através de papel filtro e transdutor.....	83
Tabela 5.8 - Resultados de sucção medida através do método do papel filtro para teores de umidade mínimo, ótimo e máximo alcançados.....	85
Tabela Anexo.1 - Resultados de Mr (MPa) para o solo residual de arenito por compactação dinâmica.....	90
Tabela Anexo.2 - Resultados de Mr (MPa) para o solo residual de arenito por compactação estática.....	91
Tabela Anexo.3 - Resultados de Mr (MPa) para o solo residual de arenito por compactação estática.....	92
Tabela Anexo.4 - Resultados de Mr (MPa) para a argila por compactação dinâmica.....	93
Tabela Anexo.5 - Resultados de Mr (MPa) para a argila por compactação estática.....	94
Tabela Anexo.6 - Resultados de Mr (MPa) para a argila por compactação por pisoteamento.....	95

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

AASHTO :	American Association of State Highway and Transportation Officials
CD:	compactação dinâmica
CE:	compactação estática
CP:	compactação por pisoteamento
E:	Módulo de Young
IP:	índice de plasticidade
LL:	limite de liquidez
LP:	limite de plasticidade
LVDT:	Linear Variable Differential Transducer
Mr:	Módulo de Resiliência
St:	sucção total
S _m :	sucção matricial
S _o :	sucção osmótica
w:	teor de umidade (%)
w _{ót} :	teor de umidade ótimo (%)
ε _p :	deformação permanente
ε _r :	deformação específica axial recuperável
φ:	diâmetro do corpo de prova
γ _d :	peso específico aparente seco
γ _{dmáx} :	peso específico aparente seco máximo
γ _s :	peso específico real dos grãos
σ _c :	tensão confinante
σ _d :	tensão desvio

RESUMO

Esta dissertação de mestrado apresenta um estudo realizado através de diferentes métodos de compactação, procurando-se conhecer o comportamento resiliente e a sucção de dois solos típicos de subleito de pavimentos do Estado do Rio Grande do Sul. Os corpos de prova confeccionados com argila e solo residual de arenito foram submetidos a ensaios de carregamento repetido em câmara triaxial. Foi realizada a medição da sucção com o intuito de verificar a relação entre umidade e módulo de resiliência nos corpos de prova compactados. Os resultados obtidos demonstraram que conforme o método de compactação empregado, o comportamento resiliente apresenta-se diferenciado, segundo o teor de umidade, o nível de tensões aplicado e o tipo de solo da amostra ensaiada. A influência dos métodos de compactação empregados pode ser verificada, também, nos resultados de sucção obtidos, tanto pelo método do papel filtro como pelo uso do transdutor de pressão de alta capacidade durante os ensaios de medição de módulo de resiliência.

ABSTRACT

This work presents a study on typical subgrade pavements materials in Rio Grande do Sul State, Brazil. Aiming at better understanding the resilient behaviour of soil and different compaction methods, specimens were compacted and tested in dynamical triaxial equipment. Besides, during resilient modulus determination, soil suction was measured. The results show that resilient behaviour is influenced not only by compaction method but by moisture content and level stress as well. Such influence was also observed in suction values, measured either with the filter paper method or the Imperial College Suction Probe used in the resilient modulus test.

Capítulo 1

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1 INTRODUÇÃO

Sendo o pavimento uma estrutura estratificada, que apresenta características próprias, suas camadas estão sujeitas às cargas de veículos; esforços estes distribuídos horizontal e verticalmente (tensões normais e cisalhantes) até alcançarem o subleito. A repetição deste tipo de carregamento provoca deformações permanentes acumuladas e deformações recuperáveis (resilientes). A ocorrência de trincas por fadiga nos materiais de revestimento ou cimentados se torna bem provável, e a extensão e abertura destas dependerá do número de solicitações deste pavimento. Estas trincas apresentam-se como sendo os defeitos mais comuns nas rodovias brasileiras, sendo que através delas ocorre a infiltração de água acelerando a deterioração do pavimento. Com isso, ao dimensionar-se um pavimento é necessário conhecer o comportamento do subleito que será submetido a um carregamento cíclico provocado por um certo tipo de tráfego (caracterizado por maior número de caminhões – área agrícola ou industrial, ou mais por veículos de passeio, por exemplo), levando-se em consideração o tipo de veículo que transitará sobre o pavimento, a quantificação do fluxo destes veículos, o tempo de aplicação da carga, o tipo de clima da região, dados pluviométricos, o tipo de material que compõe o subleito, entre outros fatores.

Mesmo com estudos avançados existentes nesta área, ainda há dúvidas que envolvem as deformações resilientes responsáveis pelas fissuras nos pavimentos, algumas vezes sem apresentar deformações plásticas significativas. Com isso, o dimensionamento de um pavimento por processos mecânicos considera a teoria da elasticidade, pois, o que condiciona a vida de fadiga das camadas superficiais mais rijas, como o revestimento, que são submetidas à flexões sucessivas, é a deformabilidade elástica ou resiliente das camadas do pavimento e do subleito.

Para se estudar materiais que possam ser utilizados em pavimentação, têm-se desenvolvido ensaios em laboratório simulando as mesmas condições de tráfego, ou seja,

de carregamento, encontradas em campo. Um dos ensaios mais empregados é o ensaio triaxial de carga repetida, que permite determinar o módulo de resiliência de materiais que serão utilizados nas camadas do pavimento, variando-se as condições encontradas em campo, como umidade, densidade, tensão confinante, magnitude, frequência e duração da tensão desvio.

A partir de estudos realizados por MITCHELL (1964), pelos quais comprovou ser a compactação um dos vários métodos para melhoramento das condições de um solo, descrevendo as principais razões em termos de propriedades deste solo, outros autores procuraram esclarecer as características e relações entre a estrutura resultante de solos compactados por diferentes métodos com o módulo de resiliência, considerando a influência da umidade (CRUZ, 1967; SVENSON, 1980; BALMACEDA, 1991; PHILLIP e CAMERON, 1995; RODRIGUES, 1997; entre outros).

O clima, através das variações de temperatura, ação das águas da chuva e de infiltrações, atua de forma direta e intensa nas características do pavimento, influenciando no seu tempo de vida de serviço. Segundo GEHLING *et al.* (1997), sabe-se que as variações ambientais, caracterizadas por alterações na sucção, causam diferenças nos valores de módulo de resiliência, além do estado de tensões. E, em se tratando da composição de subleitos rodoviários, os solos são considerados não saturados, já que geralmente se encontram acima do nível freático. A umidade do subleito do pavimento pode sofrer variações devido às próprias alterações ambientais da região onde se encontra construído. Estas alterações podem ser causadas por precipitações pluviométricas, temperatura, vegetação e vento, podendo facilitar as deformações irreversíveis e/ou reversíveis; que adicionadas à ação do tráfego, podem afetar a deformabilidade elástica dos materiais na determinação do módulo de resiliência durante o ensaio deste.

Nesta pesquisa procurou-se estudar a influência da estrutura de solos compactados, por três métodos diferentes, no seu comportamento resiliente; tendo como pretensão contribuir na busca de respostas para certas questões ainda pouco estudadas sobre o real comportamento dos solos compactados em campo, dando-se continuidade a pesquisa iniciada por RODRIGUES (1997).

Para a realização deste trabalho foram utilizados dois tipos de solos normalmente encontrados em subleitos de pavimentos no Rio Grande do Sul, o solo residual

de arenito e a argila, cujas diferentes características geotécnicas foram pesquisadas em laboratório.

Os corpos de prova foram confeccionados através de três métodos de compactação: dinâmico ou por impacto, pisoteamento ou por amassamento e estático ou por pressão, todos na densidade máxima do Proctor Normal e com teores de umidade variados.

1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

O principal objetivo desta pesquisa é avaliar a influência de diferentes métodos de compactação, empregados em laboratório, no comportamento resiliente e na sucção de dois solos, usualmente encontrados em subleitos de obras rodoviárias no Rio Grande do Sul, a argila e o solo residual de arenito.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

O trabalho será apresentado em seis capítulos. Sendo este primeiro o referente à introdução do assunto de pesquisa e aos objetivos a serem alcançados.

O segundo capítulo se refere à revisão bibliográfica desenvolvida para a realização deste trabalho, buscando apresentar conhecimentos gerais e específicos em relação ao comportamento de solos não saturados compactados, ensaios de carregamento repetido para a determinação do módulo de resiliência e métodos e instrumento utilizados para a medição de sucção.

O capítulo três apresenta uma descrição sobre o equipamento desenvolvido, no Laboratório de Pavimentação da UFRGS, para a realização dos ensaios triaxiais para determinação do módulo de resiliência, além da programação computacional empregada para tais ensaios e para a medição da sucção das amostras de solo a serem ensaiadas.

No quarto capítulo, apresenta-se a metodologia adotada em laboratório, constando dados sobre os materiais utilizados, os procedimentos empregados para a

caracterização dos mesmos, além da própria caracterização, e os procedimentos utilizados na confecção das amostras de solo que foram ensaiadas.

No quinto capítulo apresentam-se os resultados e as análises dos ensaios de carregamento repetido para a determinação do módulo de resiliência, das medições de sucção empregando o método de papel filtro e transdutor de pressão durante os ensaios triaxiais, e uma análise das relações entre os dados obtidos para os diferentes métodos de compactação empregados.

As conclusões da pesquisa realizada encontram-se no sexto capítulo, embasadas nos resultados obtidos, assim como algumas sugestões para futuros estudos, com propósito do aprimoramento dos conhecimentos nesta área.

Capítulo 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo tem por objetivo o direcionamento das informações bibliográficas sobre o estudo do comportamento resiliente de solos, devido à influência da estrutura resultante de diferentes métodos de compactação, tendo o acompanhamento da sucção durante os ensaios. Primeiramente será apresentada uma revisão sobre os diferentes métodos de compactação que foram empregados em laboratório, seguido de uma revisão sobre módulo de resiliência de solos compactados, a medição da sucção nestes solos e, por fim, a relação entre os métodos de compactação, o módulo de resiliência e a sucção.

2.2 MÉTODOS DE COMPACTAÇÃO

2.2.1 Introdução

A compactação é um dos vários métodos para melhoramento das propriedades mecânicas de um solo. É definido como um método mecânico baseado na expulsão de ar dos poros do solo reduzindo o índice de vazios sob umidade constante. Tem como objetivo básico a obtenção de um novo material, pois a compactação gera deformações permanentes que modificam as propriedades originais do solo, e este novo material deve apresentar um comportamento adequado para a aplicação a que se destina (BAPTISTA, 1976; BALMACEDA, 1991).

MITCHELL (1964) relacionou as principais razões para a compactação de solos em termos de propriedades :

- redução da compressibilidade (redução da variação de volume);
- aumento da resistência (densificação através da variação da estrutura);
- controle de tendência de variação volumétrica (com variação de umidade);
- redução da permeabilidade (redução de vazios);

- controle de propriedades resilientes (deflexão);
- diminuição da sensibilidade ao congelamento (redução de vazios).

Em 1933, Proctor, citado por BAPTISTA (1976), RICARDO e CATALANI (1990) e SENÇO (1997), observou que a densidade atingida na operação de compactação, ou seja, com o emprego de uma energia de compactação, depende da umidade do solo na hora da compactação. Com essa observação, ocorreu uma evolução nas técnicas de compactação, que até então eram realizadas de maneira empírica, sem um embasamento técnico para orientar os meios e os resultados. Iniciou-se a formulação de uma técnica de compactação e a determinação prévia de qual a umidade mais adequada para a obtenção de uma máxima densidade na compactação, numa determinada energia.

Para se encontrar o teor de umidade ótimo, para o qual obtém-se a densidade máxima aparente, utilizou-se uma certa massa de solo seco. Neste, os poros encontram-se cheios de ar, tornando a amostra elástica e impedindo, com isto, a redução do seu volume ao mínimo. Aumentando-se o teor de umidade desta massa de solo, tem-se primeiramente a lubrificação das partículas, permitindo maior aproximação entre elas, diminuindo o volume do solo durante a compactação e aumentando-se a densidade da amostra de solo até um limite máximo. Observou-se que continuando a umedecer a amostra, a água introduzida pelo umedecimento expulsa o ar existente nos poros, preenchendo-os. Com isso, impede-se a aproximação das partículas e a redução do volume durante a compactação, reduzindo, então, a densidade. Os pares de pontos (teor de umidade e densidade) plotados em um gráfico originam a denominada Curva de Compactação, sendo que esta é característica de cada material. Indica-se como conveniente um mínimo de cinco pontos experimentais para defini-la, de forma que dois se encontrem no ramo seco da curva, um próximo da densidade máxima e os restantes no ramo úmido da curva (BAPTISTA, 1976; RICARDO e CATALANI, 1990; SENÇO, 1997).

Desta forma, através da compactação com uma determinada energia, obtém-se a densidade máxima aparente de um solo, para uma umidade denominada ótima. Nesta condição tem-se a maior quantidade de partículas sólidas por unidade de volume, ou seja, obtém-se uma rigidez mais estável desse solo. Assim, para toda e qualquer execução de obras que necessitem da construção de aterros, a obtenção das maiores densidades possíveis é fator de segurança e estabilidade, inclusive pela melhoria da impermeabilidade deste solo compactado (SENÇO, 1997).

Segundo CRUZ (1967), quando se tratar de solos compactados deve-se considerar o tipo de compactação empregada (campo ou laboratório), e o fator relativo a destruição total, ou a permanência ou a remanescência de uma estrutura original no solo resultante da compactação. Cada um dos diversos tipos de compactação irão originar estruturas de solos bastante distintas.

Os métodos de compactação empregados nesta pesquisa foram: compactação dinâmica ou por impacto, compactação estática ou por pressão, e compactação por pisoteamento ou amassamento (*"kneading"*).

2.2.2 Fatores que Influenciam a Compactação de Solos

Sabendo-se da extrema diversidade dos solos, é necessário o conhecimento dos parâmetros que influem no processo de compactação, para que se possa ajustá-los de maneira que se alcance a maior eficiência e os melhores resultados. Os fatores de maior influência na compactação de um solo são a umidade do solo, o número e a espessura das camadas, a energia de compactação e o tipo equipamento utilizado.

Em relação a energia de compactação (E_c , energia transferida ao solo), esta depende da pressão aplicada, do número e espessura das camadas, da velocidade de aplicação, entre outros. Independente de onde a compactação é empregada, se em campo ou laboratório. Para qualquer tipo de solo, o aumento da energia de compactação resulta em diminuição do teor de umidade ótimo e no aumento da densidade máxima (DHAWAN e BAHRI, 1957; BAPTISTA, 1976; RICARDO e CATALANI, 1990). Contudo, da mesma forma que a energia de compactação transmitida ao solo aumenta até certo ponto com o aumento da pressão e do número de aplicações, ou passadas em se tratando de compactação em campo, esta mesma energia decresce com o aumento da velocidade e da espessura da camada compactada (RICARDO e CATALANI, 1990).

Deve-se salientar que para um certo método de compactação existe uma relação única entre densidade e teor de umidade, para cada energia de compactação aplicada em um determinado solo. E, em se tratando de energia de compactação, vários estudos foram realizados (DHAWAN e BAHRI, 1957; JOHNSON e SALLBERG, 1962; BELL, 1977) para se obter relações entre as características dos diferentes métodos de compactação.

BELL (1977), compactou amostras de um mesmo solo utilizando os métodos de compactação estática, por pisoteamento e dinâmico (AASHTO T-99). As amostras obtidas por pisoteamento e estaticamente foram compactadas de modo que apresentassem as mesmas características finais de umidade ótima e densidade máxima da amostra compactada pelo método dinâmico. Para isso foi necessário aplicar diferentes energias de compactação, como pode ser observado na figura 2.1.

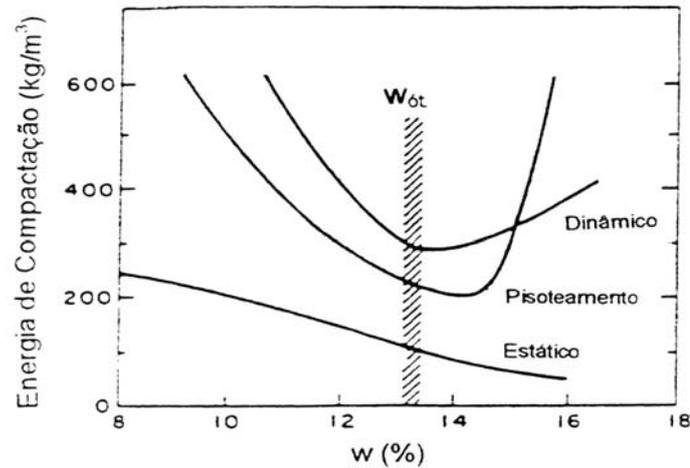


FIGURA 2.1 - Energia de compactação necessária para obter peso específico seco máximo. (BELL, 1977)

Os solos em seu estado natural, apresentam umidade acima (épocas de chuvas) ou abaixo (épocas de seca) da ótima. Quando a umidade é baixa, o solo mostra uma maior dificuldade de ser densificado, apresentando-se rígido. O solo compactado tem baixa densidade e altos valores de índice de vazios. Ao se acrescentar água, o solo se torna mais trabalhável, e o ponto no qual se encontra a melhor condição de trabalhabilidade, ou seja, quando com a energia de compactação empregada ocorre o maior agrupamento das partículas do solo, expelindo uma maior quantidade de ar, é denominada como o ponto de densidade máxima e teor de umidade ótimo (BAPTISTA, 1976; RICARDO e CATALANI, 1990).

A estrutura de um solo compactado depende da relação umidade - energia de compactação aplicada por ocasião da compactação. A figura 2.2, indica esquematicamente as estruturas de um solo argiloso sob o efeito da compactação dinâmica em função destes parâmetros, conforme LAMBE (1958). Pode-se observar que para um mesmo esforço de compactação e peso específico seco a estrutura do solo se modifica conforme o teor de umidade utilizado na compactação do corpo de prova.

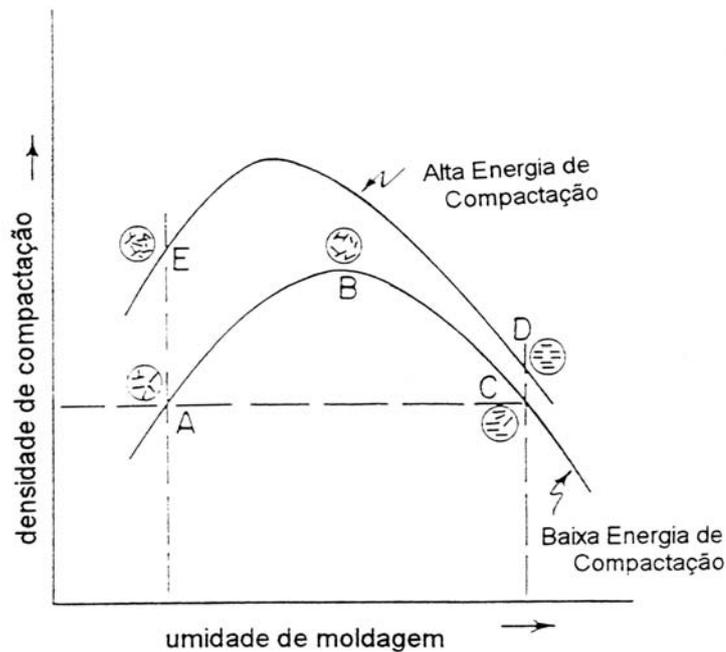


FIGURA 2.2- Efeito da energia de compactação na estrutura de um solo argiloso compactado sob diferentes teores de umidade e densidades seca máxima. (LAMBE, 1958)

No ramo seco, baixo grau de saturação, o método de compactação empregado pouco interfere na estrutura e nas propriedades do solo resultante, pois a atração face-aresta das partículas não é vencida pela energia aplicada, e geralmente origina-se estruturas flocoadas (caracterizadas pelo arranjo desordenado das partículas). Para maiores teores de umidade, ramo úmido, ocorre uma maior repulsão entre as partículas, e a compactação as orienta. Nestas condições de umidade, o método de compactação empregado influencia na estrutura final e nas propriedades do solo compactado, geralmente originando estruturas dispersas. Para uma mesma umidade, quanto maior a energia, maior o grau de dispersão. Este modelo representa de forma simplificada a complexa estrutura dos solos compactados, permitindo justificar as diferenças de comportamento dos mesmos. (LAMBE, 1958; JOHNSON e SALLBERG, 1962; SEED *et al.*, 1962; CRUZ, 1967; FREDLUND e RAHARDJO, 1993). Em geral, um solo com estrutura flocoada tem maior resistência, baixa compressibilidade, e maior permeabilidade do que o mesmo solo com o mesmo índice de vazios, porém em estado disperso (LAMBE e WHITMAN, 1979). Sendo, um solo com estrutura flocoada menos deformável do que com estrutura dispersa, aos esforços cisalhantes pequenos (MEDINA, 1997).

2.2.3 Compactação Dinâmica ou por Impacto

Consiste basicamente em deixar cair sobre uma camada de solo, com espessura determinada, colocada em um cilindro padrão, um certo peso (soquete) de uma certa altura, um número determinado de vezes (NBR 7182/86). Todas estas variáveis dependem do tipo de energia de compactação que se deseja aplicar. Quando se varia um destes fatores (altura, peso, número de golpes, ou espessura da camada) varia-se a energia de compactação e, com isso, o resultado que se pretende obter (BALMACEDA, 1991).

O conceito básico do ensaio de Proctor, segundo BURMISTER (1964) em seus estudos sobre a compactação de solos, é que o teor de umidade no qual um solo fino ou argiloso é compactado determina a densidade que pode ser alcançada por uma dada energia de compactação. Assim, a densidade máxima alcançada através da compactação não é uma propriedade fixa e constante do solo, para qualquer solo granular fino, mas sim uma variável dependente da energia de compactação utilizada, seja em campo ou em laboratório. E, em contraste com os solos granulares finos, os solos granulares apresentam bem definidos seus limites máximos e mínimos de densidade.

Nos processos de compactação dinâmica em laboratório a energia específica de compactação pode ser tomada como sendo (BALMACEDA, 1991) :

$$E_c = \frac{N \cdot n \cdot m \cdot h}{V}$$

onde,

E_c : energia de compactação

N : número de golpes por camada

n : número de camadas

m : peso do soquete

h : altura de queda do soquete

V : volume total da amostra de compactação

2.2.4 Compactação Estática ou por Pressão

Segundo BALMACEDA (1991), este método baseia-se em aplicar uma pressão sobre o solo de forma uniformemente distribuída, sendo mais empregado para reproduzir

em laboratório as características dos solos granulares compactados em campo, em particular com rolo liso.

Este método consiste em compactar cada camada com uma prensa, aplicando uma pressão determinada durante um certo tempo. Em laboratório, a energia específica para este tipo de compactação depende do tamanho do molde, da pressão aplicada e, também, do tempo de aplicação da mesma.

Conforme CRUZ (1967), a compactação estática é a que introduz menores tensões de cisalhamento, podendo resultar numa estrutura floclada ou dispersa. Segundo SEED e CHAN (1959) em seu trabalho sobre a influência do método de compactação nas propriedades do solo, quando amostras são compactadas com alto grau de saturação, ramo úmido da curva de compactação, através do método estático, o qual induz a pequenas ou nenhuma tensão de cisalhamento, a estrutura gerada é do tipo floclada.

2.2.5 Compactação por Pisoteamento ou por Amassamento

Este método de compactação baseia-se na sucessiva aplicação de altas pressões sobre áreas pequenas da amostra, através de um sistema composto por uma haste em barra de metal pelo qual uma peça cilíndrica, contendo uma mola no seu interior, é pressionada verticalmente no sentido da amostra, realizando a compactação, com pressões que variam com o tempo, crescendo e decrescendo, ciclicamente (uma foto do soquete utilizado nesta pesquisa pode ser visto na Figura 4.6). Desta forma desmancham-se os agregados das partículas do solo. Por isso mesmo, esta forma de compactação é especialmente indicada para solos coesivos e não indicada para solos granulares. A energia de compactação é função da pressão aplicada, das características do sistema de pressão, do tamanho do molde e do número de aplicações (LAMBE e WHITMAN, 1979; BALMACEDA, 1991).

Segundo BALMACEDA (1991), para solos muito brandos, com umidade elevada, se corre o risco de que a haste chegue ao fundo do molde, com isso, não se consegue o principal objetivo de uma compactação completa e correta. Já para solos muito rígidos, com baixa umidade, a compactação pode ser insuficiente.

Este tipo de compactação, segundo CRUZ (1967), é o que introduz maiores

tensões de cisalhamento e o que melhor representa, portanto, as condições de campo quando a compactação é realizada com rolo do tipo pé-de-carneiro. A compactação realizada pelos equipamentos do tipo rolo pé-de-carneiro é especialmente indicado para solos muito coesivos, pois o efeito de amassamento aliado a grandes pressões estáticas são capazes de produzir esforços internos maiores do que a resistência imposta pelas forças coesivas (RICARDO e CATALANI, 1990). Em compactações deste tipo, também se exige uma uniformização e destruição total da estrutura original do solo. Já no campo é mais provável que as ligações entre os grãos, devido a agentes cimentíceos originados da decomposição de certos materiais, não sejam totalmente destruídos e que, portanto, o solo resultante apresente características diferentes da compactação em laboratório (CRUZ, 1967).

BAPTISTA (1976) e SEED *et al.* (1962), porém, relatam experiências que comprovam a semelhança entre compactações realizadas em campo com o rolo pé-de-carneiro com aquelas realizadas em laboratório através do método de pisoteamento.

2.2.6 Relações entre os Diferentes Métodos de Compactação

Considerando-se amostras de solo compactadas no ramo seco através de compactação estática e por pisoteamento, não tem-se registrada nenhuma diferença quanto à resistência ao cisalhamento do solo, o que poderia indicar que as estruturas resultantes são semelhantes. Este fato poderia ser esperado caso as forças de atração devido ao baixo teor de umidade (deficiência de água), fossem suficientemente grandes para contrabalançar as diferentes tensões de cisalhamento introduzidas pelos métodos de compactação aplicados. Se, por outro lado, as amostras forem compactadas no ramo úmido, os métodos de compactação empregados, respeitando a ordem indicada, aplicam tensões de cisalhamento crescentes e as estruturas resultantes também apresentarão grau de dispersão crescente, e conseqüentemente menores resistências ao cisalhamento (CRUZ, 1967).

MITCHELL (1964) também refere-se a estrutura do solo compactado por diferentes métodos, considerando que, quando a argila é compactada no ramo seco, as amostras apresentam estruturas floculadas; e quando a compactação é realizada em amostras no ramo úmido, estas apresentam estruturas dispersas. E ainda complementa com a questão referente às diferentes condições de compactação, as quais podem produzir diferentes resistências e poro-pressões características. Para graus de saturação menores de 80%, argilas compactadas na mesma densidade e umidade geralmente apresentarão

uma estrutura muito similar e a relação tensão-deformação independente dos procedimentos de compactação. Por outro lado, amostras compactadas na mesma densidade e umidade no teor ótimo (saturação acima de 85%) a utilização de diferentes métodos de compactação podem produzir consideráveis diferenças nas estruturas e, portanto, diferentes propriedades, influenciadas pela tensão-deformação induzida (portanto, da dispersão) pelo método de compactação adotado. A figura 2.3 ilustra a relação tensão desvio - deformação axial de amostras compactadas no ramo seco e no ramo úmido, pelos métodos de compactação estático e por pisoteamento, confirmando a relação umidade - compactação - estrutura.

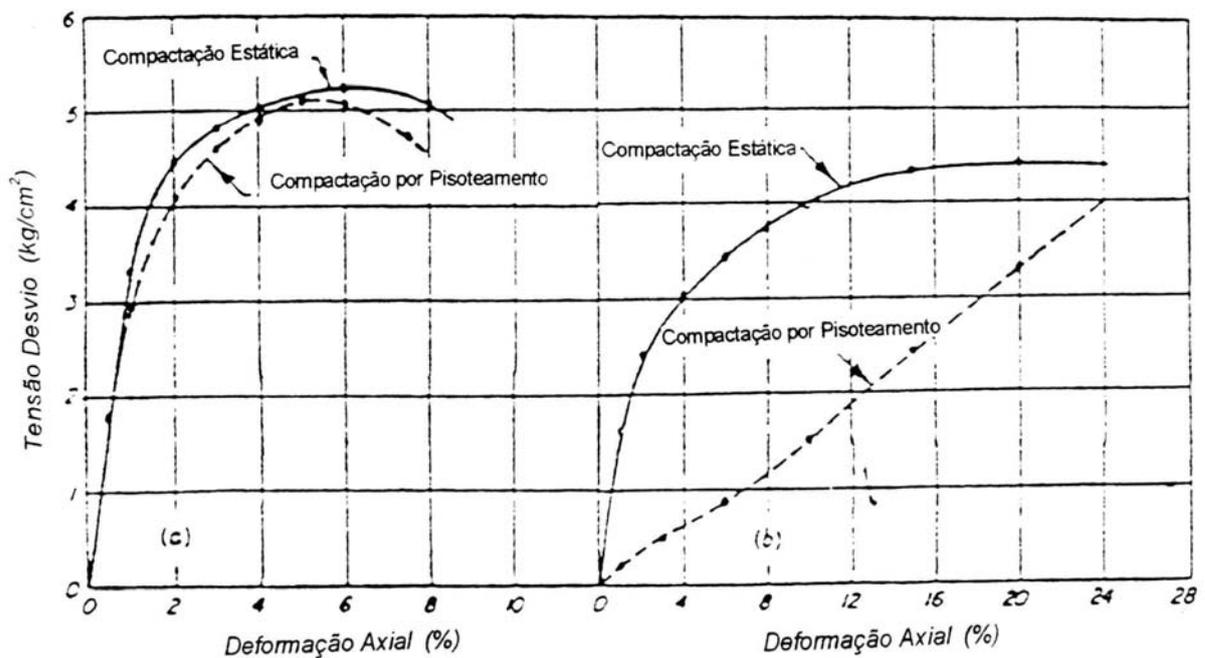


FIGURA 2.3- Efeito do método de compactação (estático e por pisoteamento) nas características tensão-deformação. (a) amostras preparadas no ramo seco; (b) amostras preparadas no ramo úmido (MITCHELL, 1964)

SEED e CHAN (1959) observaram que para a compactação estática em amostras de argila preparadas no ramo úmido (alto grau de saturação) ocorre pequena ou nenhuma deformação cisalhante, produzindo uma estrutura suavemente floculada. A compactação por pisoteamento, impacto ou vibração, porém, induz progressivamente a grandes quantidades de deformações cisalhantes e, conseqüentemente, levando a estruturas mais dispersas. Existe, ainda, segundo SEED *et al.* (1962), uma similaridade entre a relação tensão-deformação de uma amostra compactada por pisoteamento com um baixo grau de saturação e então umedecida, e uma amostra compactada estaticamente já na condição

final, saturada. Observam, ainda, que as deformações elásticas de amostras indeformadas são coerentes com as amostras compactadas por pisoteamento no laboratório; porém, são muito maiores do que as amostras compactadas estaticamente.

