

**INFLUÊNCIA DA SUCCÃO NO MÓDULO DE RESILIÊNCIA  
DE SOLOS TÍPICOS DE SUBLEITO DE PAVIMENTOS DO  
RIO GRANDE DO SUL**

***MÁRCIA RODRIGUES DE RODRIGUES***

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

Porto Alegre  
Outubro de 1997

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

Orientador:

.....  
Prof<sup>ª</sup>. Wai Ying Yuk Gehling  
D. Sc., Universitat Politècnica Catalunya

Orientador:

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

.....  
Prof<sup>ª</sup>. Denise Dal Molin  
Coordenadora do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Banca Examinadora:

- Prof. Orêncio Monje Vilar  
D. Sc., Escola de Engenharia de São Carlos - EESC / USP
- Prof<sup>ª</sup>. Liedi Bariani Bernucci  
D.Sc., Escola Politécnica de São Paulo - USP
- Prof. Glicério Triches  
D.Sc., Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA / SP
- Prof. Luiz Antônio Bressani  
Ph.D., University of London, UK

*Dedico este trabalho aos meus pais,  
Cleusa e Jalmar, e aos meus irmãos,  
Liliane e Guilherme.*

## AGRADECIMENTOS

Aos professores Wai Ying Yuk Gehling e Jorge Augusto Ceratti pela orientação e incentivo para que esta dissertação se tornasse realidade.

Aos professores do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (CPGEC-UFRGS), pelos ensinamentos recebidos.

Aos funcionários do CPGEC-UFRGS, em especial a secretária Ana Paula Martins, pela amizade e ajuda com serviços burocráticos, ao técnico do Laboratório de Mecânica dos Solos, Jair F. da Silva, pela colaboração no decorrer da execução de ensaios de laboratório e ao motorista João Diniz, pelo auxílio na coleta de amostras em campo.

Ao CNPq pelo apoio financeiro à esta pesquisa.

Ao CIENTEC pela possibilidade de realizar ensaios no Laboratório de Recursos Minerais, principalmente aos técnicos de laboratório Pedro, Amaral e Assis, por sua disposição e colaboração em ensaios de compactação de solos.

A empresa ENECON por seu desprendimento em fornecer os solos para a realização deste trabalho.

Aos auxiliares de pesquisa Mário, Joel, Carlos, Maribel, Marcelo, Carlo e Rafael que no período de 1996 à 1997 colaboraram em laboratório e em campo à realização dos inúmeros ensaios executados.

Aos colegas de mestrado de 1995, pela amizade, apoio e indiscutivelmente pelo companheirismo desta turma.

Aos colegas de mestrado de 1996; Diana ,Mara, Marcelo e Pedro pela paciência e disposição na resolução de problemas com a edição de trabalhos.

A todos os alunos do CPGEC, principalmente aos alunos de doutorado Washington Núñez, por seu auxílio com a obtenção de dados de campo e conhecimentos e César Bastos, pelo auxílio na instalação de equipamentos em campo.

Aos meus pais e irmão que mesmo a distância, sempre estiveram presentes.

A minha irmã que em todo este período soube compreender os momentos difíceis e simplesmente ser uma amiga.

# SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	x
LISTA DE TABELAS .....	xvi
LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS .....	xvii
RESUMO .....	xviii
<b>Capítulo 1.....</b>	<b>1</b>
INTRODUÇÃO E OBJETIVOS.....	1
1.1. INTRODUÇÃO.....	1
1.2. OBJETIVOS DA PESQUISA .....	3
1.2.1. Objetivos dos ensaios de laboratório.....	3
1.2.2. Objetivos dos ensaios de campo.....	4
1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	4
<b>Capítulo 2 .....</b>	<b>6</b>
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	6
2.1. INTRODUÇÃO .....	6
2.2. SOLOS NÃO SATURADOS .....	6
2.2.1. Sucção no Solo .....	8
2.2.2. Curva característica do solo .....	10
2.2.3. Fatores que influenciam a sucção .....	12
2.2.4. Métodos de medida e controle de sucção .....	14
2.3. MÓDULO DE RESILIÊNCIA .....	20
2.3.1. Fatores que influenciam o módulo de resiliência .....	21
2.3.2. Relação entre módulo de resiliência e sucção do solo.....	30

<b>Capítulo 3 .....</b>	<b>33</b>
METODOLOGIA DE ESTUDO .....	33
3.1. INTRODUÇÃO .....	33
3.2. PROCEDÊNCIA DOS SOLOS .....	34
3.3. ENSAIOS DE LABORATÓRIO .....	36
3.3.1. Caracterização dos solos em estudo .....	36
3.3.2. Metodologia de preparação das amostras .....	37
3.3.2.1. Preparação das amostras .....	37
3.3.2.2. Procedimento de secagem e ou umedecimento das amostras compactadas.....	38
3.3.3. Determinação da relação de sucção e teor de umidade .....	40
3.3.4. Ensaios de módulo de resiliência.....	40
3.3.4.1. Ensaio triaxial com carregamento repetido .....	41
3.3.4.2. Medidas de sucção durante o ensaio triaxial de carregamento repetido .....	43
3.3.4.3. Medidas de sucção após o ensaio triaxial de carregamento repetido .....	44
3.4. ENSAIOS DE CAMPO .....	45
3.4.1. Localização da Área de Pesquisa e Testes de Pavimentos .....	45
3.4.2. Descrição das pistas experimentais .....	46
3.4.3. Medidas de sucção .....	48
3.4.4. Determinação de módulo de resiliência “in situ” .....	52
<b>Capítulo 4 .....</b>	<b>55</b>
APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS .....	55
4.1. INTRODUÇÃO .....	55

4.2. ENSAIOS DE LABORATÓRIO.....	55
4.2.1. Caracterização dos solos em estudo .....	56
4.2.2. Relação entre sucção e teor de umidade .....	59
4.2.3. Ensaios de módulo de resiliência .....	66
4.2.3.1. Relação de módulo de resiliência com processo de secagem ou umedecimento .....	66
4.2.3.2. Relação de módulo de resiliência com processos de secagem e secagem e umedecimento .....	71
4.2.3.3. Medidas de sucção durante o ensaio de módulo de resiliência .....	74
4.2.3.4. Medidas de sucção dos solos após o ensaio de módulo de resiliência .....	75
4.2.3.5. Relação entre módulo de resiliência e sucção .....	78
4.2.3.6. Relação entre módulo de resiliência, normalizado pela tensão desvio e a sucção .....	81
4.2.3.7. Relação entre módulo de resiliência e sucção para tensões desvio constantes .....	83
4.3. RESULTADOS DE ENSAIOS DE CAMPO .....	86
4.3.1. Medidas de sucção .....	87
4.3.2. Determinação do módulo de resiliência .....	88
4.3.3. Relação entre módulo de resiliência e sucção de campo .....	90
4.4. COMPARAÇÃO DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA E SUCCÃO DE CAMPO E LABORATÓRIO .....	92
<b>Capítulo 5 .....</b>	<b>95</b>
<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>95</b>



5.1. CONCLUSÕES E SUGETÕES .....	95
5.2. RECOMENDAÇÕES .....	99
<b>Referência Bibliográfica.....</b>	<b>101</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Capítulo 2</b> .....	<b>6</b>
<b>FIGURA 2.1</b> - Visualização da mecânica dos solos no mundo, segundo Fredlund (1995) .....	7
<b>FIGURA 2.2</b> - Curvas de consolidação de um solo à sucção constante de acordo com Aitchison e Woodburn, apud Balmaceda (1991) .....	10
<b>FIGURA 2.3</b> - Curva característica de uma amostra calcárea de acordo com Croney et al.(1952), apud Krahn e Fredlund (1972) .....	11
<b>FIGURA 2.4</b> - Efeito da textura na sucção do solo segundo Marshall (1979) .....	12
<b>FIGURA 2.5</b> - Efeito da estrutura na sucção do solo apresentado por Hillel (1971) ...	13
<b>FIGURA 2.6</b> - Efeito da histerese segundo Poulovassilis (1962) .....	14
<b>FIGURA 2.7</b> - Painel de pressão e seus componentes para determinação da retenção de água pelo solo segundo Cauduro e Dorfman (1992) .....	18
<b>FIGURA 2.8</b> - Esquema detalhado do equipamento do tensiômetro “JET FILL” da Soilmoisture Equipment Corporation .....	19
<b>FIGURA 2.9</b> - Efeito da tensão desvio e frequência do carregamento no módulo de resiliência de acordo com Preussler (1978) .....	23
<b>FIGURA 2.10</b> - Influência do peso específico aparente seco no módulo de resiliência segundo Li e Seling (1994) .....	23
<b>FIGURA 2.11</b> - Relação de módulo de resiliência e teor de umidade obtida por Fredlund et al. (1975) .....	25
<b>FIGURA 2.12</b> - Influência do grau de saturação no módulo de resiliência segundo Preussler (1978) .....	26

<b>FIGURA 2.13.(a)</b> - Condições de compactação por diferentes métodos de compactação (A, B, e C) de acordo com Svenson (1980) .....	27
<b>FIGURA 2.13.(b)</b> - Efeito do método de compactação na relação entre módulo de resiliência ( $M_r$ ) e tensão desvio ( $\sigma_d$ ) na condição “A” de acordo com Svenson (1980)	28
<b>FIGURA 2.13.(c)</b> - Efeito do método de compactação na relação entre módulo de resiliência ( $M_r$ ) e tensão desvio ( $\sigma_d$ ) na condição “B” de acordo com Svenson (1980).	28
<b>FIGURA 2.13.(d)</b> - Efeito do método de compactação na relação entre módulo de resiliência ( $M_r$ ) e tensão desvio ( $\sigma_d$ ) na condição “C” de acordo com Svenson (1980).	29
<b>FIGURA 2.14</b> - Influência da sucção no módulo de resiliência segundo Edil e Motan (1979) .....	31
<b>FIGURA 2.15</b> - Variação do módulo de resiliência com a sucção e tensão desvio para tensão confinante constante (10 kPa) segundo Phillip (1996) .....	31
<b>Capítulo 3</b> .....	<b>33</b>
<b>FIGURA 3.1</b> - Mapa de localização das jazidas dos solos em estudo .....	35
<b>FIGURA 3.2</b> - Molde metálico utilizado para compactar os solos em estudo .....	37
<b>FIGURA 3.3</b> - Equipamento para determinação do módulo de resiliência, segundo Núñez (1991) .....	42
<b>FIGURA 3.4</b> Corpo de prova do ensaio de módulo de resiliência com o transdutor de pressão .....	44
<b>FIGURA 3.5</b> - Área de Pesquisas e Testes de Pavimentos no Campus do Vale da UFRGS .....	46
<b>FIGURA 3.6</b> - Seções longitudinais das pistas experimentais (Núñez, Ceratti e Oliveira, 1996) .....	47
<b>FIGURA 3.7</b> - Croquis da pista 10 da Área de Pesquisas e Testes de Pavimentos .....	48
<b>FIGURA 3.8</b> - Localização dos tensiômetros (JET FILL da Soilmoisture Equipment Corporation) na área de testes .....	49
<b>FIGURA 3.9</b> - Método de instalação dos tensiômetros na área de testes .....	50
<b>FIGURA 3.10</b> - Corte transversal de um tensiômetro instalado .....	50
<b>FIGURA 3.11</b> - Tensiômetro (JET FILL da Soilmoisture Equipment Corporation) instalado com proteção de PVC acima da superfície do pavimento. ....	51

<b>Capítulo 4</b> .....	<b>55</b>
<b>FIGURA 4.1</b> - Curva Granulométrica dos solos em estudo .....	58
<b>FIGURA 4.2</b> - Curvas de compactação dos solos em estudo .....	58
<b>FIGURA 4.3</b> - Relação entre sucção e teor de umidade, para amostras moldadas na umidade de ótima ( $W^*$ = umidade ótima), seguidas de processo de secagem para o solo A .....	59
<b>FIGURA 4.4</b> - Relação entre sucção e saturação, para amostras moldadas na umidade ótima ( $W^*$ = umidade ótima), seguidas de processo de secagem para o solo A .....	60
<b>FIGURA 4.5</b> - Relação entre sucção e teor de umidade, para amostras moldadas na umidade ótima ( $W^*$ = umidade ótima), seguidas de processo de secagem para o solo B .....	60
<b>FIGURA 4.6</b> - Relação entre sucção e saturação, para amostras moldadas na umidade ótima ( $W^*$ = umidade ótima), seguidas de processo de secagem para o solo B .....	61
<b>FIGURA 4.7</b> - Relação entre sucção e teor de umidade, para amostras moldadas na umidade ótima ( $W^*$ = umidade ótima), seguidas de processo de secagem para o solo C .....	62
<b>FIGURA 4.8</b> - Relação entre sucção e saturação, para amostras moldadas na umidade ótima ( $W^*$ = umidade ótima), seguidas de processo de secagem para o solo C .....	62
<b>FIGURA 4.9</b> - Relação entre sucção e teor de umidade, para amostras moldadas na umidade ótima ( $W^*$ = umidade ótima), seguidas de processo de secagem para o solo D .....	63
<b>FIGURA 4.10</b> - Relação entre sucção e saturação, para amostras moldadas na umidade ótima ( $W^*$ = umidade ótima), seguidas de processo de secagem para o solo D .....	63
<b>FIGURA 4.11</b> - Relação entre sucção e teor de umidade, para amostras moldadas na umidade ótima ( $W^*$ = umidade ótima), seguidas de processo de secagem, para os solos A, B, C e D .....	64
<b>FIGURA 4.12</b> - Relação entre sucção e saturação, para amostras moldadas na umidade ótima ( $W^*$ = umidade ótima), seguidas de processo de secagem, para os solos A, B, C e D .....	65
<b>FIGURA 4.13 (a)</b> - Relação entre módulo de resiliência e a tensão desvio por processo de secagem ou umedecimento para o solo A ( $W^*$ = umidade ótima).....	67
<b>FIGURA 4.13 (b)</b> - Relação entre módulo de resiliência e a tensão desvio por processo de secagem ou umedecimento para o solo A ( $W^*$ = umidade ótima).....	67

<b>FIGURA 4.14</b> - Relação entre módulo de resiliência e a tensão desvio por processo de secagem ou umedecimento para o solo B ( $W^*$ = umidade ótima) .....	68
<b>FIGURA 4.15</b> - Relação entre módulo de resiliência e a tensão desvio por processo de secagem ou umedecimento para o solo C ( $W^*$ = umidade ótima) .....	69
<b>FIGURA 4.16</b> - Relação entre módulo de resiliência e a tensão desvio por processo de secagem ou umedecimento para o solo D ( $W^*$ = umidade ótima) .....	70
<b>FIGURA 4.17</b> - Relação entre módulo de resiliência e a tensão desvio para umidade ótima, para os solos em estudo ( $W^*$ = umidade ótima) .....	70
<b>FIGURA 4.18</b> - Relação entre módulo de resiliência e a tensão desvio por processo de secagem e secagem e umedecimento para o solo A ( $W_f$ = umidade final) .....	71
<b>FIGURA 4.19</b> - Relação entre módulo de resiliência e a tensão desvio por processo de secagem e umedecimento e na umidade de moldagem (21%) para o solo A ( $W_f$ = umidade final; $w^*$ = umidade ótima) .....	72
<b>FIGURA 4.20</b> - Relação entre módulo de resiliência e a tensão desvio por processo de secagem e umedecimento para o solo A ( $W_f$ = umidade final) .....	72
<b>FIGURA 4.21</b> - Relação entre os ensaios de módulo de resiliência e tensão desvio com processo de secagem e secagem e umedecimento, para amostras compactadas na umidade ótima para o solo A .....	74
<b>FIGURA 4.22</b> - Relação da variação da sucção durante o ensaio de módulo de resiliência em função da tensão desvio e confinante aplicadas para o solo A .....	75
<b>FIGURA 4.23</b> - Relação entre sucção e teor de umidade, antes e após o ensaio de módulo de resiliência, para amostras do solo A, moldadas na umidade ótima ( $W^*=21\%$ ), com processo de secagem ou umedecimento .....	76
<b>FIGURA 4.24</b> - Relação entre sucção e teor de umidade, antes e após o ensaio de módulo de resiliência, para amostras do solo B, moldadas na umidade ótima ( $W^*=15,75\%$ ), com processo de secagem ou umedecimento .....	76
<b>FIGURA 4.25</b> - Relação entre sucção e teor de umidade, antes e após o ensaio de módulo de resiliência, para amostras do solo C, moldadas na umidade ótima ( $W^*=38,5\%$ ), com processo de secagem ou umedecimento .....	77
<b>FIGURA 4.26</b> - Relação entre sucção e teor de umidade, antes e após o ensaio de módulo de resiliência, para amostras do solo D, moldadas na umidade ótima ( $W^*=13,2\%$ ), com processo de secagem ou umedecimento .....	77
<b>FIGURA 4.27</b> - Relação entre módulo de resiliência e sucção para amostras compactadas na umidade ótima, com secagem ou umedecimento para o solo A.....	79

<b>FIGURA 4.28</b> - Relação entre módulo de resiliência e sucção para amostras compactadas na umidade ótima, com secagem ou umedecimento para o solo B.....	79
<b>FIGURA 4.29</b> - Relação entre módulo de resiliência e sucção para amostras compactadas na umidade ótima, com secagem ou umedecimento para o solo C .....	80
<b>FIGURA 4.30</b> - Relação entre módulo de resiliência e sucção para amostras compactadas na umidade ótima, com secagem ou umedecimento para o solo D .....	80
<b>FIGURA 4.31</b> - Relação entre módulo de resiliência normalizado pela tensão desvio e sucção para amostras compactadas na umidade ótima com secagem ou umedecimento para o solo A .....	81
<b>FIGURA 4.32</b> - Relação entre módulo de resiliência normalizado pela tensão desvio e sucção para amostras compactadas na umidade ótima, com secagem ou umedecimento para o solo B .....	82
<b>FIGURA 4.33</b> - Relação entre módulo de resiliência normalizado pela tensão desvio e sucção para amostras compactadas na umidade ótima, com secagem ou umedecimento para o solo C .....	82
<b>FIGURA 4.34</b> - Relação entre módulo de resiliência normalizado pela tensão desvio e sucção para amostras compactadas na umidade ótima, com secagem ou umedecimento para o solo D .....	83
<b>FIGURA 4.35</b> - Relação entre módulo de resiliência e sucção para amostras compactadas na umidade ótima, com secagem ou umedecimento para tensão desvio constante de 12,4 kPa para os solos em estudo .....	84
<b>FIGURA 4.36</b> - Relação entre módulo de resiliência e sucção para amostras compactadas na umidade ótima, com secagem ou umedecimento para tensão desvio constante de 24,8 kPa para os solos em estudo .....	84
<b>FIGURA 4.37</b> - Relação entre módulo de resiliência e sucção para amostras compactadas na umidade ótima, com secagem ou umedecimento para tensão desvio constante de 37,3 kPa para os solos em estudo .....	85
<b>FIGURA 4.38</b> - Relação entre módulo de resiliência e sucção para amostras compactadas na umidade ótima, com secagem ou umedecimento para tensão desvio constante de 49,7 kPa para os solos em estudo .....	85
<b>FIGURA 4.39</b> - Relação entre módulo de resiliência e sucção para amostras compactadas na umidade ótima, com secagem ou umedecimento para tensão desvio constante de 62 kPa para os solos em estudo .....	86
<b>FIGURA 4.40</b> - Sucções máximas e mínimas durante o período de tráfego nas pistas 01, 04, 08 e 07 .....	87
<b>FIGURA 4.41</b> - Resultados de retroanálise do setor 04 da pista 08 .....	89
<b>FIGURA 4.42</b> - Relação da sucção e módulo de resiliência do subleito (solo A) para o intervalo de 0 - 14 kPa .....	92

## LISTA DE TABELAS

<b>Capítulo 2</b> .....	<b>6</b>
<b>TABELA 2.1</b> - Métodos de medida de sucção apresentado por Ridley e Wray (1995).	15
<b>Capítulo 4</b> .....	<b>55</b>
<b>TABELA 4.1</b> - Caracterização dos solos em estudo .....	57
<b>TABELA 4.2</b> - Equações de ajuste da relação de sucção e teor de umidade para os solos em estudo .....	65
<b>TABELA 4.3</b> - Modelos de ajuste do módulo de resiliência para os solos em estudo ..	73
<b>TABELA 4.4</b> - Resultados de retroanálise do setor 04 da pista 08 .....	88
<b>TABELA 4.5</b> - Influência da sucção no módulo de resiliência do subleito (solo A) para o intervalo de sucção de 0 - 14 kPa .....	91
<b>TABELA 4.6</b> - Valores constantes de regressão $K_1$ e $K_2$ para o solo A .....	94
<b>TABELA 4.7</b> - Módulos de resiliência de laboratório para o solo A .....	94

## LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
a	Área da aplicação de tensão
CBR	California Bearing Ratio
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
$D_x$	Deflexão correspondente ao ponto situado à distância radial $r_x$
$D_o$	Deflexão máxima
$E_p$	Módulo efetivo do pavimento
$E_{sg}$	Módulo de resiliência do subleito
FWD	Falling Weight Deflectometer
h	Altura do corpo de prova
IP	Índice de plasticidade
$k_1, k_2$	Constantes de regressão
LL	Limite de liquidez
LP	Limite de plasticidade
LVDT	Linear Variable Differential Transducer
MCT	Miniatura, Compactado, Tropical
$M_r$	Módulo de resiliência
$r_x$	Distância radial
S	Sucção (kPa)
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos
$S_t$	Sucção total
$S_m$	Sucção matricial
$S_o$	Sucção osmótica
$T_x$	Espessura efetiva do pavimento
$u_w$	Pressão de água
$u_a$	Pressão de ar



$W$	Umidade do papel filtro (%)
$W_{\text{ót}}m$	Umidade ótima do solo (%)
$Z$	Espessura real do pavimento
$z$	Profundidade de aplicação de tensão
$\epsilon_r$	Deformação específica axial
$\phi$	Diâmetro do corpo de prova
$\gamma_d$	Peso específico aparente seco
$\gamma_{d\text{máx}}$	Peso específico aparente seco máximo
$\gamma_s$	Peso específico aparente real dos grãos
$\sigma$	Tensão total
$\sigma_1$	Tensão principal total maior
$\sigma_3$	Tensão principal total menor
$\sigma_d$	Tensão desvio aplicada repetidamente
$\sigma_z$	Tensão no topo do subleito
$\sigma_o$	Tensão normal à superfície do subleito

## RESUMO

O presente trabalho apresenta as variações do módulo de resiliência de solos do subleito de pavimento submetidos à trajetórias de secagem e/ ou umedecimento e secagem e umedecimento simuladas em laboratório para quatro solos típicos de subleito de pavimentos do Estado do Rio Grande do Sul. As trajetórias de secagem e ou umedecimento reproduzem as variações de teor de umidade provocadas por alterações ambientais tais como precipitações pluviométricas, evaporação e outros que afetam significativamente os módulos de resiliência.

Foram realizadas medidas de sucção “in situ” e determinado o módulo de resiliência nas pistas experimentais da Área de Testes e Pesquisas da UFRGS com a finalidade de comparar os resultados obtidos em laboratório com os de campo.

Os resultados demonstraram que as variações ambientais induzem a um comportamento resiliente diferenciado e que o mecanismo desta alteração pode ser compreendido através da relação entre a sucção e o teor de umidade. Este estudo permitiu salientar a influência das condições ambientais nas variações de módulo de resiliência, estabelecendo o efeito da sucção na deformabilidade elástica e no comportamento de pavimentos, em especial no subleito. Estas variações de módulo de resiliência ocasionadas por alterações ambientais podem ser minimizadas através de um sistema de drenagem eficiente para a estrutura do pavimento.

## INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

### 1.1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a importância das deformações resilientes, sendo esta, uma das maiores componentes da deformação total de estruturas de pavimentos, vem sendo estudada extensivamente. Numerosos estudos teóricos e de campo têm reconhecido que o módulo de resiliência do subleito tem considerável influência no desempenho do pavimento, principalmente em estruturas flexíveis.

Os módulos de resiliência dos solos de subleitos têm sido determinados nas condições ótimas de compactação através de ensaios triaxiais de cargas cíclicas (laboratório) sob condições de carregamento similares às encontradas no campo ou através de retroanálises (campo).

Vários são os parâmetros a influenciar o módulo de resiliência, sendo a umidade um deles. No Brasil, estudos de módulo de resiliência relacionados com as variações de teor de umidade pós-compactação, decorrentes de alterações ambientais são ainda escassos. Estas alterações ambientais, tais como precipitações pluviométricas, temperatura e vento resultam em variações de umidade no solo do subleito do pavimento. Estudos de variação de módulo de resiliência com a variação do teor de umidade têm sido apresentados por Fredlund et al. (1975), Haupt (1981), Emery (1984), Pufahl et al. (1990) e Phillip (1996).

Mais recentemente, o efeito das variações ambientais na umidade do solo foi quantificado pelo parâmetro denominado sucção do solo ou através da relação entre teor de umidade e sucção (curva característica). A relação entre módulo de resiliência e sucção do solo é muito complexa, requerendo maiores estudos para aplicação dos resultados. Em geral, os solos de subleitos rodoviários situam-se acima do nível freático e a sucção pode alcançar valores superiores a 10 kPa, dependendo das variações ambientais. Segundo Hanks e Ashcroft (1980), a sucção do solo do subleito em estado seco pode alcançar valores da ordem de 185 kPa.

Os estudos apresentados por Fredlund et al. (1975), Li e Seling (1994), Jin et al. (1994) e Phillip (1996) mostraram que um incremento no teor de umidade (diminuição da sucção) provoca um decréscimo no módulo de resiliência. Eles indicaram também a existência de uma relação não linear entre o módulo de resiliência e o teor de umidade (sucção). Phillip (1996) relata a importância de determinar corretamente o teor de umidade para previsão do módulo de resiliência.

Nesta pesquisa, procura-se estudar a influência da sucção (variações ambientais) no módulo de resiliência de diferentes solos compactados na umidade ótima e peso específico aparente seco máximo e, posteriormente, submetidos a ciclos de secagem e umedecimento que simulam as condições reais de variações ambientais.

Para o estudo de laboratório foram selecionados quatro solos com diferentes características geotécnicas, de ocorrência freqüente como materiais de subleitos de pavimentos no Rio Grande do Sul. A relação entre a sucção e o teor de umidade foi obtida através da técnica de papel filtro. Foram realizados ensaios de módulo de resiliência para solos compactados estaticamente nas condições ótimas, porém condicionados a umidades diferentes da umidade ótima através de processos de secagem e/ou umedecimento.

Os estudos de campo foram realizados na pista experimental da Área de Pesquisas e Testes de Pavimentos, localizada no Campus do Vale da UFRGS, Porto Alegre.

Nesta área foram construídas dez pistas experimentais, empregando-se um solo residual de comportamento laterítico em substituição ao subleito natural. Este solo é um dos solos em estudo neste trabalho. Os módulos de resiliência foram obtidos através de retroanálise de bacias de deformação e a sucção foi medida com tensiômetros (equipamento para monitorar a medida de sucção “in situ”), instalados em pontos de medida de deflexão do subleito.

Os módulos de resiliência obtidos em laboratório foram comparados com os de campo através da retroanálise, verificando a validade dos resultados encontrados e a influência da sucção.

## **1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA**

Os objetivos da pesquisa estão direcionados a estudar a influência da sucção no módulo de resiliência de solos de diferentes características geotécnicas comumente utilizados em subleitos de pavimentos. Os objetivos podem ser divididos em dois grupos: ensaios de laboratório e ensaios de campo.

### **1.2.1 Objetivos dos ensaios de laboratório**

Os objetivos a serem alcançados com os ensaios de laboratório estão descritos a seguir:

- Determinar a relação entre a sucção e o teor de umidade para solos compactados nas condições ótimas;

- Determinar o módulo de resiliência, para solos compactados nas condições ótimas, submetidos a diferentes trajetórias de secagem ou umedecimento;

- Determinar o módulo de resiliência para um solo específico compactado nas condições ótimas, submetido ao processo de secagem e umedecimento. Nas condições ótimas, foram realizadas medidas de variação da sucção durante o ensaio de módulo de resiliência;

- Relacionar a influência da sucção no módulo de resiliência para solos compactados nas condições ótimas estudadas; e,

- Definir o solo de melhores características como material de subleito de pavimentos entre os outros estudados.