BELL (1977) em suas pesquisas, apresenta o método estático como sendo o mais eficiente para a argila silto arenosa ensaiada. E observa que a eficiência dos outros métodos varia com a umidade do solo, a força do golpe por unidade de área e a velocidade e duração do impacto.

Analisando-se as curvas apresentadas na figura 2.4, onde BELL (1977) mostra o efeito do método de compactação em relação à deformabilidade da amostra de solo, observa-se que as curvas referentes aos ensaios das amostras compactadas pelos métodos dinâmico e por pisoteamento apresentam-se bem semelhantes. Para teores de umidade abaixo da ótima (em torno de 13%, conforme a figura 2.1) a tensão cisalhante máxima é maior para o método dinâmico, um pouco menor para o pisoteamento e praticamente a metade para o método estático de compactação. Para teores de umidade acima da ótima a tensão cisalhante apresentou semelhança entre o método de compactação por pisoteamento e dinâmico, mas para o estático não observa-se muita diferença em relação aos teores de umidade abaixo da ótima.

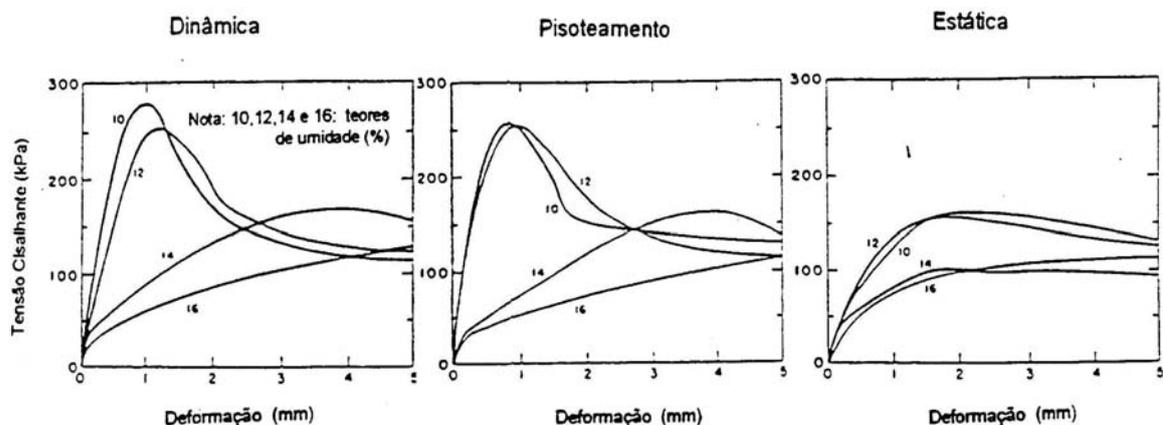


FIGURA 2.4 – Efeito do método de compactação sobre a deformabilidade. (BELL, 1977)

Quanto ao efeito do número de camadas, número de golpes por camada, pressão da ponta do aplicador de carga e o tempo de permanência da pressão no processo de compactação por pisoteamento, SEED e MONISMITH (1954) mostraram em seus estudos que aumentando o número de camadas ou de aplicações da carga por camada a amostra

apresenta o mesmo efeito que no ensaio de compactação dinâmica. E aumentando-se a pressão do aplicador da carga no pisoteamento e a força de golpe no dinâmico, a amostra também apresenta o mesmo efeito.

2.3 MÓDULO DE RESILIÊNCIA

2.3.1 Introdução

A fadiga dos materiais de revestimento é a principal causa de ruptura nos pavimentos, sendo que nos revestimentos de concreto sempre foi considerada no dimensionamento das placas; porém, isto não ocorre nos pavimentos flexíveis, ou seja, revestimentos asfálticos sobre camadas de solos granulares.

No Brasil, a realização dos ensaios laboratoriais para determinação sistemática das propriedades resilientes dos solos foi iniciada na COPPE/RJ, a partir da década de 70. Em aproximadamente duas décadas de avanços tecnológicos, houveram grandes mudanças na consideração do efeito da repetição das cargas na resistência à fadiga, e na simulação de sua atuação no dimensionamento de pavimentos flexíveis.

Hveem, citado por SEED *et al.* (1967), ao investigar rupturas em pavimentos flexíveis após um pequeno número de solicitações, concluiu que o adequado dimensionamento de pavimentos para se evitar deformações permanentes não impedia que ocorressem rupturas por fadiga. Fadiga esta, originada pela ação de carregamento cíclico por um período prolongado de tempo. Assim, segundo Hveem, se fosse possível medir a deformação elástica do pavimento o problema gerado pelas rupturas por fadiga poderia ser evitado, partindo-se da caracterização elástica dos solos. Com isso, deu-se origem ao termo Módulo de Resiliência (M_r), ao invés de se utilizar o módulo de Young (E), que determina a elasticidade estaticamente. Na verdade, o termo resiliência significa energia armazenada num corpo deformada elasticamente, a qual é devolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações; corresponde à energia potencial de deformação (MEDINA, 1997).

A caracterização da deformabilidade do material se dá com os resultados obtidos através das leituras das deformações reversíveis medidas após estabilização das deformações permanentes, seguindo um modelo elástico não-linear, e das deformações

permanentes medidas em função do número de carregamentos, caracterizando a resistência do material (PAUTE *et al.*, 1994). Os níveis de tensão utilizados nos ensaios são baseados na localização da amostra dentro da estrutura do pavimento e pelo tipo de material utilizado; dentro da base e sub-base os níveis de tensão são maiores dos aplicados em amostras do subleito.

Atualmente, a Mecânica dos Pavimentos considera o pavimento como sendo um sistema de camadas elásticas, sendo cada camada constituída de materiais diferentes, com funções diferentes. Destas camadas, as constituídas de materiais mais rígidos situam-se mais próximo da superfície, com o objetivo de distribuir melhor e de maneira mais uniforme os esforços aplicados pelo tráfego, diminuindo, assim, as tensões e deflexões no subleito.

Em ensaios de compressão triaxial de carregamento repetido realizados em laboratório, a deformação total ocorrida consiste em deformação permanente (ϵ_p) e deformação recuperável (ϵ_r), para qual determina-se o módulo de resiliência, da seguinte

forma:

$$M_r = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r}$$

onde:

M_r : módulo de deformação resiliente (kPa)

σ_d : tensão desvio aplicada repetidamente (kPa)

ϵ_r : deformação específica axial recuperável

O módulo de resiliência, obtido através da deformação axial resiliente (recuperável) fornecida pela amostra ensaiada, relaciona a tensão desvio aplicada e a deformação específica dos materiais do pavimento para a análise estrutural do sistema de camadas do pavimento. Assim, o módulo de resiliência caracteriza os materiais de construção do pavimento, incluindo o solo do subleito sob várias condições (teor de umidade, densidade, etc.) e o estado de tensões, que simulam as condições de campo.

Segundo PAUTE *et al.* (1994), quando as amostras são submetidas ao carregamento cíclico correspondente ao tráfego, para que os níveis de tensão aplicados não levem o material à ruptura, distingue-se dois estágios :

* início do carregamento: deformação permanente aumenta rapidamente, e a reversível diminui (devido o aumento da rigidez do material);

* após um certo número de aplicações de um carregamento: a deformação permanente tende a estabilizar (fenômeno de acomodação) e o comportamento do material pode ser considerado elástico.

Conforme, PHILLIP e CAMERON (1995), solos com altos valores de módulo de resiliência são menos suscetíveis ao efeito de carregamento cíclico, em campo.

Com o avanço tecnológico, a aquisição dos dados obtidos nos ensaios, passou a ser feito com a utilização do computador. Como foi descrito no trabalho desenvolvido por PINCIOTTI e KUPFERMAN (1989), com a utilização de equipamento e sub-programas para iniciar o ensaio, condicionar as amostras e controlar e coletar os resultados do carregamento cíclico aplicado na pesquisa. Os ensaios de carregamento repetido para a determinação do módulo de resiliência foram realizados pelos autores possibilitando a calibração do programa e definindo suas aplicabilidades em outros ensaios realizados em câmaras triaxiais, como ensaio de permeabilidade, ensaio com tensão controlada, entre alguns outros.

2.3.2 Fatores que Influenciam o Módulo de Resiliência

Conforme relatado por SEED e CHAN (1959), SEED *et al.* (1962), SVENSON (1980), LI e SELIG (1994) e MEDINA (1997), os fatores que têm influência no comportamento resiliente dos solos são: intensidade das tensões aplicadas, razão entre as tensões principais, número de repetições da tensão desvio, história de tensões, duração e frequência da aplicação da tensão desvio, tipo de agregado, percentagem de material passante na peneira nº 200, densidade e umidade de compactação, tixotropia, grau de saturação, método de compactação, entre outros.

A influência da umidade no módulo de resiliência pode ser verificada através do aumento do grau de saturação, que provoca uma redução no valor do módulo de resiliência. Quanto menor o grau de saturação maior será o valor apresentado para módulo de resiliência (para mesma tensão confinante, sendo mais evidente quando esta for menor), considerando-se diferentes valores para peso específico aparente seco. Assim, também, quanto maior o peso específico seco, maior será o módulo de resiliência (LI e SELIG, 1994).

Quando as amostras são compactadas com energias diferentes, porém com a mesma umidade, estas apresentam valores de módulo de resiliência muito próximos.

LI e SELIG (1994) estudaram a influência do teor de umidade e da densidade seca no módulo de resiliência de subleitos de solos granulometricamente finos, verificando que uma variação no estado físico do solo pode causar uma significativa mudança no Mr. Mudança esta que em campo pode ser causada pela própria alteração no ambiente e pelo efeito da compactação causada pelo tráfego. Assim como a densidade e a umidade, o modo como as partículas de solo se arrumam e aglomeram em amostras compactadas ou indeformadas também são fatores determinantes da deformabilidade (MEDINA, 1997).

Conforme o número de aplicações de tensões, a deformação elástica e o módulo de resiliência de uma amostra de solo argiloso compactado e ensaiado sob uma tensão desvio repetida, porém, não constante, varia consideravelmente, segundo SEED e CHAN (1959). Em tais ensaios, estes autores observaram que num solo argiloso compactado as maiores deformações recuperáveis desenvolveram-se entre 1 e 5.000 repetições de carregamento, e após 100.000 aplicações de tensão a deformação recuperável foi somente 30% do valor máximo obtido entre 1 e 1.000 aplicações do carregamento.

SEED *et al.* (1962) em seus estudos com amostras de argila compactadas com alto grau de saturação, principalmente por métodos que induzem a tensões de cisalhamento no solo, verificaram que apresentam um considerável aumento na resistência, atribuído a tixotropia e a mudança na disposição das partículas e à poro-pressão da água dentro do solo. Isso considerando-se que as amostras ficaram em repouso por algum tempo antes do carregamento inicial aplicado no ensaio, ocorrendo, então, uma diminuição na deformação elástica.

Em relação a tixotropia, o efeito desta na deformação elástica varia com o número de ciclos de carga aplicados, sendo que para aplicações abaixo de 40.000, um aumento no tempo de repouso diminui a deformação elástica. No entanto, para um número elevado de repetições (50.000) não foi observada uma variação significativa na deformação elástica relacionado ao tempo de repouso. A diferença no módulo de resiliência entre amostras ensaiadas imediatamente ou 1 dia após a compactação e amostras ensaiadas 50 dias após a compactação pode ser de 300 a 400 %, para um baixo número de aplicações (acima de 10) (SEED *et al.*, 1962).

Conforme, ainda, SEED *et al.* (1962), a intensidade da tensão desvio aplicada em amostras de solo argiloso compactado influi freqüentemente nas deformações elásticas. Para baixos níveis de tensão o módulo de resiliência decresce rapidamente com o aumento da tensão desvio. Num pavimento, a medida que a profundidade da camada de solo aumenta ocorre um decréscimo progressivo da tensão desvio, e, assim, se o solo for completamente uniforme, o módulo de resiliência poderá de fato aumentar com a profundidade. Esta variação irá dificultar a utilização da teoria da elasticidade, indicando que a contribuição das camadas superiores de um subleito de argila compactada, para a deflexão total desta, será maior do que poderá ser indicado pela teoria da elasticidade.

2.4 SOLOS NÃO SATURADOS

2.4.1 Introdução

Na Mecânica dos Solos, os primeiros estudos direcionavam-se aos solos saturados ou secos, principalmente devido ao fato do desenvolvimento de pesquisas e técnicas ocorrerem na sua maioria em regiões onde o clima predominante é frio ou temperado. Por isso, a maior ênfase em trabalhos relacionados a solos saturados, estando alguns países destas regiões sujeitos à ocorrência da penetração do congelamento em profundidade, alcançando o subleito, seguido do descongelamento primaveril que literalmente satura, encharca o pavimento (VIDAL, 1988; MEDINA, 1997). Porém, a ocorrência de solos não saturados (poro pressão negativa) é muito freqüente na região intertropical, e de modo geral os condicionantes físicos desta região apresentam-se mais favoráveis ao bom desempenho dos pavimentos, aumentando-se os estudos referentes à estas áreas de interesse. Contudo, adotar as características de solos saturados para os não saturados pode acabar levando à previsões equivocadas de comportamento. (MEDINA *et al.*, 1986; FREDLUND e RAHARDJO, 1993; RIDLEY e BURLAND, 1993 e 1995; NETO e CARVALHO, 1995).

RÖHM (1993) comenta a importância do conhecimento das respostas dos solos diante das variações de teor de umidade. Nem sempre a condição de saturação ou a ausência desta apresenta-se como a pior situação em obras em geral, devendo-se considerar que estas condições extremas em certas regiões nunca ocorrem.

2.4.2 Sucção

A sucção é o elemento condicionante das características dos solos não saturados, e pode ser entendida como sendo a energia necessária para se remover uma quantidade infinitesimal de água de um solo. A sucção total de um solo é o resultado da soma de duas parcelas: a sucção matricial (forças capilares e de adsorção) e a sucção osmótica (presença de diferentes concentrações de sais dissolvidos na fase líquida) (FREDLUND e RAHARDJO, 1993; BURLAND e RIDLEY, 1996). A sucção total pode ser descrita através da fórmula abaixo:

$$S_t = S_m + S_o$$

onde,

S_t : sucção total

S_m : sucção matricial, sendo igual a diferença entre a pressão do ar e a pressão de água : $(u_a - u_w)$

S_o : sucção osmótica

Para investigações em laboratório, a sucção (poro pressão negativa) tem sido considerada uma variável adicional nos ensaios em solos, ultrapassando a idéia de que a umidade seja ainda a principal variável, podendo auxiliar na análise dos resultados. Procedimentos e equipamentos para a determinação direta da sucção em amostras de solo foram desenvolvidos para poderem ser utilizados nos processos de secagem e umedecimento, vindo de encontro às necessidades de se ter certos métodos de medição de sucção (MOU e CHU, 1981).

RÖHM (1993) cita a grande divergência existente nos princípios que regem os solos não saturados, ressaltando duas correntes ideológicas. Por um lado, vários autores, entre eles ALONSO *et al.* (1987), afirmando que o comportamento dos solos não saturados é regido apenas pela sucção matricial. Por outro lado, RICHARDS *et al.* (1986), defendem que o comportamento dos solos não saturados é governado pela sucção total, ou seja sucção matricial mais osmótica.

Segundo EDIL e MOTAN (1984), ALONSO *et al.* (1987), FREDLUND e RAHARDJO (1993) e BURLAND e RIDLEY (1996), a sucção matricial é o mais importante e suficiente parâmetro para o estudo dos efeitos da variação da umidade no comportamento mecânico dos solos não saturados. A sucção osmótica varia com as mudanças das condições

químicas e térmicas, além do fato de sua importância estar relacionada a presença de uma concentração salina significativa ou que apresentem teores de umidade baixos; para solos com alto teor de umidade este componente se torna desprezível (RÖHM, 1993).

2.4.3 Métodos de Medida de Sucção

Existem diversos métodos diretos ou indiretos para medir sucção. Pode ser citado como exemplo:

- diretos: placa de pressão, tensiômetro e centrífuga.
- Indiretos: resistência elétrica, psicrômetro e papel filtro.

Estes métodos relacionam a sucção com o teor de umidade ou grau de saturação do solo, através destas correlações obtém-se a curva característica do solo (FREDLUND e RAHARDJO, 1993; MARINHO, 1995 (a,b); NETO e CARVALHO, 1995; RIDLEY e WRAY, 1995).

Os métodos empregados nesta pesquisa para se obter as medidas de sucção foram o transdutor de pressão de alta capacidade (Imperial College Suction Probe) e o método do papel filtro.

2.4.3.1 Método do Papel Filtro

O método do papel filtro consiste da utilização de um material poroso que possua a capacidade de absorver água e atingir um equilíbrio de sucção com a amostra. A sucção obtida depende do tipo de transferência de água do solo para o papel, que pode se dar por capilaridade (sucção matricial) ou através de vapor (sucção osmótica). É necessário se ter a calibração do papel filtro a ser utilizado, sendo o mais usualmente empregado é o Whatman N°.42, cuja umidade inicial no estado seco ao ar é aproximadamente 6%, permitindo que sucções de 0 até 29 MPa (máxima sucção que o solo pode ter para que o papel filtro absorva água do mesmo) sejam medidas (MARINHO, 1995a).

A calibração realizada no papel filtro Whatman N°. 42 por CHANDLER *et al.* (1992), apud MARINHO (1995a), apresenta as seguintes equações para serem utilizadas no cálculo da sucção de amostras de solo:

- para umidades do papel filtro $> 47\%$ → Sucção (kPa) = $10^{(6,05-2,48 \cdot \log w)}$
- para umidades do papel filtro $\leq 47\%$ → Sucção (kPa) = $10^{(4,48-0,0622 \cdot w)}$

Dependendo da forma em que ocorre o fluxo de água entre o papel filtro e a amostra de solo, pode-se obter uma sucção matricial (fluxo capilar) ou osmótica (fluxo de vapor). Na primeira, sucção matricial, há uma interação entre o papel filtro e a água do poro, ocorre fluxo capilar através das partículas do solo e das fibras do papel sem que a água perca continuidade. Na sucção osmótica, as moléculas de água escapam da água do poro vencendo as forças capilares do solo e, devido a presença de sais, o fluxo ocorre através do vapor, neste caso o papel não fica em contato com a amostra (FREDLUND e RAHARDJO, 1993; MARINHO, 1995a; NETO e CARVALHO, 1995).

O tempo necessário para que ocorra o equilíbrio entre o papel filtro e a amostra de solo, ou seja, a velocidade de absorção, depende do nível de sucção; para sucções altas o tempo para a água atingir uma determinada distância é maior do que para sucções baixas, onde a amostra encontra-se mais saturada. Com isso, sugere-se que um único contato entre o papel filtro e a água de poro pode ser suficiente para que a absorção capilar ocorra em todo o papel filtro; assim como a existência de áreas que não estejam em contato não influem no equilíbrio desde que utilize-se um tempo de equilíbrio adequado. Para que se obtenha uma adequada medição de sucção é necessário, também, que o papel filtro, após o período de equilíbrio, seja retirado da amostra e colocado no recipiente para pesagem com certa rapidez (no máximo 5s), pois a perda de umidade é da ordem de 1,5% por minuto para uma umidade de aproximadamente 35%. O mesmo cuidado deve ser tomado quando da retirada do papel da estufa, após secagem, pois pode ocorrer a absorção de umidade do ar (MARINHO, 1995a).

O método do papel filtro é muito utilizado em laboratório, principalmente devido a sua simplicidade e baixo custo, já que necessita apenas de papel filtro calibrado, recipientes hermeticamente fechados, pinça, pincel e uma balança de precisão (no mínimo 0,0005g de acurácia). No entanto, justamente pela sua facilidade de uso implica em resultados dispersos, devido a falta de cuidado na execução do ensaio. Algumas recomendações devem ser seguidas para garantir a obtenção da acurada medida da umidade através deste método, além dos já citados: o tamanho do papel (quanto menor o tamanho, menor a sensibilidade da medida), o tempo de equilíbrio (no mínimo 7 dias para a medição de sucção matricial), o conjunto amostra - papel filtro (deve ser firmemente

envolvido com filme plástico e saco plástico para se evitar a perda de umidade ou um deficiente contato), entre outros.

A técnica do papel filtro tem se mostrado muito útil na medição da sucção, segundo MARINHO (1995a) e NETO e CARVALHO (1995). Porém, deve-se salientar que a simplicidade deste método pode levar a erros, principalmente devido a falta de uma adequada execução.

2.4.3.2 Método do Transdutor de Pressão de Alta Capacidade

Este transdutor foi utilizado durante os ensaios para a determinação do módulo de resiliência. Desenvolvido por RIDLEY e BURLAND (1993), este transdutor é capaz de medir sucções até 1500 kPa (15bar).

O instrumento consiste de transdutor de pressão de tamanho reduzido (figura 2.6) composto de pedra porosa, “*strain gauges*”, conexão elétrica, blindagem inoxidável, capaz de suportar altas pressões absolutas negativas. Inicialmente é montado em condições secas e após submetido a uma pressão de água de-aerada no limite positivo do tensiômetro (3500 kPa), ou no limite das válvulas de aplicação de pressão para a saturação. A aplicação de uma alta pressão a um volume de água é muito útil, pelo fato de possibilitar a destruição dos núcleos de ar (bolhas) que são suficientes para causar a cavitação. Este era um problema muito comum nos instrumentos até então empregados, pois as bolhas são imprevisíveis a partir do momento em que se trabalha com pressões menores de - 80 kPa.

Conforme MARINHO (1995b), a utilização de tensiômetro para medição de sucção implica na necessidade de que a água dentro do sistema de medição esteja com a mesma pressão que a água de poro, com isso pode ocorrer cavitação dentro do sistema de medição, pois esta surge como resultado de uma redução de pressão. Em seu trabalho sobre a cavitação, o autor cita quatro teorias pesquisadas que podem explicar a presença de núcleos de cavitação (denominação dada às bolhas de ar macroscópicas “estabilizadas”) em sistemas que contenham água, sendo elas:

- existência de partículas sólidas na água com gás preso nas cavidades destas;
- presença de gases presos em micro cavidades existentes nas paredes do

recipiente;

- estabilização de bolhas de ar por películas iônicas existentes entre o gás e o líquido;
- cobertura das bolhas por substância de superfície ativa e estabilizadas contra a dissolução; neste caso os núcleos são considerados suficientemente pequenos para se manterem em suspensão.

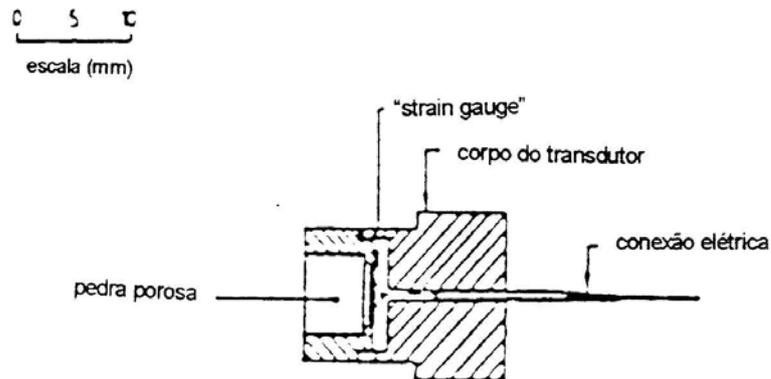


FIGURA 2.5 - Tensiômetro Imperial College Suction Probe utilizado na medição da sucção durante os ensaios triaxiais. (RIDLEY e BURLAND, 1995)

Em discussão realizada por MARINHO e CHANDLER (1994), sobre este instrumento de medição de sucção, foi apresentado alguns aspectos de relevância em relação à resposta que se espera de tal instrumento, na verdade algumas precauções, ou técnicas para que se evite realmente a ocorrência de cavitação. Sendo elas:

- a água utilizada deve ser pura e toda a superfície dentro do sistema de medição deve se encontrar extremamente limpa;
- a superfície em contato com o sistema úmido deve, tanto quanto possível, não ter fissuras ou de tamanho mínimo; quanto menor a superfície mais fácil para se evitar a cavitação;
- o sistema pode ser esvaziado a vácuo para obter-se a máxima remoção de ar entre as fissuras;
- uma pré-pressurização do sistema é necessário para altas pressões, com o objetivo de se dissolver todo o ar livre.

HIGHT (1982) apresenta uma forma de fixação de um mini-transdutor de pressão

no corpo de prova para medição de poro-pressão positiva, que consiste simplesmente, em encostar o instrumento junto a superfície do corpo de prova através de um furo aberto sobre a membrana no centro do mesmo, quando já adequadamente instalado na câmara triaxial. A membrana fica sobreposta ao transdutor e a vedação é realizada com a colocação de dois O-rings de diâmetro reduzido no corpo do transdutor sobre a membrana e aplicação de silicone sobre toda esta instalação, como pode ser vista na figura 2.6.

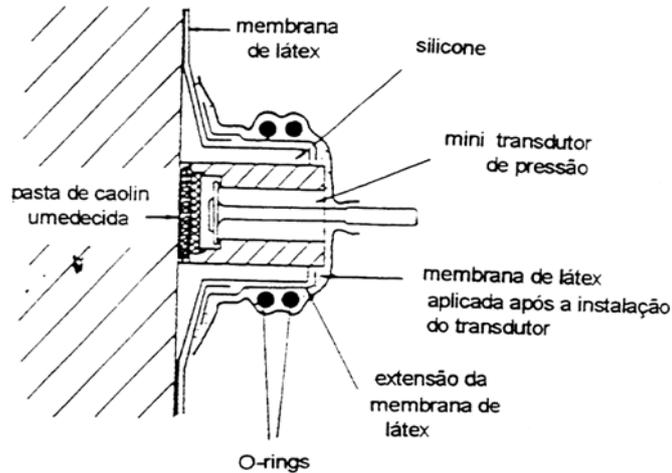


FIGURA 2.6 - Detalhes da instalação indicada para um mini-transdutor de pressão. (HIGHT, 1982)

No entanto, considerando-se o restrito espaço livre entre lateral do corpo de prova e superfície interna da câmara triaxial, neste trabalho, foi necessário o emprego de um outro modo de fixação do transdutor no corpo de prova, conforme poderá ser verificado no *Capítulo 4 – Caracterização dos Solos e Metodologia de Estudo*.

Segundo MARINHO (1995b), os tensiômetros equipados com transdutores de pressão geralmente necessitam de um fluxo muito pequeno de água para alcançar o equilíbrio com o solo. Com isso, o tempo de resposta torna-se reduzido, diminuindo também, a interferência da água do sistema no solo a ser ensaiado.

2.4.4 Curva Característica do Solo

A curva característica de um solo é a representação da variação da sucção com a variação da umidade ou grau de saturação em trajetórias de umedecimento e secagem, sendo que, quanto mais saturado se encontra um solo, menor será a sucção apresentada

pelo mesmo. Entre os fatores que influenciam a curva característica destacam-se a granulometria, a mineralogia e a estrutura do solo. Assim, cada tipo de solo apresenta uma única curva característica, sendo que para solos argilosos (poros menores, grãos menores, maiores as forças capilares) a sucção será maior do que para solos arenosos. Verificou-se, no entanto, que a curva característica não é uma função biunívoca, apresentando resultados distintos conforme é obtida, por processo de secagem (seca-se as amostras ao máximo e umedece-as até o teor de umidade desejado) ou por processo de umedecimento (umedece-se as amostras ao máximo e seca-as até o teor de umidade desejado) da amostra de solo, como pode ser verificado na figura 2.7 apresentada (FREDLUND e RAHARDJO, 1993; NETO e CARVALHO, 1995).

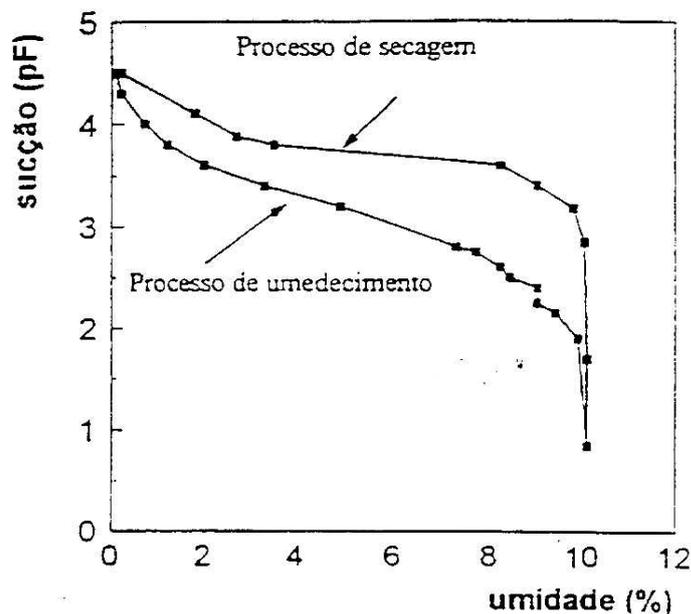


FIGURA 2.7 - Curva característica de uma amostra calcária. (CRONEY *et al.* (1952) apud NETO e CARVALHO (1995))

A unidade adotada para sucção na figura 2.7 leva em consideração a proposta de SCHOFIELD (1935), apud NETO e CARVALHO (1995), que considerando a grande variação da sucção de 0 kPa (solos saturados) até 1×10^6 kPa (solo seco em estufa), propôs que a sucção fosse apresentada em uma escala logarítmica, de modo que:

$$pF = \log h$$

onde:

h : módulo de pressão de sucção expresso em centímetros de coluna de água equivalente (por exemplo: 1 atm \approx 10 m.c.a. \approx 100 kPa \Rightarrow pF=3)

Esta maneira de representar teores de umidade, que são determinados a diferentes valores de sucção, também é citado por MEDINA (1997), sendo comumente empregado na Agronomia.

2.4.5 Fatores que Influenciam a Sucção

Existem vários fatores que influem na sucção (HILLEL, 1971; MARSHALL, 1958; FREDLUND e RAHARDJO, 1993; NETO e CARVALHO, 1995; RODRIGUES, 1997), entre eles:

- granulometria e mineralogia : a granulometria influi nas forças capilares, pois, quanto mais fino o solo, maiores serão as forças capilares. O efeito da textura na sucção do solo pode ser visto na figura 2.8, onde se observa que os solos argilosos apresentam uma curva característica mais uniforme, sem distorções com a variação do teor de umidade. Já o efeito da textura dos solos arenosos pode ser observado pela grande variação da curva característica, nestes, uma pequena sucção é suficiente para dessaturar grande parte dos poros de maior diâmetro, resultando em uma redução acentuada no teor de umidade.

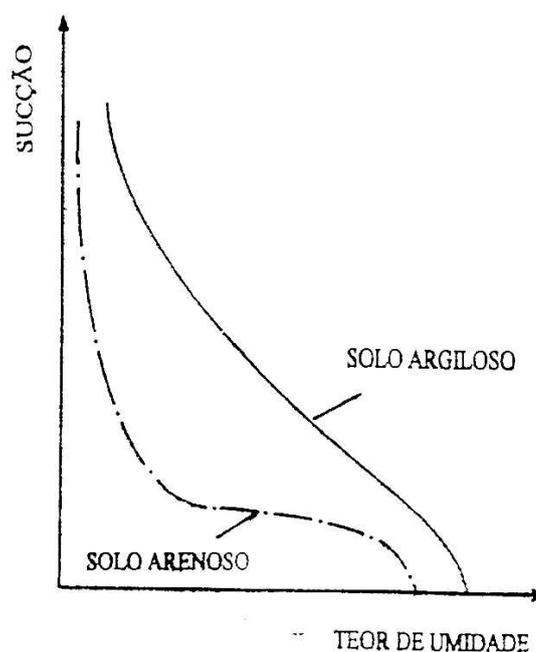
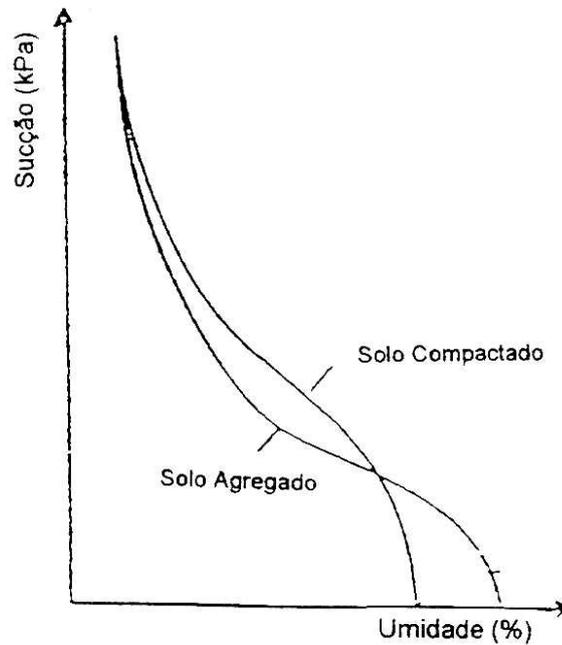


FIGURA 2.8 - Efeito da textura na sucção do solo. (MARSHALL (1958), apud RODRIGUES (1997))

- estrutura do solo : o tamanho do poro e a tensão superficial entre as partículas do solo e as moléculas da água influenciam a sucção de um solo, assumindo-se que a tensão superficial seja constante, a sucção dependerá somente da estrutura do solo, como pode ser visto na figura 2.9.



**FIGURA 2.9 - Efeito da estrutura na sucção do solo.
(HILLEL (1971), apud RODRIGUES (1997))**

- trajetória de umedecimento ou secagem : fator de grande influência na curva característica de um solo, as curvas de contorno de secagem e umedecimento geram o denominado ciclo de histerese, que pode ser visualizado na figura 2.10, onde a diferença AC representa a quantidade de ar capturada nos vazios durante a reidratação do corpo poroso estudado por POULOVASSILIS (1962), apud RÖHM (1997).

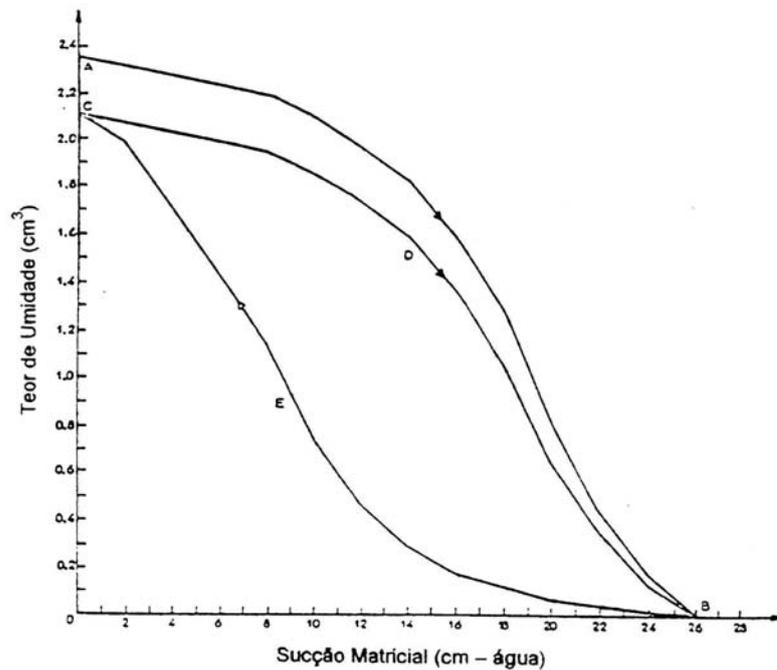


FIGURA 2.10 – Curvas características experimentais de um corpo poroso. (POULOVASSILIS (1962), apud RÖHM, 1997)

2.5 RELAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE COMPACTAÇÃO - MÓDULO DE RESILIÊNCIA - SUCCÃO

Em seu trabalho, SVENSON (1980) apresenta resultados obtidos pela compactação por impacto e por amassamento relacionando-os ao módulo de resiliência, tendo ensaiado amostras de solo argiloso não saturadas provenientes de subleito e camadas de reforço de rodovias no Rio de Janeiro. Na figura 2.11 encontra-se representada a curva de compactação média dos pontos obtidos através dos dois métodos de compactação empregados.

O efeito dos dois métodos de compactação (por impacto e por amassamento) foram analisados para o mesmo peso específico aparente seco, sendo este menor do que o peso específico aparente seco máximo, e para três condições de umidade: no ponto A teor de umidade abaixo da umidade ótima (ramo seco), ponto B com teor de umidade próximo da ótima e no ponto C com teor de umidade acima da ótima.

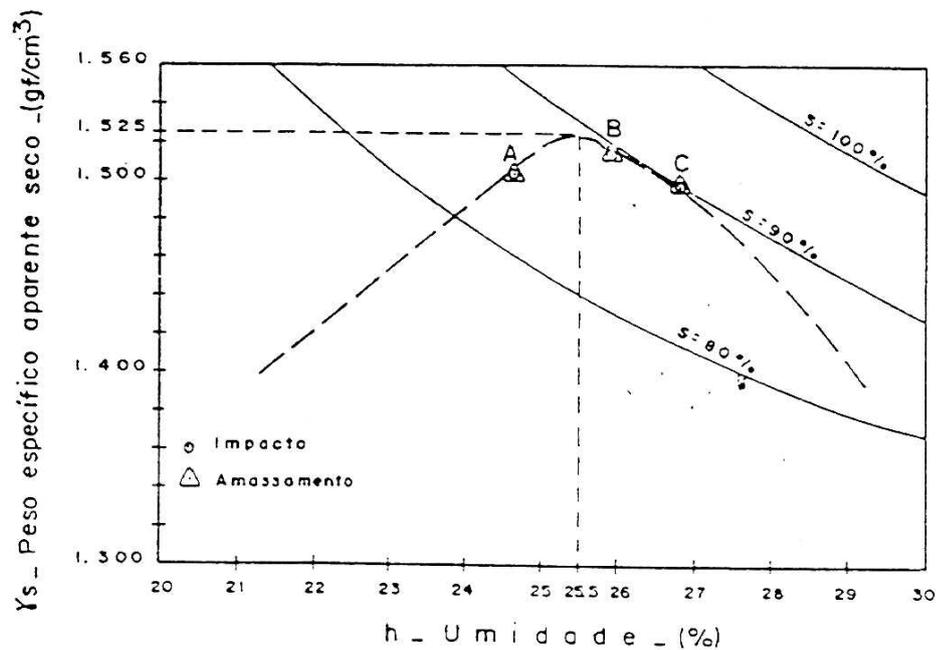


FIGURA 2.11 - Curva de compactação média por impacto e amassamento. (SVENSON, 1980)

Analisando-se o efeito dos dois tipos de compactação no módulo de resiliência, pode-se observar que para o caso do ponto A o módulo de resiliência não apresentou quase nenhuma diferença entre os resultados da amostra compactada por impacto e da compactada por amassamento, sendo que para esta última houve uma pequena redução no módulo quando do acréscimo na tensão desvio (fig. 2.12). Para o ponto B o valor do módulo de resiliência pela compactação por impacto foi maior do que por amassamento, isto para tensões baixas, quando as tensões se elevam a diferença diminui (fig. 2.13). No ponto C, o valor do módulo de resiliência pela compactação por impacto foi novamente maior do que por amassamento, e com tensões altas pelos dois métodos o módulo de resiliência tendeu a um valor constante (fig. 2.14). Observa-se, também, a diferença entre os valores de módulo de resiliência entre o caso B e C, sendo que com um teor de umidade maior do que o ótimo (caso C) a variação no módulo para os dois tipos de compactação foi reduzida.

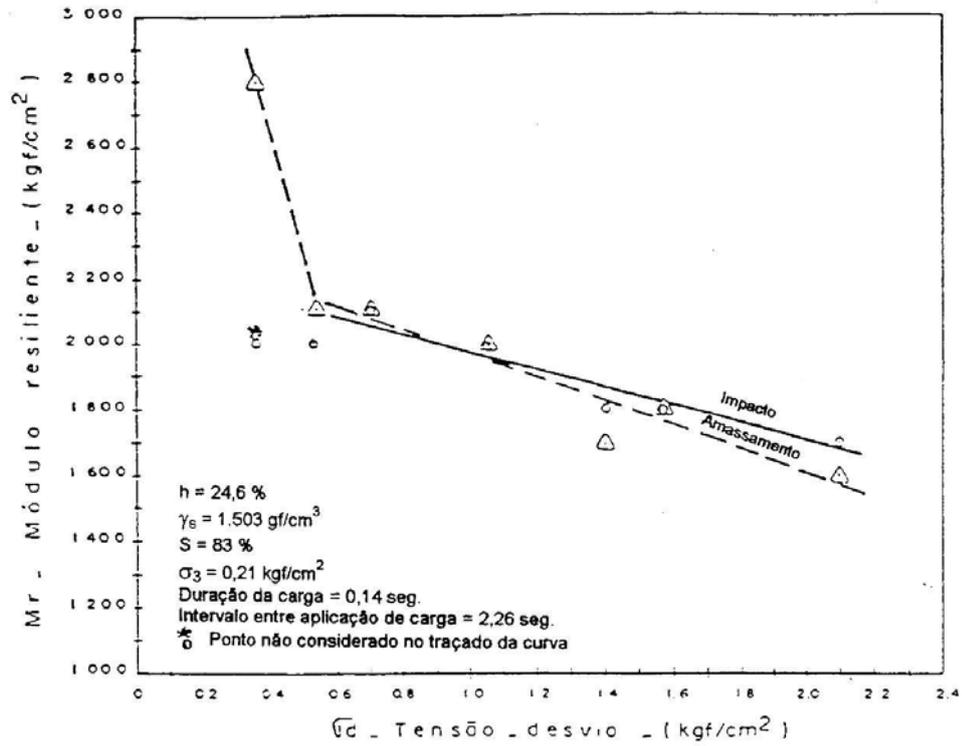


FIGURA 2.12 - Módulo resiliente x tensão desvio Compactação: impacto e amassamento - ponto A. (SVENSON, 1980)

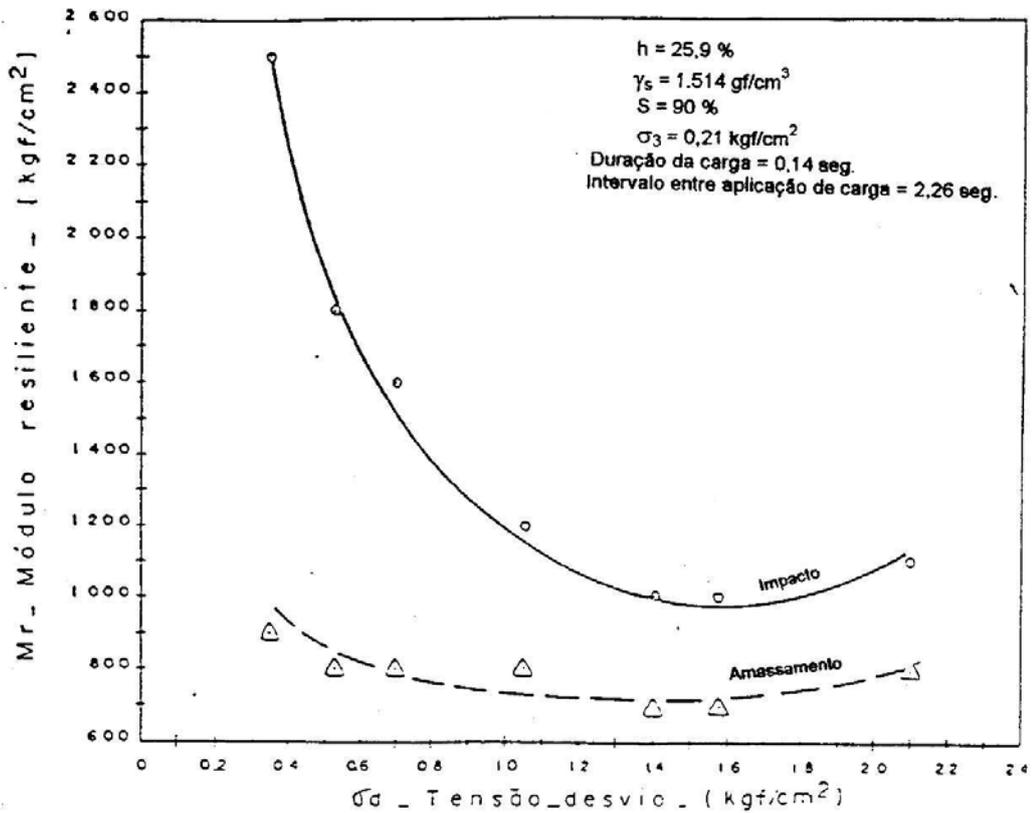


FIGURA 2.13 - Módulo resiliente x tensão desvio Compactação: impacto e amassamento - ponto B. (SVENSON, 1980)

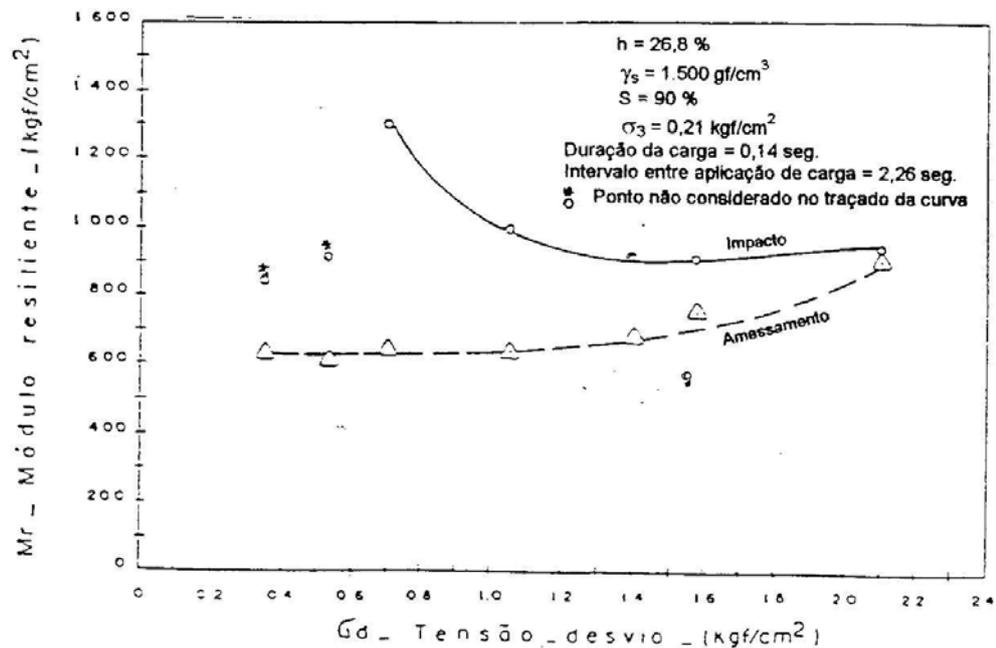


FIGURA 2.14 - Módulo resiliente x tensão desvio Compactação: impacto e amassamento - ponto C. (SVENSON, 1980)

A compactação realizada em amostras de solo coesivo no ramo seco resultaram em pequenas deformações permanentes e recuperáveis para todos métodos de compactações; porém quando a compactação ocorre no ramo úmido (com valores superiores à umidade ótima) as deformações e poro-pressões permanentes aumentam consideravelmente para compactação por amassamento (estrutura mais dispersa da amostra), já para compactação por impacto as deformações são menores.

No trabalho realizado por MOU e CHU (1981), em amostras de solo argiloso compactadas estaticamente e por pisoteamento, os resultados apresentados da relação entre a densidade máxima e a sucção mostram que as amostras compactadas estaticamente apresentaram uma menor densidade máxima e uma sucção maior. Ocorrendo o contrário com as amostras compactadas por pisoteamento; considerando que todas as amostras foram compactadas com energia de compactação constante. Tais resultados encontram-se representados abaixo na figura 2.15.

A energia de compactação é importante na avaliação da sucção, pois esta, depende da estrutura deste solo e também do tamanho do poro e da tensão superficial entre as partículas do solo e da água. E, quando se considera que a tensão superficial é

constante, então a sucção dependerá somente da estrutura do solo.

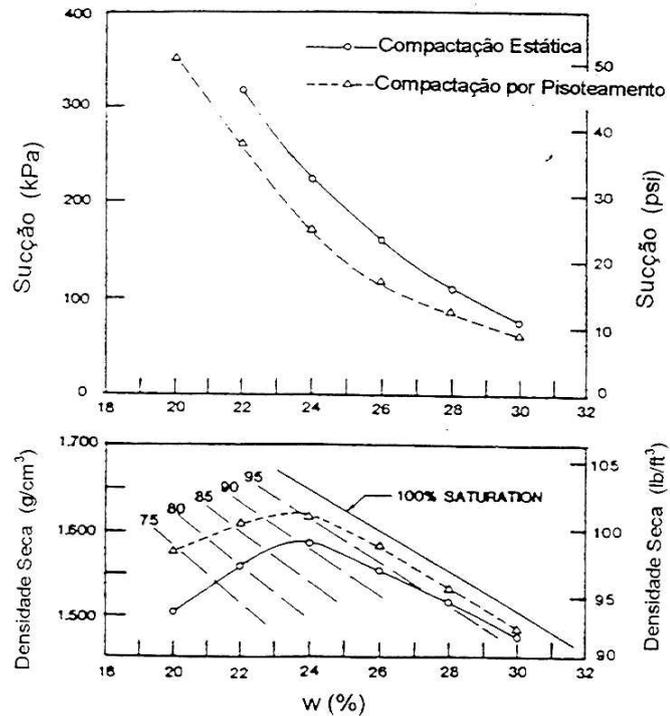


FIGURA 2.15 - Curvas de compactação e sucção versus teor de umidade. (MOU e CHU, 1981)

Apesar de existirem ainda poucos estudos no Brasil relacionando módulo de resiliência e sucção, sabe-se que, além do estado de tensões, as variações ambientais, caracterizadas pela sucção, provocam alterações nos valores de módulo de resiliência. Os solos de subleitos rodoviários, são considerados não saturados, já que geralmente se encontram acima do nível. As variações ambientais como precipitações pluviométricas, temperatura, vegetação e vento provocam alteração na umidade do subleito do pavimento, podendo, estas variações, influenciar na magnitude da deformabilidade elástica dos materiais na determinação do módulo de resiliência durante o ensaio deste (GEHLING *et. al.*, 1997).

PHILLIP e CAMERON (1995), em seu estudo sobre a relação entre sucção e módulo de resiliência, comentam que a variação de sucção no subleito durante a vida de um pavimento depende do nível de sucção no solo durante sua construção, e que o subleito pode perder ou absorver umidade para estabelecer um equilíbrio com o meio ao redor. Em climas áridos a semi-áridos, o equilíbrio da sucção no solo pode ser quase constante com a

profundidade. Entretanto, em amostras ensaiadas com sucção em equilíbrio, verificaram que o módulo de resiliência pode, a longo prazo, representar uma maior rigidez do pavimento. Após ensaiar argilas rígida e mole por compactação estática, estes autores concluíram que a relação entre módulo de resiliência e a sucção do solo em solos expansivos em subleitos é complexa, já que a sucção é um dos três fatores que influem no módulo de resiliência. Os outros dois fatores são o peso específico seco e o estado de tensões durante o carregamento cíclico.

SZAFRON e FREDLUND (1992), apresentaram um estudo realizado através do monitoramento da sucção matricial no subleito de uma rodovia no Canadá, onde destacam a influência do microclima. Confirmaram que a sucção matricial influi na resistência de subleitos de solo, em termos de durabilidade, variando entre a região da rodovia mais tráfegável e menos tráfegável. Na porção de maior intensidade de tráfego, a sucção apresenta-se maior, devido a dois fatores. O primeiro devido a infiltração nesta área ser pequena, considerando que a pavimentação encontre-se em boas condições de impermeabilização; ou, quando for o caso de superfície não pavimentada, devido a maior densificação devido ao próprio tráfego, e com isso ocorre uma diminuição na permeabilidade do subleito, escoando mais rapidamente a água para o acostamento. O segundo fator é que se a superfície tem uma baixa permeabilidade a água tem uma distância mais longa para percorrer até o subleito sob a área de tráfego mais intenso, dirigindo-se para dentro do acostamento ou talude lateral.

Capítulo 3

EQUIPAMENTO DESENVOLVIDO

3.1 INTRODUÇÃO

Para o desenvolvimento da fase experimental desta dissertação, foi desenvolvido um equipamento destinado a execução dos ensaios triaxiais de carregamento repetido em corpos de prova de solo e determinação do módulo de resiliência.

Estes ensaios de carregamento repetido eram anteriormente realizados utilizando-se um equipamento que possuía dimensões compatíveis para corpos de prova com 10 cm de altura por 5 cm de diâmetro; seus controles de pressão eram todos manuais e a aquisição de dados era feita através de um oscilógrafo. O novo equipamento foi desenvolvido com novas dimensões para comportar amostras de solo de 20 cm de altura por 10 cm de diâmetro, para que se pudesse ensaiar amostras com granulometria mais grosseira e, também, para se minimizar a influência do tamanho da amostra nos resultados. A aquisição dos dados é feita de forma direta com o auxílio de um computador, no qual se instalou um programa para este fim, permitindo a entrada de dados como as tensões confinante e desvio utilizadas nos ensaios.

O emprego de um sistema de aquisição de dados computadorizado foi adotado por apresentar vantagens como a alta velocidade com que os dados são processados e as dimensões reduzidas dos equipamentos de controle, que se restringem apenas ao micro-computador utilizado nos próprios ensaios.

A figura 3.1 apresenta um esquema do equipamento triaxial de carga repetida, e a seguir uma descrição das partes que compõem o equipamento.



FIGURA 3.1 - Câmara Triaxial preparada para ensaio de Compressão Triaxial com Carga Repetida.

3.2 CÂMARA TRIAXIAL

A câmara triaxial que foi utilizada consiste de uma câmara convencional, com parede de acrílico, permitindo a realização de ensaios com amostras com dimensões iguais a 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura.

3.3 SISTEMA DE APLICAÇÃO DE PRESSÕES

O sistema de aplicação de pressão é pneumático. Contém um sistema de lubrificação e filtragem do ar comprimido, localizado antes dos reguladores de pressão, responsáveis pelo controle da aplicação da tensão axial e confinante. O controle dos intervalos de aplicação de carga é realizado através de um temporizador, sendo este intervalo de tempo especificado pela norma AASHTO – TP-46/94.

A tensão axial, ou desvio, é aplicada através de um regulador de pressão com

capacidade de 700 kPa. Este regulador está conectado a um manômetro de Bourdon, com fundo de escala de 400 kPa, divisões de 100 em 100 kPa. Este sistema passa por um reservatório de ar, com capacidade de 4,8 litros, válvula solenóide, pistão, cilindro pneumático de dupla ação e 100 mm de diâmetro. Já para a tensão confinante, o regulador de pressão está conectado a um manômetro de Bourdon, com escala de 1.100 kPa, divisões de 100 em 100 kPa.

3.4 INSTRUMENTAÇÃO

A instrumentação instalada nos corpos de prova consistiu de transdutores para medição de deformação axial e transdutores de pressão para medir a sucção.

A medição da deformação axial do corpo de prova se verifica através de dois transdutores de deformação do tipo LVDT's (Linear Variable Differential Transducers), que transformam as deformações axiais durante o carregamento repetido do ensaio em potencial elétrico, cujo valor é registrado no programa de leitura. Estes transdutores foram pré-calibrados para que as medidas tomadas fossem correlacionadas com as deformações.

A medição da sucção do corpo de prova durante o ensaio de carregamento repetido se realiza através de um transdutor de pressão de alta capacidade (Imperial College Suction Probe), descrito no item 2.4.3.2 *Método do Transdutor de Pressão de Alta Capacidade*. Este transdutor também foi submetido a calibração através do instrumento de calibração Budenberg, e com o auxílio de um programa de calibração desenvolvido com o *software* HP-VEE, marca registrada Hewlett Packard.

3.5 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS E CONTROLE DE ENSAIO

Para esta pesquisa foi utilizada uma rotina computacional para a aquisição de dados e transformação destes em resultados de módulo de resiliência, para cada estágio de aplicação de carga. Foi empregado para este sistema de aquisição de dados um micro-computador PENTIUM, com uma frequência de 133 MHz, com 16 Mbytes de memória de acesso randômico, placa para a coleta de dados do tipo CIO-DAS 1602/16, com resolução de 16 bits.

Esta rotina foi desenvolvida a partir da utilização do programa da Hewlett Packard, modelo HP-VEE. Este programa destina-se especificamente à aquisição de dados e controle de processos, tanto para aplicações industriais como para pesquisa. Entre as principais vantagens deste programa pode-se citar o fato de sua programação ser baseada em técnicas de programação visual e a possibilidade de utilização de várias sub-rotinas pré-programadas, como, por exemplo, a plotagem de gráficos e outros tipos de controle fornecidos.

Com esta rotina pode-se introduzir os dados necessários para a determinação do módulo de resiliência (tensão confinante e desvio, distância entre alças, número de aplicações de carga), e obtém-se o gráfico de deformação para cada estágio de tensões aplicadas. O número de aplicações da tensão desvio, e o estado de tensões pode ser adaptado tanto para seguir a norma brasileira (DNER-ME 131/94) como a norma americana, AASHTO TP46-94 (1996), empregada nesta pesquisa. Na figura 3.2 encontra-se apresentado a tela da rotina utilizada.

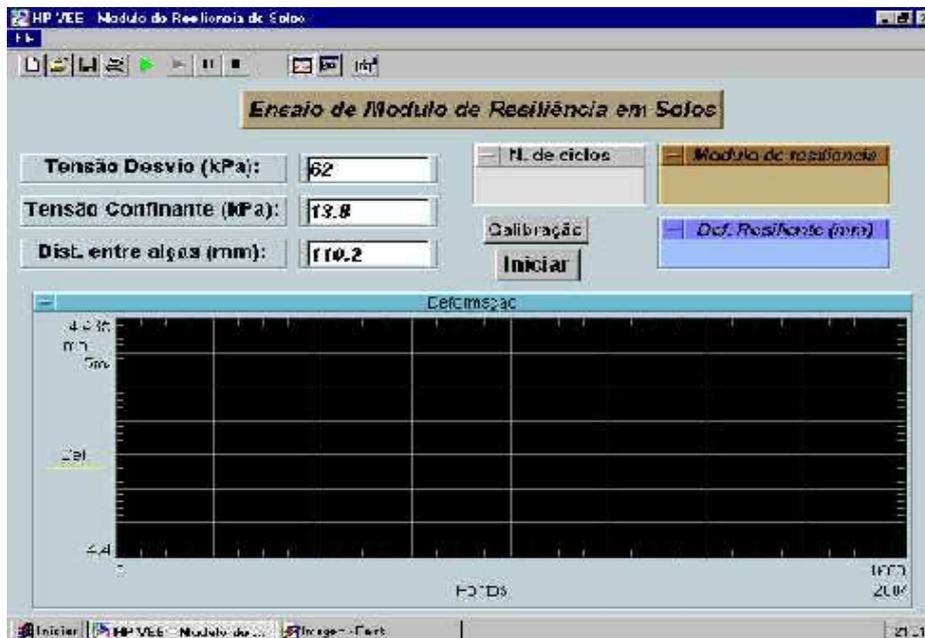


FIGURA 3.2 - Visualização da tela de rotina utilizada no ensaio para Mr.

Para a medição de sucção durante o ensaio de carregamento repetido, utilizou-se o transdutor de pressão desenvolvido por RIDLEY e BURLAND (1994). Para o seu emprego, também foi utilizado uma rotina computacional para aquisição de dados

desenvolvido através do *software* da marca Hewlett Packard, modelo HP-VEE. O modo de apresentação não difere muito do destinado ao cálculo do módulo de resiliência, contudo, sua leitura é apresentada em bits, e através da equação de calibração do transdutor esta leitura é convertida para valores de sucção.

A figura 3.3 apresenta uma tela da rotina empregada para a leitura da medição realizada pelo transdutor de pressão.

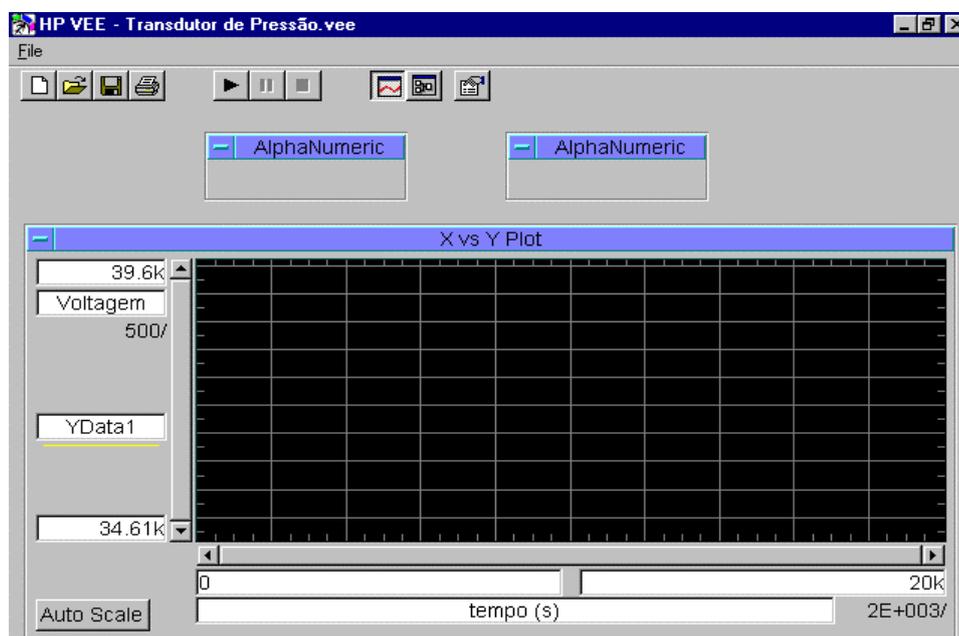


FIGURA 3.3 - Visualização da tela de rotina utilizada no ensaio para a medição de sucção com o transdutor de pressão de alta capacidade.