### **1.2.2 Objetivos dos ensaios de campo**

Com a realização dos ensaios de campo busca-se atingir os seguintes objetivos:

- Medir a sucção em campo, com a utilização de tensiômetros: antes, durante e após a solicitação de pista experimental pelo equipamento simulador de tráfego, e devido à variação de chuvas e temperatura;

- Estudar os módulos de resiliência obtidos na pista experimental, através de retroanálise de bacias de deformação; e,

- Comparar os módulos de resiliência de campo, obtidos na pista experimental, com o módulo de resiliência obtido em laboratório, para o mesmo solo.

### **1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO**

Este trabalho de pesquisa foi desenvolvido em cinco capítulos.

O primeiro capítulo apresenta a introdução do tema e os objetivos a serem alcançados.

O segundo capítulo consiste em uma revisão bibliográfica sobre o conhecimento atual do comportamento de solos não saturados e do módulo de resiliência com a variação do teor de umidade.

O terceiro capítulo descreve a localização das jazidas dos materiais utilizados neste estudo e a metodologia adotada em laboratório e em campo para a condução da pesquisa. Refere-se também aos procedimentos seguidos em laboratório para obter amostras com características pré-definidas.

O quarto capítulo apresenta a análise dos resultados dos ensaios de laboratório tais como: caracterização dos solos, a relação entre a sucção e o teor de umidade, o comportamento resiliente dos solos após processos de secagem e ou umedecimento (diferentes valores de teor de umidade), o módulo de resiliência para execução do ensaio triaxial de carregamento repetido e a relação entre o módulo de resiliência e a sucção para os solos em estudo. Apresenta-se, ainda, os resultados de medidas de sucção realizadas em campo na pista experimental da Área de Pesquisas e Testes de Pavimentos bem como a relação entre os parâmetros estudados.

O quinto capítulo apresenta as conclusões dos resultados obtidos nesta pesquisa e as linhas futuras de estudo da relação entre a sucção e o módulo de resiliência dos solos.

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo sintetiza as informações bibliográficas sobre solos não saturados e módulo de resiliência. Apresenta-se, primeiramente, o parâmetro sucção dos solos não saturados, os fatores que o influenciam e métodos de medida de sucção. A seguir, descreve-se o comportamento resiliente dos solos não saturados, submetidos a variações das condições de umidade.

### 2.2 SOLOS NÃO SATURADOS

Durante muito tempo o estudo da Mecânica dos Solos direcionou-se aos solos saturados. A tecnologia e prática de engenharia geotécnica foi primeiramente desenvolvida nos climas temperados, desenvolvendo trabalhos exclusivamente a solos saturados (poro pressões positivas). Os solos não saturados formam uma categoria de materiais, os quais não aderem ao comportamento clássico da mecânica dos solos saturados (Fredlund e Rahardjo, 1993; Ridley, 1995; Burland e Ridley, 1996).

As condições ambientais em uma área são os principais fatores responsáveis pelo fato do solo ser não saturado. Observações de campo de muitas décadas mostraram que a variação de umidade com a profundidade, em climas áridos e semi-áridos (que compreendem

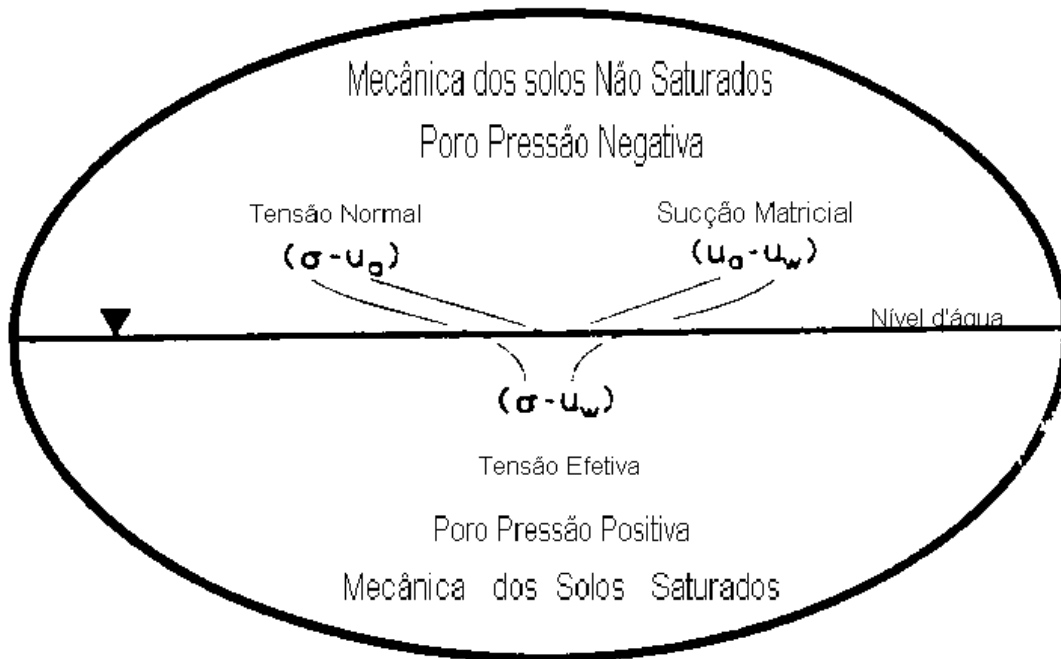


a mais de 1/3 da superfície da terra), não atinge a condição de saturação, podendo a distribuição da poro pressão ao longo da profundidade variar como resultado das alterações ambientais (Fredlund e Rahardjo, 1993).

A Mecânica dos solos pode ser caracterizada como mostra a figura 2.1, segundo Fredlund (1995).

A condição de não saturação pode ser encontrada em solos naturais ou artificiais (solos compactados), solos naturais de origem sedimentar (aluviais, colúvios e eólicos) e de origem residual (lateríticos e saprolíticos).

Em geral, os solos de subleito de pavimento situam-se acima do nível do lençol freático, assim como a maioria das estruturas projetadas em engenharia com solos compactados, apresentando, por tanto, comportamento de solos não saturados (Fredlund e Rahardjo, 1993).



$\sigma$  = Tensão total;  $u_a$  = Pressão de ar;  $u_w$  = Pressão de água

Figura 2.1 - Visualização da mecânica dos solos no mundo segundo Fredlund (1995).

Alonso et al. (1987), Balmaceda (1991), Fredlund e Rahardjo (1993), Gehling (1994) e Phillip (1996), descrevem que o comportamento dos solos não saturados é função do processo de formação, grau de saturação, distribuição granulométrica das partículas, peso específico seco, estado de tensões e de outros fatores.

Os processos de evaporação, evapotranspiração, precipitações e outras formas de variação do teor de umidade podem provocar variações no grau de saturação do solo (Fredlund, 1978; Toll, 1990; Fredlund e Rahardjo, 1993; Ridley, Burland e Monroe, 1995).

### **2.2.1 Sucção no Solo**

O primeiro grupo a reconhecer a importância da medida de sucção em engenharia civil foi o de Croney et al “Road Research Laboratory” em Londres, Inglaterra (1948, 1950), apud Krahn e Fredlund (1972). Eles empregaram essa terminologia (sucção) para ciência do solo e observaram o efeito da deficiência de umidade do solo no comportamento do mesmo.

Pesquisas posteriores (Croney e Coleman, 1960; Bishop, 1960; Aitchison, 1956; Jennings, 1960 apud Phillip, 1996), tentaram incorporar o termo de sucção na equação de tensões efetivas que pode ser usada para descrever a variação de volume e comportamento da resistência ao cisalhamento do solo.

Tuncer e Sabri (1979) definem que a sucção é a energia necessária para remover uma infinitesimal quantidade de água do solo. O termo sucção, ou potencial de água, é caracterizado como integrante de estado de tensões que leva em consideração os efeitos da superfície capazes de reter água dentro da estrutura de um solo. Segundo Blight (1965), o efeito da sucção em um solo não saturado é equivalente a uma pressão externa aplicada.

Marshall (1979) sugere que só duas componentes (sucção matricial e sucção osmótica) devem ser consideradas para definir a sucção total ( $S_t$ ) de um solo não saturado,

conforme mostra a equação 2.1. A equação 2.1. foi experimentalmente verificada por Krahn e Fredlund (1972):

$$S_t = S_m + S_o \quad (2.1)$$

onde:

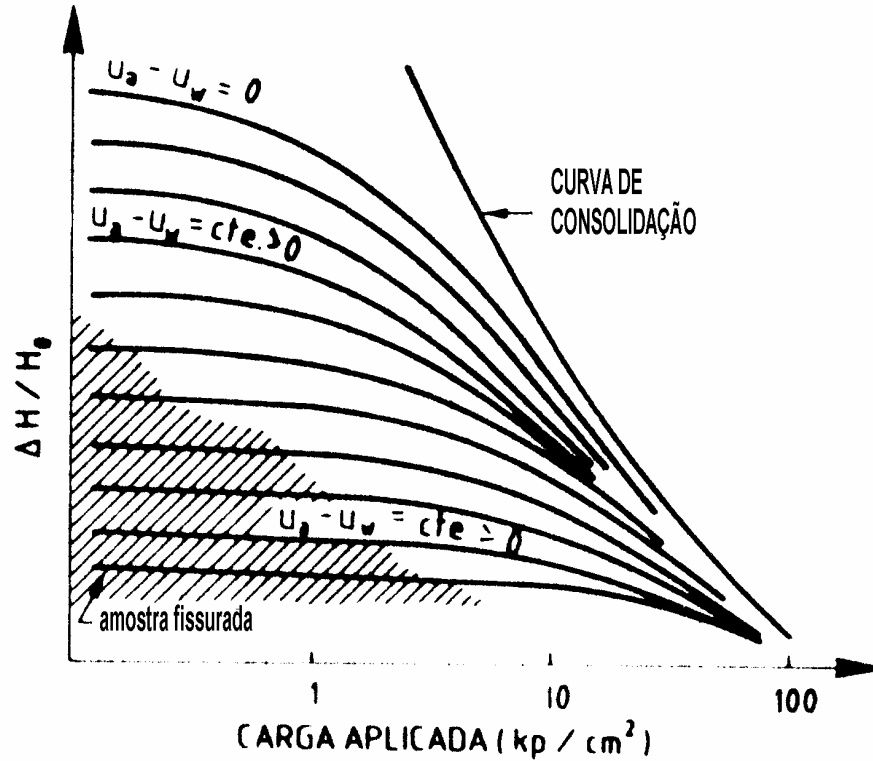
( $S_m$ ) - **Sucção matricial** - É a diferença entre a pressão do ar e a pressão de água ( $u_a - u_w$ ). É a pressão de água negativa desenvolvida na água do solo devido à capilaridade e forças de adsorção; e,

( $S_o$ ) - **Sucção osmótica** - Está associada à ocorrência de diferenças de concentração de solutos no solo. De acordo com Blight (1983), tal sucção não contribui significativamente para resistência ao cisalhamento do solo. No entanto, esta componente interfere no comportamento deformacional do solo.

Fredlund (1979), Edil e Motan (1984), Burland e Ridley (1996), entre outros, indicam que o comportamento dos solos não saturados depende basicamente da sucção matricial (estrutura do solo).

O estudo do comportamento deformacional e a resistência dos solos expansíveis e colapsíveis (solos não saturados) mediante variação da sucção, tem sido extensivamente estudados por Alonso et al (1987), Toll (1990), Balmaceda (1991), Fredlund e Rahardjo (1993), Gehling (1994), Ridley (1995) e Burland e Ridley (1996). Segundo estes autores, a sucção aumenta a rigidez e o grau de sobre consolidação do solo. Para pressões muito elevadas, as curvas de consolidação obtidas para diferentes sucções constantes e para um solo saturado, convergem até um valor de índice de vazios mínimo, que corresponde à máxima compacidade de consolidação conforme a figura 2.2 apresentada por Aitchison e Woodburn (1969) apud Balmaceda (1991).

O aumento da sucção pode produzir deformações plásticas irrecuperáveis, principalmente em solos argilosos expansivos e colapsíveis (Yong et al, 1971; Richards et al, 1984 e Josa et al, 1987).



$u_a$  = Pressão de ar;  $u_w$  = Pressão de água;

$\Delta H$  = Variação da altura da amostra;  $H_0$  = Altura inicial da amostra

**Figura 2.2 - Curvas de consolidação de um solo à sucção constante de acordo com Aitchison e Woodburn, apud Balmaceda (1991).**

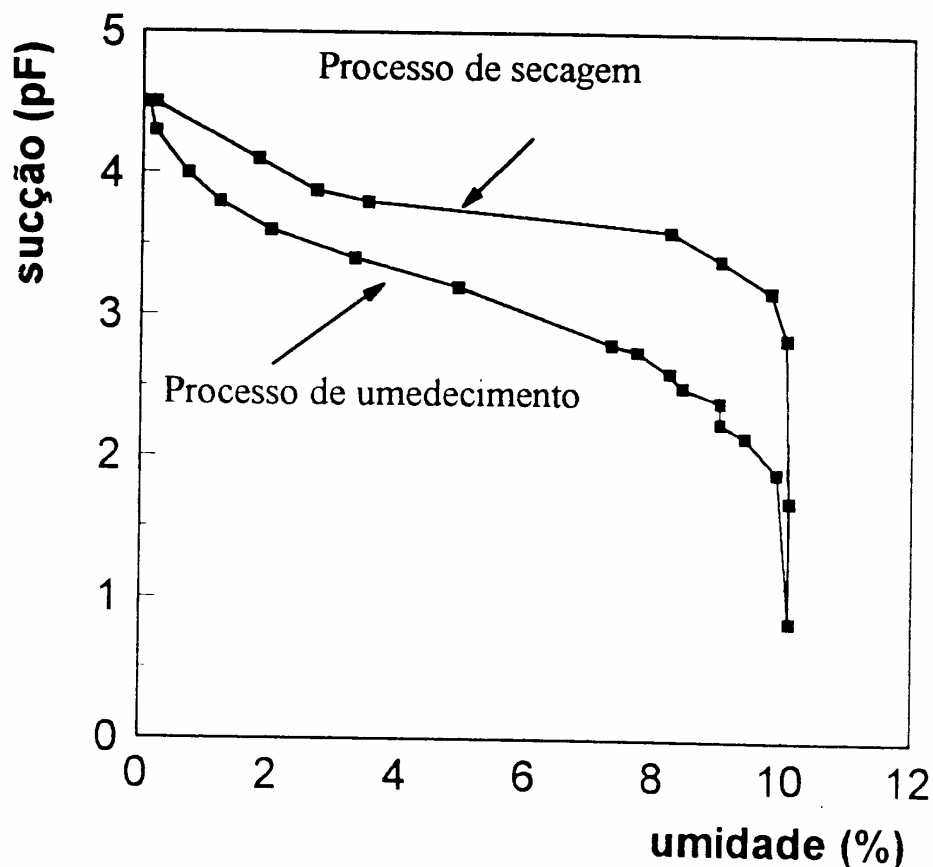
O efeito da sucção sobre a resistência ao cisalhamento do solo tem sido estudado a partir do conceito de tensões efetivas. A resistência ao cisalhamento aumenta com o incremento da sucção, o que corresponde a um aumento nas tensões efetivas.

### 2.2.2 Curva característica do solo

De acordo com Turcer e Sabri (1979), a curva característica representa a relação da sucção com a umidade ou grau de saturação. A sucção varia inversamente em relação à

umidade. A curva característica pode ser usada para estimar propriedades dos solos não saturados para análise de comportamento das propriedades mecânicas (Fredlund e Rahardjo, 1993).

Em alguns casos, a estrutura do solo consiste de arranjos irregulares de partículas de solo com diferentes tamanhos de poros (Balmaceda, 1991 e Phillip, 1996). Nos solos argilosos (poros menores), a sucção ou energia requerida, para começar a remoção d'água dos poros será maior que para os solos arenosos (poros maiores). Portanto, cada tipo de solo (areia, argila ou silte) apresenta uma única curva característica. Esta curva é uma propriedade do solo que determina a quantidade de água que um solo pode perder ou ganhar, através do parâmetro sucção (figura 2.3 apresentada por Croney et al. (1952), apud Krahn e Fredlund, 1972). A partir da curva característica, é possível correlacionar outras propriedades físicas tais como: permeabilidade, resistência ao cisalhamento e módulo de resiliência (Fredlund, 1996).

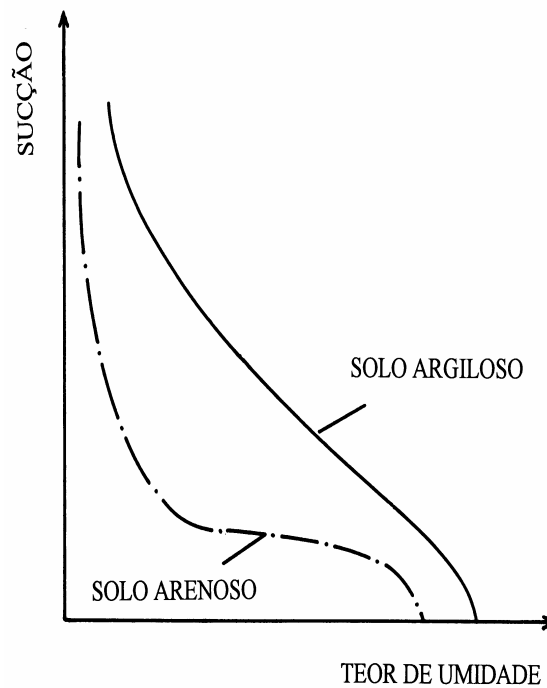


**Figura 2.3 - Curva característica de uma amostra calcárea de acordo com Croney et al. (1952), apud Krahn e Fredlund (1972).**

### 2.2.3 Fatores que influenciam a sucção

Campos et al. (1992) e Santos Neto e Carvalho (1995) descrevem que vários fatores influenciam a sucção do solo. Entre eles:

a) Tipo de solo - tanto no que se refere a aspectos granulométricos quanto mineralógicos, influem na sucção do solo. A figura 2.4 apresenta o efeito da textura do solo na sucção do mesmo (Marshall, 1979). Hillel (1971) apresenta curvas características para argilas e areias, descrevendo que nas argilas existe uma uniformidade no decréscimo da umidade com o aumento da sucção enquanto que nas areias a umidade na curva característica não é uniforme. Isto indica que os tamanhos dos poros na argila são mais uniformes e menores que na areia.

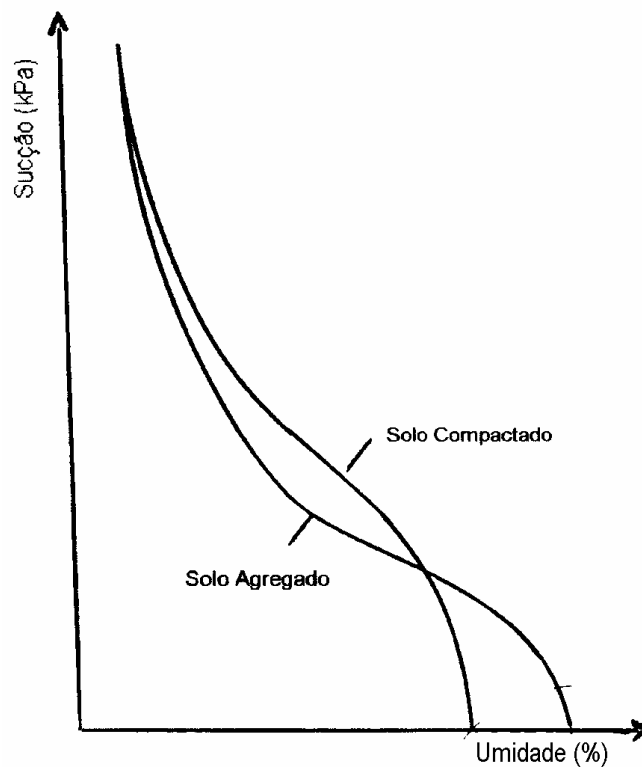


**Figura 2.4 - Efeito da textura na sucção do solo segundo Marshall (1979).**

A distribuição granulométrica influi principalmente nas forças capilares: quanto mais fino o solo, maiores as forças capilares (Fredlund e Rahardjo, 1993). Aitchinson (1961) estudou o efeito do mineral argílico na sucção do solo, constatando que este influi nas forças de adsorção.

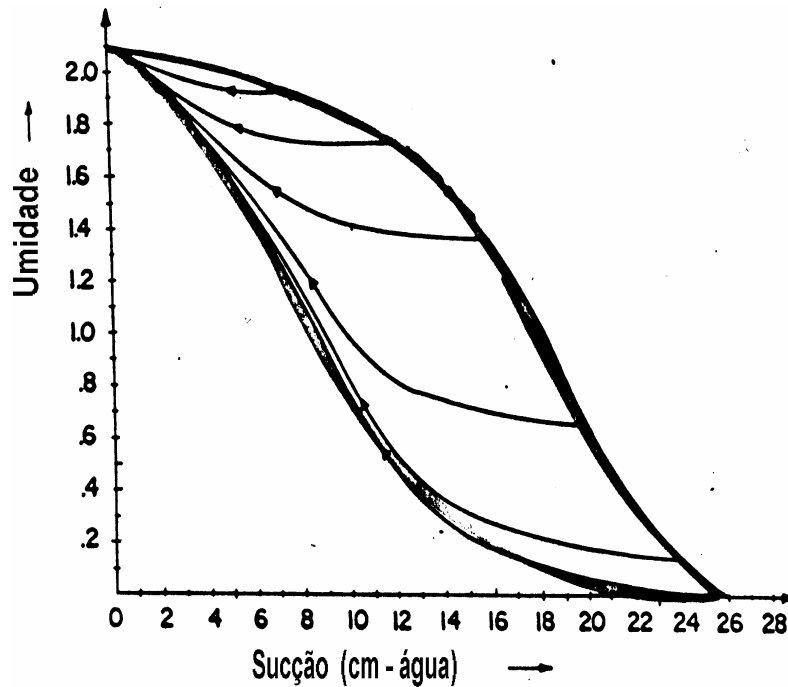
De uma maneira geral, nos solos arenosos, a sucção matricial está somente associada às forças capilares. A curva característica para este tipo de material é muito influenciada pela estrutura e distribuição granulométrica. Normalmente, em solos puramente arenosos, os poros são relativamente grandes e uniformes, sendo que uma pequena sucção é suficiente para dessaturar grande parte dos poros de maior diâmetro, provocando uma redução acentuada no teor de umidade. Em solos argilosos, além das forças capilares, as forças de adsorção são parcelas significativas da sucção matricial.

b) Estrutura do solo - a quantidade de energia ou sucção requerida para remover água de um solo depende do tamanho do poro e da tensão superficial entre as partículas do mesmo e das moléculas de água. No caso de se assumir que a tensão superficial seja constante, a sucção requerida para remover a água dependerá somente da estrutura do solo. A figura 2.5, apresentada por Hillel (1971), demonstra o efeito da estrutura na sucção do solo.



**Figura 2.5 - Efeito da estrutura na sucção do solo apresentado por Hillel (1971).**

c) Trajetória de umedecimento ou secagem - tem sido verificado experimentalmente que a curva característica de uma amostra de solo é dependente da trajetória de secagem ou umedecimento seguida, ou seja, a existência de histerese como mostra a figura 2.6 (Poulovassilis, 1962).



**Figura 2.6 - Efeito da histerese segundo Poulovassilis (1962).**

d) Temperatura - Campos et al. (1992), relataram que a temperatura reduz a tensão superficial na interface solo-água, reduzindo a sucção do solo. A existência de ar ocluso pode afetar a forma da curva característica, tendo em vista que o aumento de temperatura expandirá os poros com ar, alterando a estrutura do material.

#### **2.2.4 Métodos de medida e controle da sucção**

Existe um grande número de métodos para determinar a sucção em laboratório e campo. Estes métodos relacionam a sucção com o teor de umidade, ou grau de saturação, possibilitando a obtenção da curva característica do solo (Croney, 1977; Fredlund e Rahardjo, 1993; Marinho, 1995).



A avaliação dos métodos envolve precisão, custo de equipamentos, complexidade de procedimento e tempo para realização dos ensaios. Vários são os métodos para medir a sucção. Entre eles, pode-se citar: o método do papel filtro, tensiômetro e psicrômetros. A tabela 2.1, apresentada por Ridley e Wray (1995), resume alguns dos principais métodos de medida de sucção, componente de sucção medida, o seu intervalo de aplicação e tempo de resposta.

<b>Método</b>	<b>Componente de Sucção</b>	<b>Intervalo de Aplicação (kPa)</b>	<b>Tempo de Equilíbrio</b>
Psicrômetro	Total	100 - 7.500	Minutos
Papel Filtro (em contato)	Matricial	30 - 30.000	7 Dias
Papel Filtro (sem contato)	Total	400 - 30.000	7 - 14 Dias
Placa de Pressão	Matricial	0 - 1500	Dias
Tensiômetro	Matricial	0 - 100	Horas

**Tabela 2.1 - Métodos de medida de sucção apresentado por Ridley e Wray (1995).**

**A seguir é feita uma breve descrição destes métodos:**

#### **a) O método do Papel Filtro**

O papel filtro é utilizado para medir sucção matricial ou sucção total do solo. É um método de medida indireta da sucção segundo Fredlund e Rahardjo (1993) e Ridley (1994).

Marinho (1995) descreve que o método do papel filtro baseia-se no princípio de adsorção e equilíbrio que existe quando um material poroso com deficiência de umidade é posto em contato com o papel filtro com umidade menor. O método consiste em alcançar o equilíbrio entre o potencial de umidade do papel filtro e o potencial de umidade do solo.

Fredlund e Rahardjo (1993), Marinho (1995) e Santos Neto e Carvalho (1995) citam que no método do papel filtro o fluxo de água pode ocorrer de duas maneiras: por fluxo de vapor ou fluxo capilar. O fluxo capilar implica numa interação entre o papel filtro e a água do poro. O fluxo capilar ocorre através das partículas do solo e das fibras do papel filtro sem que a água perca continuidade. Neste caso, a sucção medida é a sucção matricial e o papel filtro é colocado em contato com a amostra. O fluxo de vapor ocorre quando as moléculas de água têm que escapar da água do poro vencendo as forças capilares no solo e eventualmente forças osmóticas que agem devido a presença de sais. Se o fluxo ocorre apenas através de vapor o papel filtro medirá sucção total. Neste caso o papel filtro é colocado sem contato com a amostra.

Para a medida da sucção matricial, o método consiste em colocar em contato uma amostra de solo com um pedaço de papel filtro. Uma vez colocado o papel filtro, a amostra é isolada do ambiente externo através de saco plástico hermeticamente fechado e levada a câmara úmida por um prazo mínimo de sete dias (o tempo de equilíbrio está associado ao tipo de contato). Os resultados experimentais indicaram que o fluxo de água do solo para o papel ocorrerá durante este prazo até atingir o equilíbrio (Fredlund e Rahardjo, 1993). Depois deste período determina-se a umidade do papel filtro. A sucção será conhecida através da curva de calibração do papel filtro utilizado. No caso de utilizar o papel filtro Whatman (Cat. No. 1442070 - 42 ), a equação 2.2 representa a curva de calibração deduzida de experimentos por Chandler et al (1992):

$$W \leq 47 \% \quad S = 10^{4.84 - 0.0622 * W} \text{ [kPa]} \quad (2.2)$$

$$W > 47 \% \quad S = 10^{6.05 - 2.48 \log W} \text{ [ kPa]}$$

onde:

W = umidade do papel filtro ( % ); e

S = sucção ( kPa ).

As principais vantagens e dificuldades do método foram apresentadas por Mcqueen e Miller (1968). A precisão do método está relacionada com o sistema de medida de umidade do papel. De acordo com Marinho (1995), o método do papel filtro em laboratório é facilitado pela simplicidade de se controlar diversos fatores que podem intervir nos processos de equilíbrio e medição da umidade do papel. Devido à simplicidade do método, a falta de cuidados na execução é a causadora de resultados equivocados. No campo, o método requer muito cuidado, principalmente no que se refere à variação de temperatura.

Sibley e Willians (1990) em seus estudos destacam o método do papel filtro por sua simplicidade, observando que a desvantagem deste, ainda está nos limites de sucções sobre o qual ele pode ser empregado satisfatoriamente. A sensibilidade do método pode ser otimizada, pela escolha cuidadosa de um material absorvente (neste estudo, millipore), para medir a sucção de interesse.