Capítulo 4

CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS E METODOLOGIA DE ESTUDO

4.1 INTRODUÇÃO

O objetivo deste capítulo consiste em apresentar os procedimentos empregados nos ensaios de laboratório para a caracterização dos solos e confecção dos corpos de prova destinados ao estudo desenvolvido nesta pesquisa.

4.2 PROCEDÊNCIA DOS SOLOS ESTUDADOS

Os solos utilizados nesta pesquisa foram:

- argila : proveniente de uma jazida situada no km 25 + 350 da estrada RS/118, à margem esquerda, sentido Gravataí - Viamão. A caracterização visual indica um material de coloração vermelha. Este solo também foi utilizado por RODRIGUES (1997) e NÚÑEZ (1997).

- solo residual de arenito : proveniente de uma jazida situada no km 8 + 640 - LD da estrada RS/239, próximo ao trecho da BR/116 - Sapiranga. A caracterização visual indica um material de coloração rósea.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS ESTUDADOS

A caracterização dos solos estudados foi realizada em laboratório com amostras deformadas coletadas em campo. Os ensaios empregados serão sucintamente descritos a seguir, indicando as respectivas normas que foram seguidas:

A) Análise Granulométrica : com base nos procedimentos descritos e indicados pela norma NBR-7181/84, foi realizada a análise granulométrica da argila e do solo residual

de arenito, através de peneiramento grosso, sedimentação com defloculante (solução de hexametáfosfato de sódio) e sem, e peneiramento fino.

B) Massa Específica Real dos Grãos : conforme a NBR 6508/84, a massa específica real dos grãos de solos que passam pela peneira de 4,8 mm, foi determinada através do ensaio do picnômetro.

C) Limites de Liquidez e de Plasticidade : compreendem os limites de consistência dos solos (LL, LP, IP), para tanto foi empregado os métodos indicados e descritos nas NBR 6459/84 e NBR 7180/84, respectivamente.

D) Ensaio de Compactação : segundo a NBR 7182/84, os solos em questão foram compactados para se determinar a densidade máxima e o teor de umidade ótimo, tendo sido utilizada a energia de compactação Proctor Normal.

Com base nos resultados obtidos, os solos puderam ser classificados conforme se segue:

- ARGILA : pelo Sistema de Classificação Unificada (USC): solo argiloso de baixa compressibilidade (CL); pelo Highway Research Board (HRB) (adotada pela AASHTO): solo argiloso (A-7-6); de acordo com a metodologia MCT: solo de comportamento laterítico argiloso (LG’).

- SOLO RESIDUAL DE ARENITO : pelo Sistema de Classificação Unificada (USC): solo arenoso (SC); pelo Highway Research Board (HRB) (adotada pela AASHTO): areia siltosa (A-2-4); de acordo com a metodologia MCT: solo de comportamento não laterítico arenoso (NA’).

A tabela 4.1 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de caracterização, sendo que os dados referentes a análise granulométrica correspondem à sedimentação com o uso de defloculante.

TABELA 4.1 - Caracterização dos solos em estudo

<u>SOLOS EM ESTUDO</u>		
	SOLO RESIDUAL DE ARENITO	ARGILA
PEDREGULHO (%)	0	0
AREIA GROSSA (%)	0	0
AREIA MÉDIA (%)	41	4
AREIA FINA (%)	35	26
SILTE (%)	18	24
ARGILA (%)	6	46
LL (%)	24	45
LP (%)	19	22
IP (%)	5	23
γ_s (kN/m ³)	26,5	26,3
w _{ót} (%)	11,5	19,7
$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (kN/m ³)	19,9	16,2

Os resultados correspondentes à análise granulométrica e a curva de compactação dos dois solos em questão, obtidos com a aplicação das normas citadas anteriormente, apresentam-se respectivamente nas figuras 4.1 e 4.2.

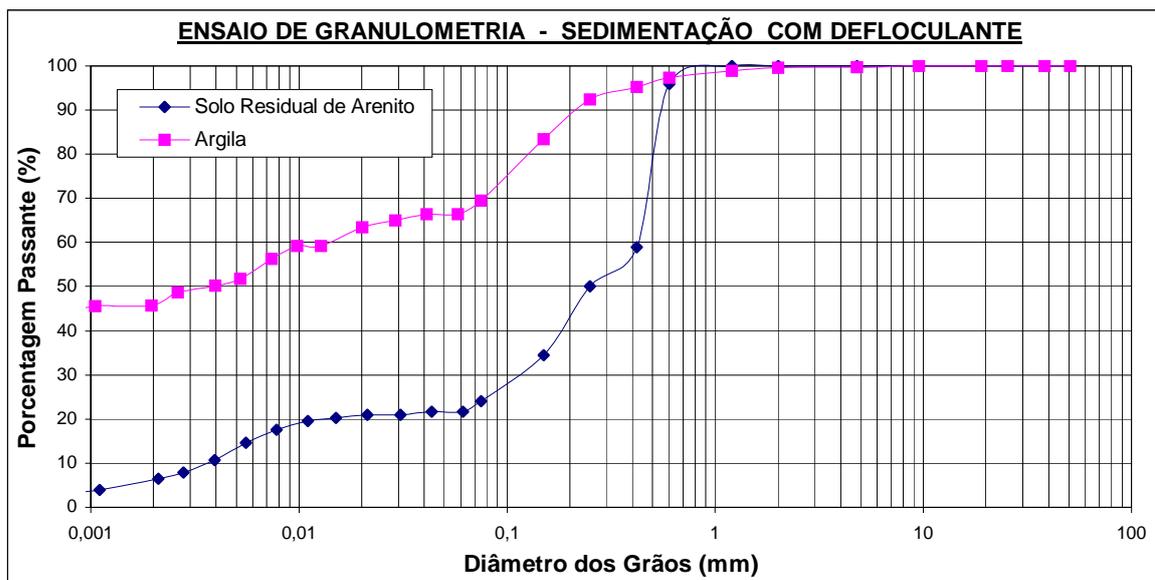


FIGURA 4.1 – Análise Granulométrica com Defloculante.

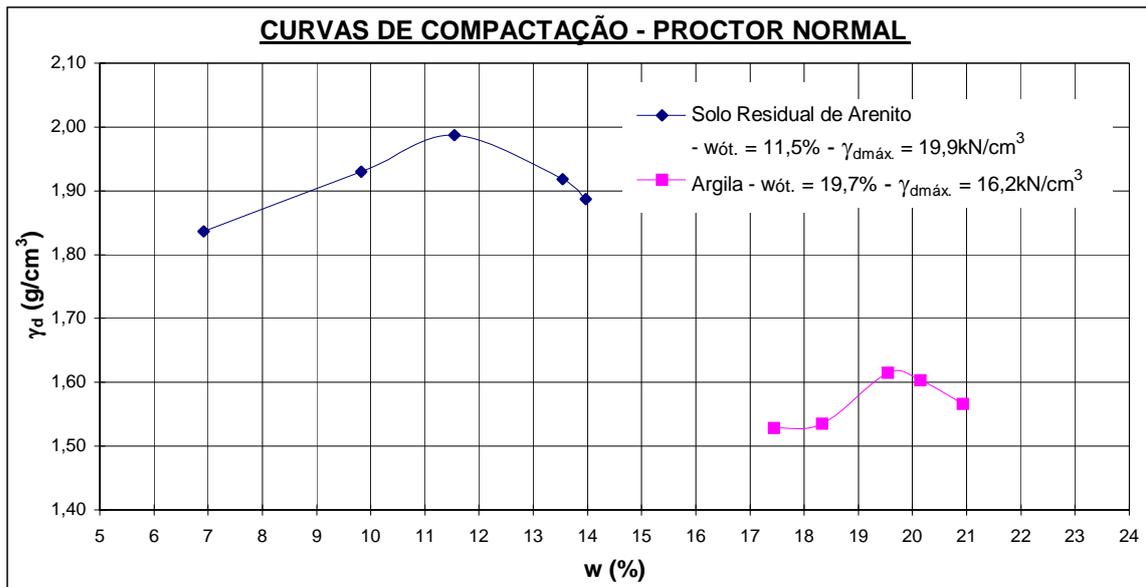


FIGURA 4.2 – Curvas de Compactação (Proctor Normal).

Na figura 4.3 apresenta-se a relação entre sucção e grau de saturação para o solo residual de arenito (S.R.A.) e para a argila, obtidas através do método de papel filtro para os três métodos de compactação empregados: compactação dinâmica – CD, compactação estática – CE e compactação por pisoteamento – CP. Tais valores foram obtidos através dos processos de umedecimento-secagem (valores referentes ao ramo úmido) e secagem-umedecimento (valores referentes ao ramo seco); sendo que os teores de umidade ótimo, ou próximos destes alcançados, foram obtidos através da média dos valores de tais teores nos dois processos para obtenção da curva. Verifica-se a confirmação do comportamento de quanto maior a saturação da amostra menor é a sucção por ela apresentada. Com o objetivo de apresentar um melhor ajuste, foram inseridos os pontos de sucção máxima (100.000) e mínima (1).

Comparando-se os resultados apresentados pelos solos estudados na figura 4.3, pode-se observar, que a argila obteve, na maioria dos teores de umidade, maior grau de saturação do que o solo residual de arenito, independente do método de compactação empregado. E que, excetuando-se os limites máximo e mínimo, a argila apresentou, também, maiores valores de sucção do que o solo residual de arenito, na maioria dos teores de umidade. Considera-se que estes comportamentos estejam relacionados às diferentes composições mineralógicas e granulométricas de tais solos.

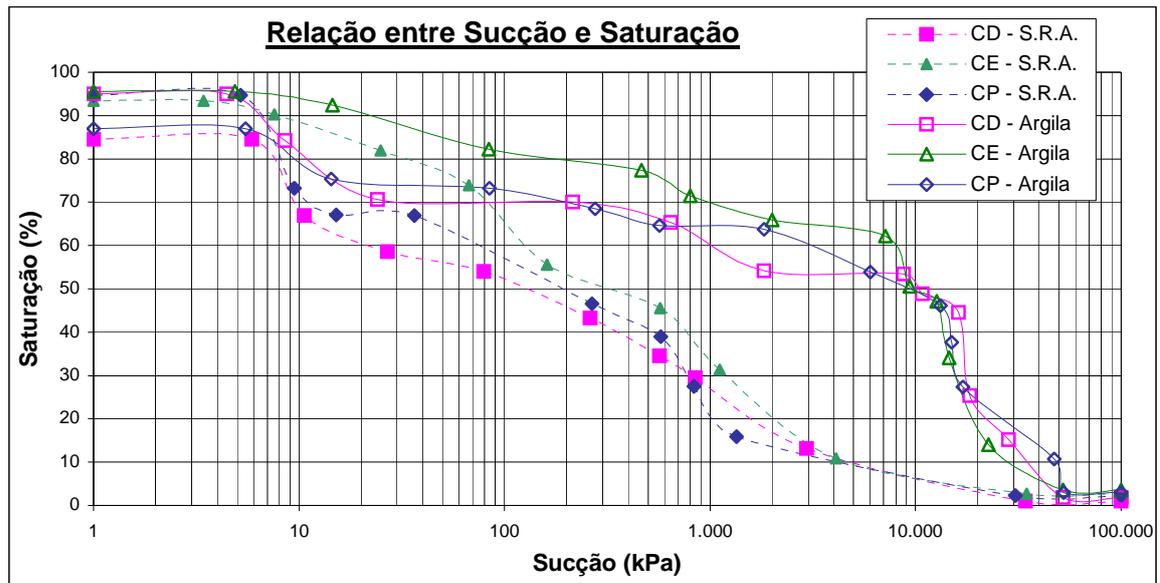


FIGURA 4.3 – Relação entre sucção e grau de saturação para o solo residual de arenito e para a argila.

Na tabela 4.2 têm-se apresentados os valores correspondentes ao grau de saturação e à sucção, tanto para o solo residual de arenito como para a argila.

TABELA 4.2 – Resultados de sucção e grau de saturação para o solo residual de arenito e argila considerando-se o teor ótimo de umidade alcançado.

	<i>SOLO RESIDUAL DE ARENITO</i>			<i>ARGILA</i>		
	w (%)	Sucção (kPa)	Sr (%)	w (%)	Sucção (kPa)	Sr (%)
CD	11,5	80	54	19,8	214	70
CE	11,7	68	74	19,3	463	75
CP	11,4	36	67	19,6	277	70

4.4 PROCEDIMENTOS PARA A PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

A seguir, serão descritos os procedimentos empregados na preparação das amostras de solo que serviram para a confecção de corpos de prova, através dos 3 métodos de compactação, para os ensaios de carregamento repetido e para a determinação da sucção através do papel filtro.

4.4.1 Preparação das Amostras para Compactação

O primeiro passo tomado quando da chegada dos solos ao laboratório é a colocação destes para secar ao ar, separados em grandes bandejas em local reservado, protegido de intempéries. Quando o solo apresenta um aspecto de seco, é destorroado, passado em peneira N^o. 4 (4,8 mm), armazenado em sacos plásticos e fechados para que se mantenha a baixa umidade.

Um dia antes da utilização do material, coleta-se uma cápsula deste para a determinação da umidade higroscópica através do método da estufa.

Em função do teor de umidade que se deseja atingir na compactação dos corpos de prova, calcula-se o peso em água necessário para a mistura do solo. Após a mistura ser realizada, esta é guardada em um saco plástico, bem fechado, identificada (tipo de solo, data da mistura e a identificação do corpo de prova que dará origem), e levada à câmara úmida por 24 h, para que ocorra homogeneização da umidade por toda a amostra.

A identificação do solo umedecido em função do corpo de prova a que se destina, foi realizada da seguinte forma:

- 1) Duas letras que indicam o tipo de compactação: CD – compactação dinâmica, CE – compactação estática, CP – compactação por pisoteamento;
- 2) Um número que indica o teor de umidade a que pertence, sendo que para cada teor de umidade foram moldados 3 corpos de prova: 1,2,3 – teor de umidade ótimo, 4,5,6 – umidade ótima -2%, 7,8,9 – umidade ótima -4%, 10,11,12 – umidade ótima +2%, 13,14,15 – umidade ótima +4%.

Assim, como exemplo: CP7 – indica que a compactação será por pisoteamento, que é o primeiro corpo de prova de três e que o teor de umidade é igual a -4% do teor ótimo de umidade.

Nos três métodos de compactação empregados, o molde utilizado apresenta as seguintes características: molde cilíndrico de alumínio com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, constituído de parede seccionada em três no sentido da maior dimensão, dois anéis externos para maior firmeza das paredes, base e parafusos para fixação do cilindro à base, e um prolongador, que se adapta ao topo do cilindro para facilitar a compactação das

últimas camadas, com altura interna de 5 cm. Na figura 4.4 pode-se observar o molde, em pé, montado e desmontado.

Alguns cuidados foram tomados na compactação e armazenamento dos corpos de prova, independente do método empregado, como:

- escarificação da superfície entre cada camada compactada, para fornecer maior aderência à nova camada de solo,
- pesagem do corpo de prova, após compactação deste, com as paredes do cilindro e posteriormente só o corpo de prova, para a verificação da densidade alcançada,
- embalagem com filme plástico para se evitar perda de umidade,
- acondicionamento em saco plástico, bem fechado e com a devida identificação do corpo de prova,
- armazenamento dos corpos de prova na câmara úmida.

Para possibilitar comparações entre os 3 métodos de compactação empregados nos solos, tomou-se como parâmetro base as densidades máximas obtidas através da curva de compactação obtida pelo Proctor Normal. Isto foi feito devido a dificuldade em se determinar uma energia de compactação adequada para os métodos estático e por pisoteamento para se obter a curva de compactação destes. Assim sendo, independente do tipo de compactação empregado, os corpos de prova deveriam ter pesos, conforme o tipo de material, que garantissem as densidades máximas e umidades ótimas definidas para a compactação dinâmica.

4.4.2 Compactação Dinâmica ou por Impacto

A compactação dinâmica ou por impacto, foi realizada empregando-se o soquete pequeno, conforme a norma NBR-7182/86. Aplicou-se 28 golpes, tanto para o solo residual de arenito como para a argila, em cada uma das cinco camadas que consistiam um corpo de prova, para uma energia de compactação igual à 600 kN.m/m^3 (figura 4.4).

Neste tipo de compactação foram confeccionados 15 corpos de prova de solo residual de arenito e 15 corpos de prova de argila.

Os cuidados durante a compactação e os procedimentos para se guardar o corpo

de prova são os mesmos conforme descrito no item anterior.



FIGURA 4.4 – Molde e soquete utilizados na Compactação Dinâmica.

4.4.3 Compactação Estática ou por Pressão

A compactação estática dos corpos de prova foi realizada através de uma prensa manual, na qual a força de compactação é empregada de forma a se manter uma velocidade constante. O controle da compactação de cada camada foi realizado através da altura atingida pelas mesmas com o auxílio de uma régua posicionada sobre o pistão de compactação. Como cada corpo de prova, tanto de solo residual de arenito como de argila, deveria ter cinco camadas, quando alcançado 4 cm (já desconsiderando a espessura da placa cilíndrica conectada ao pistão, com 10 cm de diâmetro e 2 cm de altura), parava-se a aplicação da carga. Assim, após atingir a altura desejada, a força era mantida por cerca de 5 min para garantir que as tensões dentro da amostra se equalizassem, evitando-se a expansão no momento da descompressão, que era realizada de maneira suave e com velocidade constante (figura 4.5).

Com a compactação estática totalizou-se 15 corpos de prova compactados com solo residual de arenito e 15 corpos de prova compactados com argila.

A energia aplicada em cada camada pela prensa para que fosse atingida a altura desejada variou entre 400 kPa, para teores de umidade mais secos, até 200 kPa, para teores no ramo úmido.

Os cuidados durante a compactação e na retirada do corpo de prova do molde são os mesmos; assim como os procedimentos para se guardar o corpo de prova confeccionado na câmara úmida.

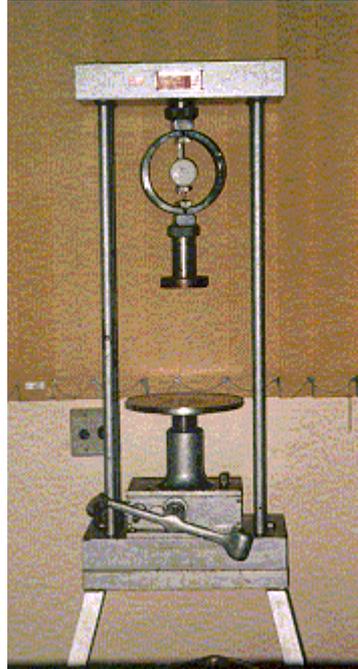


FIGURA 4.5 – Prensa utilizada na Compactação Estática.

4.4.4 Compactação por Pisoteamento ou por Amassamento

Para este tipo de compactação primeiramente adaptou-se à base do soquete, já descrito anteriormente, uma espécie de “sapata” cilíndrica com altura de 2 cm e diâmetro de 5 cm, para se ter uma maior adequação ao tamanho dos corpos de prova, que são bem maiores do que aqueles aos quais se destina este tipo de soquete. O diâmetro de 5 cm foi adotado tomando-se como modelo o soquete empregado na compactação dinâmica. Caso fosse utilizado somente o soquete sem a “sapata” conectada à ponta do eixo como base de aplicação da carga, como descrito em bibliografias pesquisadas, para este molde com dimensões de 10 cm de diâmetro, além da necessidade de aplicação de um maior número de golpes por camada, não se teria garantida uma uniformidade de carregamento, como foi comprovado. Em alguns pontos o solo não se apresentava tão compacto como em outros da mesma camada. Mesmo variando-se número de golpes, espessura da camada e número de camadas, a variação de teores de umidade e consistência de cada tipo de solo não

permitiam uma adequada compactação (figura 4.6).



FIGURA 4.6 – Soquete utilizado na Compactação por Pisoteamento.

A mola utilizada neste soquete de compactação foi escolhida entre duas disponíveis no laboratório, sendo uma com maior deformabilidade do que a outra. Como a compactação resulta de forma manual (com a força do operador), a mola de maior deformabilidade foi a escolhida já que se considerou que com esta se conseguiria manter uma velocidade e uma altura de compressão de forma constante. Essa mola apresentou uma capacidade de carga aplicada aproximadamente igual a 200 kPa sendo que, conforme o teor de umidade, foi necessário aplicar um número maior de golpes por camada (o número mínimo de golpes por camada foi igual a 50), para se obter o peso específico desejado.

Devido às grandes dificuldades encontradas neste tipo de compactação por pisoteamento, foi necessário modificar o número de camadas para que se conseguisse realizá-la de maneira a garantir a densidade máxima desejada. Desta forma, para os corpos de prova confeccionados tanto com solo residual de arenito como com argila utilizou-se sete camadas, ao invés de cinco como nos métodos anteriores.

Não foi possível realizar a compactação dos teores de umidade iguais à $\pm 4\%$ do teor ótimo de umidade com o solo residual de arenito, e $- 4\%$ com a argila, por não conseguir-se alcançar as alturas necessárias ainda nas primeiras camadas para garantir o

peso do corpo de prova necessário à densidade desejada. Assim, compactaram-se somente 9 corpos de prova de solo residual de arenito, e 12 corpos de prova de argila.

Os cuidados durante a compactação, no momento da desmoldagem do corpo de prova e no armazenamento deste continuam os mesmos, conforme os outros métodos de compactação.

4.4.5 Obtenção da Curva Característica

A Curva Característica para os dois tipos de solos foi construída a partir da medição da sucção através do método de papel filtro, colocado em contato com o solo contido em pequenos anéis de PVC, com 5 cm de diâmetro e uma altura média igual a 2 cm. Para isso, compactou-se 12 corpos de prova de solo residual de arenito e 16 corpos de prova de argila em molde de alumínio com dimensões reduzidas, iguais a 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura. Na figura 4.7, pode-se observar um anel, uma camada de amostra de solo, e um anel contendo outra amostra.



FIGURA 4.7 – Anel de PVC com e sem camada de solo compactado para a medição da sucção através do método do papel filtro.

As curvas características foram realizadas para cada um dos três métodos de compactação, totalizando 168 corpos de prova. Considerando-se a curva característica por processo de secagem-umedecimento (secagem das amostras ao máximo e umedecimento até o teor de umidade desejado), por umedecimento-secagem (umedecimento das amostras ao máximo e secagem até o teor de umidade desejado) e as intermediárias (a partir do teor

ótimo de umidade secagem de uma parte das amostras e umedecimento de outra parte até alcançar os teores de umidades desejados).

A diferença no número de corpos de prova compactados se deve a diferença dos valores de umidade ótima para cada tipo de solo, variando-se, assim, o tamanho do intervalo de umidades para cada curva característica. Ou seja, o solo residual de arenito tem um teor ótimo de umidade igual a 11,5%, a umidade média máxima alcançada foi igual a 16,2%, assim, a curva característica foi montada com 3 pontos de umidade acima da ótima, a ótima e 5 pontos abaixo da mesma; para o solo argiloso montou-se a curva com 3 pontos de umidade acima da ótima, a própria ótima de 19,7% e 8 pontos abaixo da mesma, tendo sido a umidade média máxima alcançada para as três curvas características igual a 24,1%.

A preparação das amostras segue o mesmo procedimento dos corpos de prova destinados aos ensaios triaxiais, em relação ao umedecimento, à armazenagem e identificação. Todos os corpos de prova foram moldados na umidade ótima obtida através da compactação dinâmica.

Cada corpo de prova moldado gerava 4 amostras e estas eram separadas colocando-se um anel no corpo de prova na altura de cada uma das 4 camadas. Para facilitar a separação das camadas não se realizava a escarificação entre estas no momento da compactação. Após serem separadas com o auxílio de uma pequena espátula e retirado o material excedente das bordas do anel, de cada corpo de prova retirava-se amostras de solo para se verificar o teor de umidade. Cada amostra partida e pesada, juntamente com o anel, era imediatamente embalada em papel alumínio e filme plástico, evitando-se a perda de umidade, para posteriormente serem destinadas à série secagem-umedecimento, à série umedecimento-secagem ou à série intermediária. Por fim, era ensacada, fechada, identificada e guardada em local reservado.

No dia seguinte, com os resultados dos teores de umidades referentes a cada corpo de prova, e através de uma planilha eletrônica, determina-se o peso a que o anel com a amostra de solo deve alcançar para atingir o teor de umidade desejado para a construção da curva característica.

Os anéis contendo as amostras de solo submetidos ao processo de umedecimento-secagem são primeiramente umedecidos ao máximo, porém evitando-se a exudação, e depois conforme alcançado o peso desejado coloca-se papel filtro no meio

(parte-se a camada de solo diametralmente) e sobre o solo, feito isto embala-se e guarda-se da mesma forma já citada acima. No processo de secagem-umedecimento, as amostras são colocadas para secar ao ar em local arejado até atingirem pesos referentes ao teor de umidade o mais próximo possível de 0%, e após são umedecidas até atingirem os teores de umidade desejados, então coloca-se papel filtro e guarda-se da mesma forma citada no processo anterior. O processo de umedecimento era realizado com conta-gotas, da forma mais homogênea possível; não se realizou o umedecimento através de pedra porosa devido ao fato disto acarretar perda de material da amostra e de não se poder ter um maior controle de exudação quando do umedecimento ao máximo, cuja umidade era obtida por tentativas.

A curva característica intermediária foi realizada da seguinte forma: a compactação foi realizada com os mesmos procedimentos já citados, porém, partiu-se diretamente da umidade de compactação (ótima) para a secagem de um grupo de anéis com amostras de solo e para o umedecimento de outro, sem a secagem ou umedecimento máximo para depois umedecer ou secar até o teor de umidade desejado.

Após o período de equalização, retira-se os papéis filtro de maneira cuidadosa, porém, rápida para que não haja variação de umidade. Cada papel filtro é depositado em recipiente de vidro pequeno e hermeticamente fechado, pesado anteriormente. Então, se realiza a pesagem do papel úmido no recipiente em balança com precisão de 0,0001 g. Levado à estufa de 65° por 24 h, depois o conjunto é pesado novamente, e por fim, só o vidro. Todos estes dados são colocados na planilha, de onde se obtém os valores de sucção a partir das equações de calibração do papel filtro, com seus teores de umidade correspondentes. Plotando-se os valores da média, entre papel filtro do meio e da superfície, de umidade x sucção, obtém-se a Curva Característica.

4.4.6 Ensaio de Módulo de Resiliência

A realização dos ensaios para a determinação do módulo de resiliência seguiu a orientação da norma americana AASHTO TP46-94 (1996).

Esta norma apresenta o método para a determinação do módulo de resiliência de solos e agregados, abrangendo procedimentos para preparar e ensaiar os materiais de subleito e base/sub-base sob condições que representam uma simulação do estado físico e de tensões dos materiais abaixo do pavimento flexível, sujeito a carga das rodas de veículos

em movimento.

Os métodos apresentados são aplicáveis a amostras indeformadas ou deformadas (compactadas em laboratório), de solos do subleito e materiais de base/sub-base, sendo que não considera materiais tratados com o uso de qualquer tipo de agente ligante ou estabilizante. Os níveis de tensão aplicados no ensaio do corpo de prova são baseados na localização da amostra dentro da estrutura do pavimento, no subleito ou na base/sub-base.

Após a montagem do corpo de prova na câmara triaxial para a realização dos ensaios de carregamento repetido, faz-se um condicionamento prévio do corpo de prova com a aplicação de uma seqüência de carregamentos dinâmicos, com o objetivo de se eliminar as grandes deformações permanentes que ocorrem nas primeiras aplicações da tensão desvio reduzir a influência das deformações permanentes, segundo recomendado por PREUSSLER *et al.* (1981) e MEDINA *et al.* (1986). Este condicionamento consiste da aplicação mínima de 500 repetições de um estado de tensões indicado conforme a localização da amostra na estrutura do pavimento, seguindo-se a norma destinada para este ensaio. E, somente após este condicionamento realiza-se as medições das deformações resilientes.

O ensaio consiste da aplicação de uma tensão axial cíclica de magnitude fixada, com duração de carregamento de 0,1 s e uma freqüência igual a 1,0 Hz. Sendo este carregamento aplicado a uma amostra cilíndrica, cujo tamanho deve respeitar a condição de que a altura do corpo de prova seja igual a duas vezes o diâmetro do próprio, confinada sob uma determinada tensão confinante estática, fornecida pela pressão na câmara triaxial. A resposta de deformação axial total resiliente da amostra ensaiada é medida a cada nível de tensões aplicado e usada para calcular o módulo de resiliência.

O ensaio de carregamento repetido para a determinação do módulo de resiliência, fornece uma relação entre tensão e deformação para que se possa caracterizar o material de pavimentação para uma análise estrutural das camadas do pavimento.

A tabela 4.3, abaixo apresentada, contém os valores referentes aos estados de tensão empregados nesta pesquisa para solos de subleito, segundo a norma utilizada.

Ao todo foram ensaiados 75 corpos de prova, sendo 33 de solo residual de

arenito e 42 de argila.

Ao final de cada ensaio, cada corpo de prova era pesado, para se confirmar a densidade máxima, e partido para que se pudesse coletar uma amostra de material com o propósito de se verificar a umidade presente. Foram coletadas amostras do meio e das extremidades de cada corpo de prova, com o objetivo de se avaliar a uniformidade no teor de umidade ao qual foi imposto, tendo sido os resultados completamente aceitos.

TABELA 4.3 – Seqüência de ensaio para solos de subleito – AASHTO -TP46-94 (1996).

SEQÜÊNCIA Nº	TENSÃO CONFINANTE (kPa)	TENSÃO AXIAL (kPa)	Nº APLICAÇÕES DA CARGA
0	41.4	24.8	500 – 1000
1	41.4	12.4	100
2	41.4	24.8	100
3	41.4	37.3	100
4	41.4	49.7	100
5	41.4	62.0	100
6	27.6	12.4	100
7	27.6	24.8	100
8	27.6	37.3	100
9	27.6	49.7	100
10	27.6	62.0	100
11	13.8	12.4	100
12	13.8	24.8	100
13	13.8	37.3	100
14	13.8	49.7	100
15	13.8	62.0	100

4.4.6.1 Procedimento para Montagem da Câmara Triaxial para Realização do Ensaio de Carregamento Repetido

A montagem da câmara triaxial para o ensaio segue os seguintes passos:

- o corpo de prova é colocado sobre um pequeno pedestal central na base da câmara, no qual existe uma pedra porosa umedecida e sobre esta um papel filtro, para evitar passagem de material da amostra para a pedra porosa;
- sobre o corpo de prova é colocado outro papel filtro, uma pedra porosa umedecida e um elemento de aplicação de carga, e então, o conjunto é envolto com uma membrana de látex, sendo fixada em ambas extremidades por dois anéis de vedação;
- sobre a membrana é colocado o par de alças, de alumínio, que servem de suporte para os transdutores de medição da deformação axial do corpo de prova durante o ensaio (LVDT's);
- a distância entre as alças (H_0) é anotada, pois será o valor de referência para a medida da deformação resiliente (deformação específica vertical recuperável), sendo um dos dados de entrada do programa;
- a medição de sucção foi realizada durante este ensaio com a instalação do transdutor de pressão, conforme descrito no próximo item deste capítulo, referente a medição da sucção;
- por fim, fixa-se a parte superior da câmara ao anel separador e à base através de hastes com rosca. Após montada e tendo sido testada contra qualquer vazamento de ar através da aplicação de tensão confinante, a câmara é posicionada sobre o suporte e é feito o ajuste das tensões desvio e confinante desejadas para a realização do ensaio de módulo de resiliência.

4.4.7 Medição da Sucção durante o Ensaio de Módulo de Resiliência

A medição da sucção durante o ensaio de carregamento repetido foi realizada através da instalação do transdutor de pressão de alta capacidade desenvolvido por RIDLEY e BURLAND (1993), com o objetivo de se verificar a ocorrência de variação da sucção com a aplicação de tensões cíclicas no corpo de prova.

Sempre antes de se instalar o transdutor de pressão era realizada uma leitura chamada de "leitura zero", ou seja, estando o instrumento conectado ao computador e ao

programa de aquisição de dados, este era deixado em contato com água e quando a leitura em bits estabilizava-se tomava-se a média do valor apresentado como termo independente na equação de calibração. Este processo era repetido no final do ensaio, antes do próximo, e assim consecutivamente, pois a cada leitura após um ensaio o transdutor apresentava uma variação no valor de “leitura zero”, devido aos diferentes teores de umidade a que era submetido nos ensaios.

Após a instalação do transdutor de pressão no corpo de prova a ser ensaiado, as leituras dos resultados apresentados pelo programa só eram consideradas significativas, e então coletadas, quando os mesmos apresentavam-se de forma estabilizada.

Durante o ensaio de módulo de resiliência coletavam-se os valores obtidos pelo transdutor e apresentados em bits pelo programa. A média destes valores era aplicada à equação de calibração, junto com a leitura zero, para se saber o valor referente em termos de sucção (kPa). Com esta resposta comparava-se ao resultado esperado conforme o valor de sucção encontrado para tal corpo de prova, considerando-se teor de umidade e tipo de solo e compactação empregada, através do método de papel filtro.

Ao todo, dentre os 75 corpos de prova ensaiados para a determinação do módulo de resiliência, 23 foram ensaiados com o acompanhamento da sucção através do transdutor de pressão, sendo 11 corpos de prova de solo residual de arenito, e 12 corpos de prova de argila. Não tendo sido ensaiados com medição da sucção pelo transdutor de pressão os corpos de prova de argila com teores de umidade iguais a - 4% da umidade ótima, pelos métodos de compactação do tipo dinâmico e estático, pois estes apresentaram valores de sucção, através do método de papel filtro, além do valor capaz de ser obtido pelo transdutor de pressão.

O transdutor de pressão quando não estava sendo usado permanecia sempre sob pressão em contato com água de-aerada.

4.4.7.1 Procedimento para Instalação do Transdutor de Pressão de Alta Capacidade para Realização do Ensaio de Carregamento Repetido com Medição da Sucção

Para a instalação do transdutor no corpo de prova foi feito, inicialmente, uma cavidade de mesmo diâmetro do transdutor e com profundidade igual a 3,5 cm no meio do

corpo de prova, antes deste ser montado na câmara triaxial. Devido ao diâmetro do corpo de prova (10 cm), a profundidade do furo não causou preocupação quanto ao enfraquecimento estrutural do próprio corpo, até porque o furo estava preenchido pelo próprio transdutor.

No fundo do furo foi colocada uma pasta do mesmo material do corpo de prova, porém, passado em peneira N° 200 (0,74 mm) e com teor de umidade sempre próximo ao do material a ser ensaiado, para permitir um contato de forma mais uniforme entre o transdutor e o corpo de prova. Desta forma, minimizaria a interferência e o tempo de equalização entre transdutor e corpo de prova. Após a montagem do corpo de prova na base da câmara triaxial, cortava-se a membrana coincidente com o furo do corpo de prova.

O passo seguinte consistia na instalação do transdutor no furo, tomando-se cuidado para que realmente ficasse o mais próximo do fundo do furo possível, e preenchia-se novamente o furo com o material retirado. Preenchido o furo, aplicava-se silicone sobre a membrana no local de contato, cobrindo membrana e solo. Após a secagem do silicone, verificava-se a ocorrência de algum vazamento com o fechamento da câmara e aplicação de certa tensão confinante. A ausência de bolhas internas na membrana permite confirmar a eficiência da vedação e o prosseguimento do ensaio.

A figura 4.8 apresenta o transdutor de pressão de alta capacidade utilizado nesta pesquisa.



FIGURA 4.8 – Transdutor de pressão de alta capacidade.

Na figura 4.9, pode-se observar o transdutor de pressão já colocado na cavidade feita no corpo de prova.

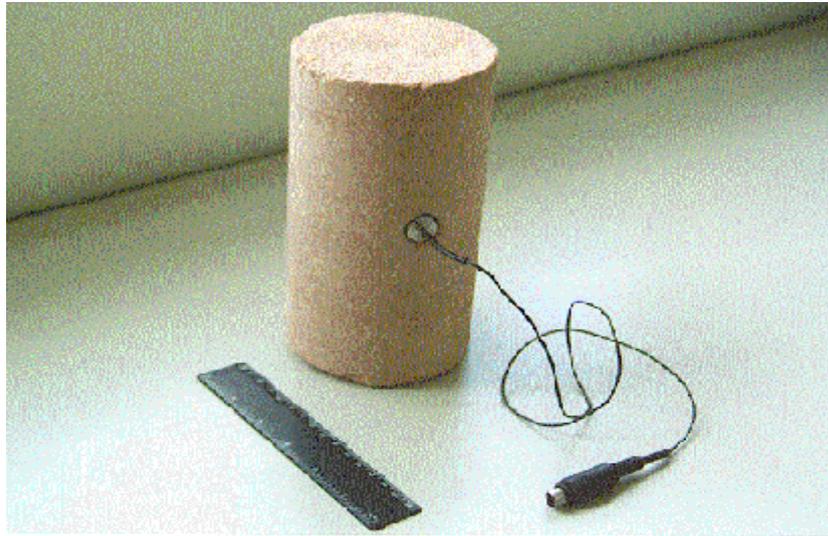


FIGURA 4.9 – Corpo de prova com transdutor de pressão instalado.

Na figura 4.10, tem-se o corpo de prova montado na câmara triaxial com o transdutor de pressão instalado para o ensaio de carregamento repetido, no qual também será medida a sucção.

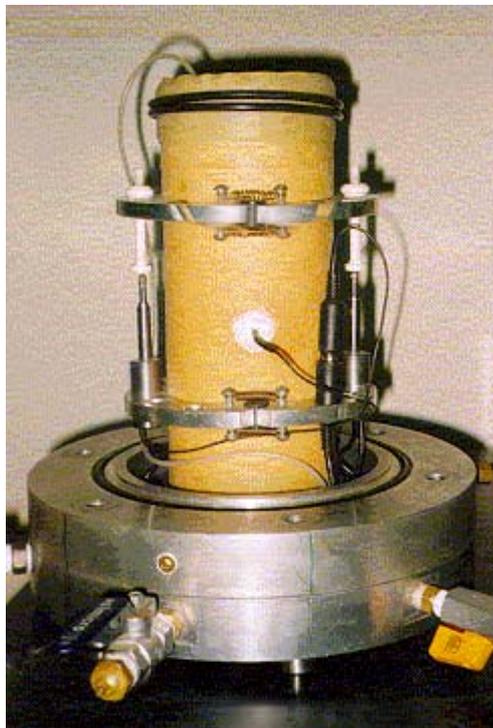


FIGURA 4.10 – Corpo de prova montado com transdutor de pressão sobre base da câmara triaxial.

Capítulo 5

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, serão apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios desta pesquisa.

A análise dos ensaios realizados com solo residual de arenito e argila, compactados através dos três métodos descritos, será realizada em função do módulo de resiliência e da sucção. Em todos os gráficos referentes a relação entre teor de umidade e sucção, foram inseridos os pontos de saturação máxima (100%) e mínima (0%), com o objetivo de apresentar um melhor ajuste.

Para a determinação da curva característica nos diferentes métodos de compactação foi utilizado o método do papel filtro, convém salientar que a capacidade de medição da sucção através deste método é no máximo 29 MPa. Para os valores acima do valor máximo de sucção os resultados obtidos podem apresentar uma certa dispersão.

5.2 COMPACTAÇÃO DINÂMICA

5.2.1 Curva Característica

Como pode ser observado na figura 5.1, referente a relação entre teor de umidade e sucção, medida com a utilização do papel filtro, ocorre o aumento do valor da sucção quando os valores do teor de umidade são baixos, para ambos os solos estudados. Sendo visível a superioridade dos valores de sucção apresentados pela argila em relação ao solo residual de arenito, para todos os teores de umidade. Comportamento este também observado por autores como FREDLUND e RAHARDJO (1993), MARINHO (1994), RODRIGUES (1997).

Isto vem confirmar os estudos de autores que relatam a influência da textura, da granulometria e da mineralogia na forma da curva característica. Nos solos argilosos, por apresentarem uma maior fração de finos, a presença da água se dá tanto na superfície das partículas como na forma de meniscos. Assim, não só o efeito de adsorção é muito importante como também as forças capilares atuantes, principalmente sob altas sucções matriciais. Já para solos granulares o efeito mais predominante são as forças capilares atuantes em suas partículas.

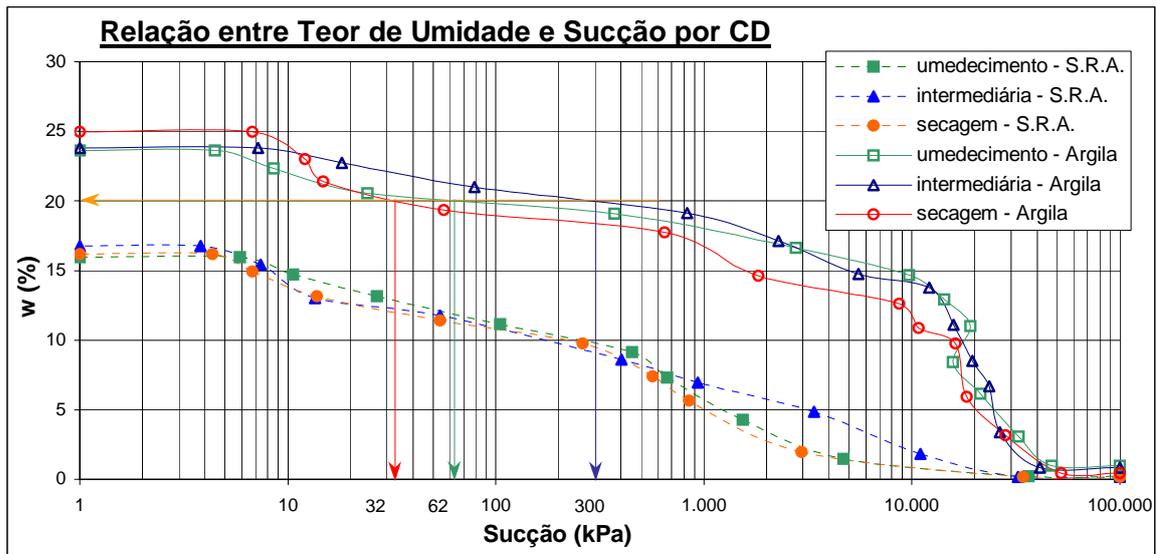


FIGURA 5.1 – Relação entre teor de umidade e sucção por compactação dinâmica.

Na figura 5.1, o gráfico apresentado, mostra que para um mesmo teor de umidade têm-se diferentes valores de sucção, dependendo se a curva característica foi obtida através dos processos de secagem-umedecimento, de umedecimento-secagem, ou pela curva característica intermediária. Este fato ocorre mais visivelmente para o solo argiloso. As linhas traçadas sobre o gráfico exemplificam tal observação, onde, para a argila, tomando-se uma umidade de 20% têm-se valores diferentes de sucção pelo processo secagem-umedecimento alcançando aproximadamente igual 32 kPa, pelo processo umedecimento-secagem aproximadamente igual 62 kPa, e para a curva característica intermediária, sucção aproximadamente de 300 kPa. Estes valores de sucção foram determinados pelo gráfico apresentado na figura 5.1, tendo sido obtidos através de ensaios com papel filtro.

A tabela 5.1 apresenta os resultados de sucção e grau de saturação, considerando-se a compactação dinâmica, para os teores de umidade alcançados referentes ao mínimo, o mais próximo possível do ótimo e máximo.

TABELA 5.1 – Resultados de sucção e grau de saturação para teores de umidade mínimo, ótimo e máximo para CD.

	<i>SOLO RESIDUAL DE ARENITO</i>			<i>ARGILA</i>		
	w (%)	Sucção (kPa)	Sr (%)	w (%)	Sucção (kPa)	Sr (%)
Curva Umed	0,2	36.278	1	1,0	47.072	4
	11,6	105	50	19,7	372	72
	16,0	6	85	23,6	4	95
Curva Inter.	0,2	32.361	1	0,9	41.305	4
	11,8	54	57	19,3	831	90
	16,7	4	75	23,8	7	91
Curva Sec.	0,2	34.163	1	0,4	52.192	2
	11,4	54	58	19,8	56	68
	16,2	4	79	25,0	7	80

Através da figura 5.1, pode-se obter os valores aproximados de sucção referentes aos teores de umidade ótimo. Sendo assim, para o solo residual de arenito com umidade ótima de 11,5% tem-se pela curva característica no processo de umedecimento-secagem uma sucção de 80 kPa, pela curva característica intermediária uma sucção de 65 kPa, pela curva característica no processo de secagem-umedecimento uma sucção de 55 kPa. Para a argila, na umidade ótima (19,7%), tem-se pela curva característica no processo de umedecimento-secagem uma sucção de 370 kPa, pela curva característica intermediária uma sucção de 700 kPa, pela curva característica no processo de secagem-umedecimento uma sucção de 40 kPa. Comparando-se os valores de sucção referentes aos teores de umidade apresentados na tabela 5.1, pode-se observar a variabilidade que ocorre com a sucção em função de uma pequena mudança no valor do teor de umidade do solo estudado.

5.2.2 Relação entre Módulo de Resiliência e Sucção

Nas figuras 5.2, 5.3 e 5.4, onde se tem a relação entre Mr e sucção, observa-se que, independente da tensão confinante aplicada, para os dois tipos de solo, os maiores valores de módulo de resiliência ocorreram em amostras com teores de umidade iguais a 2% abaixo do teor de umidade ótimo (indicado pelas setas nas próprias figuras). O fato de ocorrer uma variação mais significativa nos valores de módulo de resiliência para os teores de umidade do ramo seco, do que no ramo úmido, além do módulo de resiliência ser maior a -2% do que a -4%. Comportamento idêntico também foi observado por EDIL e MOTAN (1979) e RODRIGUES (1997) em seus trabalhos.

A argila apresentou nas amostras com teores de umidade acima do valor ótimo um valor inicial mais alto para o teor +4% decrescendo para o teor +2%. Outro fato consiste no aumento das tensões desvio o valor do módulo de resiliência diminui, considerando-se um mesmo teor de umidade.

A tabela 5.2 abaixo, apresenta os máximos valores de módulo de resiliência alcançados através da compactação dinâmica, para ambos os solos estudados, em função das tensões confinantes aplicadas. Os valores de sucção correspondem ao teor de umidade igual à -2% do teor ótimo, apresentaram maiores valores de módulo de resiliência tanto para o solo residual de arenito como para a argila.

TABELA 5.2 – Resultados de máximo módulo de resiliência para CD.

	<i>SOLO RESIDUAL DE ARENITO</i>		<i>ARGILA</i>	
	Sucção (kPa)	Mr (MPa)	Sucção (kPa)	Mr (MPa)
$\sigma_c = 13,8$ kPa	261	497	646	881
$\sigma_c = 27,6$ kPa		458		855
$\sigma_c = 41,4$ kPa		431		719

Em anexo, encontram-se os resultados de Mr com relação aos diferentes valores de teores de umidade, tipo de solo e método de compactação empregado, em função dos níveis de tensões aplicados.

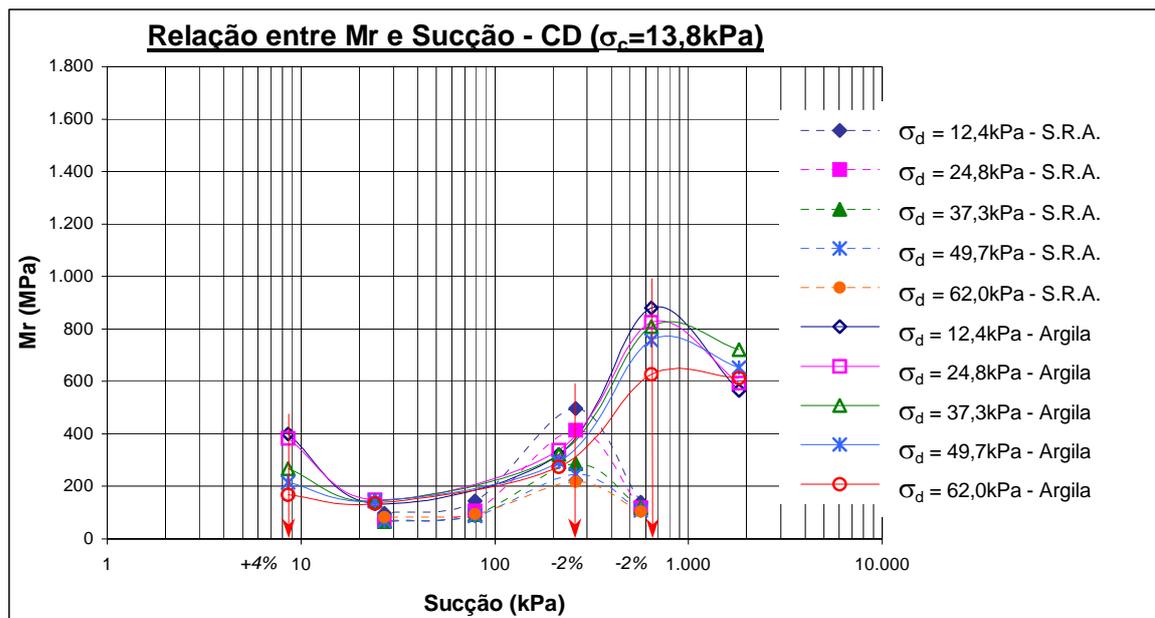


FIGURA 5.2 – Relação entre módulo de resiliência e sucção para $\sigma_c=13,8$ kPa - CD.

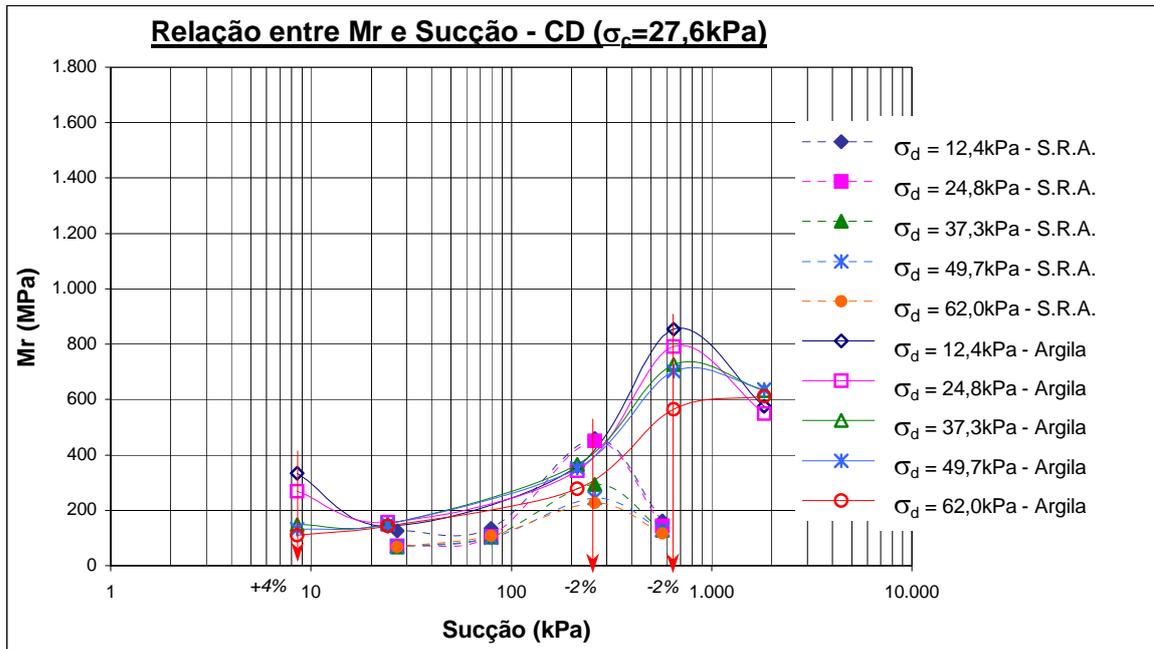


FIGURA 5.3 – Relação entre módulo de resiliência e sucção para $\sigma_c=27,6\text{ kPa}$ - CD.

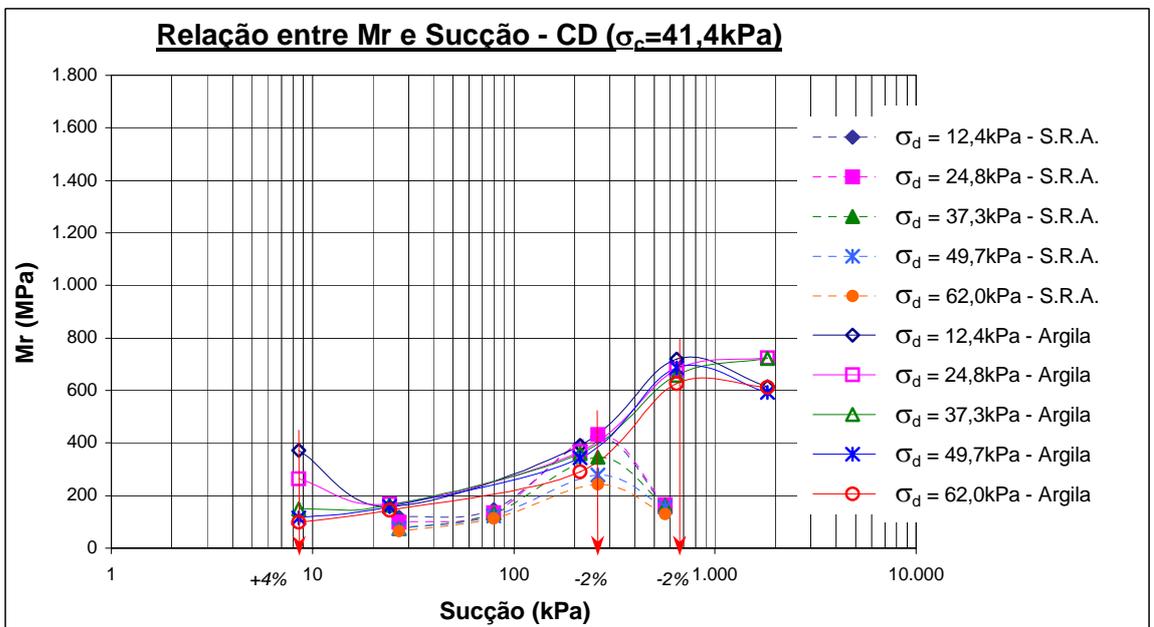


FIGURA 5.4 – Relação entre módulo de resiliência e sucção para $\sigma_c=41,4\text{ kPa}$ - CD.

5.3 COMPACTAÇÃO ESTÁTICA

5.3.1 Curva Característica

Na compactação estática também se verifica o aumento do valor da sucção para valores de teor de umidade baixos; além do fato de que a argila apresenta valores maiores de sucção, quando de teores altos de umidade, do que o solo residual de arenito, como pode ser observado na figura 5.5. Para este método de compactação observa-se também que para um mesmo teor de umidade têm-se diferentes valores de sucção, conforme o processo de obtenção da curva característica.

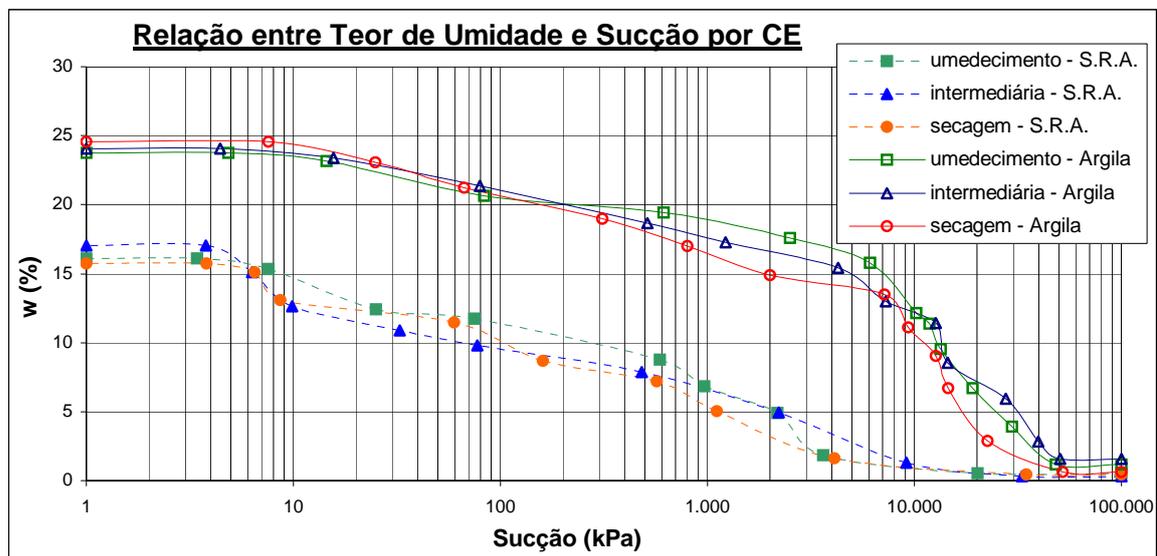


FIGURA 5.5 – Relação entre teor de umidade e sucção por compactação estática.

Na tabela 5.3, encontram-se apresentados os resultados de sucção e grau de saturação para os teores de umidade mínimo, ótimo (ou o mais próximo deste) e máximo alcançados, através da compactação estática.

TABELA 5.3– Resultados de sucção e grau de saturação para teores de umidade mínimo, ótimo e máximo para CE.

	<i>SOLO RESIDUAL DE ARENITO</i>			<i>ARGILA</i>		
	w (%)	Sucção (kPa)	Sr (%)	w (%)	Sucção (kPa)	Sr (%)
Curva Umed	0,6	20.225	4	1,2	48.097	7
	11,8	75	78	19,4	615	76
	16,1	3	93	23,8	5	96
Curva Inter.	0,3	33.047	2	1,6	50.715	6
	10,9	33	70	18,4	511	74
	17,1	4	98	24,1	4	95
Curva Sec.	0,4	34.674	3	0,6	52.178	4
	11,5	60	70	19,2	310	79
	15,7	4	98	24,6	8	98

Pelo gráfico apresentado na figura 5.5, pode-se obter os valores aproximados de sucção referentes aos teores de umidade ótimo. Através da curva característica obtida pelo processo de umedecimento-secagem para o solo residual de arenito tem-se uma sucção de 90 kPa, pela curva característica intermediária a sucção é de 20 kPa, pela curva característica no processo de secagem-umedecimento tem-se uma sucção de 60 kPa. A argila, na umidade ótima, pela curva característica no processo de umedecimento-secagem apresenta uma sucção de 500 kPa, pela curva característica intermediária uma sucção de 250 kPa, e pela curva característica através do processo de secagem-umedecimento uma sucção de 200 kPa. Neste caso também pode-se verificar a variabilidade que ocorre no valor da sucção com uma pequena alteração no teor de umidade de acordo com os valores apresentados na tabela 5.3.

5.3.2 Relação entre Módulo de Resiliência e Sucção

Nas relações entre módulo de resiliência e sucção apresentadas nas figuras 5.6 a 5.8, pode-se observar que houve uma diferença entre os resultados apresentados pelo solo residual de arenito e pela argila.

As amostras do solo residual de arenito apresentaram maior valor de módulo de resiliência no teor de umidade mais seco (-4%), não ocorrendo muita variação para os teores mais altos. Os maiores valores de módulo de resiliência apresentados pela argila se deram no teor ótimo de umidade. Pode-se observar, ainda, que os valores de módulo de resiliência decrescem com o aumento da tensão desvio, para um mesmo teor de umidade; e

que não houve grande diferença em ordem de grandeza entre os valores nos teores de umidade mais altos entre a compactação dinâmica e estática para o solo argiloso.

A tabela 5.4 apresenta os valores máximos de módulo de resiliência obtidos através da compactação estática, considerando-se as três tensões confinantes aplicadas, para uma sucção equivalente ao teor de umidade igual a -4% do teor ótimo para o solo residual de arenito e ao próprio teor ótimo de umidade para a argila.

TABELA 5.4 – Resultados de máximo módulo de resiliência para CE.

	<u>SOLO RESIDUAL DE ARENITO</u>		<u>ARGILA</u>	
	Sucção (kPa)	Mr (MPa)	Sucção (kPa)	Mr (MPa)
$\sigma_c = 13,8 \text{ kPa}$	571	878	463	1.705
$\sigma_c = 27,6 \text{ kPa}$		884		1.565
$\sigma_c = 41,4 \text{ kPa}$		991		1.625

A seguir apresentam-se as figuras 5.6 a 5.8.