## **b) Placa de Pressão**

O equipamento consiste de uma câmara onde várias amostras são ensaiadas. A base da câmara é constituída por uma pedra de alta pressão de borbulhamento, sobre a qual são colocadas as amostras e é conectada a pressão atmosférica. Isto implica que a pressão de água ( $u_w$ ), é mantida nula, enquanto que a pressão de ar ( $u_a$ ) é aplicada no interior da câmara. A figura 2.7 apresenta o equipamento citado e seus componentes para determinação da retenção de água pelo solo. A faixa de sucção sob o qual este equipamento pode trabalhar depende da capacidade da pedra de alta pressão de borbulhamento utilizada.

A pedra de alta pressão de borbulhamento deve estar saturada durante o ensaio, garantindo assim uma coluna de água continua entre o corpo de prova e a câmara de água inferior (Campos et al., 1992). As amostras previamente saturadas são submetidas a uma diferença de pressão aplicada entre as faces opostas das amostras. A diferença de pressão faz sair a água das amostras, até que elas fiquem em equilíbrio com a diferença de pressão aplicada (Cauduro e Dorfman, 1992; Ridley e Wray, 1995).

O procedimento do ensaio descrito por Cauduro e Dorfman (1992) indica que devem ser impostos estágios de sucção, (ex.: 50, 100, 200 e 300 kPa, sucessivamente). Cada estágio permanece aplicado por um período de seis dias, tempo considerado necessário para equalização de umidade. No final de cada estágio, as amostras devem ser pesadas para definir-se a umidade por diferença de peso.

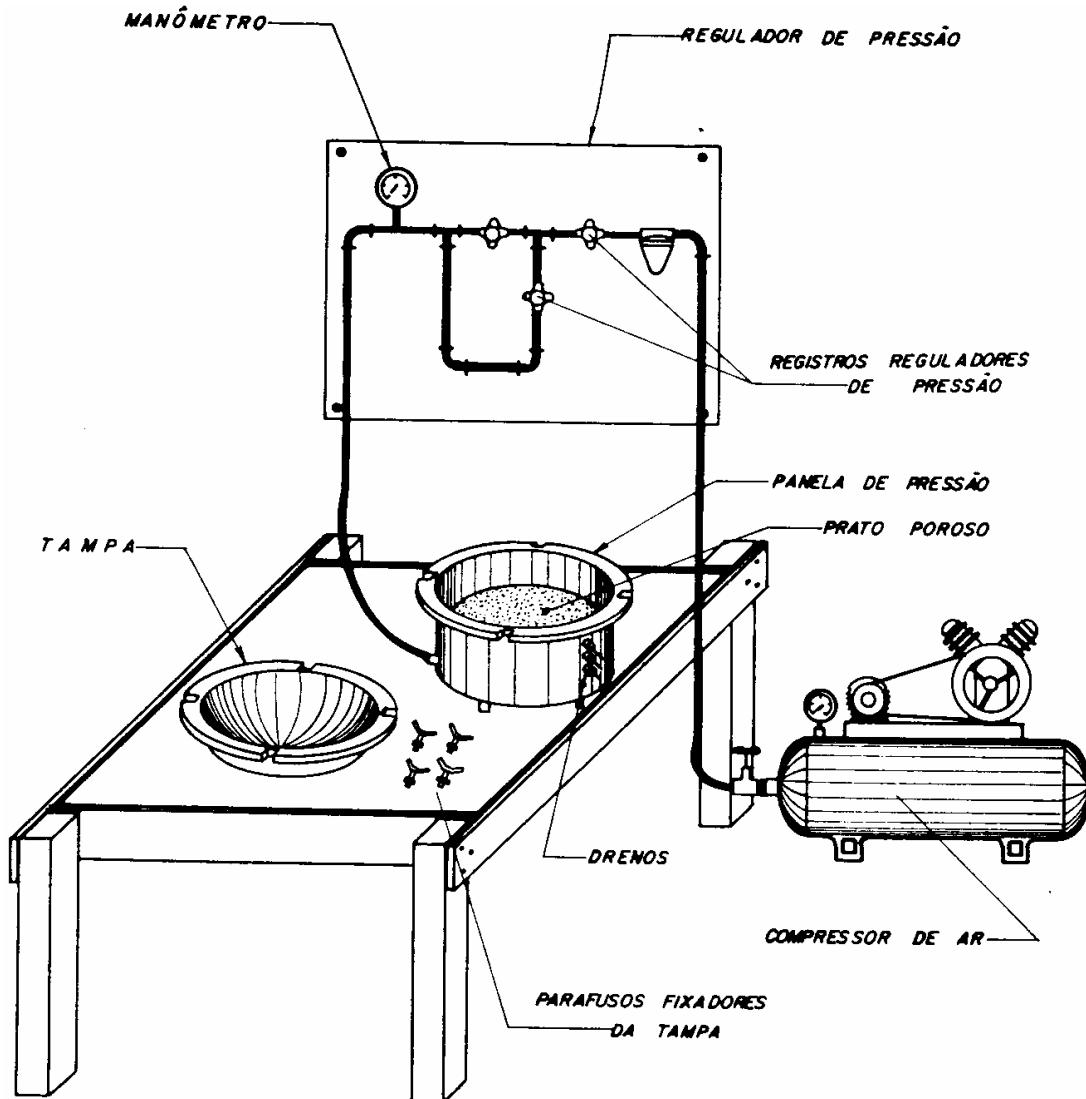
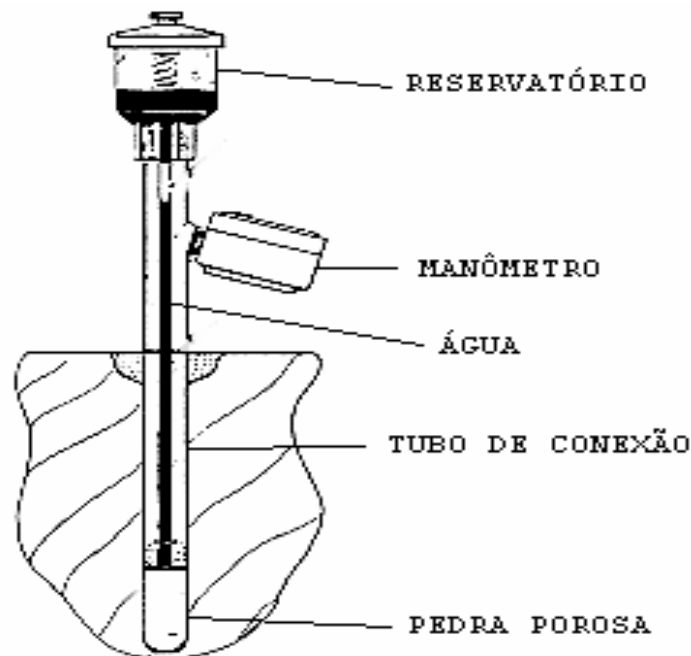


Figura 2.7 - Panela de pressão e seus componentes para determinação da retenção de água pelo solo segundo Cauduro e Dorfman (1992).

### c) Tensiômetros

Segundo Stannard (1992), o tensiômetro é um meio de transferir poro pressão negativa da água para o sistema de medida. É um método de medida direta de sucção matricial (Fredlund e Rahardjo, 1993).

Detalhes da preparação, instalação e uso dos tensiômetros são apresentados por Stannard (1992). O equipamento geralmente é composto por uma pedra porosa de alta pressão de borbulhamento, tubo de conexão, água e um sistema de medida de pressão. A água dentro do sistema tem a mesma pressão negativa com a água dos poros do solo. Deve-se ter cuidado na instalação do equipamento para obter bom contato entre a pedra porosa e o solo. A vantagem é que ele requer pequeno período para alcançar o equilíbrio. Um esquema do convencional tensiômetro “JET FILL”, da Soilmoisture Equipment Corporation, é representado na figura 2.8. O tensiômetro tem o diâmetro do tubo de conexão de aproximadamente 20 mm e comprimentos variados.



**Figura 2.8-** Esquema detalhado do equipamento do tensiômetro “JET FILL” da Soilmoisture Equipment Corporation.

A máxima sucção medida em um tensiômetro é de aproximadamente  $S = 90$  kPa, devido a possibilidade de cavitação da água no tensiômetro (Fredlund e Rahardjo, 1993).

Existem vários tipos de tensiômetros diferindo apenas na forma de medir a poro pressão negativa da água no tubo de conexão (manômetro de água-mercúrio ou transdutor de pressão elétrico).

### 2.3 MÓDULO DE RESILIÊNCIA

A tendência atual da Mecânica dos Pavimentos é considerar o pavimento como um sistema de várias camadas elásticas, dimensionando a estrutura de modo que a repetição de esforços não cause, em curto prazo, a ruptura por fadiga dos materiais. Cada camada é constituída de um material diferente, responsável em desempenhar uma função particular. Materiais com maior resistência são convencionalmente situados próximo à superfície distribuindo os esforços determinados pelo tráfego de forma uniforme e diminuindo as tensões e deflexões no subleito.

O desempenho de pavimentos depende das características do comportamento tensão-deformação dos materiais de cada camada bem como da frequência, da intensidade de tráfego e das condições ambientais e regionais.

Segundo Medina e Preussler (1980), a análise de tensões e deformações de estruturas de pavimentos como sistemas multicamadas e a aplicação da teoria da elasticidade deram ensejo a considerações racionais das deformações no dimensionamento de pavimentos. Os parâmetros elásticos, ou resilientes dos solos são obtidos em ensaios de carga cíclicas. Nestes ensaios, os solos são submetidos a cargas repetidas de duração e frequência comparáveis as que ocorrem nos pavimentos.

O módulo de resiliência é o parâmetro que caracteriza o comportamento elástico dos materiais sobre carregamento cíclico. Em laboratório, os parâmetros elásticos podem ser

determinados através de ensaios de carga cíclica (Seed et al., 1967; Preussler, 1978 e Svenson, 1980). De acordo com Carter et al. (1982) apud Phillip (1996), o comportamento dos solos submetidos a carregamento cíclico é complexo. Em campo, o módulo de resiliência pode ser obtido através de retroanálise das medidas de deflexão.

Por definição o módulo de resiliência é determinado pela seguinte equação (2.3);

$$M_r = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad (2.3)$$

onde:

$M_r$  - Módulo de resiliência;

$\sigma_d$  - Tensão desvio aplicada repetidamente; e ,

$\varepsilon_r$  - Deformação específica axial recuperável correspondente a um número particular de repetições.

### 2.3.1 Fatores que influenciam o módulo de resiliência

De acordo com estudos de Seed et al. (1967), Medina e Preussler (1980); Svenson (1980) e Li e Seling (1994) os seguintes fatores podem afetar o comportamento resiliente dos solos: a) intensidade de tensões; b) razão de tensões principais ( $\sigma_1/\sigma_3$ ); c) número de repetições da tensão-desvio; d) história de tensões; e) duração e frequência de aplicação da tensão-desvio; f) tipo de agregado; g) percentagem de material que passa na peneira 200; h) densidade e umidade de compactação; i) grau de saturação e j) método de compactação.

#### a) Efeito do número de repetições da tensão-desvio

As medidas de módulo de resiliência só representam o real comportamento de deformação do material se ele é tomado após um grande número de aplicações de carregamento (Phillip, 1996). O módulo de resiliência reduz com o número de repetições de

tensão desvio (Fredlund et al. 1977; Seed et al., 1967; Brodsky, 1988). As variações irregulares do módulo de resiliência obtidas em laboratório para pequeno número de repetições são atribuídas aos contatos irregulares entre a amostra de solo, o cabeçote ('top cap') e a base da célula triaxial.

No caso de solos saturados, cada aplicação da tensão desvio pode causar um acréscimo ou decréscimo na poro pressão da água. Estas variações ocorrem devido às condições do material e do valor das tensões aplicadas. Os estudos de laboratório têm demonstrado que em amostras saturadas, ou próximas à saturação, os ensaios de longa duração podem provocar variações na poro pressão da água e, conseqüentemente, variações no módulo de resiliência. A variação da poro pressão da água é parcialmente dissipada por ocasião da remoção da tensão-desvio, e será totalmente nula se houver um intervalo de tempo suficiente entre duas aplicações sucessivas. A drenagem completa não ocorrerá se as tensões são repetidas a curtos intervalos, resultando uma variação acumulativa de poro pressão da água.

### **b) Efeito da duração e freqüência do carregamento**

O tempo de atuação da carga repetida é estabelecido em função da velocidade dos veículos e do ponto no interior dos pavimentos onde se deseja calcular o módulo de resiliência. A freqüência de aplicação é função das condições de tráfego da estrada em estudo. O efeito da duração do carregamento depende do intervalo de aplicações do mesmo.

A figura 2.9 apresentada por Preussler (1978) demonstra o efeito da tensão-desvio no módulo de resiliência. Foram ensaiados três corpos de prova com o mesmo peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ) e diferentes ciclos de carregamento. Seed et al. (1967) atribuem que o aumento no módulo de resiliência com o aumento da freqüência de carregamento depende do teor de umidade e do peso específico aparente seco. O fato é que o módulo de resiliência é maior porque o solo tem uma componente viscosa que exige certo tempo para se manifestar. Se o carregamento é rápido, as deformações medidas são menores, então, o módulo de resiliência é maior.



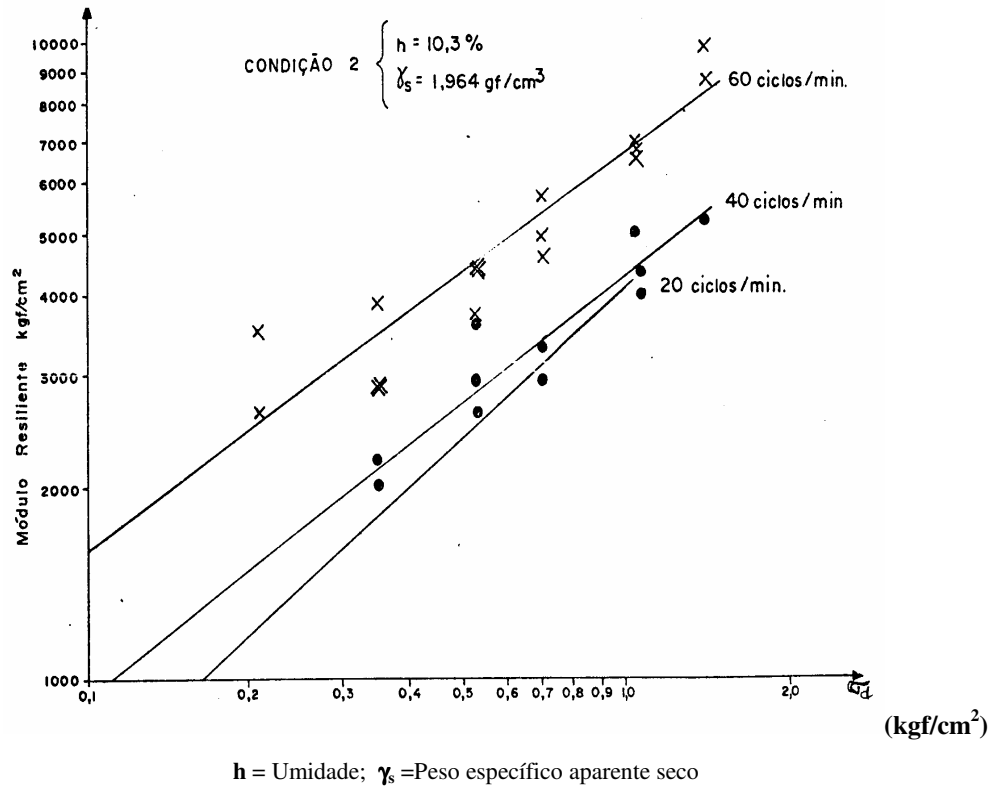


Figura 2.9 - Efeito da tensão desvio e freqüência do carregamento no módulo de resiliência de acordo com Preussler (1978).

c) Peso específico aparente seco

Estudos realizados demonstraram que o módulo de resiliência pode aumentar quando o peso específico aparente seco aumenta, como mostra a figura 2.10 (Li e Seling, 1994). Isto ocorre no ramo seco de compactação sem que haja contato com a água.

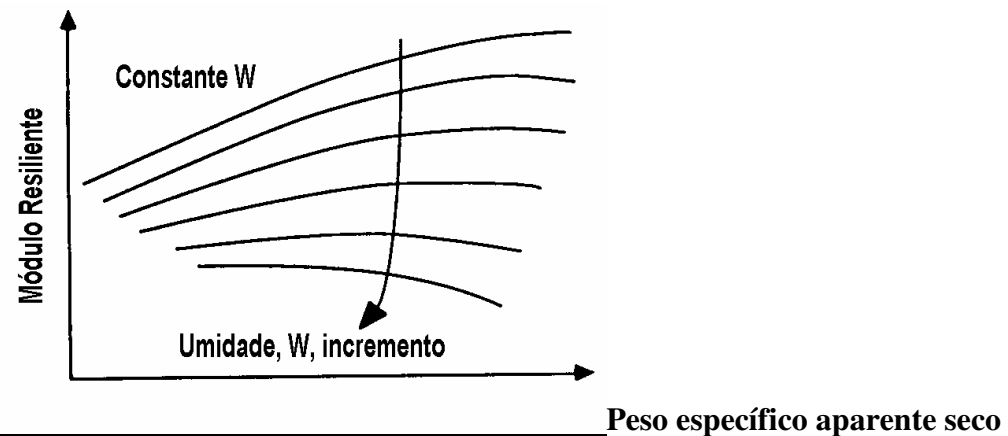


Figura 2.10 - Influência do peso específico aparente seco no módulo de resiliência segundo Li e Seling (1994).

#### **d) Influência da umidade no módulo de resiliência**

A condição de umidade no subleito dependerá do clima da região em estudo, do equilíbrio entre a precipitação local e a evapotranspiração, das condições de drenagem e da permeabilidade do solo.

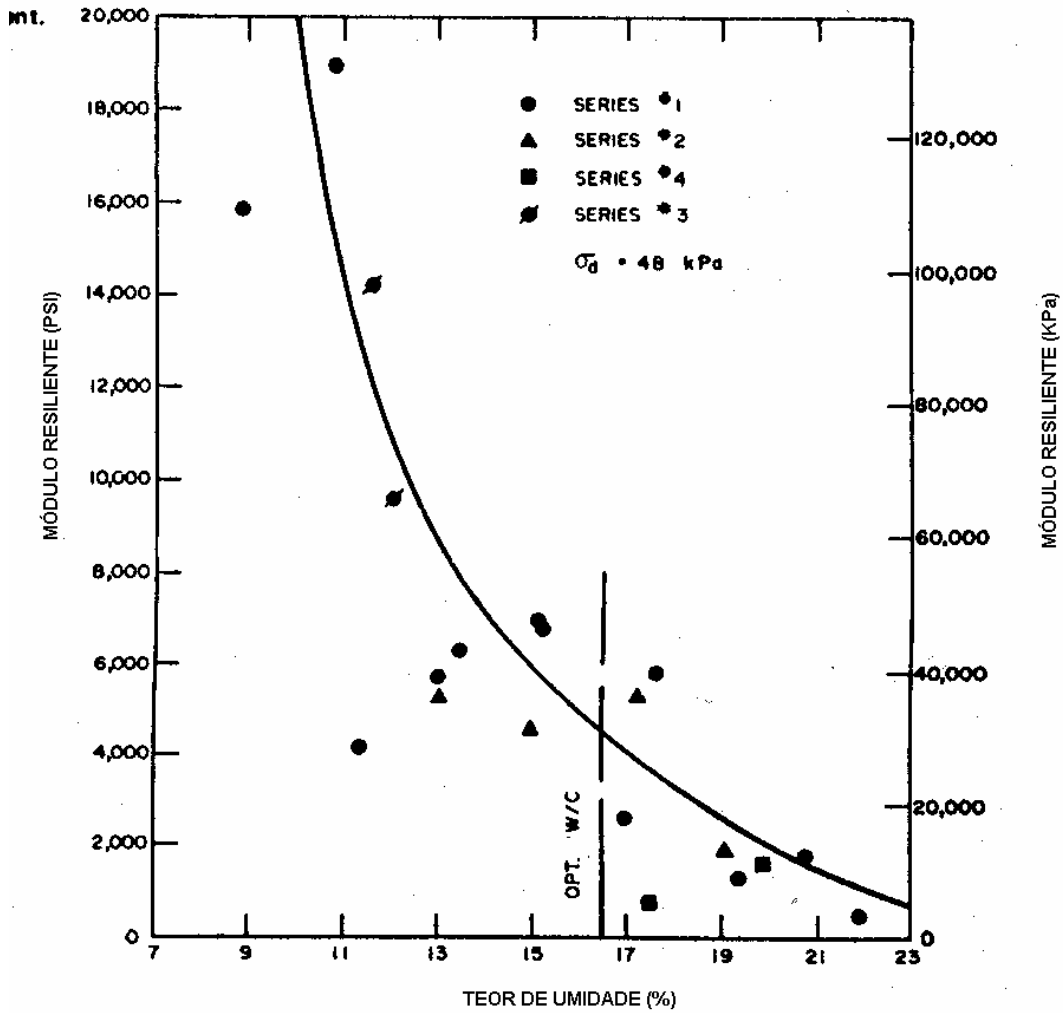
O grau de saturação do solo do subleito pode sofrer alterações com o tempo. Estas alterações são provocadas pelos fatores externos, tais como: períodos intensos de chuvas, infiltração de água superficial ou subterrânea e ressecamento do solo (Russan e Coleman, 1961).

Inúmeros estudos sobre a influência da variação da umidade na variação do módulo de resiliência foram realizados por Russan e Coleman (1961); Fredlund et al. (1975); Preussler (1978); Svenson (1980); Haupt (1980); Jin et al. (1994); e Phillip (1996). Os resultados apresentaram uma diminuição do módulo de resiliência das amostras compactadas com o aumento do grau de saturação para diferentes condições de peso específico aparente seco. Entretanto, a magnitude desta variação depende do valor das tensões confinantes utilizadas no ensaio, principalmente para solos granulares. As amostras com umidades equivalentes e energias de compactação diferentes apresentaram módulo de resiliência muito semelhante, tendo como fator preponderante o teor de umidade. Fredlund et al. (1975) executaram ensaios triaxiais de carga repetida e apresentaram os resultados de módulo de resiliência em função do teor de umidade de acordo com a figura 2.11.

Preussler (1978), em seus ensaios triaxiais de carga repetida, obteve pequenas deformações permanentes e recuperáveis para amostras ensaiadas no ramo seco da curva de compactação. Em amostras compactadas a umidades maiores que a umidade ótima, as deformações permanentes cresceram consideravelmente, atingindo valores até 10 vezes maiores que os obtidos para ramo seco.

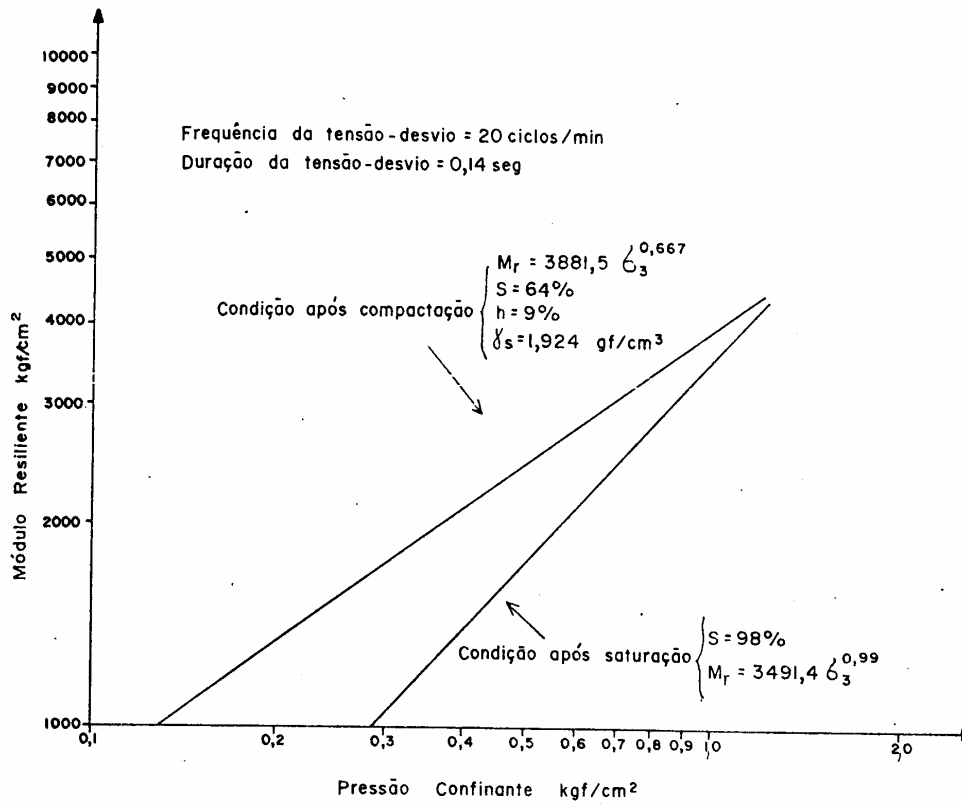
Segundo Preussler (1978), observa-se claramente que para a mesma tensão confinante, o módulo de resiliência é maior, quanto menor o nível de saturação. Isto é mais

evidente à baixa tensão confinante. A figura 2.12 apresenta resultados de ensaios de dois corpos de prova com o mesmo peso específico, porém com grau de saturação diferente.



$\sigma_d$  = Tensão desvio; OPT. w/c = Umidade ótima

Figura 2.11 - Relação de módulo de resiliência e teor de umidade obtida por Fredlund et al. (1975).

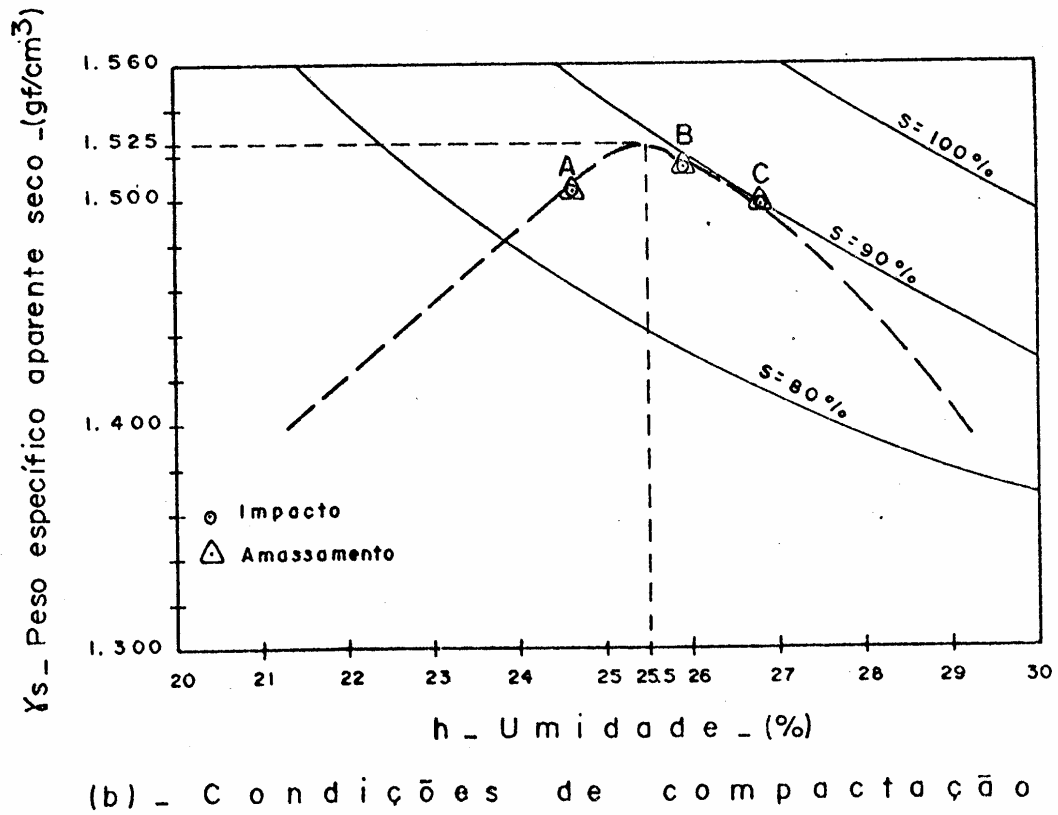


$M_r$  = Módulo de resiliência;  $S$  = Saturação;  $h$  = Teor de umidade;  $\gamma_s$  = Peso específico aparente seco

**Figura 2.12 - Influência do grau de saturação no módulo de resiliência segundo Preussler (1978).**

**e) Método de compactação**

Seed e Chan (1959), citado por Coffman e Mitchell (1967), descrevem a influência do método de compactação nas propriedades do solo. Seed et al. (1961), citado por Svenson (1980), mostraram que a deformação resiliente de amostras de uma argila varia com o teor de umidade e com o método de compactação. As figuras 2.13.(a, b, c e d) mostram os resultados obtidos pelos autores com relação aos métodos de compactação: amassamento e estático. Svenson (1980) apresenta o efeito do método de compactação por impacto e por amassamento em três condições (A, B e C) de compactação, conforme a figura 2.13(a).