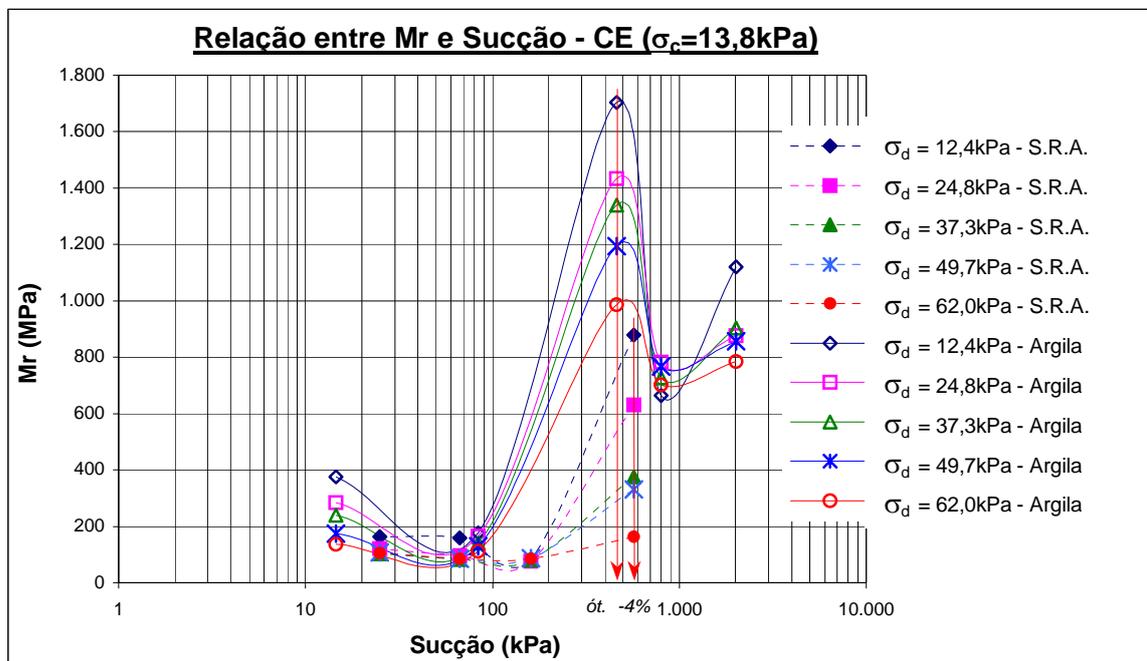


FIGURA 5.6 – Relação entre módulo de resiliência e sucção para $\sigma_c=13,8 \text{ kPa}$ - CE.

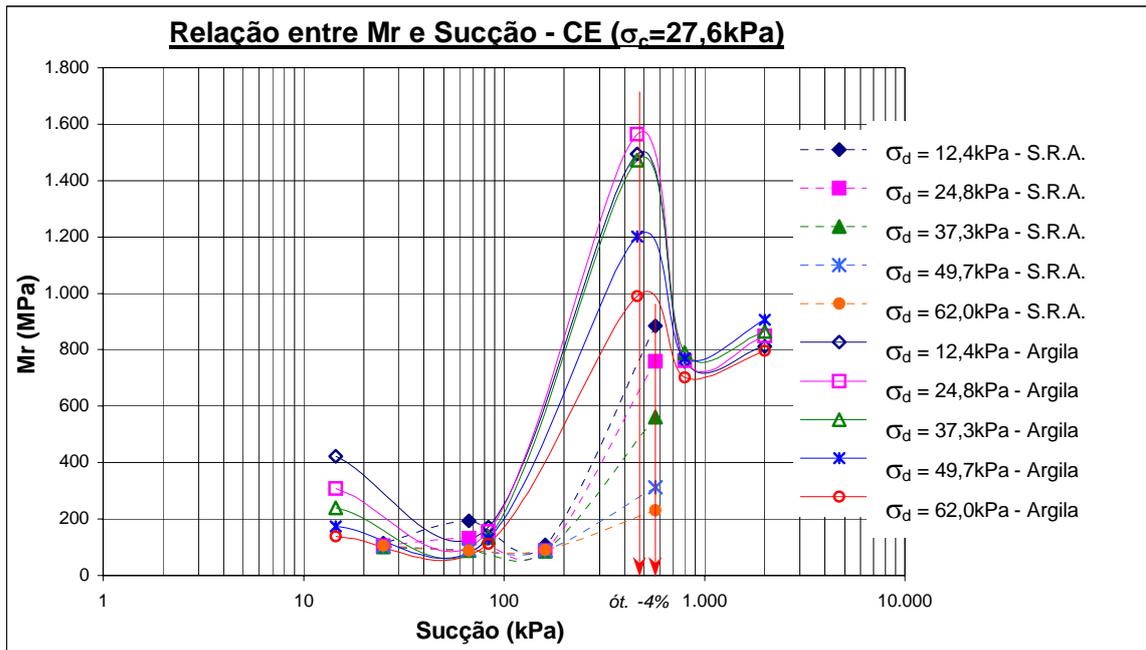


FIGURA 5.7 – Relação entre módulo de resiliência e sucção para $\sigma_c=27,6$ kPa - CE.

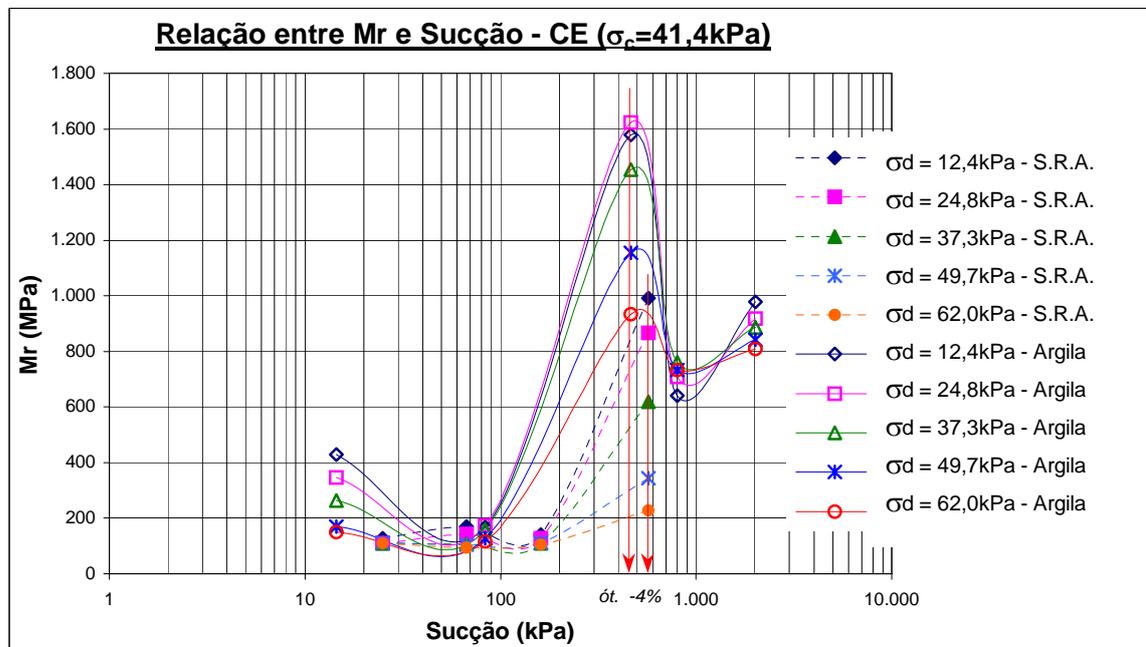


FIGURA 5.8 – Relação entre módulo de resiliência e sucção para $\sigma_c=41,4$ kPa - CE.

5.4 COMPACTAÇÃO POR PISOTEAMENTO

5.4.1 Curva Característica

Na figura 5.9, apresenta-se os resultados referentes a sucção dos dois solos estudados, considerando-se as curvas características por processo de secagem, umedecimento e a curva intermediária. Pode-se observar que, por este método de compactação, o solo residual de arenito apresenta uma maior semelhança, proximidade entre os valores de teor de umidade e sucção em relação às três curvas características (umedecimento, secagem e intermediária); apresentando-se bem visível entorno do teor de umidade igual a 10%. Com relação a argila o mesmo não ocorre, podendo-se notar que praticamente em qualquer teor de umidade, com exceção à extremidade mais úmida, pode-se obter uma notável variação de valores de sucção para um mesmo teor de umidade, considerando-se a forma de obtenção da curva.

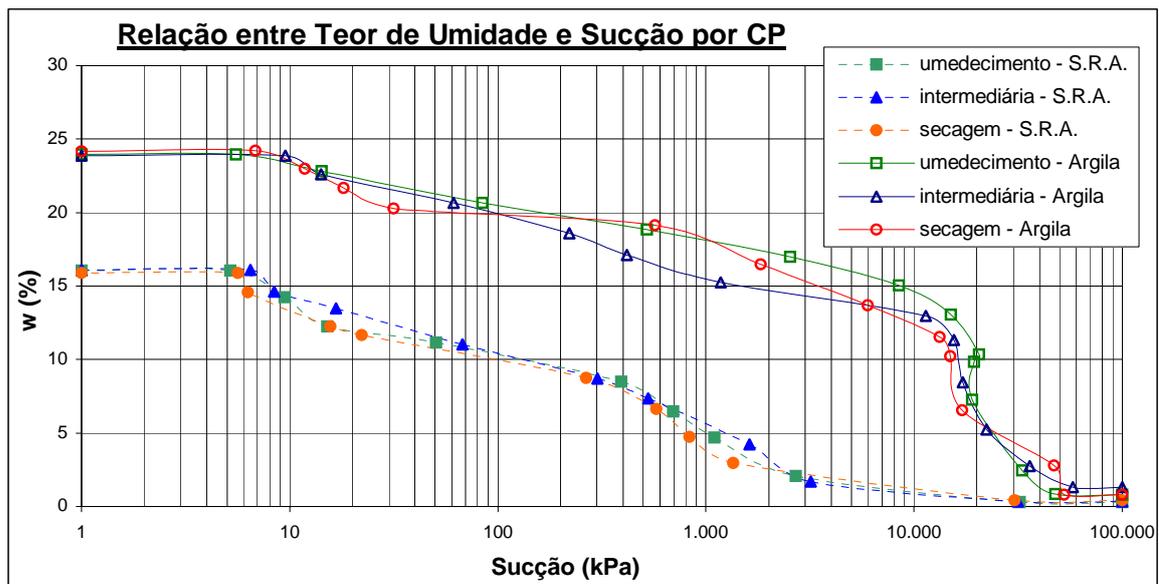


FIGURA 5.9 – Relação entre teor de umidade e sucção por compactação por pisoteamento.

Na tabela 5.5, mostra-se os resultados de teor de umidade, sucção e grau de saturação nos teores de umidade mínimo, ótimo e máximo alcançados, para a compactação por pisoteamento.

TABELA 5.5 – Resultados de sucção e grau de saturação para teores de umidade mínimo, ótimo e máximo para CP.

	<i>SOLO RESIDUAL DE ARENITO</i>			<i>ARGILA</i>		
	w (%)	Sucção (kPa)	Sr (%)	w (%)	Sucção (kPa)	Sr (%)
Curva Umed.	0,3	32.233	2	0,8	47.760	3
	11,2	50	66	18,9	521	68
	16,1	5	95	23,9	6	87
Curva Inter.	0,4	31.484	2	1,3	57.754	6
	11,0	68	63	18,6	221	72
	16,1	6	88	23,9	10	81
Curva Sec.	0,4	30.525	2	0,8	52.383	3
	11,6	22	68	20,3	32	71
	15,9	6	89	24,2	7	79

Verificando-se, ainda, a figura 5.9, pode-se obter os valores aproximados de sucção referentes aos teores de umidade ótimo para o solo residual de arenito e para a argila. Para o primeiro tem-se, pela curva característica (para a umidade ótima de 11,5%) através do processo de umedecimento-secagem, uma sucção de 35 kPa, pela curva característica intermediária uma sucção de 50 kPa e pela curva característica no processo de secagem-umedecimento uma sucção de 25 kPa. No caso da argila ($w_{ót.} = 19,7\%$), tem-se pela curva característica através do processo de umedecimento-secagem uma sucção de 210 kPa, pela curva característica intermediária uma sucção de 120 kPa e pela curva característica no processo de secagem-umedecimento uma sucção de 180 kPa. Nota-se que também neste método de compactação ocorre uma significativa variação no valor resultante de sucção com uma variação no teor de umidade imposto, comparando-se com os resultados contidos na tabela 5.5.

5.4.2 Relação entre Módulo de Resiliência e Sucção

Na compactação por pisoteamento, tanto o solo residual de arenito como a argila apresentaram semelhanças em seus resultados comparando-se as tensões confinantes aplicadas, como pode ser visto nas figuras 5.10, 5.11 e 5.12. Porém, para os demais métodos estes solos apresentaram grande. Os valores apresentados pelo solo residual de arenito referentes ao teor de umidade +2% praticamente coincidiram com o teor de umidade igual a +4% da argila. O máximo valor de módulo de resiliência para o solo residual de arenito ocorreu no teor ótimo de umidade, e para a argila no teor mais seco que permitiu a compactação, igual a -2%. Neste método também se observou o decréscimo dos valores de

módulo de resiliência com o aumento da tensão desvio para um mesmo teor de umidade, de um modo geral.

Na tabela 5.6 apresentam-se os máximos valores de módulo de resiliência alcançados para uma sucção correspondente ao teor de umidade ótimo para o solo residual de arenito e igual à -2% do teor ótimo para a argila, considerando-se as três tensões confinantes aplicadas através da compactação por pisoteamento.

TABELA 5.6 – Resultados de máximo módulo de resiliência para CP.

	<i>SOLO RESIDUAL DE ARENITO</i>		<i>ARGILA</i>	
	Sucção (kPa)	Mr (MPa)	Sucção (kPa)	Mr (MPa)
$\sigma_c = 13,8$ kPa	36	512	568	446
$\sigma_c = 27,6$ kPa		476		506
$\sigma_c = 41,4$ kPa		462		479

A seguir apresentam-se as figuras 5.10 a 5.12.

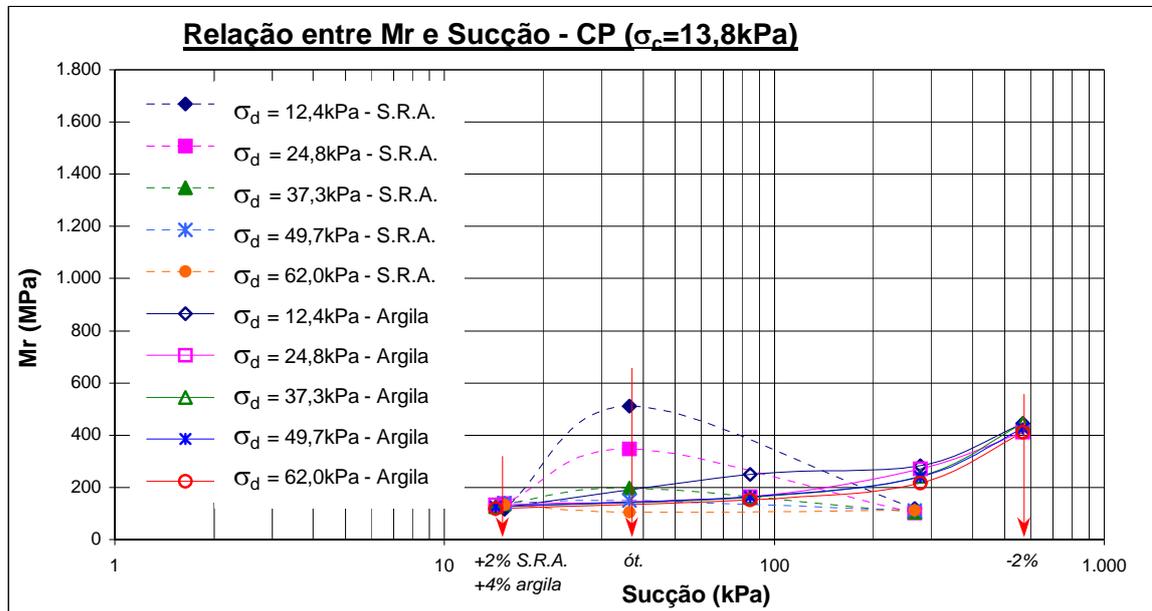


FIGURA 5.10 – Relação entre módulo de resiliência e sucção para $\sigma_c=13,8$ kPa - CP.

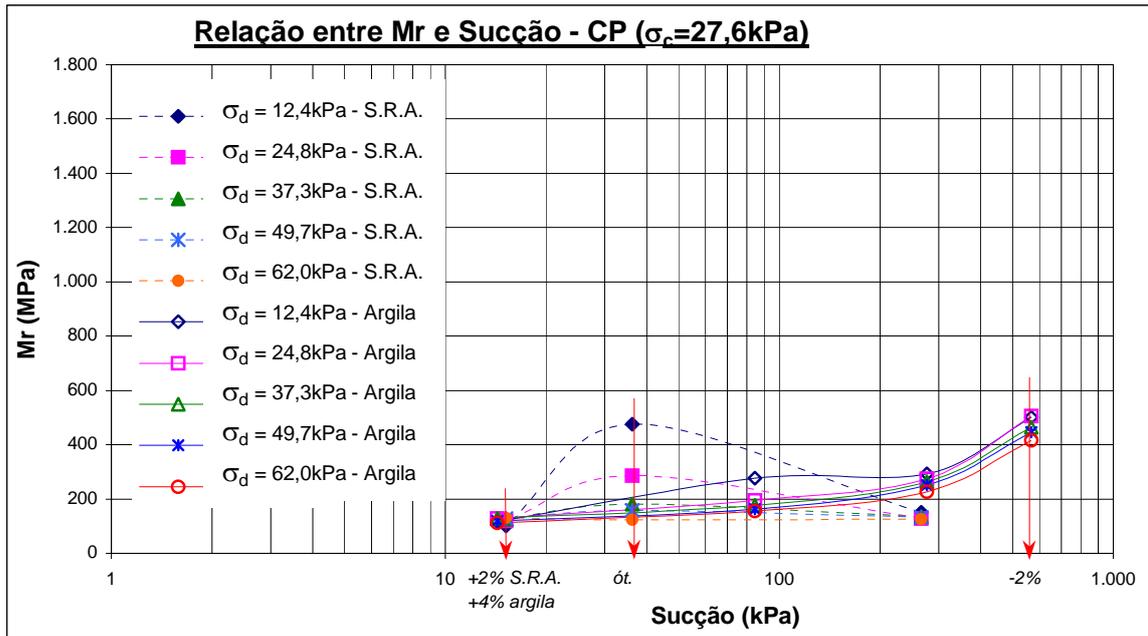


FIGURA 5.11 – Relação entre módulo de resiliência e sucção para $\sigma_c=27,6\text{ kPa}$ – CP.

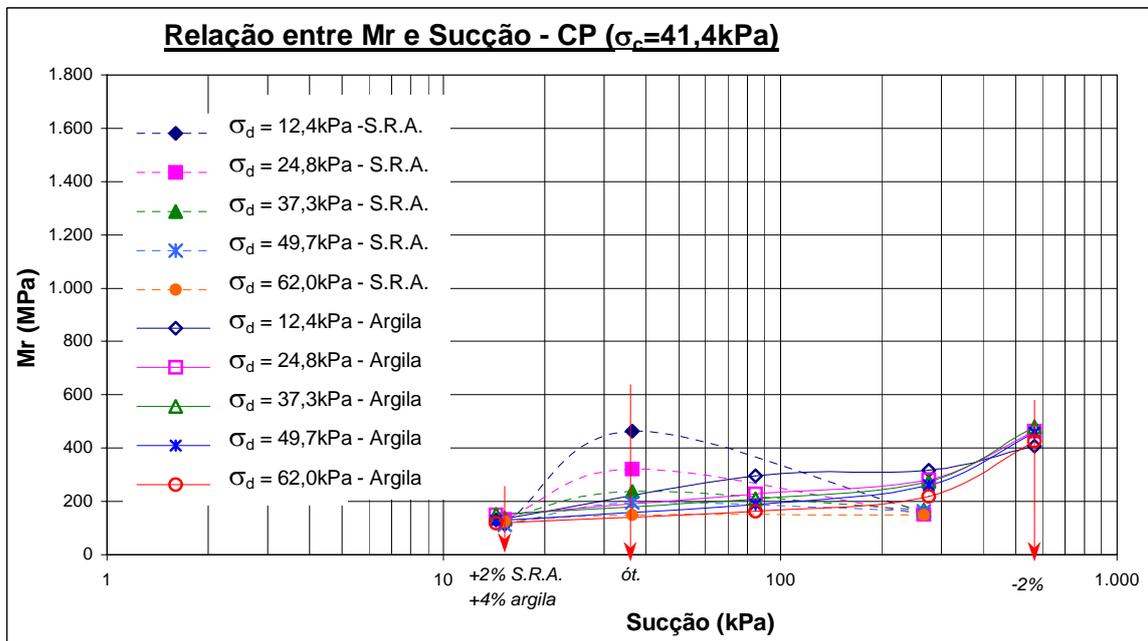


FIGURA 5.12 – Relação entre módulo de resiliência e sucção para $\sigma_c=41,4\text{ kPa}$ – CP.

Como pode ser observado, a relação entre módulo de resiliência e sucção apresentou-se não linear, tanto para o solo residual de arenito como para o solo argiloso. LI e SELIG (1994) também observaram a não linearidade entre os parâmetros M_r e sucção, ao relacioná-los em ensaios triaxiais de carga cíclica. FREDLUND *et al.* (1975) e RODRIGUES (1997) também verificaram este comportamento.

O fato de que baixos valores de sucção, ou seja, altos teores de umidade, provocam uma redução nos módulos de resiliência, isto de forma independente do nível de tensões, assim como o M_r decrescer com o aumento da tensão desvio aplicada também foi verificado por RODRIGUES (1997).

Também é válido salientar a ocorrência da redução do valor do M_r para a máxima sucção, principalmente para as compactações dinâmica e estática, para ambos tipos de solo. Isto também foi verificado por EDIL e MOTAN (1979), PHILLIP (1996) apud RODRIGUES (1997), e RODRIGUES (1997).

5.5 RELAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE COMPACTAÇÃO – MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Os gráficos apresentados a seguir contém os resultados obtidos através dos ensaios realizados para a determinação do módulo de resiliência, comparando-se os três métodos de compactação empregados no solo arenoso e argiloso, considerando-se os teores de umidade e as tensões confinante utilizadas.

Pode-se observar que, independente do nível de tensões aplicadas, os valores de módulo de resiliência encontrados para o solo residual de arenito foram, na sua maioria, menores do que os apresentados pela argila, sendo a diferença entre os valores mais significativa nos teores de umidade ótimo e os secos.

Nota-se, também, que não houve variação em termos de grandeza nos valores de módulo de resiliência, com a maior ou menor tensão confinante aplicada, tanto para o solo residual de arenito como para a argila e dependente apenas da tensão desvio aplicada, cujo aumento causa diminuição do M_r .

Em relação ao tipo de método de compactação empregado, verificou-se uma

maior influência de um método ou outro em função do tipo de solo, do teor de umidade e dos níveis de tensões aplicados, como pode-se observar nas análises descritas a seguir.

Os resultados dos ensaios de carregamento repetido apresentado nos gráficos a seguir encontram-se no *Anexo 1*.

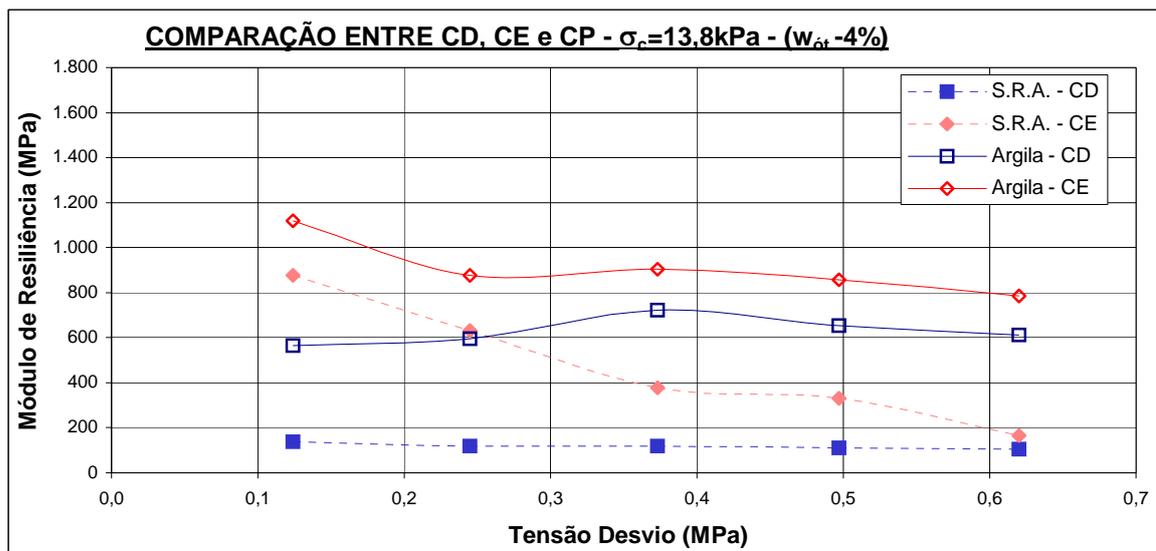


FIGURA 5.13 – Relação entre M_r e σ_d – para $\sigma_c=13,8 \text{ kPa}$ e $w_{ót}$ -4%.

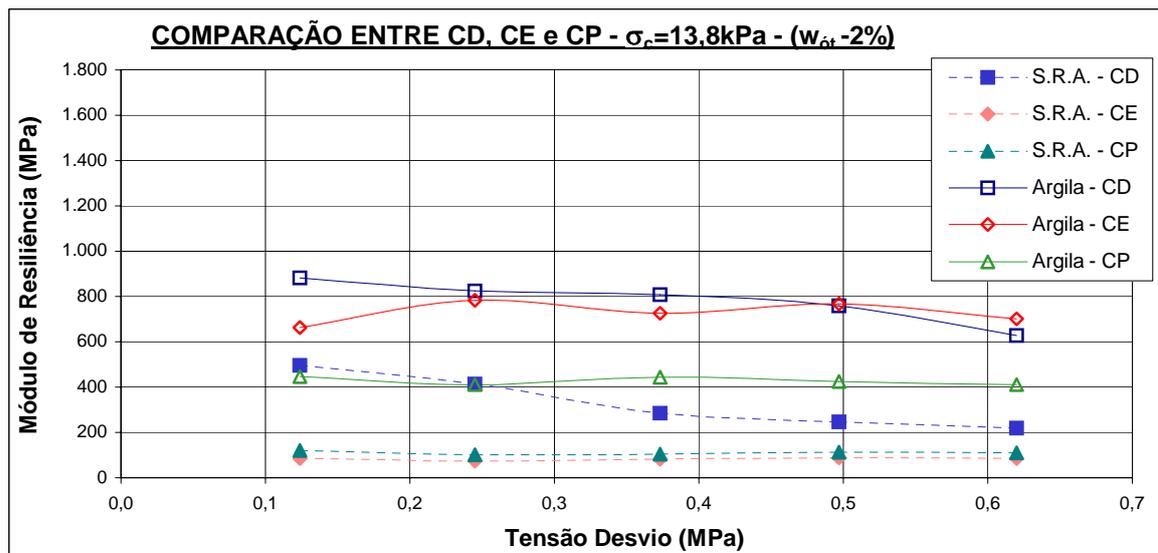


FIGURA 5.14 – Relação entre M_r e σ_d – para $\sigma_c=13,8 \text{ kPa}$ e $w_{ót}$ -2%.

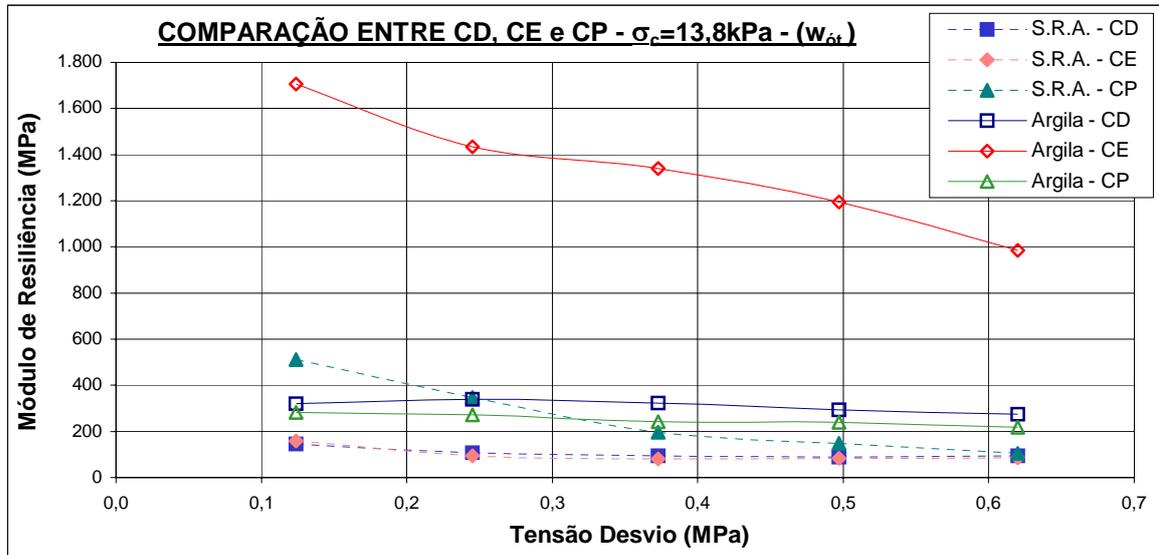


FIGURA 5.15 – Relação entre M_r e σ_d – para $\sigma_c=13,8$ kPa e $w_{ót}$.

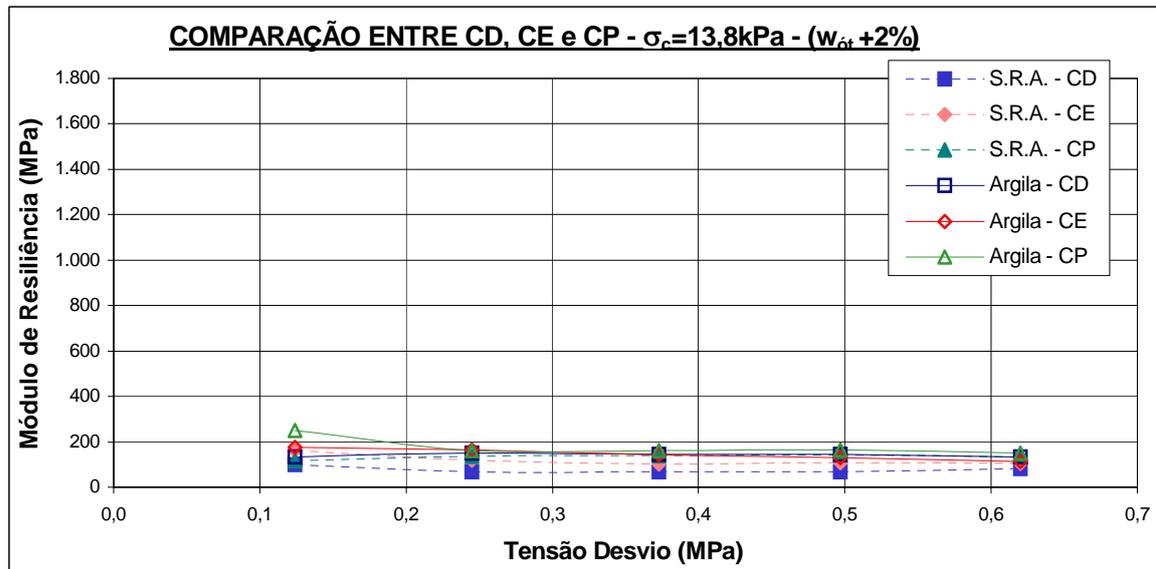


FIGURA 5.16 – Relação entre M_r e σ_d – para $\sigma_c=13,8$ kPa e $w_{ót} + 2\%$.

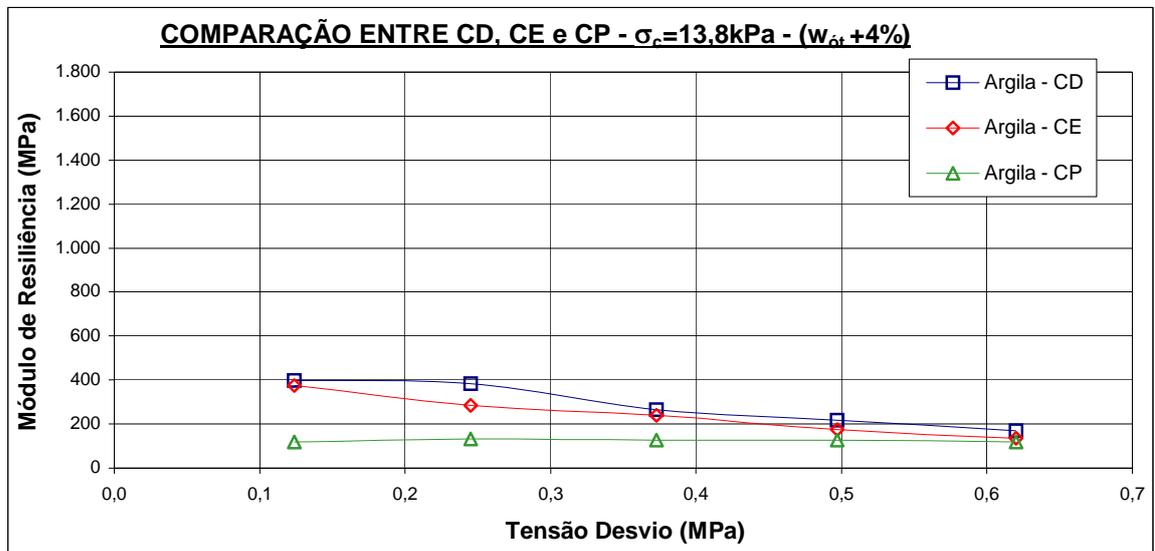


FIGURA 5.17– Relação entre M_r e σ_d – para $\sigma_c=13,8\text{ kPa}$ e $w_{ót.}+4\%$.

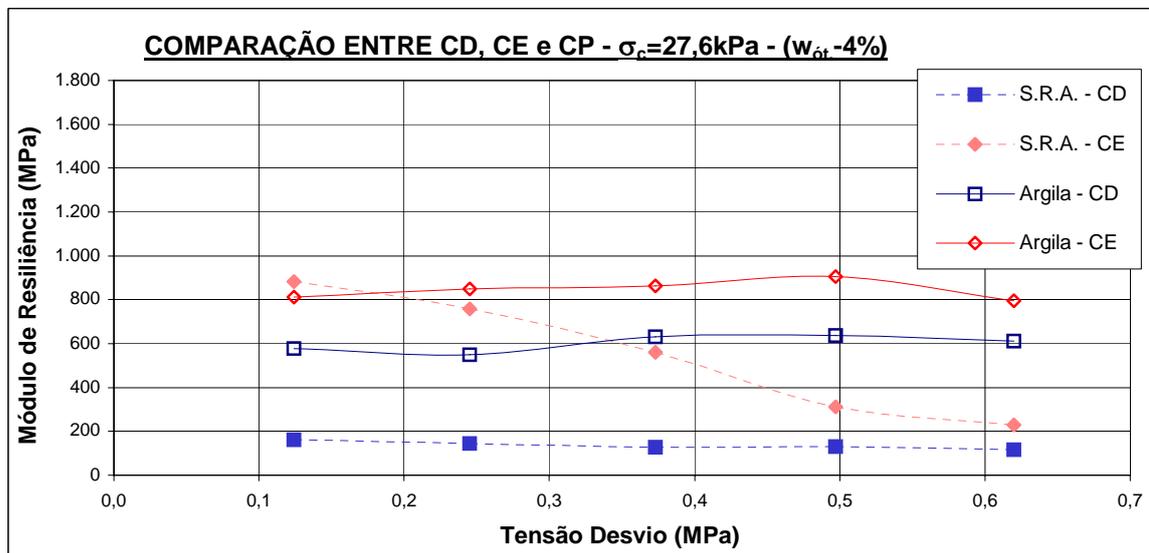


FIGURA 5.18 – Relação entre M_r e σ_d – para $\sigma_c=27,6\text{ kPa}$ e $w_{ót.}-4\%$.

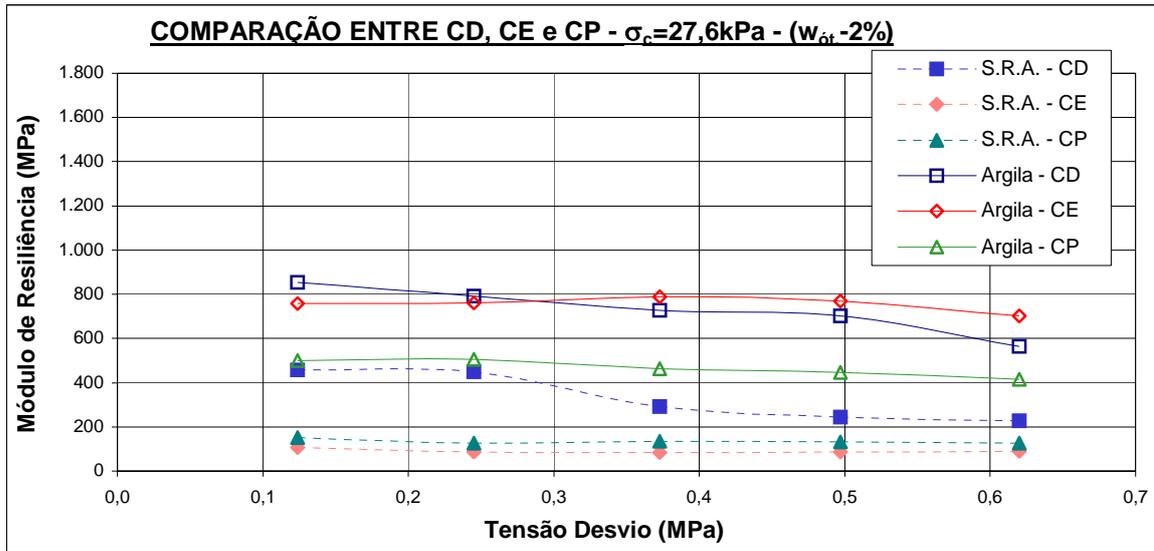


FIGURA 5.19 – Relação entre M_r e σ_d – para $\sigma_c=27,6$ kPa e $w_{ót.} -2\%$.

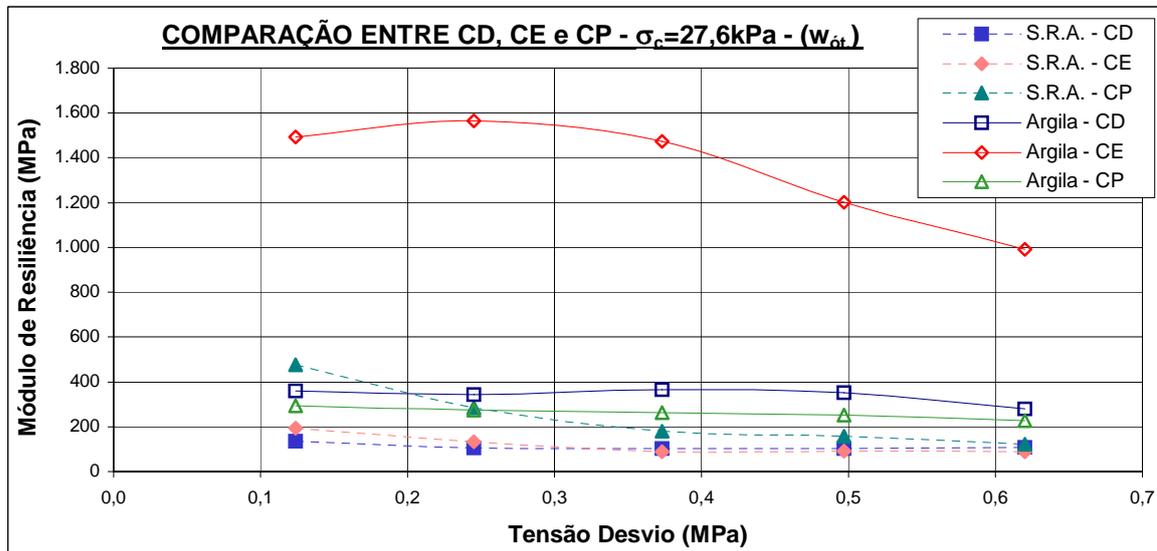


FIGURA 5.20 – Relação entre M_r e σ_d – para $\sigma_c=27,6$ kPa e $w_{ót.}$

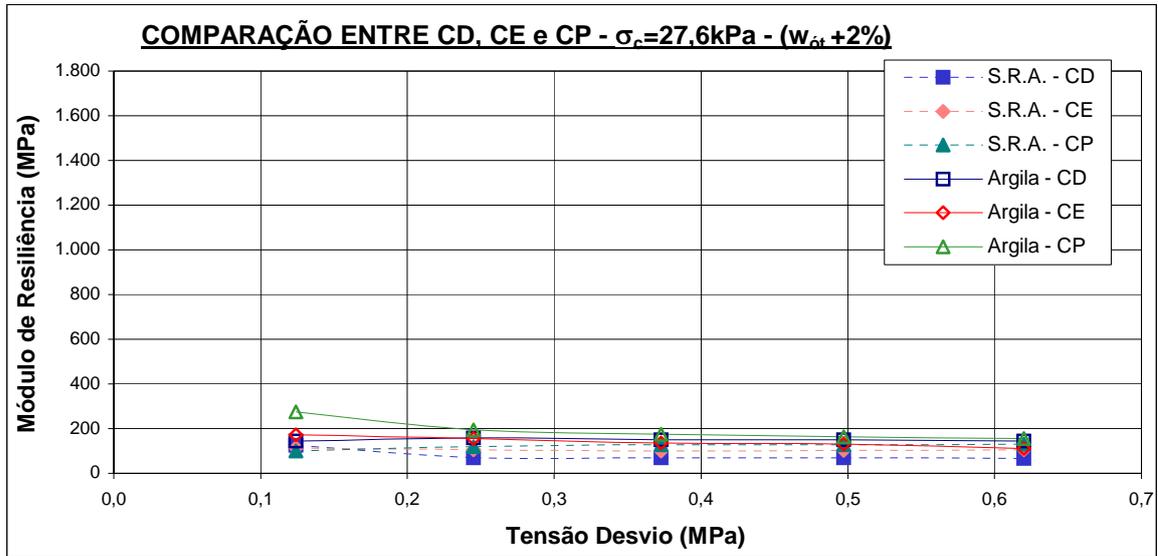


FIGURA 5.21 – Relação entre M_r e σ_d – para $\sigma_c=27,6$ kPa e $w_{ót}+2\%$.

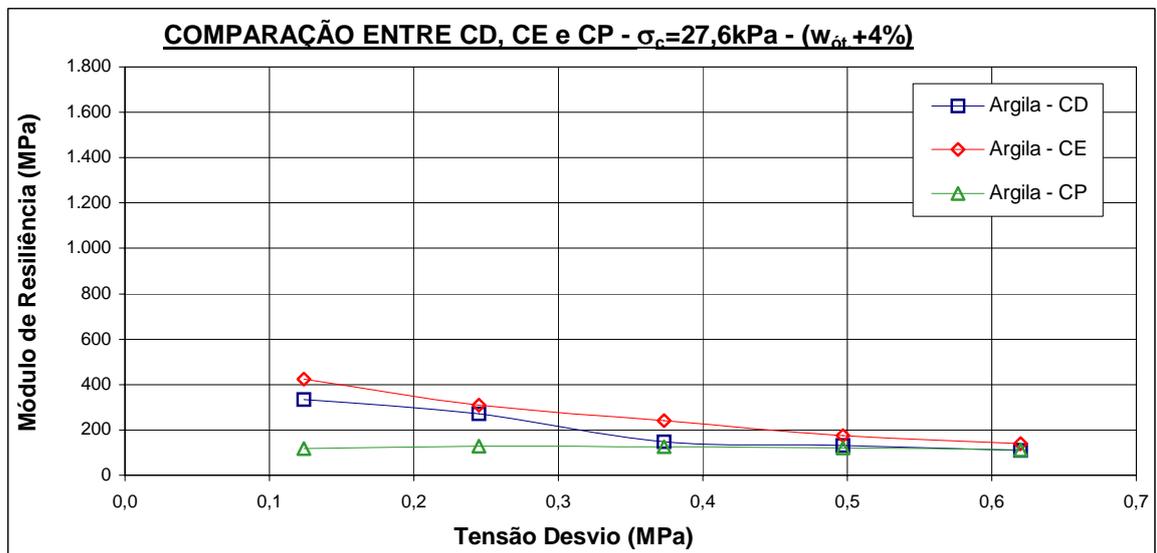


FIGURA 5.22 – Relação entre M_r e σ_d – para $\sigma_c=27,6$ kPa e $w_{ót}+4\%$.

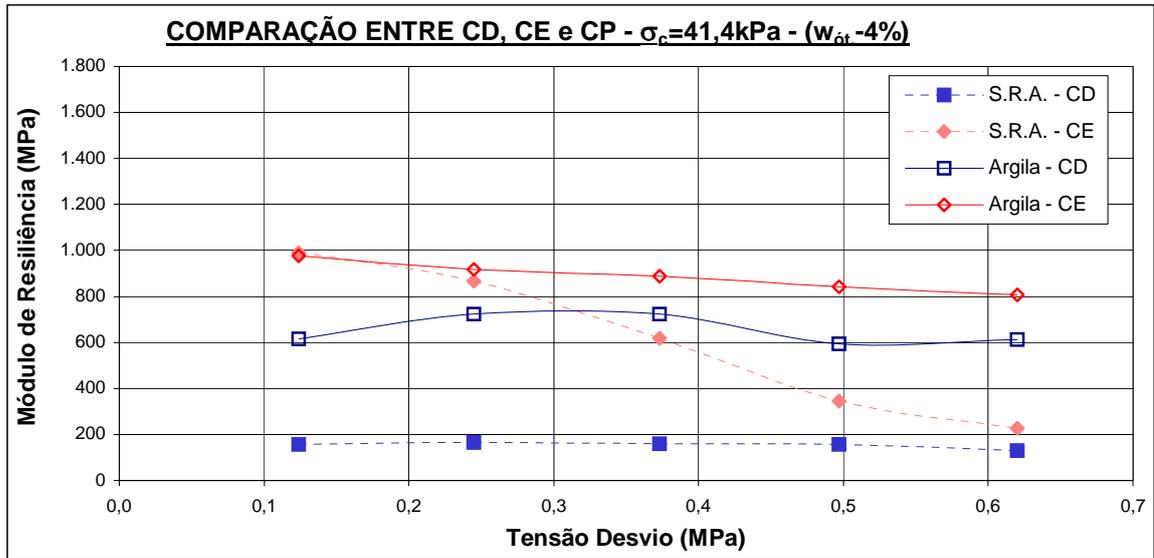


FIGURA 5.23 – Relação entre M_r e σ_d – para $\sigma_c=41,4$ kPa e $w_{ót.}-4\%$.

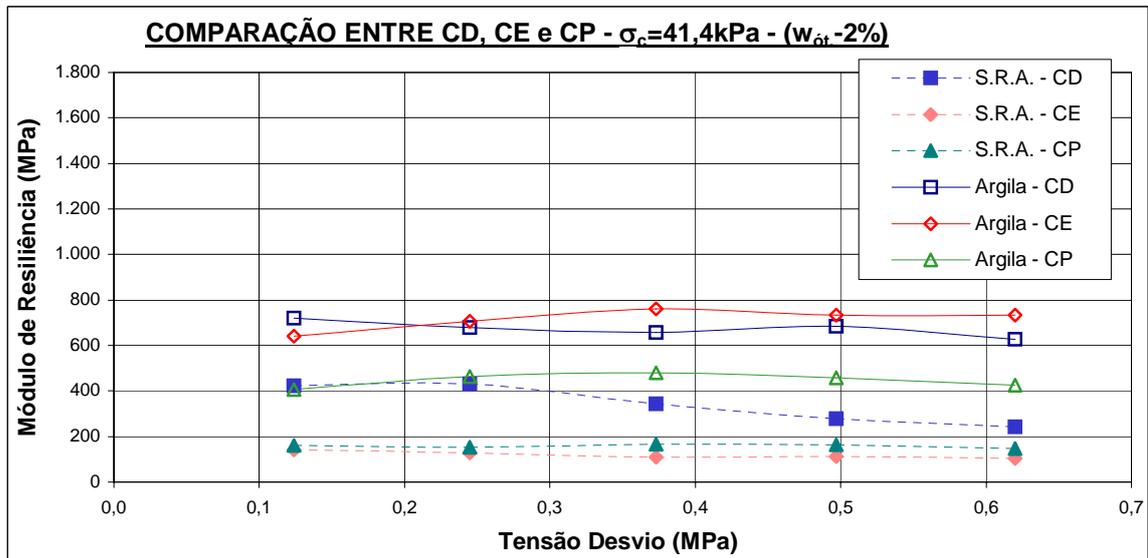


FIGURA 5.24 – Relação entre M_r e σ_d – para $\sigma_c=41,4$ kPa e $w_{ót.}-2\%$.

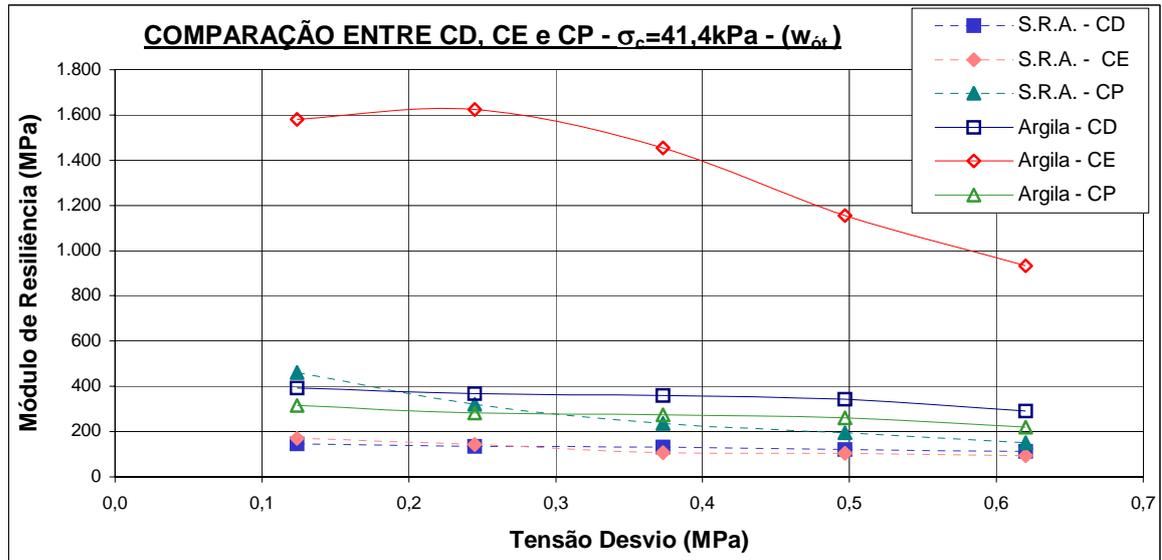


FIGURA 5.25 – Relação entre M_r e σ_d – para $\sigma_c=41,4$ kPa e $w_{ót.}$

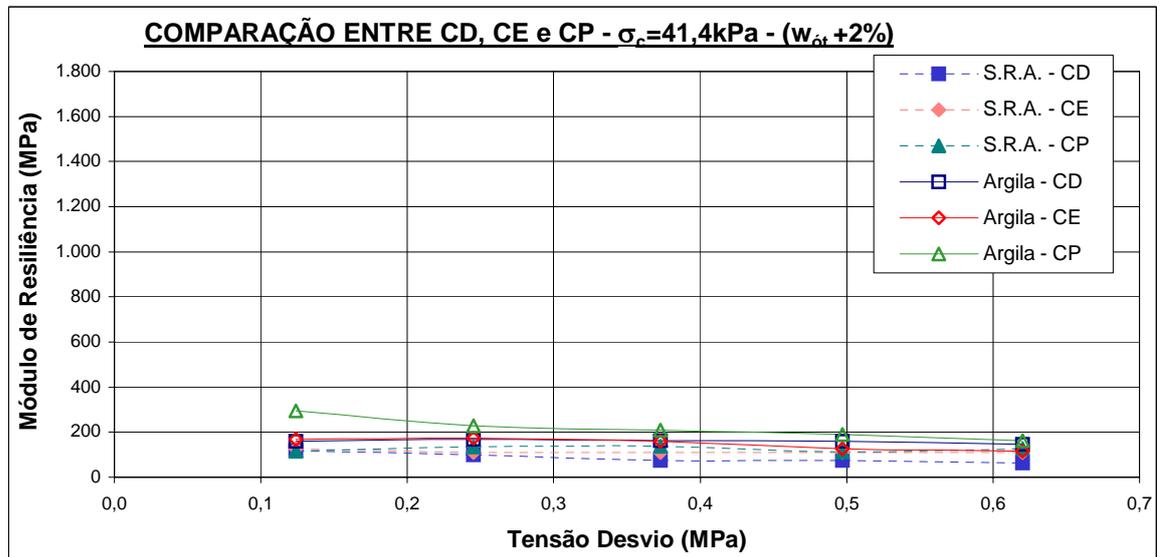


FIGURA 5.26 – Relação entre M_r e σ_d – para $\sigma_c=41,4$ kPa e $w_{ót.}+2\%$.

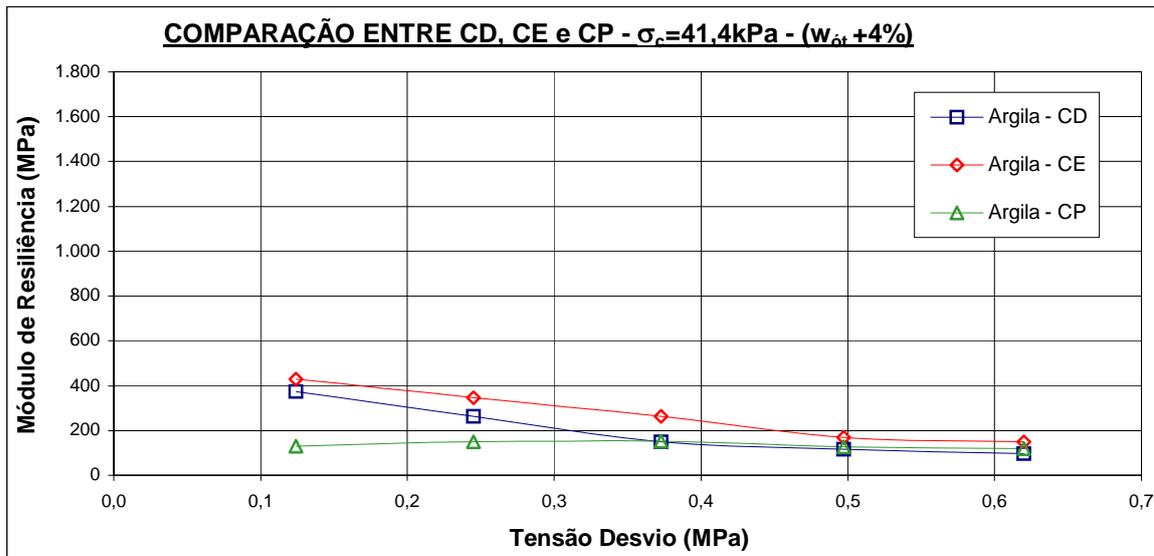


FIGURA 5.27 – Relação entre M_r e σ_d – para $\sigma_c=41,4\text{ kPa}$ e $w_{ót.}+4\%$.

Conforme pode ser observado da figura 5.13 à figura 5.27, referentes a relação entre módulo de resiliência e tensão desvio, o comportamento apresentado pelo arenito, em função dos diferentes métodos de compactação empregados e os teores de umidade variantes utilizados, demonstrou ser mais representativo através da compactação por pisoteamento, na maioria de seus resultados.

Considerando-se os teores de umidade abaixo do teor ótimo, ou seja, maiores succões, pode-se verificar que os valores maiores de módulo de resiliência apresentados pelo arenito ocorreram através da compactação estática para o teor igual a -4% do teor de umidade ótimo, e para o teor de umidade igual a -2% do teor de umidade ótimo na compactação dinâmica. Ambos resultados independentemente das tensões desvio e confinante aplicadas.

Para o teor ótimo de umidade, o arenito teve seu melhor desempenho com o emprego da compactação por pisoteamento, independente das tensões desvio e confinante. O mesmo ocorreu para o teor igual a +2% do teor de umidade ótimo, porém, com exceção da tensão desvio igual a 12,4 kPa, sob a qual observou-se os maiores resultados na compactação estática para as tensões confinantes iguais a 13,8 kPa e 41,4 kPa, e para 27,6 kPa de tensão confinante, a compactação dinâmica foi a de maior representatividade.

Com relação a argila, os resultados apresentados mostraram que maiores

valores de módulo de resiliência ocorreram para o método de compactação estática.

Para o teor de umidade igual a -4% do teor de umidade ótimo a argila apresentou melhor desempenho através da compactação estática, assim como o arenito, independente dos níveis de tensões aplicados. No teor -2% da umidade ótima, o comportamento verificado na argila modificou-se com o aumento da tensão desvio e também da tensão confinante, variando os maiores resultados entre a compactação dinâmica e estática. Sob os níveis de tensão mais baixos, ou seja, $\sigma_c = 13,8$ kPa, e σ_d de 12,4 kPa até 37,3 kPa, a compactação dinâmica apresentou maiores resultados de módulo de resiliência. Para as tensões desvio mais altas (49,7 e 62,0 kPa), através da compactação estática obteve-se os melhores resultados de módulo de resiliência. Com o aumento da tensão confinante para 27,6 kPa, a compactação dinâmica, para a argila, apresentou maior resultado nas tensões desvio mais baixas (12,4 e 24,8 kPa). Com $\sigma_c = 41,4$ kPa, com exceção da tensão desvio igual a 12,4 kPa, sob todas as outras a compactação estática apresentou melhores resultados do que a compactação dinâmica.

No teor ótimo de umidade, a argila apresentou maiores respostas em relação ao módulo de resiliência sob a compactação estática, sem variação devido ao aumento das tensões desvio e confinante.

No teor de umidade igual a 2% acima do teor ótimo da argila, prevaleceu a compactação por pisoteamento sem variação em função das tensões desvio e confinante. No teor 4% acima da ótima, houve uma variação dos resultados conforme a tensão confinante aplicada, apresentando-se independente da tensão desvio. Para $\sigma_c = 13,8$ kPa, a compactação dinâmica resultou em melhores valores de módulo de resiliência, porém, nas demais tensões, a compactação estática apresentou resultados mais elevados.

De modo geral, pode-se observar que a argila alcançou resultados de Mr superiores aos do arenito, independente do método de compactação empregado. Fato este também verificado por RODRIGUES (1997) em seus estudos com solos arenosos e argilosos, considerando que o solo com índice de plasticidade maior apresenta maiores valores de módulo de resiliência.

Em relação aos teores de umidade utilizados, o arenito apresentou maior diferença entre os resultados de Mr entre o teor de umidade ótimo e os abaixo deste.

5.6 COMPARAÇÃO ENTRE SUCÇÃO MEDIDA POR PAPEL FILTRO E POR TRANSDUTOR DE PRESSÃO

Como pode ser observado na figura 5.28, os resultados de sucção obtidos através da utilização do método do papel filtro e do método do transdutor de pressão de alta capacidade, tanto para argila como para arenito, foram satisfatórios. Tais semelhanças nas respostas com a utilização de papel filtro e o transdutor de pressão de alta capacidade também foram verificadas por BASTOS et. al. (1998).

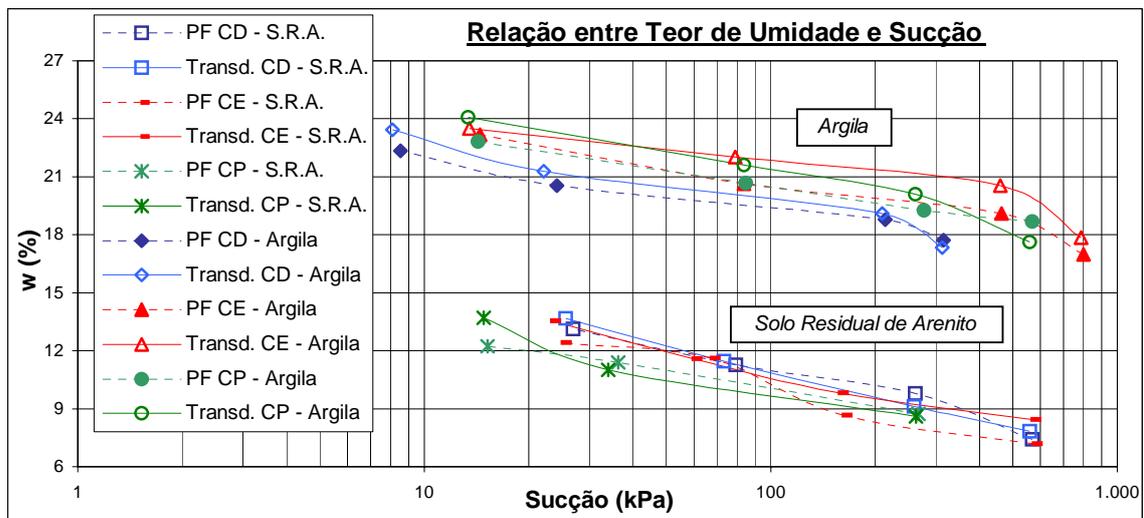


FIGURA 5.28 – Relação entre teor de umidade e sucção comparando resultados obtidos através do método do papel filtro e transdutor de pressão.