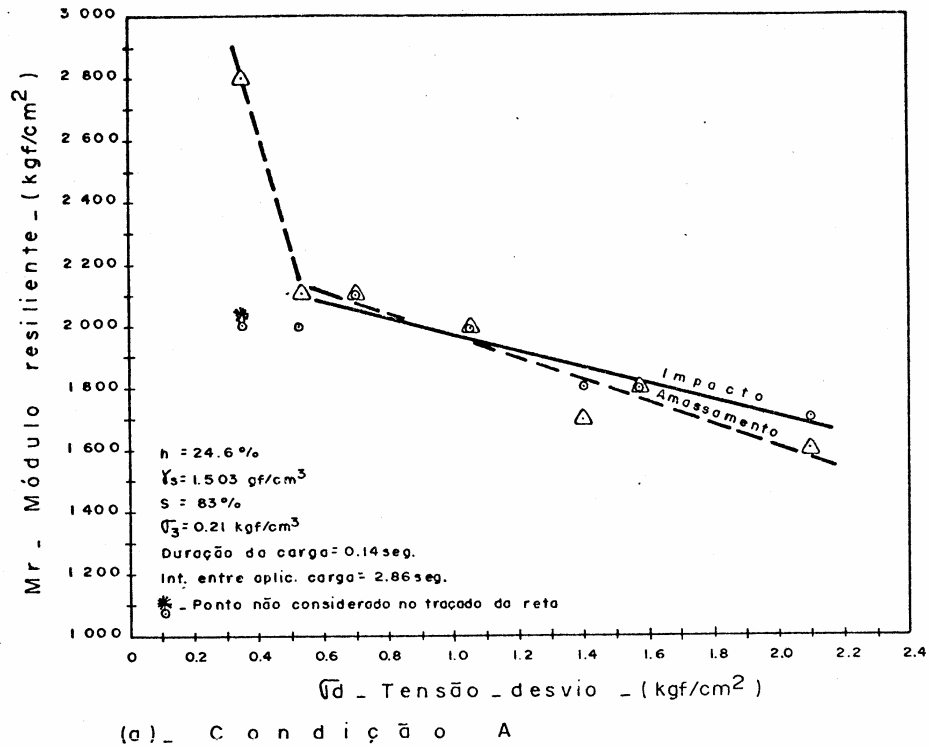


S = Saturação

**Figura 2.13.(a) - Condições de compactação por diferentes métodos de compactação (A, B e C) de acordo com Svenson (1980).**

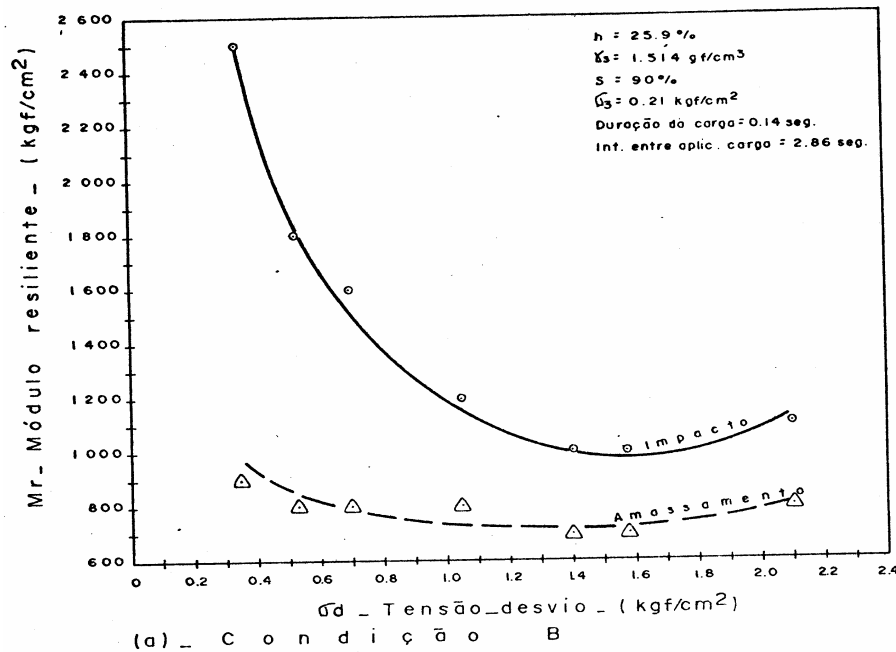
Na condição “A”, o solo foi compactado com teor de umidade abaixo do teor ótimo (ramo seco) e peso específico aparente seco menor que o peso específico aparente seco máximo. O valor do módulo de resiliência para condição “A” (figura 2.13(b)) se manteve praticamente o mesmo para os diferentes métodos de compactação. Com o aumento da tensão desvio, ocorreu uma redução um pouco mais acentuada no módulo de resiliência de amostras compactadas por amassamento.

Para a condição “B”, o solo foi compactado com teor de umidade acima do teor ótimo ( $\pm 0,5\%$ ) e peso específico aparente seco menor que o peso específico aparente seco máximo. O valor de módulo de resiliência das amostras compactadas por impacto foi maior que por amassamento, sendo que para baixas tensões desvio a diferença é mais acentuada (figura 2.13(c)).



$h$  = Teor de umidade;  $\gamma_s$  = Peso específico aparente seco;  $S$  = Saturação;  $\sigma_3$  = Tensão confinante

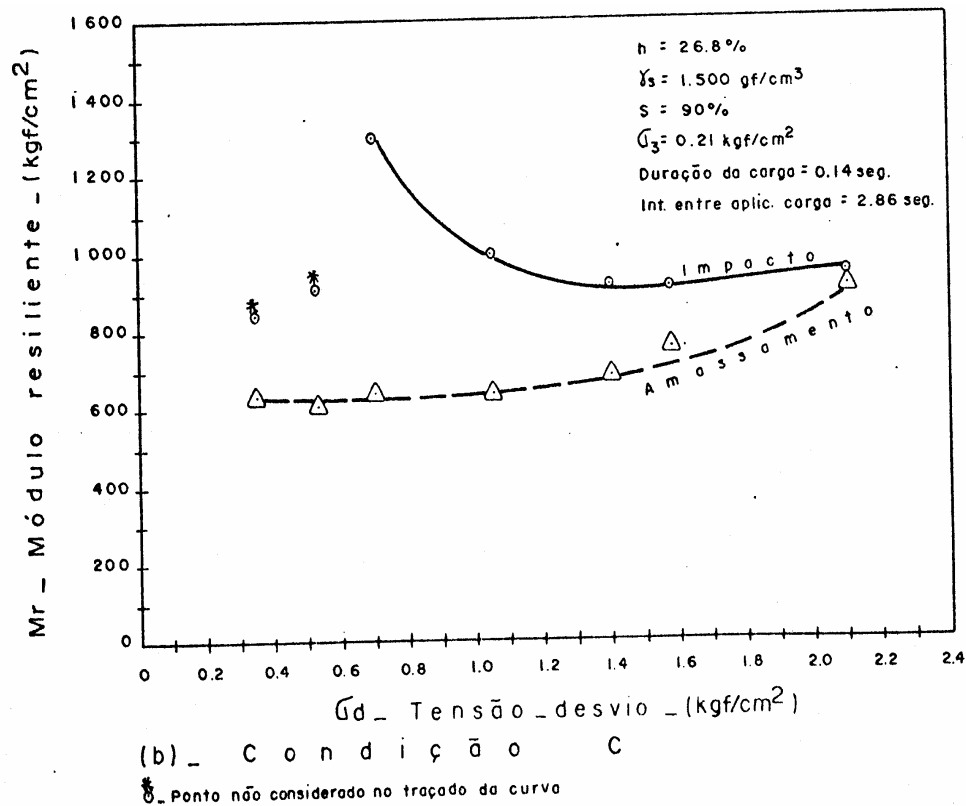
Figura 2.13.(b) - Efeito do método de compactação na relação entre módulo de resiliência ( $M_r$ ) e tensão desvio ( $\sigma_d$ ) na condição "A", de acordo com Svenson (1980).



$h$  = Teor de umidade;  $\gamma_s$  = Peso específico aparente seco;  $S$  = Saturação;  $\sigma_3$  = Tensão confinante

Figura 2.13.(c) - Efeito do método de compactação na relação entre módulo de resiliência ( $M_r$ ) e tensão desvio ( $\sigma_d$ ) na condição "B", de acordo com Svenson (1980).

Para a condição “C”, o solo foi compactado com teor de umidade acima do teor ótimo ( $\pm 1,5\%$ ) e peso específico aparente seco menor que o peso específico aparente seco máximo (valor menor do que para condição B). O valor de módulo de resiliência das amostras compactadas por impacto foi maior que por amassamento. Para elevados valores de tensão desvio, os valores de módulo de resiliência tenderam a valores iguais (figura 2.13(d)). Comparando-se as últimas três figuras indicadas, pode-se dizer que o aumento do teor de umidade provocou redução nos valores de módulo de resiliência.



$h$  = Teor de umidade;  $\gamma_s$  = Peso específico aparente seco;  $S$  = Saturação;  $\sigma_3$  = Tensão confinante

**Figura 2.13.(d) - Efeito do método de compactação na relação entre módulo de resiliência ( $M_r$ ) e tensão desvio ( $\sigma_d$ ) na condição “C”, de acordo com Svenson (1980).**

Em solos coesivos, todos os métodos de compactação produzem deformações cisalhantes pequenas no ramo seco. No ramo úmido, o método de compactação por amassamento causa maiores deformações cisalhantes (maior grau de dispersão) e maiores poro-pressões no ramo úmido. A compactação por impacto resulta deformações cisalhantes

ligeiramente menores do que as produzidas por amassamento (Seed e Chan, 1959 citados por Coffman e Mitchell, 1961 e Svenson, 1980).

### **2.3.2 Relação entre módulo de resiliência e sucção do solo**

Vários estudos relacionados com módulo de resiliência e sucção do solo tem sido objeto de investigação, dentre eles citam-se: Sauer e Monismith (1968); Shackel (1973); Fredlund et al. (1977); Tuncer e Sabri (1979); Motan e Edil (1982) e Phillip e Cameron (1995).

Sauer e Monismith (1968) estudaram a influência da sucção no módulo de resiliência de um depósito glacial através de ensaios de campo e laboratório. Segundo eles, os valores de módulo de resiliência diminuem para as amostras compactadas estaticamente no ramo úmido (sucções menores) e aumentam para as amostras compactadas no ramo seco (sucções maiores).

Edil e Motan (1979) realizaram ensaios triaxiais de carregamento repetidos com medidas de variação de sucção através de psicrômetros em solos compactados na umidade ótima e  $\pm 2\%$  da umidade ótima. Os autores observaram que quanto maior a sucção maior o módulo resiliente, até alcançar um valor crítico. A partir deste valor, o módulo de resiliência decresce para valores de sucção maiores (vide figura 2.14).

Phillip (1996) apresentou resultados de módulo de resiliência e sucção para solos expansivos compactados estaticamente com diferentes teores de umidade. Segundo ele, um aumento da sucção é acompanhado por um aumento do módulo de resiliência até alcançar um valor máximo. A partir deste valor um acréscimo na sucção não corresponde a um aumento no módulo de resiliência (vide figura 2.15).



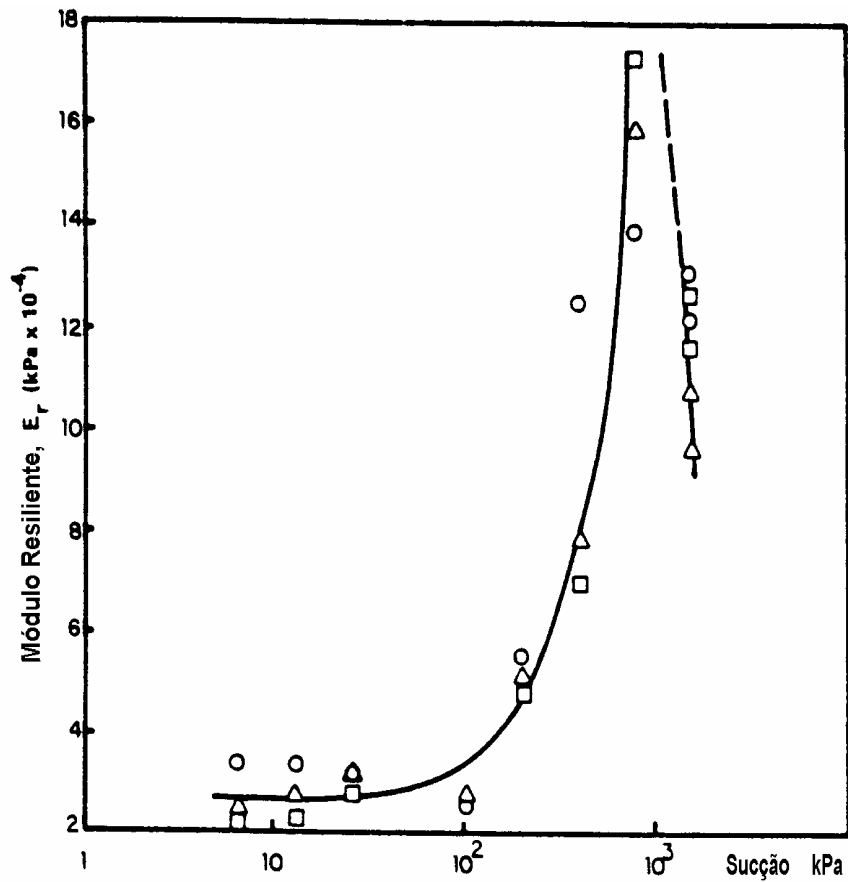


FIGURA 2.14 - Influência da sucção no módulo de resiliência, segundo Edil e Motan (1979).

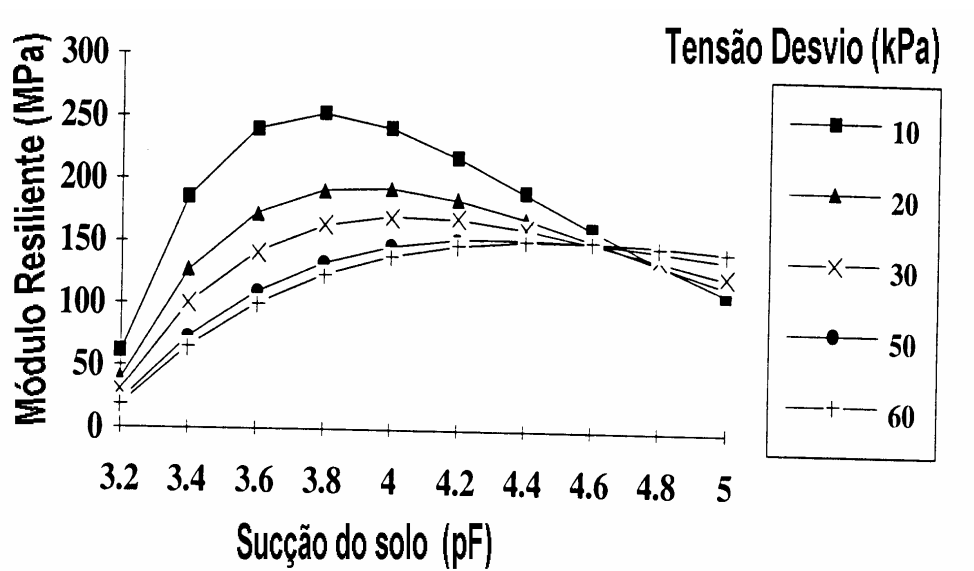


FIGURA 2.15 - Variação do módulo de resiliência com a sucção e tensão desvio para tensão confinante constante (10kPa), segundo Phillip (1996).

Fredlund et al. (1975), Thornton e Elliott (1987), Jim et al. (1994), Li e Seling (1994) e Phillip (1996) relacionaram resultados de módulo de resiliência com sucção em ensaios triaxiais de carga cíclica. Eles observaram a não linearidade entre estes parâmetros. Gerrard et al. (1975) também observaram a relação não linear entre o módulo de resiliência e a sucção. Os resultados encontrados são discutíveis pelos dados limitados e o fato dos valores de módulo de resiliência terem sido determinados em condições estáticas. Fredlund et al. (1975) realizaram ensaios de carga cíclica e, utilizando a curva característica de teor de umidade e sucção, definiram uma relação entre módulo de resiliência e sucção (figura 2.11). Os referidos autores indicaram que o módulo de resiliência é função de três variáveis para análise de estado de tensões e que podem ser expressas da seguinte forma (equação 2.4):

$$M_r = f(\sigma_3 - u_a) (\sigma_1 - \sigma_3) (u_a - u_w) \quad (2.4)$$

onde :

$(\sigma_3 - u_a)$  = tensão de confinamento;

$(\sigma_1 - \sigma_3)$  = tensão desvio;

$(u_a - u_w)$  = sucção;

$u_a$  = pressão do ar; e

$u_w$  = pressão da água.

## METODOLOGIA DE ESTUDO

### 3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo descrevem-se os procedimentos e equipamentos de ensaios de laboratório e de campo utilizados durante o desenvolvimento desta dissertação, bem como os solos selecionados para o estudo.

Foram escolhidos quatro solos de diferentes características geotécnicas, frequentemente utilizados como subleito de pavimentos no Estado do Rio Grande do Sul. Os solos estudados serão identificados no decorrer do trabalho como: solo **A**, solo **B**, solo **C** e solo **D**.

O solo **A** encontrado no município de Viamão, foi utilizado como reforço de subleito em pistas experimentais na Área de Pesquisas e Testes de Pavimentos no Campus do Vale da UFRGS. Para este solo foram realizados ensaios em laboratório e campo, os demais solos (**B**, **C** e **D**) foram estudados somente em laboratório. O solo **B** encontrado no município de São Leopoldo (RS) constitui o subleito de pavimentos da região e tem sido extensivamente estudado na UFRGS como solo estabilizado e cimentado. Os solos **C** e **D** são provenientes das regiões do trecho Vila Oeste e do trecho Estreito São José do Norte respectivamente.

### 3.2 PROCEDÊNCIA DOS SOLOS

A localização das jazidas dos solos em estudo está descrita a seguir e a figura 3.1 apresenta o mapa de localização das mesmas:

O solo **A** é proveniente de uma jazida situada no km 25 + 350 da estrada RS/118, à margem esquerda (sentido Gravataí-Viamão). O material tem coloração vermelha e foi extraído de uma profundidade compreendida entre 0,70m e 1,50m, tem coloração vermelha. Este solo foi utilizado como reforço de subleito das pistas experimentais construídas na Área de Pesquisas e Testes de Pavimentos no Campus do Vale da UFRGS.

O solo **B** é originário de uma jazida em Vila Scharlau, junto a rodovia RS/240 no município de São Leopoldo (RS). Este solo apresenta coloração rozeada ao longo de todo perfil da jazida. Nos estudos de Nuñez (1991), este material foi analisado para ser empregado em pavimentação após estabilização com cal. Martins (1994) em sua dissertação de mestrado analisou o efeito da cimentação deste solo. Os autores salientam a homogeneidade das propriedades características do solo (textura, limites de consistência e densidade real dos grãos) ao longo do horizonte C da jazida.

O solo **C** é proveniente da jazida localizada no km 17 + 260 (LD), do trecho Vila Oeste e do Entroncamento RS/129. A jazida apresenta horizontes A, B e C bem definidos. O horizonte “A” é formado por uma camada vegetal, o horizonte “B” apresenta com um solo de coloração vermelha que é utilizado como reforço de subleito e o horizonte “C” é constituído de solos variegados.

O solo **D** é proveniente da jazida localizada na RS/101 do trecho Estreito - São José do Norte. Estes materiais são constituídos por planossolos com substratos de sedimentos quaternários pleistocênicos da Formação Chuí. Apresentam seqüência de horizontes “A”, “B” e “C” bem diferenciados. O material estudado é constituinte do horizonte “B” de coloração amarelo-avermelhada (característica de cimentação por óxidos de ferro e manganês). Do ponto de vista geotécnico, os solos arenosos amarelados são os que apresentam melhores condições para utilização em pavimentos, especialmente como solo-cimento.

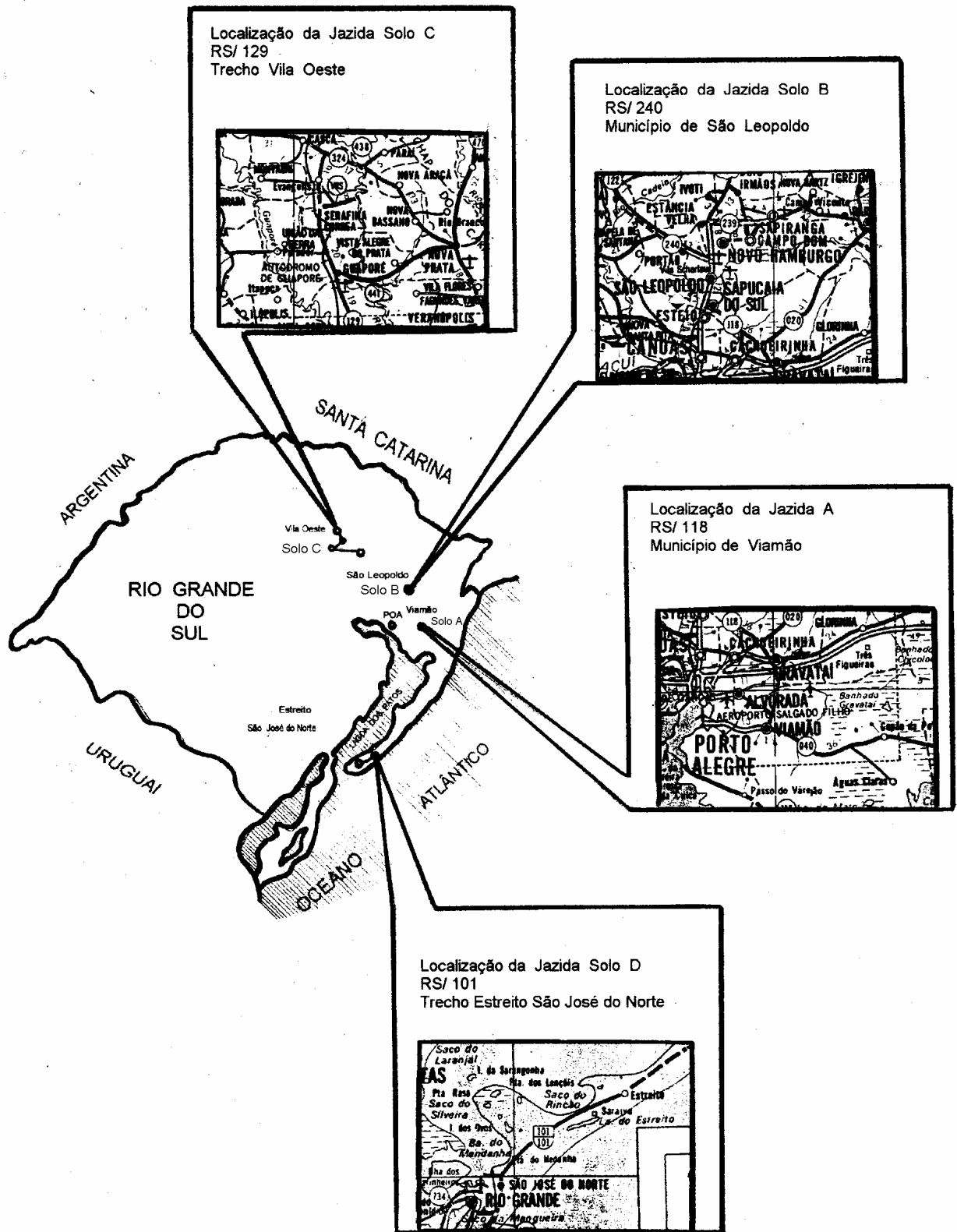


FIGURA 3.1 - Mapa de localização das jazidas dos solos em estudo.

### 3.3 ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Amostras deformadas dos solos em estudo foram levadas à laboratório. Os procedimentos e equipamentos utilizados neste estudo estão descritos a seguir.

#### 3.3.1 Caracterização dos solos em estudo

Realizou-se uma série de ensaios à fim de caracterizar o comportamento dos solos em estudo. Os ensaios realizados foram:

a) Análise Granulométrica por sedimentação foi realizada com base no método da NBR 7181/84 e utilizou-se o hexa-metafosfato de sódio como defloculante, de forma a obter-se a real porcentagem de finos na massa do solo. As porcentagens de materiais retidos em função do diâmetro das partículas foram determinadas através da NBR 6502/80.

b) Massa Específica Real dos Grãos dos solos foi determinada conforme o método da NBR 6508/84.

c) Limites de Consistência dos solos (LL, LP) foram determinados de acordo com os métodos da NBR 6459/84 e 7180/84, respectivamente.

d) Ensaios de Compactação. Os solos estudados foram submetidos a ensaios de compactação, a fim de determinar o peso específico aparente seco máximo e a umidade ótima, na energia Proctor Normal, segundo a NBR 7182/84.

e) Ensaios da metodologia MCT

Com base nos resultados obtidos na análise granulométrica e nos limites de consistência, os solos em estudo foram classificados segundo o sistema AASHTO e USCS e MCT. A metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical) desenvolvida por Nogami e Villibor (1980,1985) classifica especificamente os solos tropicais, subdividindo-os em duas classes: solos lateríticos (L) e não lateríticos (N).

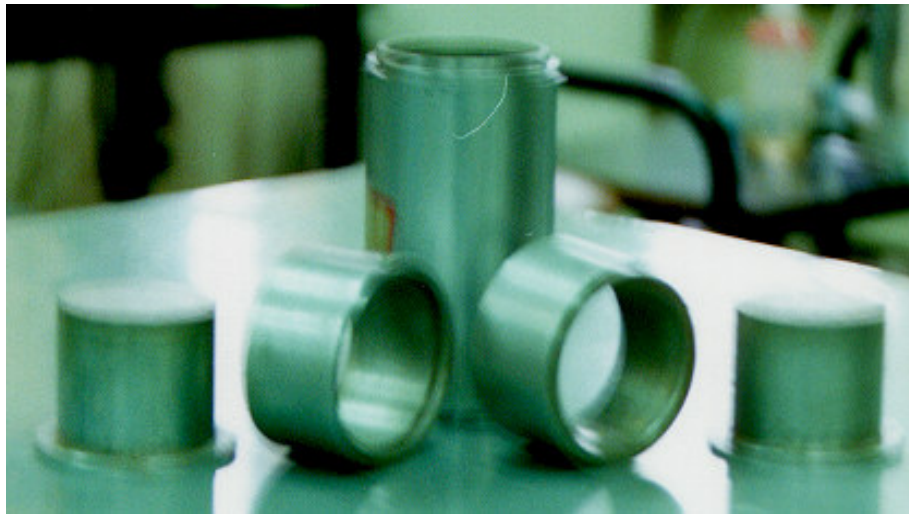
### 3.3.2 Metodologia de preparação das amostras

Nesta seção descrevem-se os procedimentos seguidos para preparação de corpos de prova dos solos, a partir de amostras deformadas levadas a laboratório. Os corpos de prova foram utilizados para determinar a relação de sucção e teor de umidade e a execução dos ensaios de módulo de resiliência. Apresenta-se também o procedimento de secagem e ou umedecimento das amostras compactadas nas condições ótimas.

#### 3.3.2.1 Preparação das amostras

Em laboratório, os solos foram condicionados em sacos plásticos e posteriormente secos ao ar. Após a secagem, os solos foram destorroados e passados na peneira No. 4 (4,8mm).

Utilizando-se os parâmetros obtidos nos ensaios de compactação, os corpos de prova, foram moldados em cilindros de dimensões reduzidas ( $\phi= 5,0\text{cm}$  e  $h=10,0\text{cm}$ ), por compactação estática, em três camadas. O cilindro utilizado era de aço inoxidável, constituído de um corpo cilíndrico central, dois êmbolos de extremidade e dois anéis complementares do molde (figura 3.2).



**FIGURA 3.2 - Molde metálico utilizado para compactar os solos em estudo.**

Realizada a mistura solo + água, procede-se a moldagem, porém durante esta, as misturas eram cobertas por um pano úmido para evitar a evaporação. Determinada a quantidade de solo necessária para moldar o corpo de prova na densidade prevista, divide-se a em três frações, uma para cada camada. Coloca-se a primeira fração de solo no corpo cilíndrico central (devidamente lubrificado), limitado inferiormente por um êmbolo em seguida coloca-se o êmbolo superior pressionando com as mãos contra o solo. O conjunto é levado para uma prensa de CBR e aplica-se uma força axial suficiente para que o êmbolo ressaltado toque a extremidade do molde cilíndrico. Mantêm-se a força por um período de 5 minutos a fim de equalizar as tensões, evitando-se a expansão na descompressão. Retira-se um dos êmbolos e escarifica-se a face da camada central compactada. Coloca-se o anel complementar e adiciona-se a segunda fração de solo, recoloca-se o êmbolo, pressionando-o com as mãos e repete-se o processo de compactação. Uma vez aliviada a carga, inverte-se o molde, escarifica-se a face central de solo compactado, coloca-se o anel complementar subsequente e repete-se com a terceira fração de solo as operações anteriormente descritas.

Realizada a compactação, extrai-se o corpo de prova do molde por ação de um macaco hidráulico e verifica-se sua altura ( $10,00 + 0,05$  cm) e seu diâmetro ( $5,00 + 0,05$  cm) com precisão de 0,01 cm e o peso com precisão de 0,01 gf. Em seguida, os corpos de prova são colocados em sacos plásticos, hermeticamente fechados e identificados, e levados à câmara úmida por 24 horas. No final da moldagem de cada corpo de prova é retirada uma porção da mistura para determinar a umidade de moldagem. Procurou-se obter um teor de umidade aproximadamente igual ao ótimo ( $\pm 5\%$  do valor). Com os dados de umidade de moldagem, peso e dimensões, verifica-se se o peso específico aparente seco do corpo de prova não difere de  $0,4 \text{ kN/m}^3$  do peso específico aparente seco máximo da curva de compactação (Nuñez, 1991) .

### **3.3.2.2 Procedimento de secagem e ou umedecimento das amostras compactadas**

Para avaliar a influência da sucção nos valores de módulo de resiliência três procedimentos de ensaios foram realizados. Os corpos de prova foram compactados na



umidade ótima e peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{dm\acute{a}x}$ ) e posteriormente submetidos a processos de secagem ou umedecimento e secagem e umedecimento (solo A).

No processo de secagem, os corpos de prova após 24 horas de moldagem são retirados da câmara úmida e secos ao ar. Após cerca de 6 horas de exposição ao ar alcança-se a umidade desejada. O controle do teor de umidade a ser alcançado é realizado através da secagem do corpo de prova, com precisão de 0,01gf. Uma vez atingido o peso desejado, o corpo de prova é novamente ensacado hermeticamente, identificado e levado à câmara úmida por 24 horas para homogeneização da umidade. Após este período, o corpo de prova é submetido ao ensaio de módulo de resiliência. A umidade desejada com a secagem dos corpos de prova foi determinada em 5% a 10% abaixo da umidade ótima (valor absoluto). Esta porcentagem variou para os solos em estudo, pois com umidade 10% abaixo da umidade ótima, alguns solos tornaram-se muito rígidos, impossibilitando o registro durante o ensaio de módulo de resiliência.

No processo de umedecimento, os corpos de prova, após 24 horas de moldagem, são retirados da câmara úmida, colocados sobre uma pedra porosa mantida saturada e umedecidos por absorção. O tempo requerido para alcançar a umidade desejada é em torno de 24 horas. O controle do teor de umidade é idêntico ao do processo de secagem. Para determinar a umidade desejada com o umedecimento, usou-se o mesmo intervalo identificado como o processo de secagem.

O processo de secagem e umedecimento, realizado somente para o solo “A”, por outro lado, consiste inicialmente em secar as amostras até atingir 5% abaixo do teor de umidade ótima (valor relativo). Posteriormente, as amostras são colocadas sobre uma pedra porosa saturada e umedecidas por absorção, até atingirem teores de umidades semelhantes aos obtidos pelo processo de secagem (descrito anteriormente). O tempo requerido para alcançar a umidade desejada é em torno de 2 dias. O controle do teor de umidade é idêntico ao processo de secagem ou de umedecimento descrito acima. A diferença está em que o processo de secagem e umedecimento ocorre no mesmo corpo de prova. Logo após alcançar o teor de umidade desejado nos dois procedimentos, as amostras são submetidas a ensaios de módulo de resiliência.

### 3.3.3 Determinação da relação de sucção e teor de umidade

A relação entre sucção matricial e teor de umidade é obtida através do método do papel filtro (Chandler e Gutierrez, 1986), somente no processo de secagem, nas amostras compactadas com seus respectivos teores de umidade ótima.

Após 24 horas de moldagem, os corpos de prova são retirados da câmara úmida e secos ao ar. O controle do teor de umidade a alcançar é realizado através do controle do peso do corpo de prova com precisão de 0,01gf. Uma vez atingido o peso desejado, o corpo de prova é partido ao centro e o papel filtro é inserido, tomando cuidado para que este fique totalmente em contato com o solo. A amostra é envolvida com um filme plástico, papel aluminizado, colocada em saco plástico hermeticamente fechado, identificada e levada à câmara úmida por um prazo de 14 dias (tempo considerado suficiente para ocorrer o equilíbrio entre o teor de umidade do solo e do papel filtro).

Após este período, determina-se a umidade da amostra e do papel filtro e através da curva de calibração do papel filtro encontra-se o valor da sucção. Com posse dos resultados é determinada a relação entre a sucção e o teor de umidade.

### 3.3.4 Ensaios de módulo de resiliência

Ensaios triaxiais de carregamento repetido foram realizados para determinar o módulo de resiliência dos solos em estudo. Uma descrição da execução de ensaio (normas) e do equipamento utilizado é apresentada.

Com o objetivo de analisar a influência da sucção nos resultados de módulo de resiliência foram realizadas medidas de sucção durante e após a execução dos ensaios triaxiais de carregamento repetido. Os equipamentos e procedimentos seguidos estão expostos a seguir. Para o solo “A”, foi realizado um maior número de ensaios do que para os demais em estudo, devido ao fato de que este material foi utilizado na pista experimental da

Área de Teste, possibilitando, assim, medidas “in situ” e a subsequente comparação entre resultados de laboratório e de campo.

### **3.3.4.1 Ensaio triaxial com carregamento repetido**

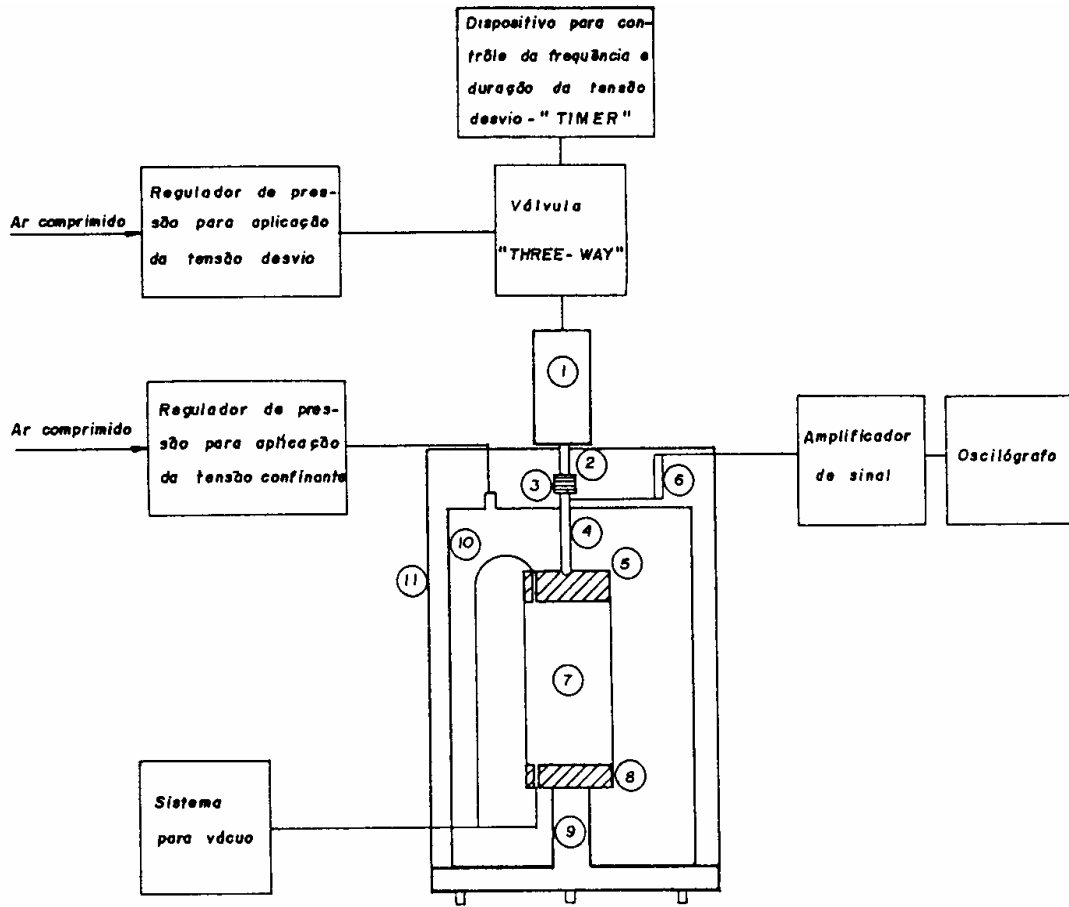
Os solos foram ensaiados segundo o método descrito pela AASHTO TP 46-94. A AASHTO TP 46-94 determina o nível de tensão desvio e confinante a aplicar em função do material e camada do sistema de pavimentos a ser estudada, simulando as condições a que o pavimento está sujeito.

O equipamento compreende um sistema pneumático de aplicação de carga, célula triaxial especial, sistemas de controle, de medição de deformações transientes e de registro oscilográfico. As tensões são aplicadas de forma rápida e alternadas no topo da amostra através de um pistão. Para isto, o ar comprimido ao passar por um registro de pressão atua diretamente numa válvula que está em contato com o cilindro de pressão. Quando a válvula abre a pressão do ar é transmitida através do cilindro para a amostra envolta por uma membrana de borracha e quando fecha a pressão deixa de atuar. O tempo de abertura da válvula e a frequência desta operação são controlados por um dispositivo mecânico digital (‘timer’). A figura 3.3 apresenta o equipamento empregado para determinação do módulo de resiliência utilizado.

O sistema de medição das deformações se compõe de um transdutor do tipo LVDT (medida interna), fixo a um amplificador dos sinais elétricos e um oscilógrafo EBC. O transdutor transforma, por variação de campo magnético, a deformação axial durante o carregamento repetido em potencial elétrico, que chega ao oscilógrafo. Previamente é feita uma calibração a fim de correlacionar as deformações com a amplitude do traço do registro.

Os ensaios foram realizados na condição não drenada. Para isto, colocou-se pedras porosas saturadas entre o corpo de prova e a base e entre este e o cabeçote, e o sistema foi fechado.

Os corpos de prova foram submetidos a um condicionamento prévio através da aplicação de uma seqüência de carregamentos repetidos, a fim de eliminar as deformações permanentes elevadas que ocorre nas primeiras aplicações da tensão desvio.



- |                       |                           |
|-----------------------|---------------------------|
| ① CILINDRO DE PRESSÃO | ⑦ AMOSTRA DE SOLO         |
| ② PISTÃO              | ⑧ BASE                    |
| ③ CONEXÃO             | ⑨ SUPORTE CENTRAL         |
| ④ HASTE               | ⑩ CÉLULA TRIAXIAL         |
| ⑤ CABEÇOTE            | ⑪ ESTRUTURA PARA SUPORTE. |
| ⑥ LVDT                |                           |

FIGURA 3.3 - Equipamento para determinação do módulo de resiliência, segundo

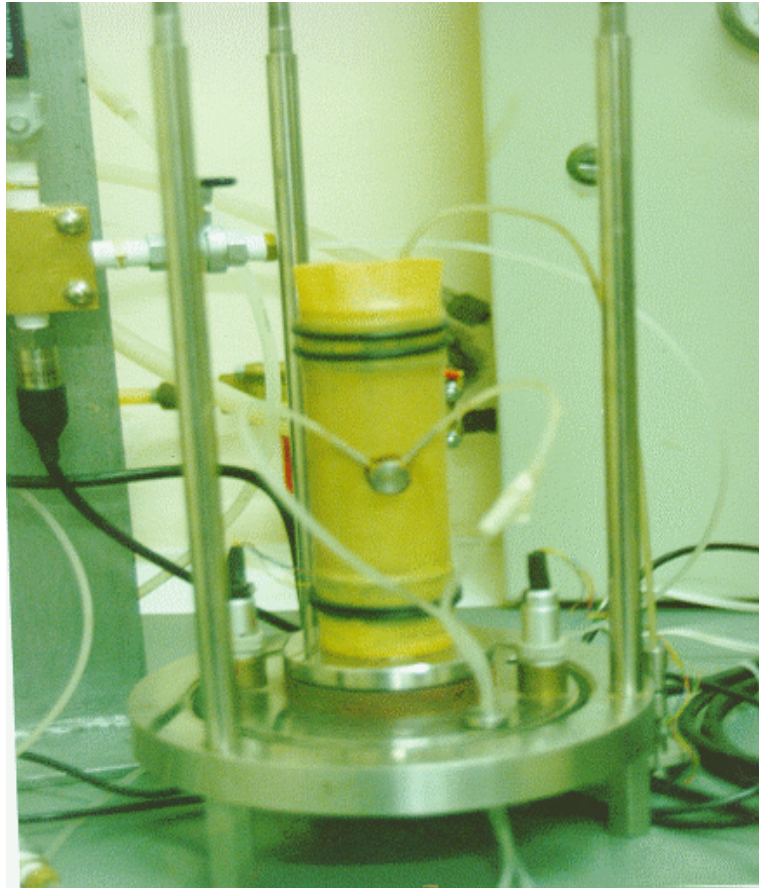
*Núñez (1991).*

### 3.3.4.2 Medidas de sucção durante o ensaio triaxial de carregamento repetido

Para o solo “A” em estudo, uma série de ensaios de determinação do módulo de resiliência com medidas de sucção durante o ensaio foi realizada, através de uma probe colocada no centro do corpo de prova compactado (figura 3.4). A probe foi construída no Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, com a finalidade de verificar a variação da sucção com a aplicação de tensões cíclicas no corpo de prova.

A probe é constituída de um corpo cilíndrico de cerâmica de  $\pm 1,0\text{cm}$  de diâmetro e  $\pm 2,0\text{cm}$  de altura (mantido permanentemente saturado), suas extremidades são vedadas por chapas metálicas. Numa das extremidades é fixado um sistema de tubos metálicos que permite a circulação de água e captar possíveis bolhas de ar, localizadas internamente no cilindro cerâmico. Um dos tubos está ligado à atmosfera, permitindo a entrada de água para a circulação enquanto o outro está conectado a um transdutor de pressão fora da câmara triaxial e ligado a um oscilógrafo. O transdutor transforma a variação de pressão de água durante o carregamento cíclico em potencial elétrico, que chega ao oscilógrafo. Previamente foi feita uma calibração a fim de correlacionar as pressões com amplitude do traço do registro.

A ligação da probe interna à câmara com o transdutor externo é realizada na base da câmara triaxial. Para a instalação da probe no corpo de prova, é realizado um furo lateral na porção central do corpo de prova, com o auxílio de uma broca de diâmetro equivalente ao da probe, garantindo o perfeito contato entre o solo e a probe. Na membrana de látex que envolve o corpo de prova durante o ensaio triaxial de carga repetida é realizado um furo de diâmetro menor que o da probe. Após a instalação, a probe é fixada por uma pasta de silicone que a cobre totalmente, garantindo perfeita vedação da amostra com a membrana de látex. Passado duas horas para o silicone aderir, é realizado o ensaio triaxial de carga repetida.



**FIGURA 3.4** Corpo de prova do ensaio de módulo de resiliência com o transdutor de pressão.

### **3.3.4.3 Medidas de sucção após o ensaio triaxial de carregamento repetido**

Para avaliar a influência da sucção nos valores de módulo de resiliência, é realizada a medida de sucção com o método do papel filtro após o ensaio triaxial de carregamento repetido.

Após o ensaio, parte-se o corpo de prova em três seções e utiliza-se a parte central para colocar o papel filtro. O procedimento seguido para determinar a sucção com o uso do papel filtro, foi o mesmo descrito no item 3.3.3.

### 3.4. ENSAIOS DE CAMPO

No início desta década a UFRGS e o DAER/RS celebraram um Protocolo Consensual de Colaboração Técnico-Científica com o objetivo de estudar alternativas econômicas para a pavimentação de rodovias coletoras no Estado do Rio Grande do Sul. Já resultou deste convênio a construção de um Simulador de Tráfego e a criação da Área de Pesquisas e Testes de Pavimentos, localizada no Campus do Vale da UFRGS (figura 3.5), Porto Alegre-RS, na qual foram construídas dez pistas experimentais, empregando-se um solo residual de comportamento laterítico em substituição ao subleito natural (Núñez et al, 1996). O solo utilizado como reforço de subleito foi o solo “A”, já descrito e estudado em laboratório. Uma descrição das características do Simulador de Tráfego empregado na Área de Pesquisas e Testes de Pavimentos foi apresentada por Núñez et al. (1996).

A resposta estrutural do subleito do pavimento está sendo acompanhada por levantamentos defletométricos através, da viga Benkelman, nas seções de teste, durante a sollicitação. Também foram levantadas bacias de deformação com o objetivo de obter-se o módulo de resiliência do solo através de retroanálise (Núñez et al., 1996 e 1997).

Foram instalados três tensiômetros (sistema de medida de sucção) junto às pistas experimentais, em pontos de medida de deflexão do subleito. Antes, durante e após a sollicitação das pistas pelo Simulador de Tráfego, foram realizadas medidas de sucção com o objetivo de analisar o seu efeito no módulo de resiliência.

Este estudo possibilitou a comparação dos módulos de resiliência de laboratório com os obtidos em campo e a influência da sucção neste parâmetro para o solo “A”.

#### 3.4.1 Localização da Área de Pesquisa e Testes de Pavimentos

A Área de Pesquisas e Testes de Pavimentos está localizada no Campus do Vale da UFRGS, em Porto Alegre (RS). Esta área é fruto de um amplo programa de pesquisa,

desenvolvido desde o início desta década pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e o Departamento Autônomo de Estradas e Rodagem (DAER).

A figura 3.5 apresenta a Área de Pesquisas e Testes de Pavimentos na qual foram construídas dez pistas experimentais.



**FIGURA 3.5 - Área de Pesquisas e Testes de Pavimentos no Campus do Vale da UFRGS.**

### **3.4.2 Descrição das pistas experimentais**

Núñez, et. al. (1996) apresentam uma descrição da construção e materiais empregados nas pistas experimentais. Os autores descrevem que entre os anos de 1995 e 1996 foi criada uma infra-estrutura que permite a execução de até doze pistas experimentais com comprimento de 20m e largura de 3,5m, a serem solicitadas pelo Simulador de Tráfego UFRGS-DAER/RS e um prédio de controle de operações, de processamento de informações e armazenamento de materiais e equipamentos.

A figura 3.6 apresenta cortes longitudinais das pistas. Procurando-se reproduzir o terreno de fundação de rodovias construídas nas regiões de ocorrência dos materiais em estudo, foi executado um reforço de subleito compactado em três camadas, na espessura de 60 a 67cm, empregando-se para tal, o solo “A” estudo nesta pesquisa.



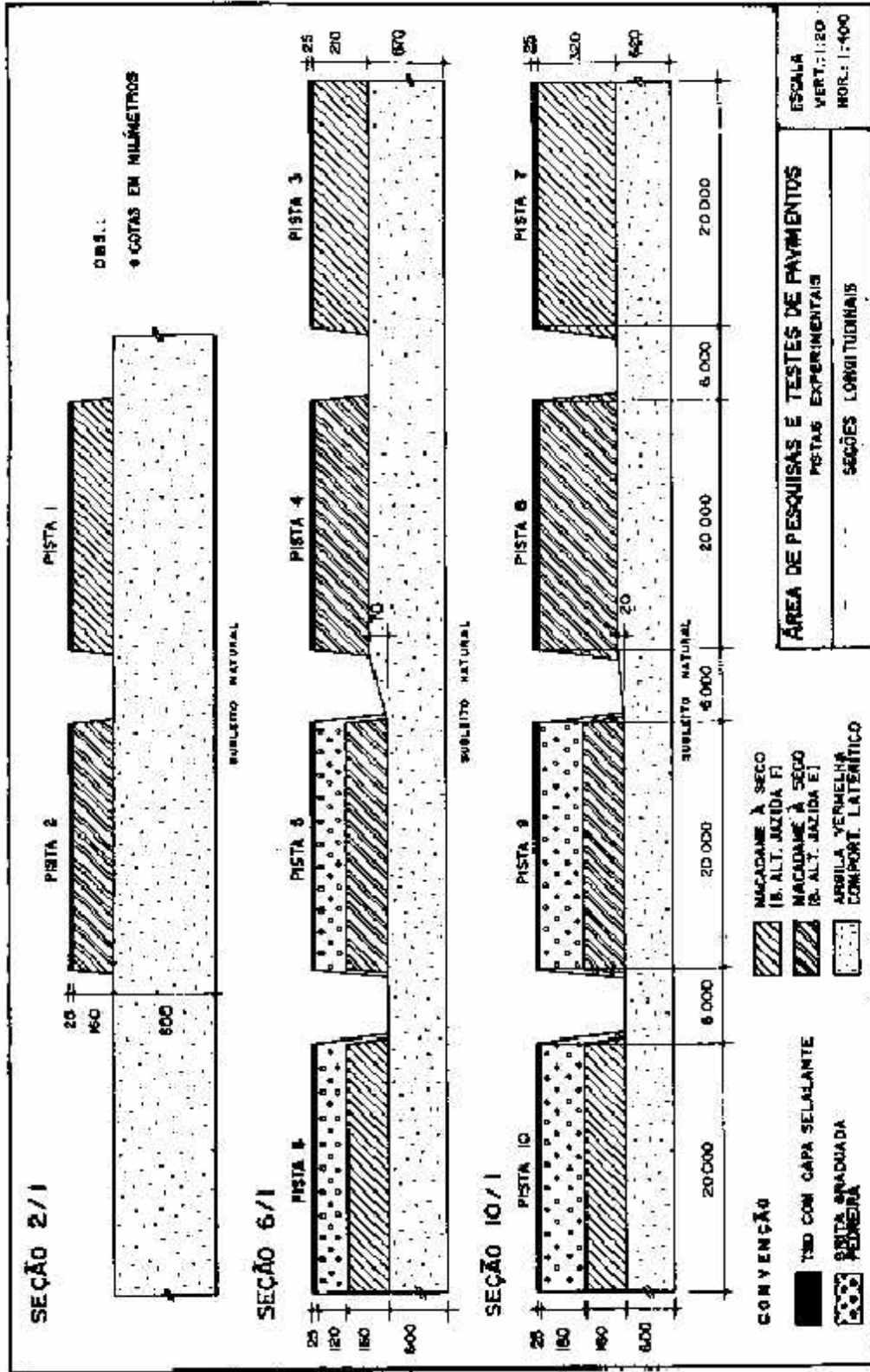
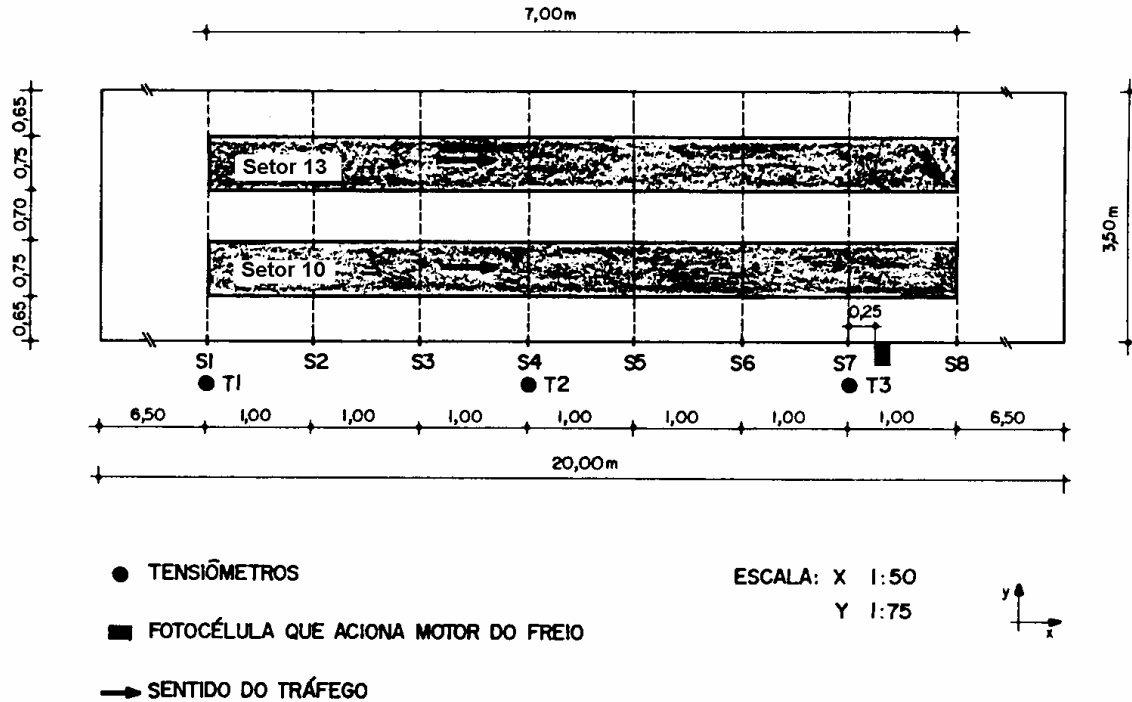


FIGURA 3.6 - Seções longitudinais das pistas experimentais (Núñez, et. al., 1996).

Núñez, et. al. (1996) descrevem que na fase de planejamento da pesquisa, determinou-se que cada pista experimental seria solicitada em dois setores com 7,0m de comprimento e 0,70m de largura (figura 3.7) com cargas diferentes.



**FIGURA 3.7 - Croqui da pista 10 da Área de Pesquisas e Testes de Pavimentos.**

Este trabalho apresenta resultados do setor 10 da Pista 01, dos setores 13 e 08 da Pista 04, dos setores 12 e 10 da Pista 08 e do setor 12 da Pista 07.

### 3.4.3 Medidas de sucção

Na Área de Pesquisas e Testes de Pavimentos, com o objetivo de análise da influência da sucção no módulo de resiliência do subleito, foram instalados três tensiômetros (JET FILL da Soilmoisture Equipment Corporation). Os tensiômetros foram posicionados em pontos de medida de deflexão do subleito. A figura 3.8 apresenta a localização dos tensiômetros instalados na área de testes.