Na tabela 5.7, apresentada a seguir, encontram-se os resultados de sucção medida por papel filtro e por transdutor de pressão para os solos estudados, considerando-se os teores de umidade alcançados para -4% e -2% do teor de umidade ótimo, o próprio teor ótimo, +2% e +4% do teor ótimo. Os espaços em branco referentes ao solo residual de arenito e a argila, sendo que esta somente através da compactação por pisoteamento, representam os teores de umidade nos quais não foram realizadas compactações. E, os espaços em branco na tabela para a argila compactada por CD e CE referem-se aos ensaios no teor de umidade -4% da ótima que não foram realizados, devido ao fato de que os resultados apresentados através do papel filtro mostraram valores de sucção acima do alcance possível do transdutor de pressão.

TABELA 5.7 – Resultados de sucção medida através do papel filtro e transdutor de pressão.

<u>ARENITO</u>					<u>ARGILA</u>			
	Papel Filtro		Transdutor		Papel Filtro		Transdutor	
	w (%)	Sucção (kPa)	w (%)	Sucção (kPa)	w (%)	Sucção (kPa)	w (%)	Sucção (kPa)
CD	7,4	567	7,8	558				
	9,8	261	9,1	259	17,7	315	17,4	313
	11,5	80	11,5	73	19,8	214	19,1	210
	13,1	27	13,7	26	20,5	24	21,3	22
					22,4	9	23,4	8
CE	7,2	571	8,4	565				
	8,7	161	9,8	158	17,0	799	17,9	785
	11,6	68	11,6	60	19,3	463	20,6	460
	12,4	25	13,6	23	20,7	84	22,0	79
					23,2	15	23,5	14
CP								
	8,7	266	8,6	262	18,7	568	17,6	560
	11,4	36	11,0	34	19,6	277	20,1	261
	12,2	15	13,7	15	20,7	85	21,6	84
				22,8	14	24,1	13	

A diferença nos valores de sucção entre tais solos vem confirmar a influência da textura, do tipo e da granulometria dos solos. Em solos argilosos, onde há a presença de grande porção de finos, as forças capilares e de adsorção são mais importantes na sucção matricial. Em solos arenosos, grande porção de areia, ocorre menores valores de sucção, estando esta associada somente a forças capilares (RODRIGUES, 1997).

Durante a medição da sucção no ensaio de carregamento repetido, para a determinação do módulo de resiliência, observou-se que, mesmo após o tempo de espera para a estabilização do valor medido de sucção, ainda ocorria um aumento deste valor no início do ensaio. Quando aplicava-se o carregamento e realizava-se a mudança das tensões aplicadas, havia uma pequena variação crescente, sempre de forma constante, nos valores medidos. Porém, quando se interrompia a aplicação das tensões reiniciando-a em seguida ocorria uma mudança na leitura de forma brusca, um salto, demorando alguns minutos para que voltasse a estabilidade. Considera-se que este fato tenha ocorrido devido a grande sensibilidade apresentada pelo transdutor e pelo equipamento de leitura.

Ainda com relação à sucção – teor de umidade – método de compactação, na figura 5.29 temos as curvas características do solo residual de arenito e da argila, obtidas através do método de papel filtro. Através deste gráfico podemos observar o comportamento

de tais solos quanto à sucção quando submetidos aos diferentes métodos de compactação empregados. O solo residual de arenito apresenta uma visível diferença no valor da sucção para cada método de compactação empregado quando tomamos um mesmo teor de umidade, com exceção dos extremos. Sendo que, há uma convergência entorno do teor de umidade aproximadamente igual a 7%, onde os valores tornam-se praticamente os mesmos, independente da compactação. Com a argila, a diferença entre os valores de sucção apresentados para uma mesma umidade, considerando-se os três métodos, é maior do que a que ocorreu com o solo residual de arenito, também nota-se neste solo uma semelhança no valor de sucção, independente do método, entorno dos teores de umidade aproximadamente iguais a 13% e 6%.

Com o objetivo de apresentar um melhor ajuste, foram inseridos os pontos de sucção máxima (100.000) e mínima (1) no gráfico apresentado na figura 5.29.

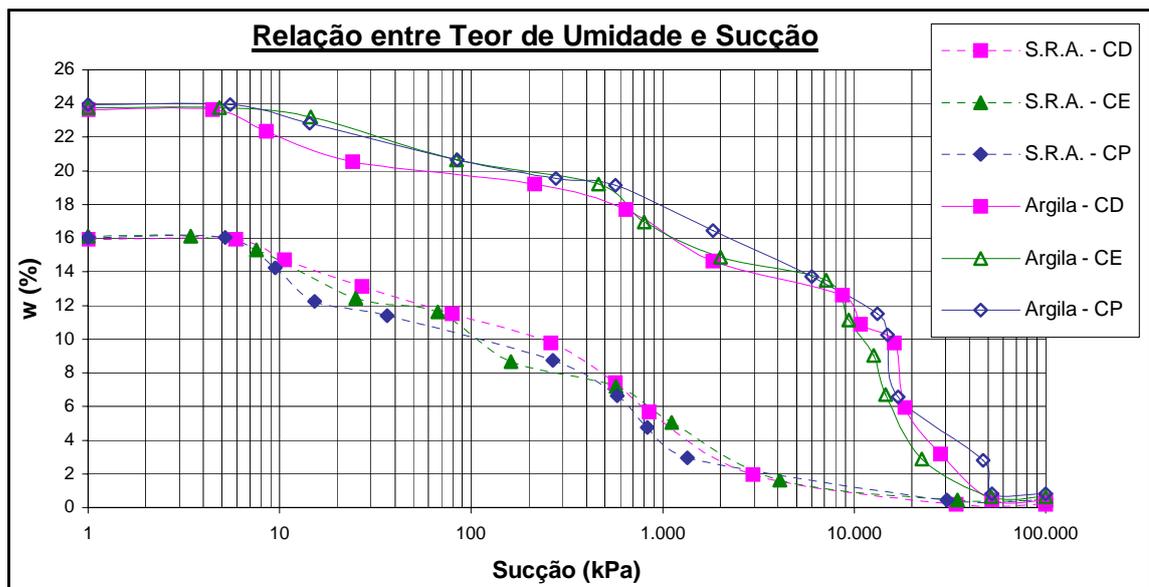


FIGURA 5.29 – Curva característica para o solo residual de arenito (S.R.A.) e para argila através dos métodos de compactação empregados.

Os resultados apresentados na tabela 5.8 referem-se aos teores de umidade mínimo, ótimo ou próximo deste e máximo alcançados e às respectivas sucções apresentados na figura 5.29, obtidos através do método do papel filtro. Os valores referentes ao ramo úmido foram obtidos através dos processos de umedecimento-secagem, e os valores referentes ao ramo seco, através do processo de secagem-umedecimento. Com

relação aos teores de umidade ótimo, ou próximos destes alcançados, foram obtidos através da média dos valores de tais teores nos dois processos para obtenção da curva.

TABELA 5.8 – Resultados de sucção medida através do método do papel filtro para teores de umidade mínimo, ótimo e máximo alcançados.

<i><u>ARENITO</u></i>			<i><u>ARGILA</u></i>	
	w (%)	Sucção (kPa)	w (%)	Sucção (kPa)
CD	0,2	34.164	0,4	52.1912
	11,5	80	19,8	214
	16,0	6	23,6	5
CE	0,4	34.675	0,6	52.178
	11,7	68	19,3	463
	16,1	3	23,8	5
CP	0,4	30.526	0,8	52.383
	11,4	36	19,6	277
	16,1	5	23,9	6

Capítulo 6

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

6.1 CONCLUSÕES

Embasado nos resultados obtidos através da realização desta pesquisa, serão apresentadas a seguir as conclusões mais relevantes.

- Verificou-se que o melhor desempenho que se pode esperar de um método de compactação está relacionado com o tipo de solo que será empregado e o seu teor de umidade.

- O arenito apresentou maiores módulos de resiliência na compactação dinâmica para o teor de umidade igual a -2% do teor ótimo de umidade (sucção = 261 kPa), na compactação estática na umidade -4% do teor ótimo (sucção = 571 kPa), e na compactação por pisoteamento no teor de umidade ótima (sucção = 36 kPa). Considerando-se que os teores de umidade ótimo para o solo residual de arenito e para a argila foram obtidos através do método de compactação dinâmica, conforme NBR 7182.

- A argila apresentou maiores módulos de resiliência na compactação dinâmica para o teor de umidade igual a -2% do teor ótimo de umidade (sucção = 646 kPa), na compactação estática no teor de umidade ótimo (sucção = 463 kPa), e na compactação por pisoteamento no teor -2% da umidade ótima (sucção = 568 kPa).

- A argila apresentou valores de módulo de resiliência superiores aos apresentados pelo arenito.

- Os valores de sucção medidos através do método do papel filtro e os resultados obtidos através da medição com o transdutor de pressão de alta capacidade (Imperial College Suction Probe) mostraram-se muito satisfatórios e sem grandes dispersões.

- Independente do método de compactação empregado, a argila apresentou maiores valores de sucção do que os apresentados pelo arenito.
- Para ambos os solos estudados, independente do processo de obtenção da curva característica (secagem-umedecimento, umedecimento-secagem ou intermediária), observou-se que para uma pequena variação no teor de umidade pode haver uma significativa alteração no valor da sucção.
- Observou-se a influência negativa das tensões desvio no módulo de resiliência.
- A influência da sucção no comportamento resiliente de solos compactados foi verificada através dos resultados obtidos. As alterações ambientais, simuladas em laboratório através dos processos de umedecimento-secagem e secagem-umedecimento, afetaram a deformabilidade dos solos estudados.

6.2 SUGESTÕES

Com o intuito de complementar esta pesquisa, as seguintes recomendações são sugeridas para futuros estudos desenvolvidos sobre as relações entre estrutura – sucção – módulo de resiliência:

- Realizar ensaios com amostras de arenito e argila compactadas em campo pelos métodos estudados em laboratório, para avaliar os resultados de campo e de laboratório.
- Analisar a estrutura gerada pelos três métodos de compactação empregados através de microscopia eletrônica. Comprovando-se a veracidade das estruturas originadas e estudadas nesta pesquisa e por vários autores.
- Estudar a variação da resiliência de solos siltosos com diferentes processos de compactação.
- Determinar o comportamento mecânico (resistência e compressibilidade)

destes solos ensaiados para diferentes valores de teor de umidade.

- Avaliar a permeabilidade destes materiais em diferentes condições de umidade inicial (permeabilidade não saturada).

ANEXO

A seguir, serão apresentadas as tabelas com os valores referentes aos ensaios de módulo de resiliência realizados com amostras de solo residual de arenito e argila, sendo que os valores de tensão desvio e tensão confinante encontram-se conforme indicado pela norma AASHTO T46/94.

TABELA ANEXO.1 – Resultados de Mr (MPa) para o solo residual de arenito por compactação dinâmica.

SOLO RESIDUAL DE ARENITO - CD			
W_{ót.}			
σ_d (MPa)	$\sigma_c = 13,8$ (kPa)	$\sigma_c = 27,6$ (kPa)	$\sigma_c = 41,4$ (kPa)
0,124	145	135	147
0,245	107	105	133
0,373	93	103	131
0,497	88	102	122
0,620	94	107	113
W_{ót.} -2%			
σ_d (MPa)	$\sigma_c = 13,8$ (kPa)	$\sigma_c = 27,6$ (kPa)	$\sigma_c = 41,4$ (kPa)
0,124	497	458	423
0,245	415	450	431
0,373	286	293	345
0,497	247	244	278
0,620	218	227	243
W_{ót.} +2%			
σ_d (MPa)	$\sigma_c = 13,8$ (kPa)	$\sigma_c = 27,6$ (kPa)	$\sigma_c = 41,4$ (kPa)
0,124	98	126	117
0,245	67	71	98
0,373	67	68	74
0,497	69	68	75
0,620	82	67	64
W_{ót.} -4%			
σ_d (MPa)	$\sigma_c = 13,8$ (kPa)	$\sigma_c = 27,6$ (kPa)	$\sigma_c = 41,4$ (kPa)
0,124	139	162	158
0,245	118	144	166
0,373	117	129	160
0,497	109	129	157
0,620	104	116	129

TABELA ANEXO.2 – Resultados de Mr (MPa) para o solo residual de arenito por compactação estática.

SOLO RESIDUAL DE ARENITO - CE			
W_{ót.}			
σ_d (MPa)	$\sigma_c = 13,8$ (kPa)	$\sigma_c = 27,6$ (kPa)	$\sigma_c = 41,4$ (kPa)
0,124	159	193	171
0,245	95	132	142
0,373	82	88	106
0,497	84	91	105
0,620	85	87	94
W_{ót.} -2%			
σ_d (MPa)	$\sigma_c = 13,8$ (kPa)	$\sigma_c = 27,6$ (kPa)	$\sigma_c = 41,4$ (kPa)
0,124	85	107	141
0,245	75	88	127
0,373	81	85	109
0,497	88	88	112
0,620	85	91	104
W_{ót.} +2%			
σ_d (MPa)	$\sigma_c = 13,8$ (kPa)	$\sigma_c = 27,6$ (kPa)	$\sigma_c = 41,4$ (kPa)
0,124	162	113	127
0,245	120	106	110
0,373	102	100	109
0,497	108	103	111
0,620	106	106	110
W_{ót.} -4%			
σ_d (MPa)	$\sigma_c = 13,8$ (kPa)	$\sigma_c = 27,6$ (kPa)	$\sigma_c = 41,4$ (kPa)
0,124	878	884	991
0,245	630	758	866
0,373	376	562	618
0,497	330	311	344
0,620	164	230	227

TABELA ANEXO.3 – Resultados de Mr (MPa) para o solo residual de arenito por compactação por pisoteamento.

SOLO RESIDUAL DE ARENITO - CP			
W_{ót.}			
σ_d (MPa)	$\sigma_c = 13,8$ (kPa)	$\sigma_c = 27,6$ (kPa)	$\sigma_c = 41,4$ (kPa)
0,124	512	476	462
0,245	347	286	322
0,373	197	180	236
0,497	149	158	195
0,620	105	123	150
W_{ót.} -2%			
σ_d (MPa)	$\sigma_c = 13,8$ (kPa)	$\sigma_c = 27,6$ (kPa)	$\sigma_c = 41,4$ (kPa)
0,124	120	151	161
0,245	101	128	152
0,373	105	136	167
0,497	111	132	163
0,620	111	126	148
W_{ót.} +2%			
σ_d (MPa)	$\sigma_c = 13,8$ (kPa)	$\sigma_c = 27,6$ (kPa)	$\sigma_c = 41,4$ (kPa)
0,124	117	100	114
0,245	137	119	134
0,373	138	126	137
0,497	141	128	112
0,620	134	129	127

TABELA ANEXO.4 – Resultados de Mr (MPa) para a argila por compactação dinâmica.

ARGILA – CD			
W_{ót.}			
σ_d (MPa)	$\sigma_c = 13,8$ (kPa)	$\sigma_c = 27,6$ (kPa)	$\sigma_c = 41,4$ (kPa)
0,124	321	359	391
0,245	338	342	367
0,373	322	364	360
0,497	294	351	343
0,620	275	279	292
W_{ót.} -2%			
σ_d (MPa)	$\sigma_c = 13,8$ (kPa)	$\sigma_c = 27,6$ (kPa)	$\sigma_c = 41,4$ (kPa)
0,124	881	855	719
0,245	825	791	680
0,373	809	726	658
0,497	758	702	686
0,620	627	565	626
W_{ót.} +2%			
σ_d (MPa)	$\sigma_c = 13,8$ (kPa)	$\sigma_c = 27,6$ (kPa)	$\sigma_c = 41,4$ (kPa)
0,124	134	144	159
0,245	149	157	168
0,373	145	151	163
0,497	145	150	159
0,620	134	143	145
W_{ót.} -4%			
σ_d (MPa)	$\sigma_c = 13,8$ (kPa)	$\sigma_c = 27,6$ (kPa)	$\sigma_c = 41,4$ (kPa)
0,124	565	577	614
0,245	595	549	724
0,373	723	632	723
0,497	653	636	593
0,620	613	613	613
W_{ót.} +4%			
σ_d (MPa)	$\sigma_c = 13,8$ (kPa)	$\sigma_c = 27,6$ (kPa)	$\sigma_c = 41,4$ (kPa)
0,124	399	334	373
0,245	384	270	263
0,373	266	149	148
0,497	216	132	115
0,620	168	110	97

TABELA ANEXO.5 – Resultados de Mr (MPa) para a argila por compactação estática.

ARGILA – CE			
W_{ót.}			
σ_d (MPa)	$\sigma_c = 13,8$ (kPa)	$\sigma_c = 27,6$ (kPa)	$\sigma_c = 41,4$ (kPa)
0,124	1.705	1.493	1.579
0,245	1.433	1.565	1.625
0,373	1.339	1.473	1.453
0,497	1.195	1.202	1.154
0,620	985	990	934
W_{ót.} -2%			
σ_d (MPa)	$\sigma_c = 13,8$ (kPa)	$\sigma_c = 27,6$ (kPa)	$\sigma_c = 41,4$ (kPa)
0,124	664	758	641
0,245	783	761	707
0,373	726	790	761
0,497	767	770	733
0,620	702	702	733
W_{ót.} +2%			
σ_d (MPa)	$\sigma_c = 13,8$ (kPa)	$\sigma_c = 27,6$ (kPa)	$\sigma_c = 41,4$ (kPa)
0,124	176	172	167
0,245	165	155	175
0,373	141	135	158
0,497	129	130	127
0,620	112	112	116
W_{ót.} -4%			
σ_d (MPa)	$\sigma_c = 13,8$ (kPa)	$\sigma_c = 27,6$ (kPa)	$\sigma_c = 41,4$ (kPa)
0,124	1.119	813	978
0,245	877	849	918
0,373	904	864	888
0,497	856	906	843
0,620	785	796	807
W_{ót.} +4%			
σ_d (MPa)	$\sigma_c = 13,8$ (kPa)	$\sigma_c = 27,6$ (kPa)	$\sigma_c = 41,4$ (kPa)
0,124	376	423	429
0,245	284	309	347
0,373	239	240	264
0,497	175	174	170
0,620	136	138	150

TABELA ANEXO.6 – Resultados de Mr (MPa) para a argila por compactação por pisoteamento.

ARGILA – CP			
W_{ót.}			
σ_d (MPa)	$\sigma_c = 13,8$ (kPa)	$\sigma_c = 27,6$ (kPa)	$\sigma_c = 41,4$ (kPa)
0,124	282	294	316
0,245	272	276	283
0,373	242	262	275
0,497	240	251	260
0,620	217	226	219
W_{ót.} -2%			
σ_d (MPa)	$\sigma_c = 13,8$ (kPa)	$\sigma_c = 27,6$ (kPa)	$\sigma_c = 41,4$ (kPa)
0,124	446	500	408
0,245	411	506	464
0,373	445	464	479
0,497	426	446	458
0,620	412	416	426
W_{ót.} +2%			
σ_d (MPa)	$\sigma_c = 13,8$ (kPa)	$\sigma_c = 27,6$ (kPa)	$\sigma_c = 41,4$ (kPa)
0,124	251	276	295
0,245	163	193	227
0,373	162	176	209
0,497	165	163	189
0,620	151	157	163
W_{ót.} +4%			
σ_d (MPa)	$\sigma_c = 13,8$ (kPa)	$\sigma_c = 27,6$ (kPa)	$\sigma_c = 41,4$ (kPa)
0,124	119	118	131
0,245	132	128	148
0,373	126	127	151
0,497	126	120	128
0,620	119	112	119

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

1. ALONSO, E. E.; GENS, A.; HIGHT, D. W.. “*Special problems soils.*”. General Report. In: 9º European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Proceedings. Rotterdam, A.A. Balkema, pp. 5.1- 5.60. Dublin. 1987.
2. AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS; TP46-94 Standard test method for determining the resilient modulus of soil and aggregate materials. Pp. 522 – 552. Washington. 1996.
3. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS; NBR 6457. Amostras de Solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. 9 pág. Rio de Janeiro, 1986.
4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS; NBR 6502. Rochas e solos – Terminologia 5 pág. Rio de Janeiro, 1980.
5. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS; NBR 6508. Grãos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica. 8 pág. Rio de Janeiro, 1984.
6. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS; NBR 6459. Solo – Determinação do limite de liquidez. 3 pág. Rio de Janeiro, 1984.
7. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS; NBR 7180. Solo – Determinação do limite de plasticidade. 4 pág. Rio de Janeiro. 1984.
8. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS; NBR 7181. Solo – Análise granulométrica. 6 pág. Rio de Janeiro. 1984.
9. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS; NBR 7182. Compactação. 10 pág. Rio de Janeiro. 1984.

10. BALMACEDA, Alfredo R.. “*Suelos compactados - un estudio teorico y experimental*”. Universitat Politècnica de Catalunya. Tesis Doctoral. Barcelona. 1991.
11. BAPTISTA, C. de F. Nogueira. “*Pavimentação*”. Editora Globo. Tomo 1 e 2. 1976.
12. BASTOS, C. A. B.; GEHLING, W. Y. Y.; BICA, A. V. D.. “*Influência da sucção na resistência ao cisalhamento de solos residuais.*”. Prática de Engenharia Geotécnica da Região Sul – Geosul’98, pp. 165-178. Porto Alegre. 1998.
13. BELL, J.R.. “*Compaction energy relationships of cohesive soils*”. Transportation Research Record, nº 641, pp. 29-34. 1977.
14. BURLAND, J. B.; RIDLEY, A. M.. “*The importance of suction mechanics*”. Twelfth Southeast Asian Geotechnical Conference. Kuala Lumpur. 1996.
15. BURMISTER, Donald M.. “*Environmental factors in soil compaction*”. Symposium Presented at the 67th Annual Meeting ASTM. Compaction of Soils; ASTM (American Society of Testing and Materials), pp. 47-66. Chicago. 1964.
16. CORTÉ, Jean-François. “*Caractéristiques mécaniques des graves non traitées au triaxial à chargements répétés*”. Bull. Liaison Labo. P. et Ch., nº. 190, pp. 17-18. 1994.
17. CRUZ, Paulo Teixeira da. “*Propriedades de engenharia de solos residuais compactados da região Centro - Sul do Brasil*”. Escola Politécnica, USP, pp. 21-29. São Paulo. 1967.
18. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM; DNER-ME 131/94. Solos – Determinação do Módulo de Resiliência. Norma Rodoviária, Método de Ensaio, 8 pág. 1994.
19. DHAWAN, C.L.; BAHRI, J.C.. “*Stable density*”. Proc., 4th Internacional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, London, Vol. 1, pp.149-152. 1957.

20. EDIL, T. B.; MOTAN, S. E.. “*Soil-water potential and resilient behavior of subgrade soils*”. Transportation Research Record, n° 705, pp. 54-63. 1979.
21. EDIL, T. B.; MOTAN, S. E.. “*Laboratory evaluation of soil suction components*”. Geotechnical Testing Journal, ASTM, n° 4, vol.7, pp. 173-181. Philadelphia. 1984.
22. FREDLUND, D. G.; BERGAN, A. T.; SAUER, E. K.. “*Deformation characteristics subgrade soils for highways and runways in Northern environments.*” Canadian Geotechnical Journal, v. 12, n.2, pp. 213-223. 1975.
23. FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H.. “*Soil mechanics for unsaturated soils*”. John Wiley & Sons, Inc.. New York. 1993.
24. GEHLING, W.Y.Y.; CERATTI, J.A P.; BICA, A V.D.; NÚÑEZ, W.P.; RODRIGUES, M. R. de. “*Influência da sucção nos módulos de resiliência obtidos em laboratório e em campo para um solo típico de subleito de pavimento do Rio Grande do Sul*”. Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados. Editores T.M.P. de Campos e E.A Vargas, vol.1, pp. 105-112. Rio de Janeiro. 1997.
25. HIGHT, D.W.. “*A simple piezometer probe for the routine measurement of pore pressure in triaxial tests on saturated soils*”. Géotechnique 32, n° . 4, pp. 396-401. 1992.
27. JOHNSON, A.W.; SALLBERG, J.R.. “*Factors influencing compaction test results*”. HRB, Bulletin, 319. 1962.
28. LAMBE, T.W.. “*The structure of compacted clay*”. Proceedings of the American Society of Civil Engineers. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. Vol. 84, n°. SM2, Part 1, May. 1958.
29. LAMBE, T.W.; WHITMAN, R.V.. “*Soil mechanics, SI Version*”. John Wiley & Sons. 1979.

- 30.LI, D.; SELIG, E.. “*Resilient modulus for fine-grained subgrade soils.*” *Journal of Geotechnical Engineering*. ASCE, vol.120, n°6, pp. 939-957. 1994.
- 31.MARINHO, F. A M.. “*A técnica do papel filtro para a medição de sucção.*” Encontro sobre Solos Não Saturados, pp.112-125. Porto Alegre. 1995a.
- 32.MARINHO, Fernando A M.. “*Cavitação e a medição direta de sucção*”. Encontro sobre Solos Não Saturados, pp. 126-142. Porto Alegre. 1995b.
33. MARINHO, F. A M.; CHANDLER, R.J.. “*Discussion : A new instrument for the measurement of soil moisture suction*”. *Géotechnique* 44, n° 3, pp. 551-556. 1994.
- 34.MEDINA, Jacques. “*Mecânica dos pavimentos*” . Editora UFRJ. Rio de Janeiro. 1997.
- 35.MEDINA, Jacques; MOTTA, Laura M. G.; CERATTI, Jorge A. P.. “*Estudo de resiliência na mecânica dos pavimentos*”. VII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações. ABMS, Anais vol. IV, pp. 137-148. Porto Alegre. 1986.
- 36.MOU, C.H.; CHU, T.Y.. “*Soil-suction approach for evaluation of swelling potential*”. *Transportation Research Record*, n°. 790. Washington, DC, pp. 54-60, Jan. 1981.
- 37.MITCHELL, James K.. “*Panel discussion on compaction, testing, and test results*”. *Compaction of Soils*. American Society for Testing and Materials, pp. 80-135. Chicago. 1964.
- 38.NETO, Pedro M. S.; CARVALHO, José C. de. “*Métodos para medir a sucção em solos não saturados*”. Encontro sobre Solos Não Saturados, pp. 143-158. Porto Alegre. 1995.
- 39.NÚÑEZ, Washington P.. “*Análise experimental de pavimentos rodoviários delgados com basaltos alterados*”. Tese de doutorado submetida ao corpo docente do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto

Alegre. 1997.

40. PAUTE, Jean-Louis; MARIGNIER, Jacques; VIDAL, Bruno. “*Le triaxial à chargements répétés LPC pour l’étude des graves non traitées*”. Bull. Liaison Labo. P. et Ch., n°. 190, pp. 19-26. 1994.
41. PHILLIP, A W.. “*The relation between resilient modulus and suction of fine grained soil in pavement design*”. Tese de Mestrado. University of South Australia. 1996.
42. PHILLIP, A W.; CAMERON, D.A .. “*The influence of soil suction on the resilient modulus of expansive soil subgrade*”. Conference International on Unsaturated Soils. E. E. Alonso & P. Delage, vol. 1, pp.171-176. Paris. 1995.
43. PINCIOTTI, R. J.; KUPFERMAN, M.. “*Use of a microcomputer for control, data acquisition and evaluation of the resilient modulus test.*”. Resilient Moduli of Soils : Laboratory Conditions – Proceedings. Geotechnical Special Publication, n° 24. Edited por David J. Elton e Richard P. Ray. Publican for American Society of Civil Engineers.. New York. 1989.
44. PREUSSLER, E. S.; MEDINA, J. de; PINTO, S.. “*Resiliência de solos tropicais e sua aplicação à mecânica dos pavimentos*”. Simpósio Brasileiro de Solos tropicais em Engenharia. COPPE/RJ–CNPq–ABMS, pp. 591-614. Rio de Janeiro. 1981.
45. RICARDO, H. de S.; CATALANI, G.. “*Manual prático de escavação*”. Editora PINI. 1990.
46. RICHARDS, B. G.; EMERSON, W. W.; PETER, P.. Discussion of “*Evaluation of soil suction components*” by T. B. Edil and S. E. Motan. Geotechnical Testing Journal, ASTM, pp. 41-47. Philadelphia. 1986.
47. RIDLEY, A.M.; BURLAND, J.B.. “*A new instrument for measuring soil moisture suction*”. Proceedings of the 1st International Symposium on Engineering Characteristics of Arid Soils, pp. 289-295. A. A. Balkema. London. 1993.

48. RIDLEY, A.M.; BURLAND, J.B.. “*Measurement of suction in materials which swell*”. Mechanics of Swelling. Appl Mech Rev, vol. 48, n^o. 10, pp. 727-732. Edited by Theodoros K. Korolis. 1995.
49. RIDLEY, A.M.; WRAY, W.K.. “*Suction measurement: a review of current theory and practices*”. 1st Int. Conf. on Unsaturated Soils. Paris. 1995.
50. RODRIGUES, M.R. de. “*Influência da sucção no módulo de resiliência do solos típicos de subleito de pavimentos do Rio Grande do Sul*”. Tese de mestrado submetida ao corpo docente do Curso de Pós-Graduação de Engenharia Civil Escola da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 1997.
51. RÖHM, Sérgio A.. “*Solos não-saturados*”. Monografia Geotécnica n^o. 4. Publicação 081/93, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Geotecnia. 1997.
52. SEED, H.B.; CHAN, C.K.. “*Structure and strength characteristics of compacted clays*”. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. American Society of Civil Engineers. 1959.
53. SEED, H.B.; CHAN, C.K.; LEE, C.E.. “*Resilience characteristics of subgrade soils and their relation to fatigue failures in asphalt pavements*”. International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, pp. 1-23. University of Michigan, Ann Arbor. Michigan. 1962.
54. SEED, H.B.; MITRY, F.G.; MONISMITH, C.L.; CHAN, C.K.. “*Prediction of flexible pavement deflections from laboratory repeat load test*”. Institute of Traffic and Transportation Engineering. University of California. Report TE 65.6. 1967.
55. SEED, H.B.; MONISMITH, C.L.. “*Relationships between density and stability of subgrade soils*”. HRB, Bulletin 93. 1954.

- 56.SENÇO, W. de. “*Manual de técnicas de pavimentação*”. Editora PINI, Vol. 1. 1997.
- 57.SVENSON, Margareth. “*Ensaio triaxiais dinâmicos de solos argilosos*”. Tese de mestrado submetida ao corpo docente da Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 1980.
- 58.SZAFRON, B. J.; FREDLUND, D. G.. “*Monitoring matric suction in the subgrade of unpaved roads.*”. Canadian Geotechnical Conference, n° 45; paper n° 52, pp. 52-1 – 52-10. 1992.
- 59.VIDAL, Delma de M.. “*Estudo dos parâmetros de deformabilidade de solos compactados*”. Curso ministrado no Centro Técnico Aeroespacial - Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São Paulo. 1988.