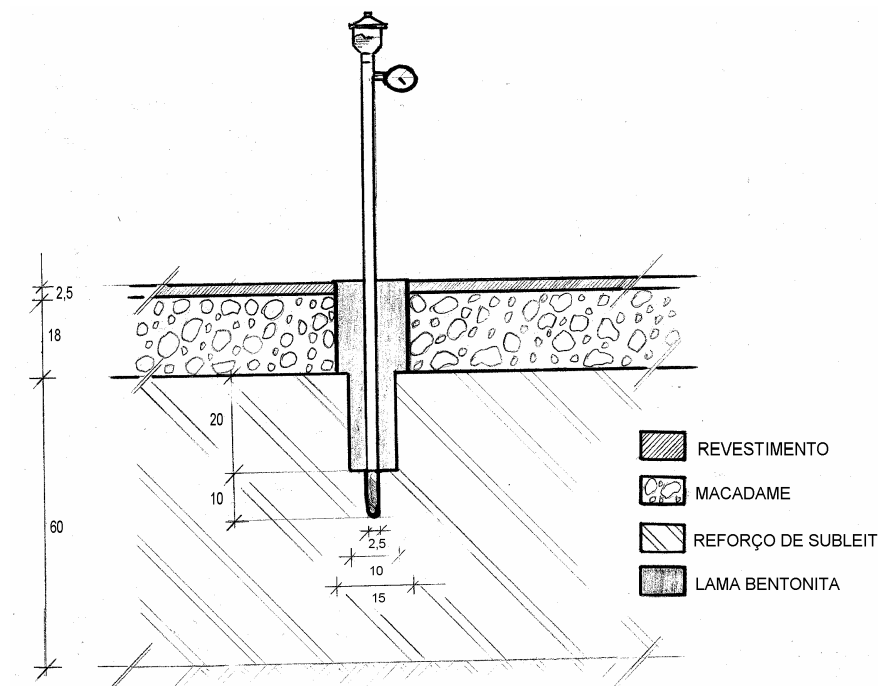
Determinado o local da instalação, sendo este junto à lateral da pista solicitada, realiza-se um furo de cerca de 20 cm de diâmetro na camada de revestimento e base de basalto alterado, até encontrar o topo do reforço do subleito. Para conter as laterais do furo coloca-se um tubo de PVC de mesmo diâmetro. A partir desta profundidade trata-se o reforço do subleito com um trado de 10 cm de diâmetro até uma profundidade correspondente a 10 cm acima do centro da camada do reforço do subleito (figura 3.9). A parte inferior da pedra porosa do tensiômetro deve estar junto ao centro da camada do reforço do subleito. Para isto, os últimos 10 cm são tratados com uma haste metálica de diâmetro igual ao da pedra porosa garantindo que no momento da instalação do tensiômetro ocorra perfeito contato entre a pedra porosa e o solo. A figura 3.10 apresenta um corte transversal de um tensiômetro instalado de acordo com a descrição acima. O material retirado nos últimos 10 cm do furo é levado ao laboratório para determinação da umidade do solo no ponto de instalação do tensiômetro.



**FIGURA 3.8 - Localização dos tensiômetros (JET FILL da Soilmoisture Equipment Corporation) na área de testes.**



**FIGURA 3.9 - Método de instalação dos tensiômetros na área de testes.**



**FIGURA 3.10 - Corte transversal de um tensiômetro instalado.**

Quando instalado, preenche-se o furo realizado com uma mistura de solo e bentonita, garantindo a vedação do sistema (evitar problemas com infiltração). A porção do tensiômetro que fica acima da superfície do pavimento era protegida com um tubo de PVC de diâmetro de 10 cm, evitando eventuais problemas como batidas e flexão (vento) do tubo de acrílico (figura 3.11).

Foram realizadas medidas diárias de sucção durante a solicitação das pistas e toda vez que se mudava de pista a solicitar, os tensiômetros acompanhavam. Em cada pista foi ensaiado dois setores com cargas de eixo diferentes como mostrado na figura 3.7.



**FIGURA 3.11 - Tensiômetro (JET FILL da Soilmoisture Equipment Corporation) instalado com proteção de PVC acima da superfície do pavimento.**

### 3.4.4 Determinação de módulo de resiliência “in situ”

Com o objetivo de obter o módulo de resiliência através da técnica de retroanálise, procedeu-se ao levantamento de bacias de deformação empregando-se viga Benkelman. Os levantamentos foram realizados antes do início e durante a solitação dos diversos setores pelo Simulador de Tráfego. A retroanálise das bacias de deformação foi realizada com base na metodologia proposta por Noureldin (1993) e apresentada por Albernaz (1994).

Noureldin (1993) em seu trabalho utilizou dados de bacias de deformação obtidas com equipamento FWD e Albernaz (1994) o adaptou de modo a que possa ser utilizado com dados obtidos com viga Benkelman.

O método de Noureldin é baseado na teoria da elasticidade aplicada a meios semi-infinitos, considerados homogêneos, isotrópicos e linearmente elásticos. O seu princípio básico reside no fato de que existe um ponto na superfície do pavimento, situado à uma certa distância do ponto de aplicação da carga, cuja deflexão é devida exclusivamente ao subleito e é numericamente igual à deflexão do topo do subleito na vertical que passa pelo centro do carregamento. Este método apresenta duas alternativas de análise, conforme se conheça (primeira alternativa) ou não (segunda alternativa) as espessuras do pavimento. Após o fim da solitação das pistas 01 e 04, procedeu-se à abertura de trincheiras em seções destas pistas com uma degradação representativa. Assim, para estas pistas, foi possível determinar-se a espessura real do pavimento.

Entretanto, para as pistas 08 e 07 nas quais não foram abertas trincheiras, optou-se pela segunda análise do método de Albernaz (1994). O método salienta que este procedimento só poderá ser usado em análises preliminares. Como o objetivo deste trabalho é analisar a influência da sucção no módulo de resiliência e não a obtenção de módulos de resiliência se considera válida a opção utilizada.

Os procedimentos de aplicação desta alternativa são os seguintes:

a) Ajusta-se a bacia defletométrica medida através de uma equação do tipo:

$$D_x = \frac{D_o}{(1 + k \cdot r_x^n)} \quad (3.1)$$

onde:

$D_o$  é a deflexão máxima e  $k$  e  $n$  são obtidos por regressão.

b) Define-se, através dos pares de valores ( $r_x$ ,  $D_x$ ) obtidos das bacias de deformação de campo, a distância radial  $r_x$  correspondente ao maior valor do produto  $r_x \cdot D_x$ .

c) Determina-se o valor de módulo de resiliência do subleito ( $E_{sg}$  em  $\text{kgf/cm}^2$ ), através da equação 3.2:

$$E_{sg} = \frac{1,193}{(r_x \times D_x)} \quad (3.2)$$

onde:

$r_x$  é a distância radial (cm) a partir do ponto de aplicação da carga até o ponto considerado; e

$D_x$  é a deflexão (cm) correspondente ao ponto situado à distância radial  $r_x$ .

d) Calcula-se a espessura efetiva do pavimento ( $T_x$ ) através da equação 3.3:

$$T_x = \left[ \left( \frac{(D_o - D_x)}{\left( D_x \cdot \left( \left( \frac{r_x}{3,3} \right) - 2,54 \right) \right)} \right)^{\frac{1}{3}} \times \left( (4 \cdot r_x^2) - 282,3 \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (3.3)$$

Outras equações apresentadas por Albernaz (1994) permitem determinar o módulo efetivo do pavimento ( $E_p$ ) e o seu número estrutural corrigido.

Quando a espessura real do pavimento é conhecida procede-se da seguinte forma:

a) Com os pares de valores ( $r_x$ ,  $D_x$ ), obtidos das bacias de deformação de campo ajustadas, plotam-se os gráficos  $T_x$  versus  $r_x$ , e  $E_{sg}$  versus  $r_x$ .

b) Entra-se com o valor real da espessura do pavimento existente no gráfico  $T_x$  versus  $r_x$  obtendo-se o valor de  $r_x$  correspondente ao ponto da bacia de deformação onde a deflexão na superfície do pavimento é igual a deflexão no topo do subleito na vertical que passa pelo centro da carga.

c) Como o valor de  $r_x$  determinado no item anterior, obtém-se no gráfico  $E_{sg}$  versus  $r_x$  o valor de  $E_{sg}$ .



## **APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS**

### **4.1 INTRODUÇÃO**

Neste capítulo estão apresentados os resultados de laboratório e campo citados no item de Metodologia da Pesquisa, bem como análise dos dados obtidos.

### **4.2 ENSAIOS DE LABORATÓRIO**

Os resultados de laboratório obtidos se dividem em:

- a) Ensaio de caracterização dos solos em estudo;
- b) Determinação da relação entre a sucção e o teor de umidade para os solos em estudo, através do método do papel filtro;
- c) Análise dos resultados de ensaios de módulos de resiliência para os solos em estudo;

d) Medidas de sucção durante o ensaio de módulo de resiliência para o solo A, através da probe e medidas de sucção com o papel filtro, após o ensaio triaxial de carregamento repetido, para os solos em estudo;

e) Obtenção da relação entre o módulo de resiliência e a variação do teor de umidade através de ciclos de secagem e/ou umedecimento para os solos em estudo.

#### **4.2.1 Caracterização dos solos em estudo**

Na tabela 4.1 apresentam-se os resultados dos ensaios de caracterização dos solos em estudo. Esta tabela mostra os resultados de distribuição granulométrica para cada solo, a massa específica real dos grãos, limites de consistência, dados da classificação dos solos e os parâmetros ótimos das curvas de compactação (energia Proctor normal). A figura 4.1 apresenta as curvas de distribuição granulométrica dos solos estudados. As curvas de compactação dos solos A, B, C e D estão apresentadas conjuntamente na figura 4.2.

Com relação a análise granulométrica, observa-se que o solo D apresenta a maior porcentagem de areia fina, seguido pelo solo B. No solo C são encontradas as maiores porcentagens de argila seguidas do solo A.

Com relação aos limites de consistência o solo C apresenta valores elevados de limites de liquidez e limites de plasticidade (L e LP), enquanto o solo B registra os menores valores entre os solos em estudo. O solo A tem o maior valor de índice de plasticidade e o solo B tem o menor valor.

A classificação dos solos foi realizada através dos sistemas USCS, AASTHO e MCT. Os solos A e C são classificados como solos argilosos de baixa compressibilidade e alta compressibilidade respectivamente, de acordo com a classificação do sistema USCS e os solos B e D classificam-se como solos arenosos. Baseada na classificação do sistema AASTHO os solos A e C apresentam a mesma classificação e se enquadram dentro da classe de argila de

alta plasticidade. O solo B é classificado com solo areno-siltoso e o solo D como um solo arenoso. De acordo com a metodologia MCT, o solo B foi classificado como solo não laterítico arenoso (NA'), os solo A e C foram classificados como solos lateríticos argilosos (LG') e o solo D como solo laterítico arenoso (LA').

Tabela 4.1

<b>Solos em Estudo</b>				
	<b>Solo A</b>	<b>Solo B</b>	<b>Solo C</b>	<b>Solo D</b>
<b>Ped (%)</b>	1	0	0	0
<b>Areia G. (%)</b>	1	0	0	0
<b>Areia M. (%)</b>	3	5	3	1
<b>Areia F. (%)</b>	33	62	15	72
<b>Silte (%)</b>	14	13	15	3
<b>Argila (%)</b>	48	20	67	24
<b>LL (%)</b>	46	20	71	34
<b>LP (%)</b>	25	16	53	21
<b>IP (%)</b>	21	4	18	13
<b><math>\gamma_s</math> (kN/m<sup>3</sup>)</b>	28,5	26,4	27,2	26,3
<b>SUCS</b>	CL	SC-SM	CH	SC
<b>AASTHO</b>	A-7-6	A-4	A-7-6	A-2-6
<b>MCT</b>	LG'	NA'	LG'	LA'
<b>W<sub>ót</sub>m (%)</b>	21,0	15,8	38,5	13,2
<b><math>\gamma_{dmáx}</math> (kN/m<sup>3</sup>)</b>	16,0	17,3	12,5	18,2

#### **Caracterização dos solos em estudo.**

No ensaio de compactação, o solo C com maior porcentagem de argila, apresenta maior teor de umidade ótima e o menor peso específico aparente seco máximo. Por outro lado

o solo D, o mais arenoso, apresenta menor teor de umidade e o maior peso específico aparente seco máximo.

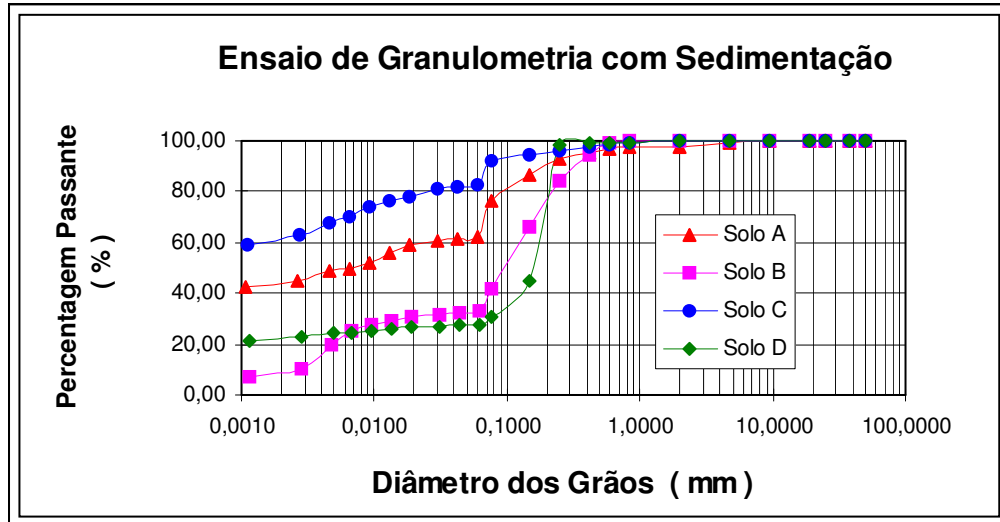


Figura 4.1 - Curva granulométrica dos solos em estudo.

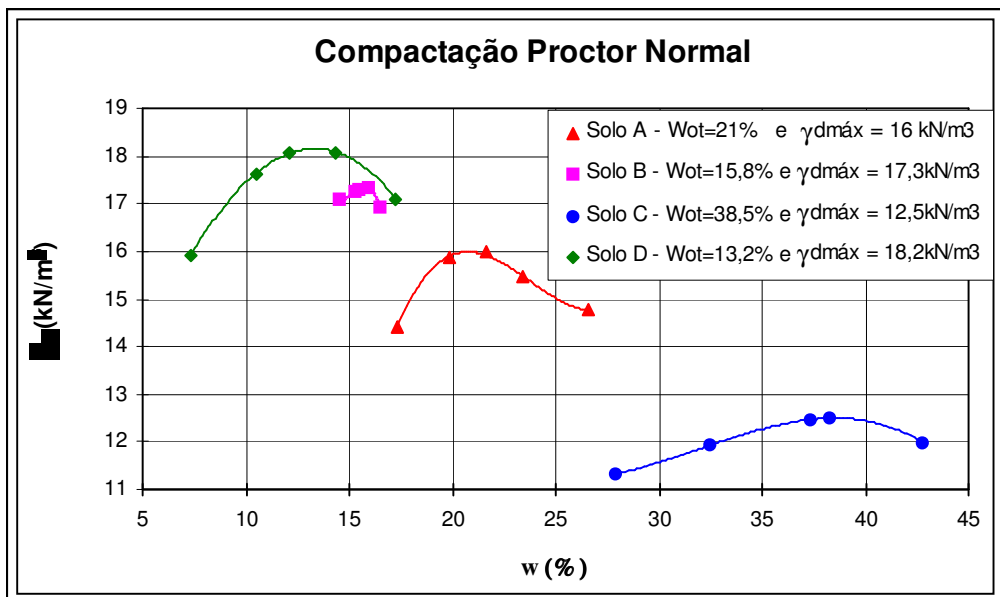
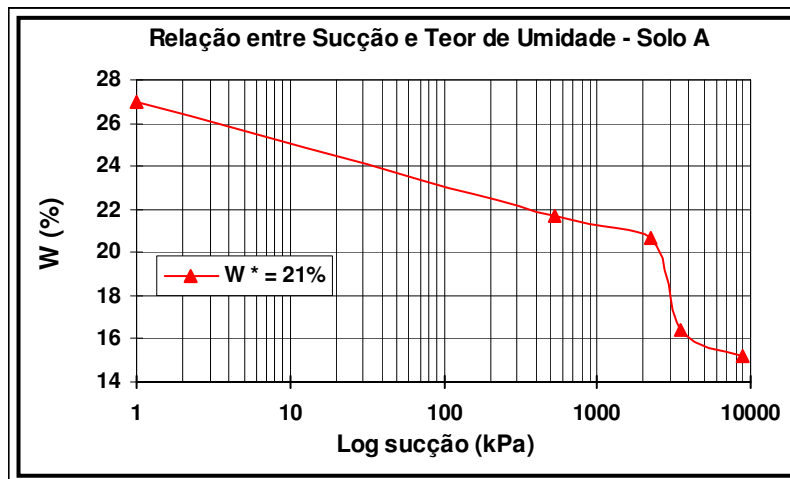


Figura 4.2 - Curvas de compactação dos solos em estudo.

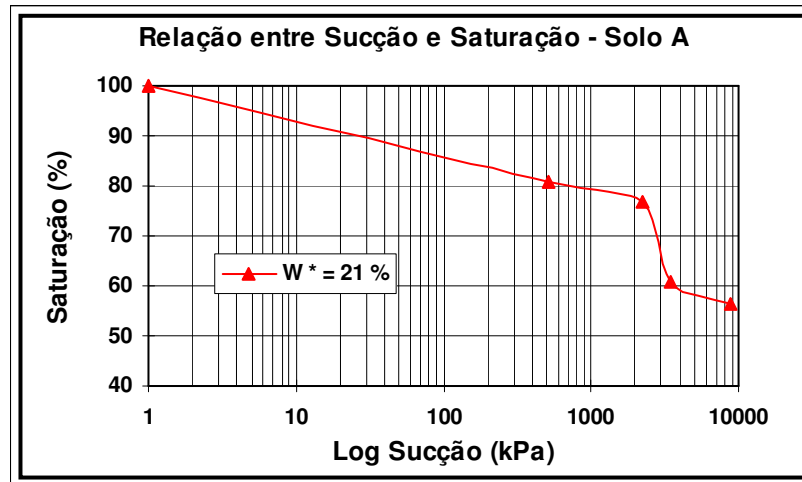
#### 4.2.2 Relação entre sucção e teor de umidade

A relação entre sucção e o teor de umidade foi determinada para cada solo em estudo a partir das condições ótimas de compactação. As amostras compactadas nestas condições ótimas foram submetidas somente a processo de secagem (quatro amostras para cada umidade desejada) e, posteriormente, foi obtida a sucção. Desta relação, entre sucção e o teor de umidade, foi calculado o teor de umidade que corresponde a sucção nula ( $S = 100\%$ ).

A relação apresentada na figura 4.3, refere-se a amostras do solo “A” compactadas nas condições ótimas ( $W^* = 21\%$ ). O valor de sucção obtido através do método do papel filtro foi de 500 kPa para o teor de umidade ótima. Observa-se um aumento do valor de sucção para valores de teor de umidade menores que o teor de umidade ótima. Este comportamento é encontrado por diversos autores (Hillel, 1980, Fredlund e Rahardjo, 1993; Marinho, 1994; Ridley, 1996). Para o melhor ajuste da relação de sucção e teor de umidade foi inserido o ponto de saturação de 100% ( $W = 26,95\%$ ), onde o valor da sucção é zero. A figura 4.4 apresenta a relação da sucção com a saturação, quanto maior o grau de saturação menor o valor de sucção.

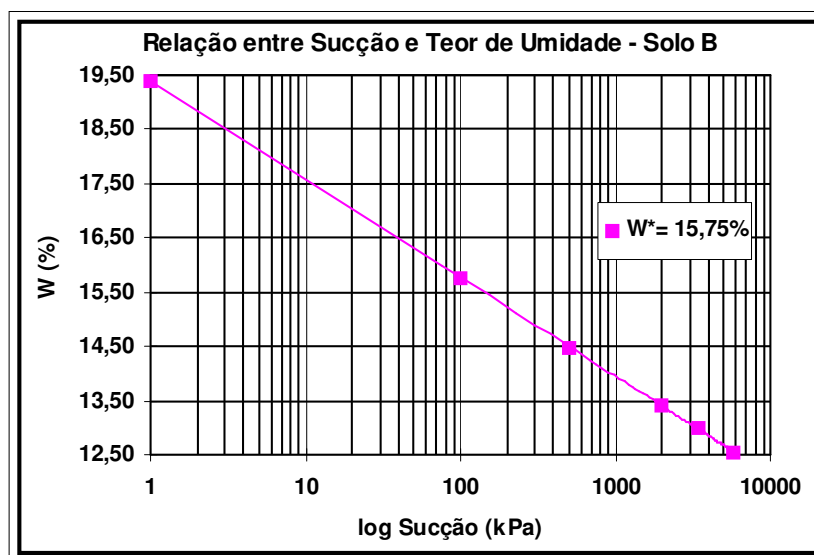


**Figura 4.3 - Relação entre sucção e teor de umidade, para amostras moldadas na umidade ótima ( $W^* =$  umidade ótima), seguidas de processo de secagem para o solo A.**

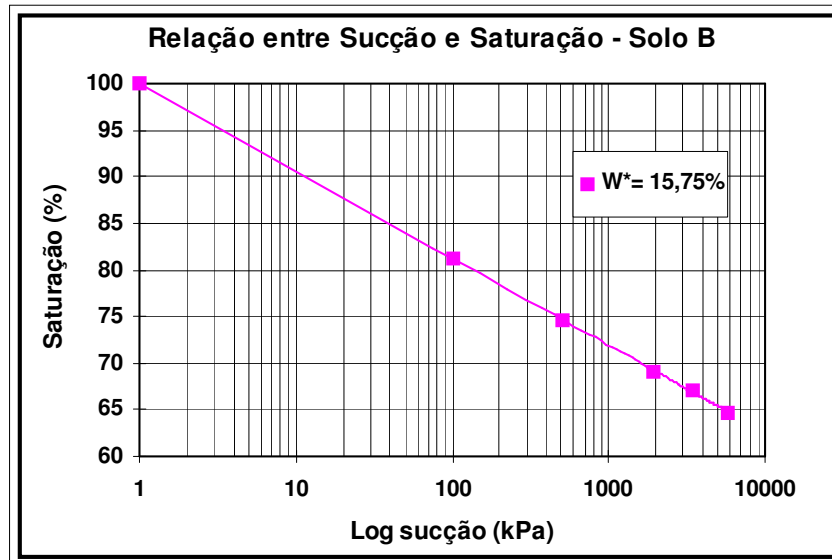


**Figura 4.4 - Relação entre sucção e saturação, para amostras moldadas na umidade ótima ( $W^*$ = umidade ótima), seguidas de processo de secagem para o solo A.**

A figura 4.5 apresenta a relação entre sucção e o teor de umidade das amostras do solo B compactadas nas condições ótimas ( $W^* = 15,75\%$ ) e submetidas a processo de secagem. Como para o solo A, também foi inserido o ponto de saturação de 100% ( $W = 19,50\%$ ), onde o valor da sucção é zero. De acordo com os resultados de caracterização dos solos, o solo B apresenta considerável porção de areia, o que lhe confere menores valores de sucção que o solo A. Para o teor de umidade ótima, a sucção foi de aproximadamente 120 kPa. A figura 4.6 apresenta a relação entre sucção e saturação para o solo B.



**Figura 4.5 - Relação entre sucção e teor de umidade, para amostras moldadas na umidade ótima ( $W^*$ = umidade ótima), seguidas de processo de secagem para o solo B.**



**Figura 4.6 - Relação entre sucção e saturação, para amostras moldadas na umidade ótima ( $W^*$ = umidade ótima), seguidas de processo de secagem para o solo B.**

Os corpos de prova moldados nas condições ótimas de compactação do solo C, após o processo de secagem, apresentaram sucções superiores ao solo A e B (figura 4.7). Foi inserido o ponto de saturação de 100 % ( $W=43,1\%$ ), para o valor da sucção zero. Obteve-se para umidade ótima, uma sucção de 80 kPa (medida). Com a secagem de no máximo 10% abaixo da umidade ótima ocorreu um aumento da ordem de  $S \approx 10000$  kPa. O solo C apresenta o maior teor de argila comparado aos demais solos em estudo. Desta forma, para o mesmo teor de umidade, este solo apresenta maiores valores de sucção. A figura 4.8 apresenta a relação entre sucção e saturação para o solo C.

Para o solo D, a relação entre sucção e teor de umidade de amostras compactadas nas condições ótimas ( $W^* = 13,2\%$ ) e submetidas à processo de secagem está apresentada na figura 4.9. O valor de sucção para a umidade ótima é aproximadamente de 320 kPa. Este comportamento é idêntico ao ocorrido e descrito aos demais solos. Para obter um melhor ajuste foi inserido o ponto de saturação de 100% ( $W = 26,95\%$ ), onde o valor da sucção é zero.

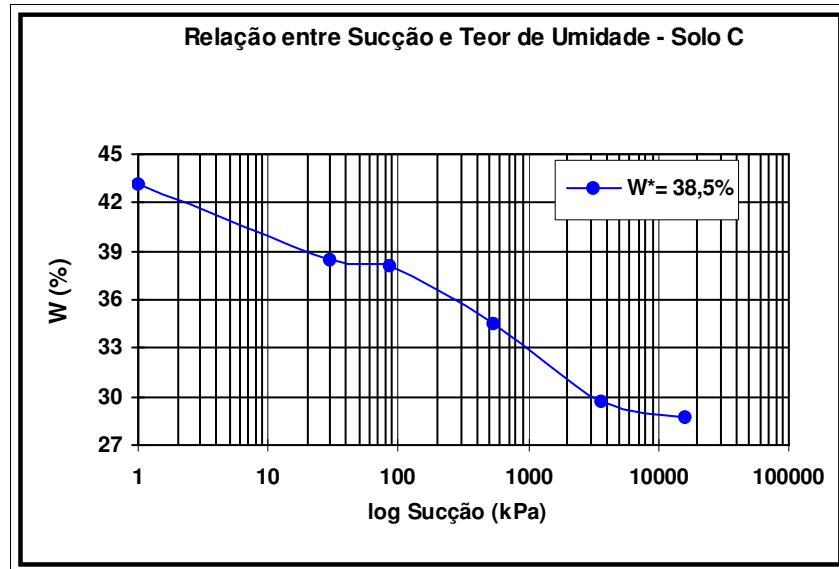


Figura 4.7 - Relação entre sucção e teor de umidade, para amostras moldadas na umidade ótima ( $W^*$  = umidade ótima), seguidas de processo de secagem para o solo C.

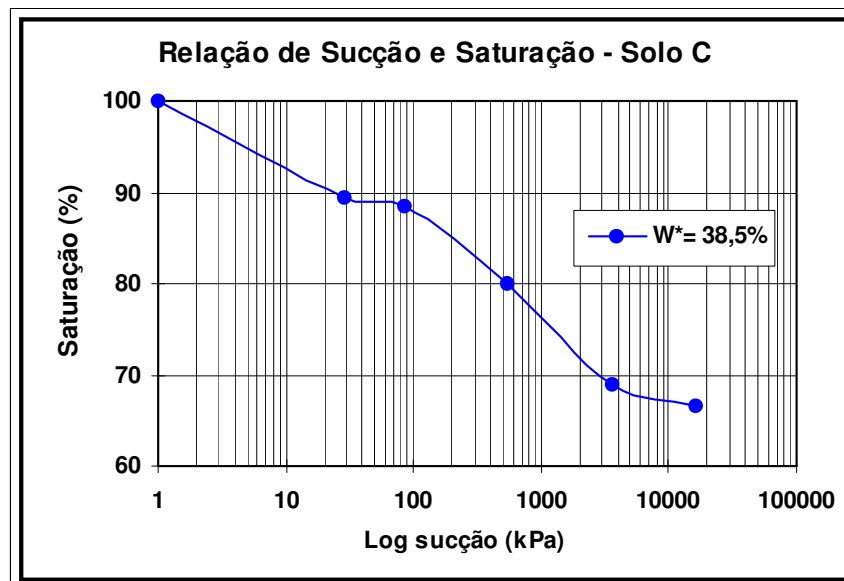


Figura 4.8 - Relação entre sucção e saturação, para amostras moldadas na umidade ótima ( $W^*$  = umidade ótima), seguidas de processo de secagem para o solo C.



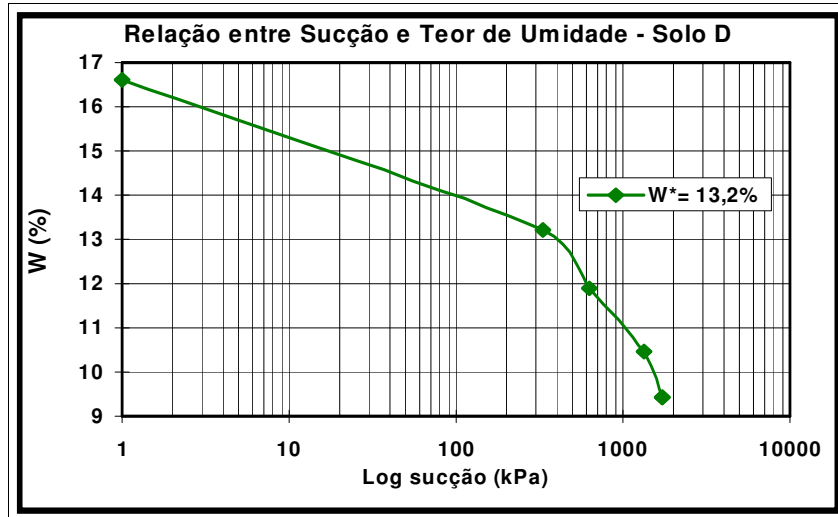


Figura 4.9 - Relação entre sucção e teor de umidade, para amostras moldadas na umidade ótima ( $W^*$ = umidade ótima), seguidas de processo de secagem solo D.

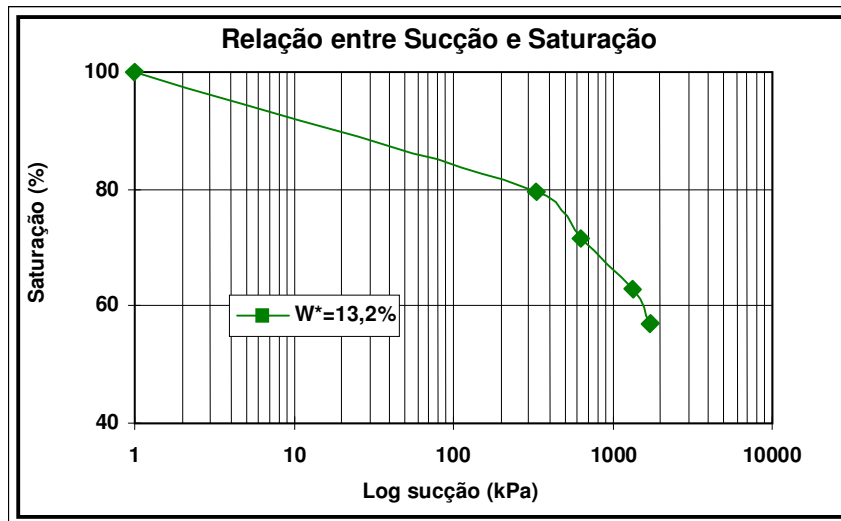
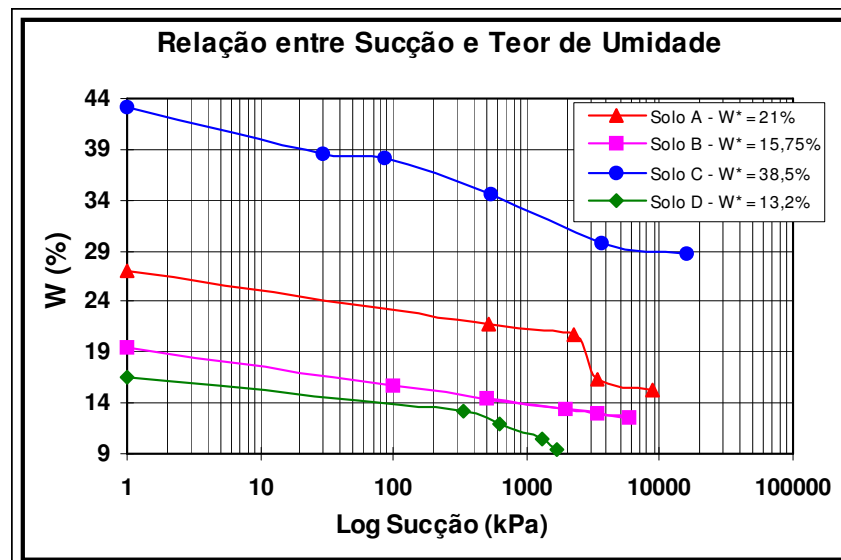


Figura 4.10 - Relação entre sucção e saturação, para amostras moldadas na umidade ótima ( $W^*$ = umidade ótima), seguidas de processo de secagem solo D.

As relações entre o teor de umidade e a sucção dos solos em estudo estão apresentadas na figura 4.11. Nota-se que ao reduzir o teor de umidade ocorre um aumento no valor da sucção e este comportamento é semelhante para os diferentes solos em estudo.

O solo “C” apresenta maior porcentagem de argila, portanto se observa um teor de umidade maior para o mesmo valor de sucção. Por outro lado, o solo “D” apresenta maior porcentagem de areia, portanto menor teor de umidade para o mesmo valor de sucção.

A figura 4.12 apresenta a relação entre sucção e saturação dos solos em estudo. Nota-se que quanto maior a porcentagem de finos dos solos em estudo (descrito no capítulo 3) maior foi à umidade ou saturação para um mesmo nível de sucção alcançado. Desta forma fica claro o efeito do tipo e textura do solo e que a distribuição granulométrica influi nas forças capilares, alterando assim o nível de sucção alcançado. Os solos “A” e “C” são solos argilosos com grande porção de finos. Nestes as forças capilares e de adsorção são as principais parcelas da sucção matricial. Os solos “B” e “D” são solos arenosos, a sucção medida está associada somente a forças capilares. Fredlund e Rahardjo (1993) relacionam este comportamento com as forças capilares, isto é, com a distribuição granulométrica.



**Figura 4.11 - Relação entre sucção e teor de umidade, para amostras moldadas na umidade ótima ( $W^*$ = umidade ótima), seguidas de processo de secagem para os solos A, B, C e D.**

A tabela 4.2 apresenta as equações de calibração (figura 4.11) para as curvas da relação de sucção e teor de umidade dos solos em estudo, moldados na umidade ótima submetidos à processo de secagem.

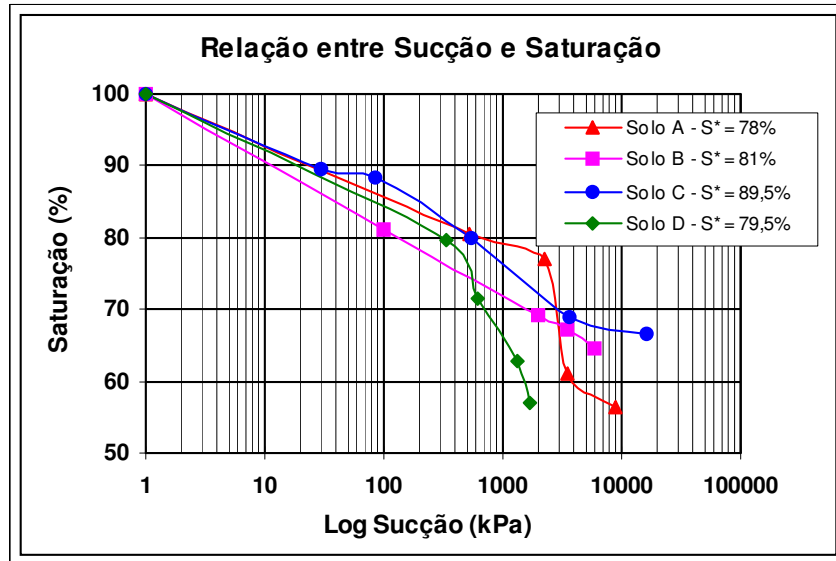


Figura 4.12 - Relação entre sucção e saturação, para amostras moldadas na umidade ótima ( $W^*$ = umidade ótima), seguidas de processo de secagem para os solos A, B, C e D.

Tabela 4.2

Solo	$W^*$ (%)	Sucção Medida (kPa)	Relação de Ajuste ( $R^2$ ) Inserindo o ponto de saturação de 100% ( $S_{at} = 100\%$ ; Sucção = 0 kPa)
A	21,00	500	$w = -1 \cdot 10^{-11} \cdot S^3 + 4 \cdot 10^{-7} \cdot S^2 - 0,0037 S + 25,657$ (Polinômio)
B	15,75	120	$w = -0,7893 \cdot \ln(S) + 19,399$ (Logarítimo)
C	38,50	80	$w = -1,5693 \cdot \ln(S) + 43,797$ (Logarítimo)
D	13,20	320	$w = 3 \cdot 10^{-6} \cdot S^2 - 0,0083 \cdot S + 16,213$ (Polinômio)

Equações de ajuste da relação entre sucção e o teor de umidade para os solos em estudo.

### 4.2.3 Ensaio de módulo de resiliência

Os módulos de resiliência para os solos em estudo foram determinados em função da tensão desvio e de acordo com os procedimentos das normas para realização de ensaios, citadas no capítulo 3.

#### 4.2.3.1 Relação entre módulo de resiliência com processo de secagem ou umedecimento

A figura 4.13 (a) apresenta os resultados obtidos do ensaio de módulo de resiliência para o solo “A” de acordo com a norma AASHTO, através do processo de secagem ao ar (19%), umedecimento por absorção (23%) e na umidade ótima (21%) das amostras compactadas nas condições ótimas. Para teor de umidade de 23%, atingido por processo de umedecimento ocorre uma redução nos valores de módulos de resiliência com relação aos outros valores de teor de umidade para o mesmo nível de tensão desvio. Isto indica que um aumento no teor de umidade acima do valor ótimo provoca um decréscimo na sucção, conseqüentemente uma diminuição no módulo de resiliência. Por outro lado, os resultados obtidos de módulo de resiliência por processo de secagem até atingir o valor de 19% situaram-se levemente superiores aos valores encontrados para as amostras compactadas no teor de umidade ótima. A figura 4.3 (b) apresenta os resultados obtidos de módulo de resiliência para o solo “A” com maiores valores de tensões desvio e tensão confinante. Este estudo foi realizado somente para o solo “A” com a finalidade de avaliar melhor o comportamento deste material, utilizado nas pistas experimentais.

A figura 4.14 apresenta os resultados obtidos do ensaio de módulo de resiliência para o solo “B”, através do processo de secagem ao ar (valor atingido de teor de umidade =14,6%), umedecimento por absorção (16,4%) e na umidade ótima (15,75%) das amostras nas condições ótimas de compactação. Observa-se que para teor de umidade de 16,4% atingido por processo de umedecimento ocorre uma redução nos valores de módulos de resiliência com relação aos outros valores de teor de umidade para o mesmo nível de tensão desvio.

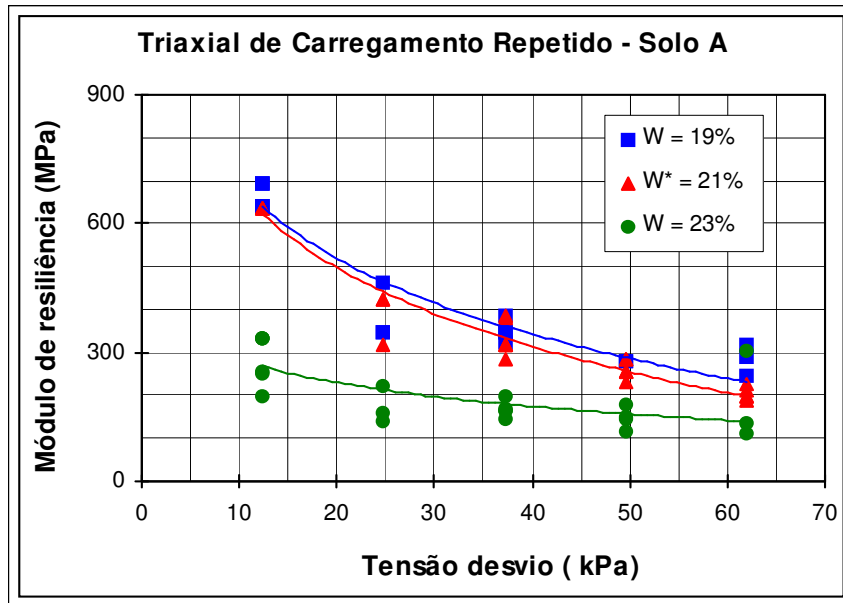


Figura 4.13 (a) - Relação entre módulo de resiliência e a tensão desvio por processo de secagem ou umedecimento para o solo A ( $W^*$  =umidade ótima).

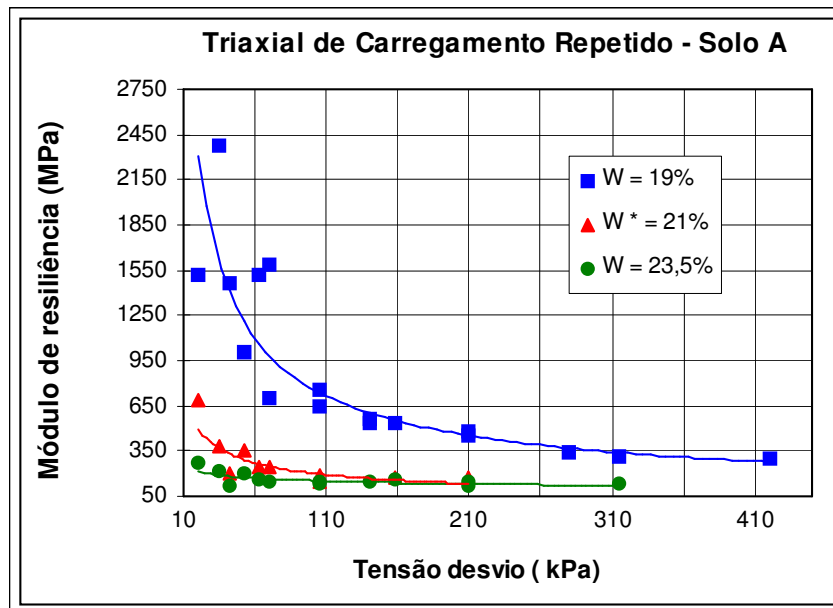
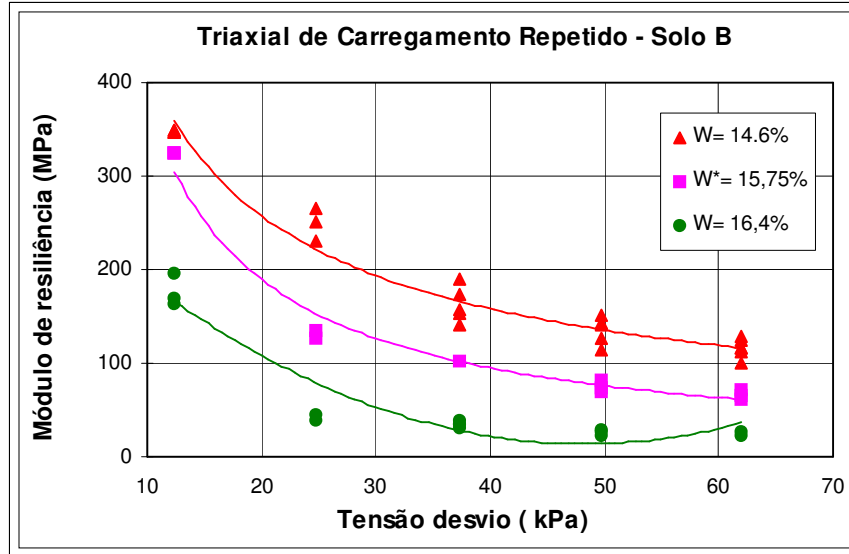


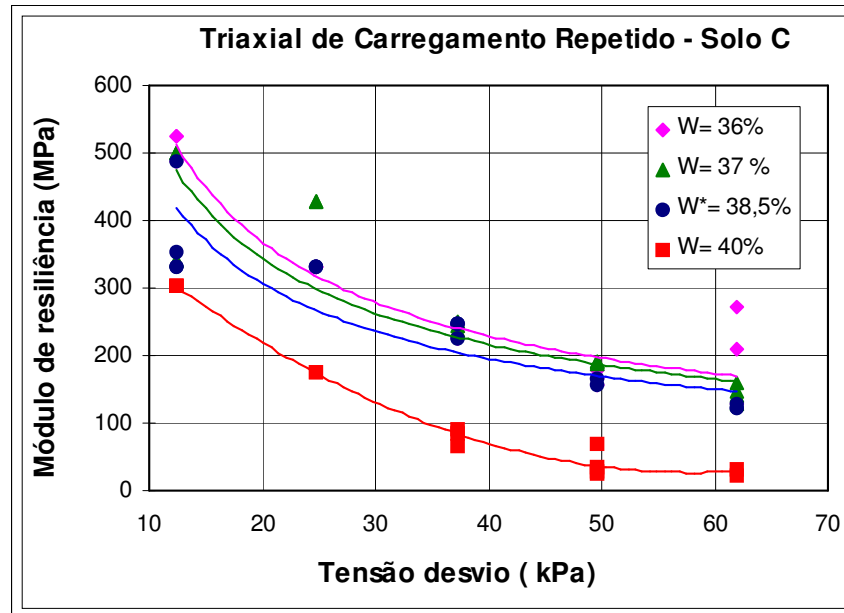
Figura 4.13 (b) - Relação entre módulo de resiliência e a tensão desvio por processo de secagem ou umedecimento para o solo A ( $W^*$  =umidade ótima).

Diferindo dos resultados obtidos para o solo “A”, o solo “B” apresenta maiores diferenças para os valores de módulo de resiliência de amostras com o teor de umidade ótimo e teor de umidade abaixo desta. Quanto menor o teor de umidade (14,6%), maiores são os valores de sucção e de módulo de resiliência. Este comportamento diferenciado pode estar relacionado com a granulometria do solo.



**Figura 4.14 - Relação entre módulo de resiliência e a tensão desvio por processo de secagem ou umedecimento para o solo B (W\* =umidade ótima).**

A figura 4.15 apresenta os resultados obtidos do ensaio de módulo de resiliência através do processo de secagem ao ar (36% e 37%), umedecimento por absorção (40%) e na umidade ótima (38,5%) das amostras compactadas do solo “C”. No teor de umidade ótimo o comportamento semelhante aos solos A e B foi observado para este solo, isto é, quanto maior o teor de umidade alcançado por umedecimento, menor o valor de módulo de resiliência com relação aos outros teores de umidade, para o mesmo nível de tensão desvio. Por outro lado, os resultados obtidos de módulo de resiliência por processo de secagem até atingir o valor de 36% ou 37% apresentam valores superiores aos encontrados para as amostras compactadas no teor de umidade ótima. As curvas que descrevem este comportamento para amostras com teores de umidade ótimo ou abaixo desta são praticamente paralelas.



**Figura 4.15 - Relação entre módulo de resiliência e a tensão desvio por processo de secagem ou umedecimento para o solo C ( $W^*$  =umidade ótima).**

A figura 4.16 apresenta os resultados do solo “D” obtidos do ensaio de módulo de resiliência, através do processo de secagem ao ar (11,7%), umedecimento por absorção (14,7%) e na umidade ótima (13,2%) das amostras compactadas nas condições ótimas de compactação. Observa-se que para teor de umidade de 14,7% atingido por processo de umedecimento ocorre uma redução nos valores de módulos de resiliência com relação aos outros valores de teores de umidade para o mesmo nível de tensão desvio. Para o teor de umidade de 11,7% atingido por processo de secagem ocorre um aumento nos valores de módulos de resiliência.

A figura 4.17 apresenta o comportamento resiliente para os solos em estudo, em amostras compactadas nas condições ótimas de compactação. Os solos argilosos (“A” e “C”) apresentaram maiores valores de módulo de resiliência, sendo que o solo “A” com o maior valor de índice de plasticidade apresentou valores de módulo de resiliência maiores. Os solos arenosos (“B” e “D”) apresentaram valores de módulo de resiliência menores. Considera-se que o solo com índice de plasticidade maior apresenta maiores valores de módulo de resiliência.

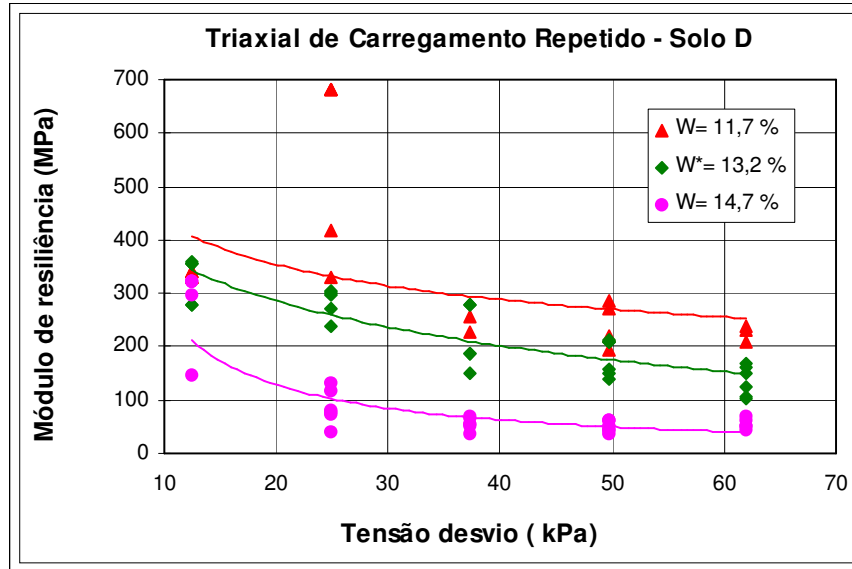


Figura 4.16 - Relação entre módulo de resiliência e a tensão desvio por processo de secagem ou umedecimento para o solo D ( $W^*$  =umidade ótima).

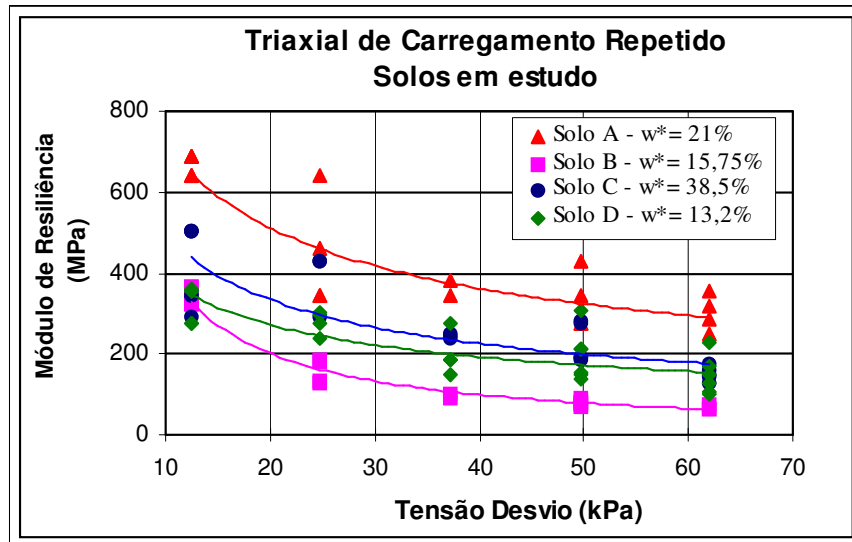


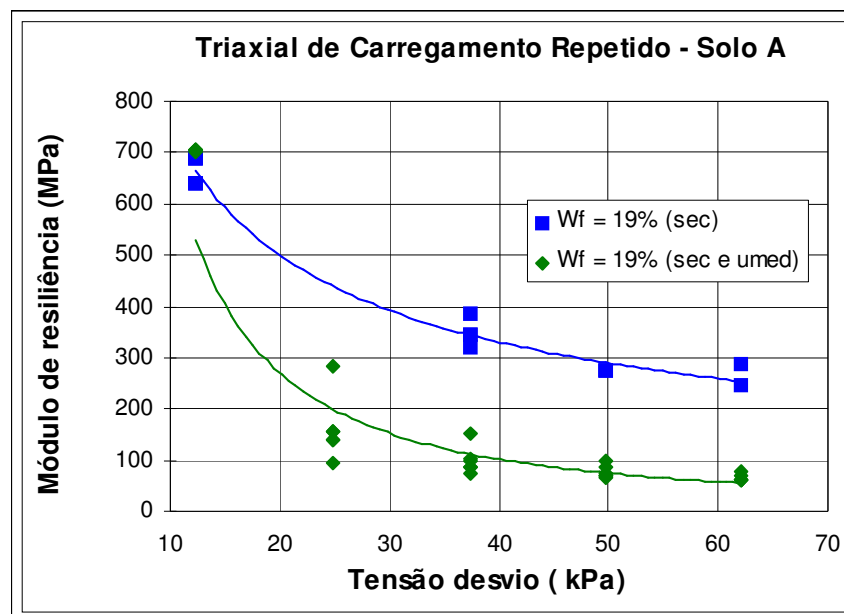
Figura 4.17 - Relação entre módulo de resiliência e a tensão desvio pela para umidade ótima para os solos em estudo ( $W^*$  =umidade ótima).



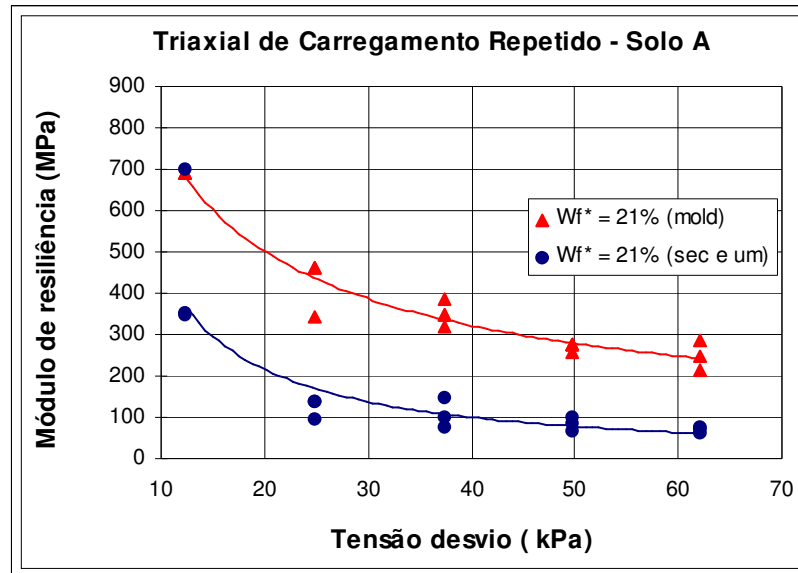
### 4.2.3.2 Relação entre o módulo de resiliência com os processos de secagem e secagem e umedecimento

A fim de estudar o efeito das variações ambientais sofridas pelo subleito em períodos de secas seguidos de períodos de chuvas, realizaram-se em laboratório ciclos de secagem e secagem e umedecimento, para o solo “A”, em corpo de prova compactado na umidade ótima (descrito no capítulo 3).

A figura 4.18 mostra os resultados dos ensaios de módulo de resiliência através de processos de secagem e secagem e umedecimento para o teor de umidade abaixo da umidade ótima (19%). Observa-se que os valores de módulo de resiliência obtidos no processo de secagem e umedecimento são menores que os obtidos no processo de secagem. O ciclo de secagem e umedecimento provocou uma redução na sucção, acarretando um decréscimo no módulo de resiliência. Por outro lado, os resultados obtidos de módulo de resiliência na umidade ótima e os encontrados para as amostras compactadas na umidade ótima e posteriormente submetidas aos processos de secagem (- 5% do valor ótimo) e umedecimento até atingir o valor ótimo (21%) apresentaram também diferenças entre os dois processos (figura 4.19).

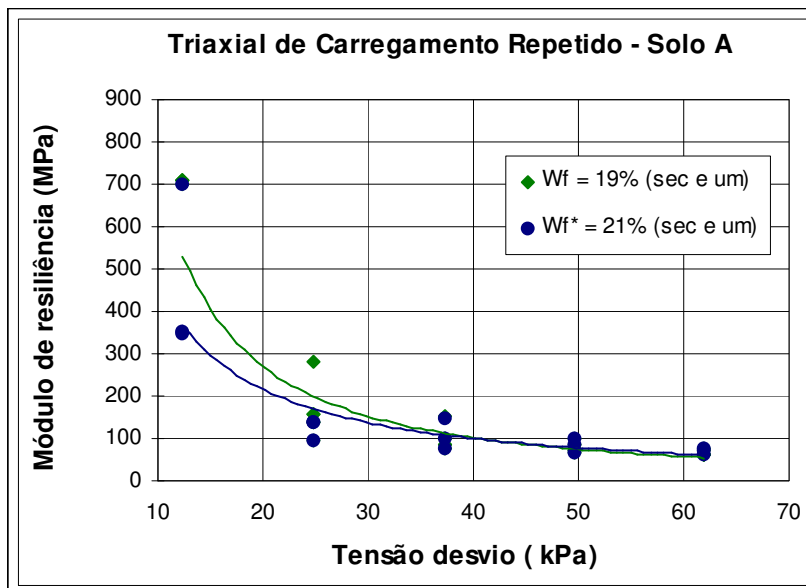


**Figura 4.18 - Relação entre módulo de resiliência e a tensão desvio por processo de secagem e secagem e umedecimento para o solo A (Wf = umidade final).**



**Figura 4.19 - Relação entre módulo de resiliência e a tensão desvio por processo de secagem e umedecimento e na umidade de moldagem (21%) para o solo A (Wf = umidade final; W\* = umidade ótima).**

A figura 4.20 apresenta resultados encontrados de módulo de resiliência submetidos a ciclo de secagem e umedecimento para teores de umidade de 19% e 21%. Observa-se que o ciclo de secagem e umedecimento para estes teores de umidade, os módulos de resiliência são equivalentes para tensão desvio superior a 40 kPa. Abaixo deste valor de tensão desvio, quanto menor o teor de umidade alcançado maior será o valor de módulo de resiliência.



**Figura 4.20 - Relação entre módulo de resiliência e a tensão desvio por processo de secagem e umedecimento para o solo A (Wf = umidade final).**

A tabela 4.3 apresenta os modelos de ajuste para as curvas de módulo de resiliência dos solos em estudo, moldados na umidade ótima submetidos ao processo de secagem e/ou umedecimento.

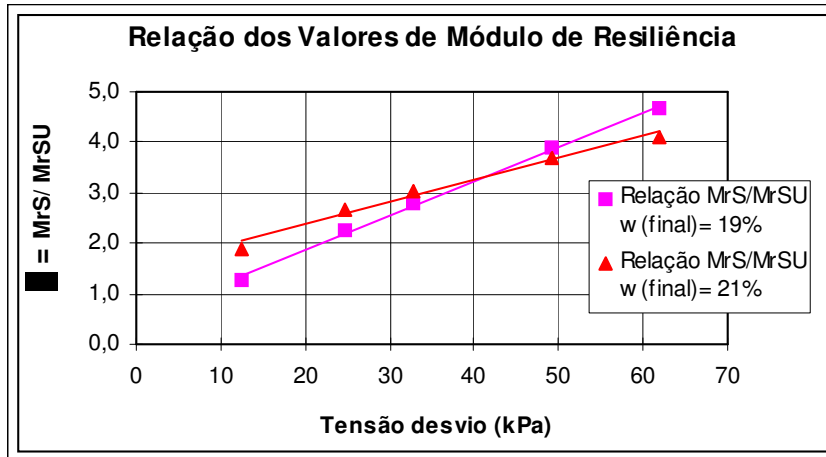
**Tabela 4.3**

<b>Solo</b>	<b>W</b>	<b>Modelos de Ajuste</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
	(%)	$M_r = K_1 \cdot \sigma_d^{-k_2}$	
<b>A *</b>	19	$M_r = 2973,3 \cdot \sigma_d^{-0,5955}$	<b>0,98</b>
<b>A *</b>	21	$M_r = 3402,3 \cdot \sigma_d^{-0,6303}$	<b>0,94</b>
<b>A *</b>	23	$M_r = 698,73 \cdot \sigma_d^{-0,3893}$	<b>0,48</b>
<b>A **</b>	19	$M_r = 19793 \cdot \sigma_d^{-0,7069}$	<b>0,86</b>
<b>A **</b>	21	$M_r = 2697,4 \cdot \sigma_d^{-0,5618}$	<b>0,71</b>
<b>A **</b>	23	$M_r = 394,3 \cdot \sigma_d^{-0,2052}$	<b>0,47</b>
<b>A ***</b>	19	$M_r = 18527 \cdot \sigma_d^{-1,4114}$	<b>0,88</b>
<b>A ***</b>	21	$M_r = 6007 \cdot \sigma_d^{-1,111}$	<b>0,83</b>
<b>B *</b>	14,6	$M_r = 2093 \cdot \sigma_d^{-0,7002}$	<b>0,95</b>
<b>B *</b>	15,75	$M_r = 3753,2 \cdot \sigma_d^{-0,9974}$	<b>0,98</b>
<b>B *</b>	16,4	$M_r = 1132,6 \cdot \sigma_d^{-0,9521}$	<b>0,72</b>
<b>C *</b>	36	$M_r = 2835,4 \cdot \sigma_d^{-0,6751}$	<b>0,79</b>
<b>C *</b>	37	$M_r = 2543,5 \cdot \sigma_d^{-0,6677}$	<b>0,84</b>
<b>C *</b>	38,5	$M_r = 2161 \cdot \sigma_d^{-0,6515}$	<b>0,83</b>
<b>C *</b>	40	$M_r = 13233 \cdot \sigma_d^{-1,4637}$	<b>0,87</b>
<b>D *</b>	11,7	$M_r = 666,38 \cdot \sigma_d^{-0,2982}$	<b>0,63</b>
<b>D *</b>	13,2	$M_r = 1396,9 \cdot \sigma_d^{-0,5414}$	<b>0,72</b>
<b>D *</b>	14,7	$M_r = 2883,3 \cdot \sigma_d^{-1,0374}$	<b>0,72</b>
* Processo de secag. ou umedec.			
** Processo de secag.( estado de tensões maiores)			
*** Processo de secag. e umedec.			

**Modelos de ajuste do módulo de resiliência para os solos em estudo.**

A figura 4.21 apresenta relação entre os valores de módulo de resiliência obtidos nos processos de secagem e secagem e umedecimento para teores de umidade alcançados de 19% e 21%. Foi observada a existência de uma relação linear entre os valores de módulo de

resiliência com a tensão desvio em amostras submetidas a diferentes processos de variação de umidade.

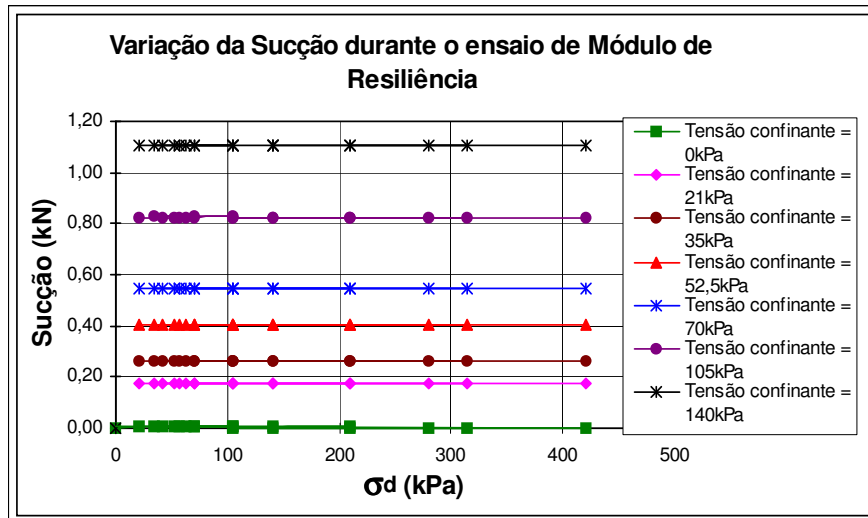


**Figura 4.21 - Relação entre os ensaios de módulo de resiliência e tensão desvio com processo de secagem e secagem e umedecimento, para amostras compactadas na umidade ótima para o solo A.**

#### 4.2.3.3 Medidas de sucção durante o ensaio de módulo de resiliência

Para o solo “A”, como descrito anteriormente, realizou-se medidas de sucção durante o ensaio triaxial de carregamento repetido em amostras compactadas na umidade ótima com o objetivo de se observar a variação da sucção.

As medidas de sucção (figura 4.22) foram realizadas através de uma probe. Os resultados indicam que para uma mesma tensão confinante aplicada, a sucção não varia. Ocorrerá variação na sucção somente se o nível de tensão confinante for alterado, conforme a figura 4.22. A magnitude desta variação é proporcional ao incremento da tensão confinante.

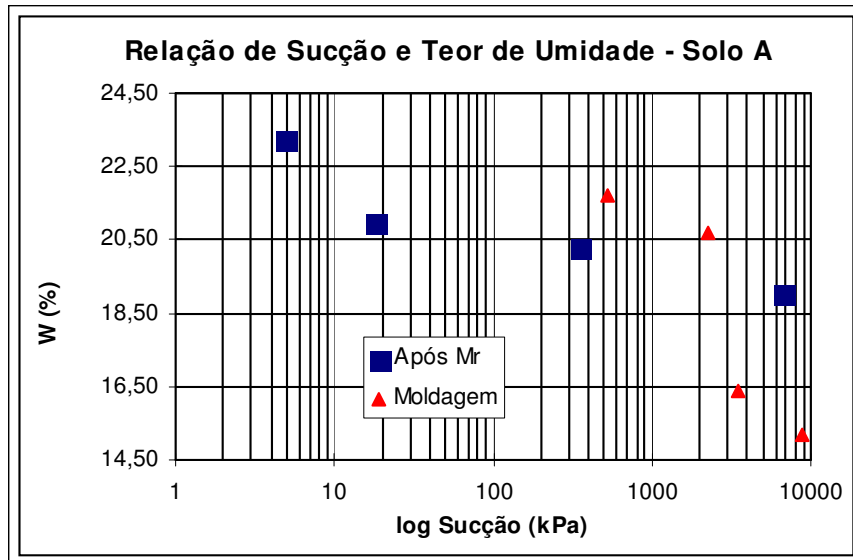


**Figura 4.22 - Relação da variação da sucção durante o ensaio de módulo de resiliência em função da tensão desvio e confinante aplicadas para o solo A.**

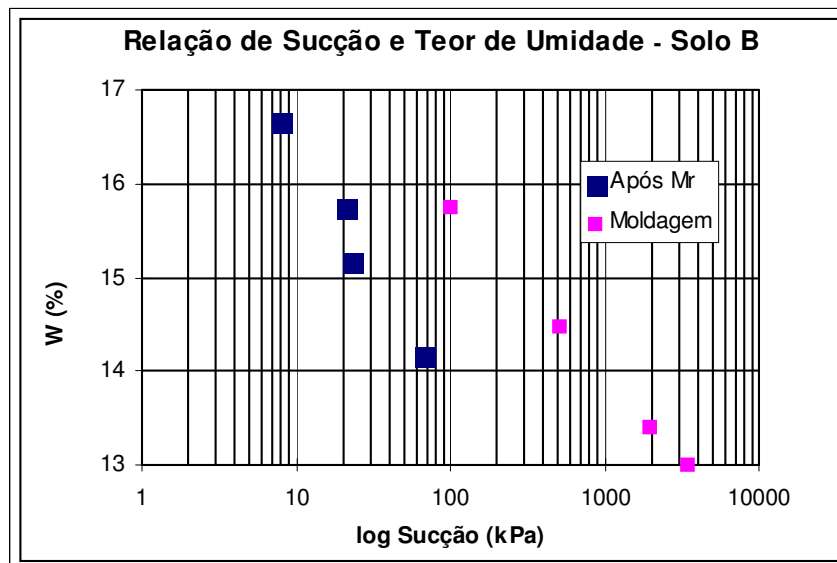
#### 4.2.3.4 Medidas de sucção dos solos após o ensaio de módulo de resiliência

Após os ensaios cíclicos para medida do módulo de resiliência, foi determinada a sucção mediante a técnica do papel filtro, para os solos em estudo. A sucção medida após o ensaio de módulo de resiliência em amostras compactadas nas condições ótimas, submetidas ao processo de secagem (ao ar) ou umedecimento (por absorção), apresentou valores menores que os medidos em corpos de prova que não sofreram nenhuma solicitação de tensões (figura 4.23, 4.24, 4.25 e 4.26). Nota-se que ao reduzir o teor de umidade ocorre um aumento no valor da sucção e este comportamento é semelhante para os diferentes solos em estudo.

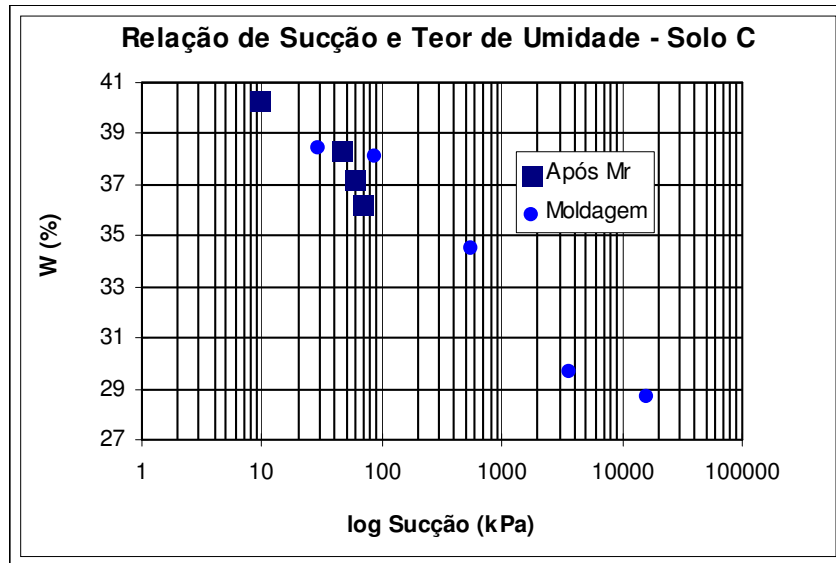
Para todos os solos em estudo, ocorre uma redução nos valores de sucção obtidos após o ensaio de módulo de resiliência, comparado aos valores de sucção em corpos de prova antes do ensaio. Admite-se que o carregamento cíclico causa uma redução dos vazios na amostra, alterando a estrutura da mesma. Como o ensaio é não drenado, com a redução do índice de vazios, o grau de saturação aumenta, ocasionando a redução na sucção.



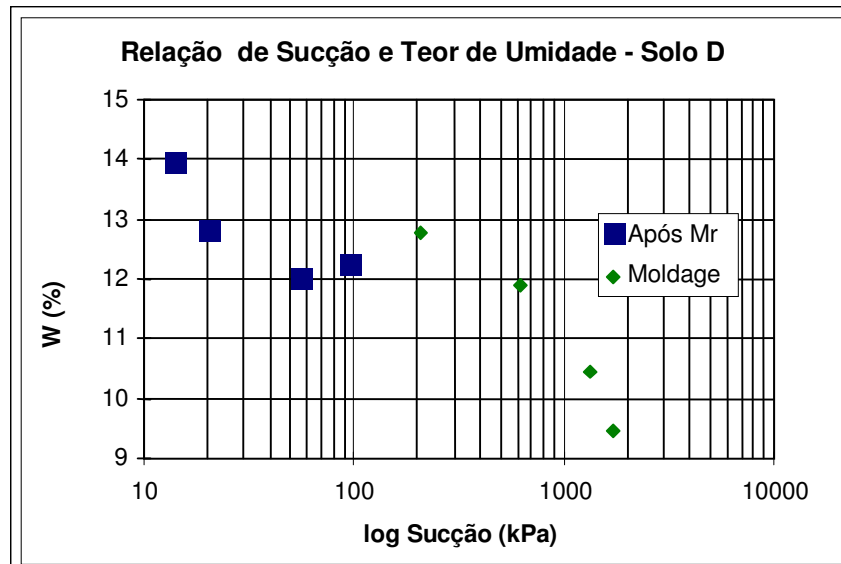
**Figura 4.23 - Relação entre sucção e teor de umidade, antes e após o ensaio de módulo de resiliência, para amostras do solo A, moldadas na umidade ótima ( $W^*=21\%$ ), com processo de secagem ou umedecimento.**



**Figura 4.24 - Relação entre sucção e teor de umidade, antes e após o ensaio de módulo de resiliência, para amostras do solo B, moldadas na umidade ótima ( $W^*=15,75\%$ ), com processo de secagem ou umedecimento.**



**Figura 4.25 - Relação entre sucção e teor de umidade, antes e após o ensaio de módulo de resiliência, para amostras do solo C, moldadas na umidade ótima ( $W^*= 38,5\%$ ), com processo de secagem ou umedecimento.**



**Figura 4.26 - Relação entre sucção e teor de umidade, antes e após o ensaio de módulo de resiliência, para amostras do solo D, moldadas na umidade ótima ( $W^*= 13,2\%$ ), com processo de secagem ou umedecimento.**

#### 4.2.3.5 Relação entre o módulo de resiliência e a sucção

Fredlund et al. (1996) indicaram que a relação entre a sucção e teor de umidade permite determinar o comportamento do solo frente à variação de umidade. A partir da relação da sucção com o teor de umidade dos solos em estudo, obtido pelo método do papel filtro, foi possível determinar a relação entre o módulo de resiliência e a sucção. Os teores de umidade foram obtidos utilizando os processos de secagem ou umedecimento das amostras compactadas nas condições ótimas.

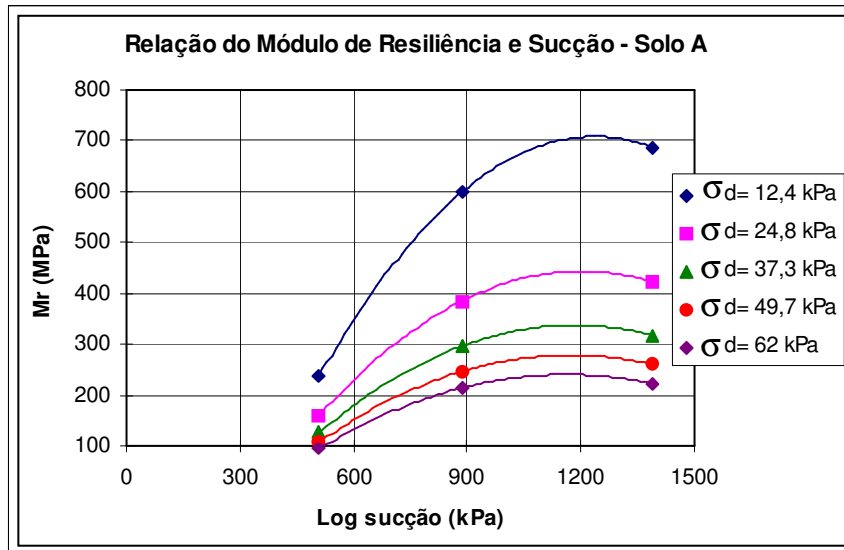
Nas figuras 4.27, 4.28, 4.29 e 4.30 apresentam-se os resultados de módulo de resiliência para amostras compactadas e submetidas a processo de secagem ou umedecimento dos solos “A”, “B”, “C” e “D” respectivamente, em função da sucção. É notável que a redução da sucção (aumento no teor de umidade) dos corpos de prova provoca uma diminuição no módulo de resiliência, independente do nível de tensões. Os valores de módulo de resiliência decrescem com o aumento da tensão desvio aplicada.

Para o solo “A”, observa-se aumento significativo do módulo de resiliência para valores maiores de sucção, até atingir 1000 kPa. Após este valor da sucção, os módulos de resiliência não apresentam um aumento acentuado com a sucção como se verifica no primeiro trecho (figura 4.27). Este comportamento também foi observado por Edil e Motan (1979) e Phillip (1994).

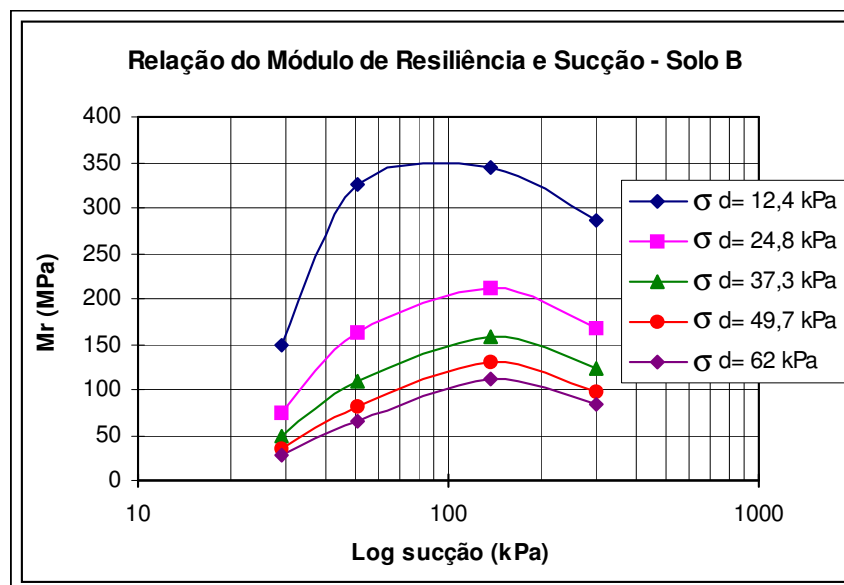
No caso do solo “B” (figura 4.28), o crescimento acentuado ocorre para valores de sucção até 150 kPa onde o valor de módulo de resiliência atinge o valor máximo para qualquer nível de tensão desvio (exceto para  $\sigma_d = 12,4$  kPa). Posteriormente ocorre uma diminuição do módulo com o aumento da sucção.

Comportamento similar foi verificado para o solo C (figura 4.29) que apresenta um crescimento acentuado para valores de sucção até 200 kPa, onde o valor de módulo de resiliência atinge o valor máximo para qualquer nível de tensão desvio. Posteriormente, ocorre uma diminuição do módulo com o aumento da sucção.

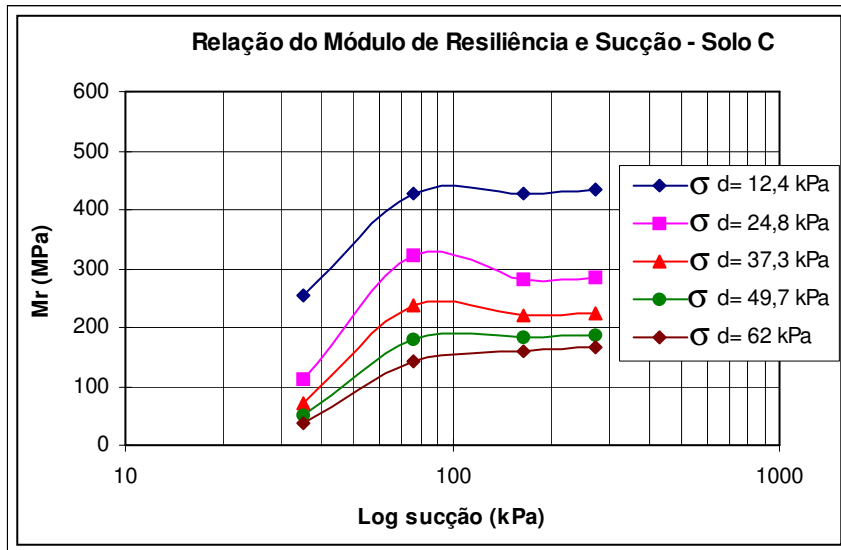




**Figura 4.27 - Relação entre módulo de resiliência e sucção para amostras compactadas na umidade ótima, com secagem ou umedecimento para o solo A.**

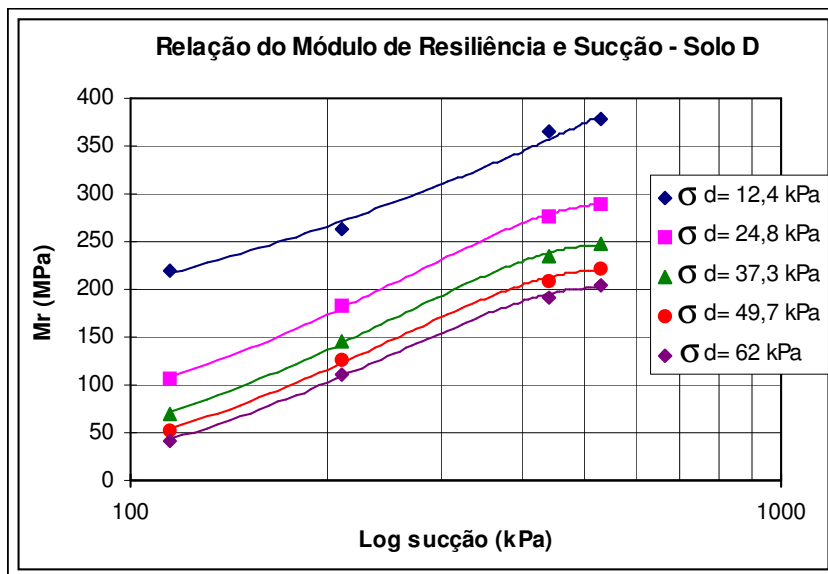


**Figura 4.28 - Relação entre módulo de resiliência e sucção para amostras compactadas na umidade ótima, com secagem ou umedecimento para o solo B.**



**Figura 4.29 - Relação entre módulo de resiliência e sucção para amostras compactadas na umidade ótima, com secagem ou umedecimento para o solo C.**

No caso do solo “D” (figura 4.30) observa-se aumento significativo do módulo de resiliência com o aumento da sucção, sem que se possa definir um valor máximo de módulo de resiliência para os diferentes níveis de tensões desvio aplicada.



**Figura 4.30 - Relação entre módulo de resiliência e sucção para amostras compactadas na umidade ótima, com secagem ou umedecimento para o solo D.**

#### 4.2.3.6 Relação entre o módulo de resiliência, normalizado pela tensão desvio e a sucção

Com o objetivo de avaliar somente o efeito da sucção no módulo de resiliência, eliminando-se o efeito das tensões aplicadas, os valores de módulo de resiliência obtidos para os solos em estudo foram normalizados pela tensão desvio aplicada.

O solo “A” (figura 4.31), solo “B” (figura 4.32) e solo “C” (figura 4.33) apresentaram, para uma tensão desvio constante, uma relação não linear entre o módulo de resiliência e a sucção. Descrevem que existe um valor limite de sucção a partir do qual o módulo de resiliência decresce com o aumento da sucção. Este comportamento foi observado por Edil e Motan (1979) e Phillip (1994).

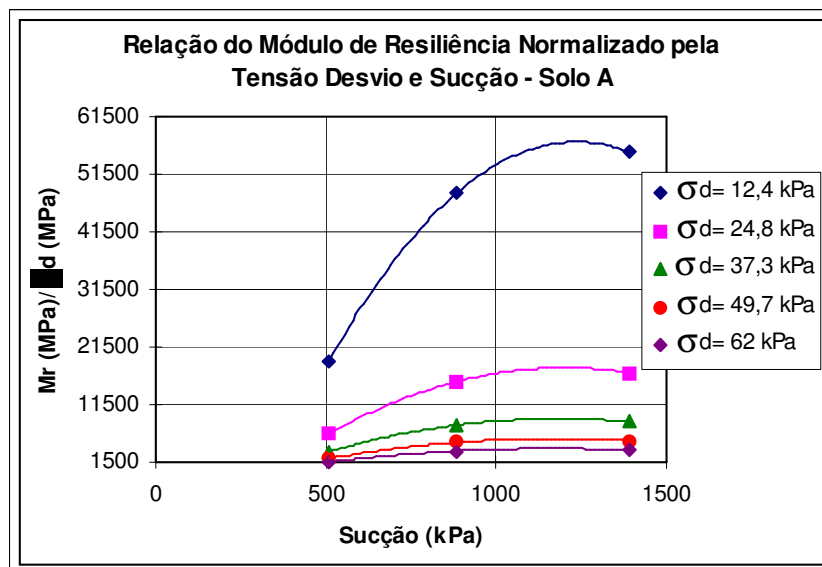
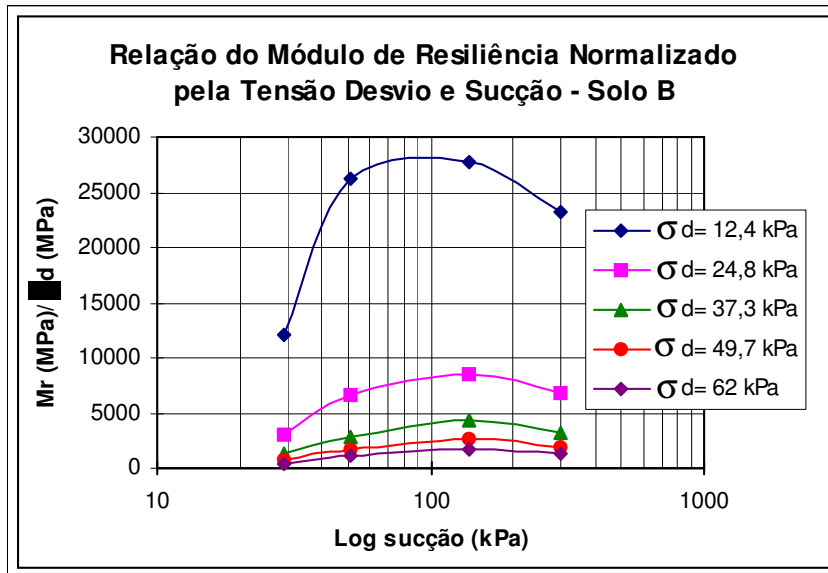
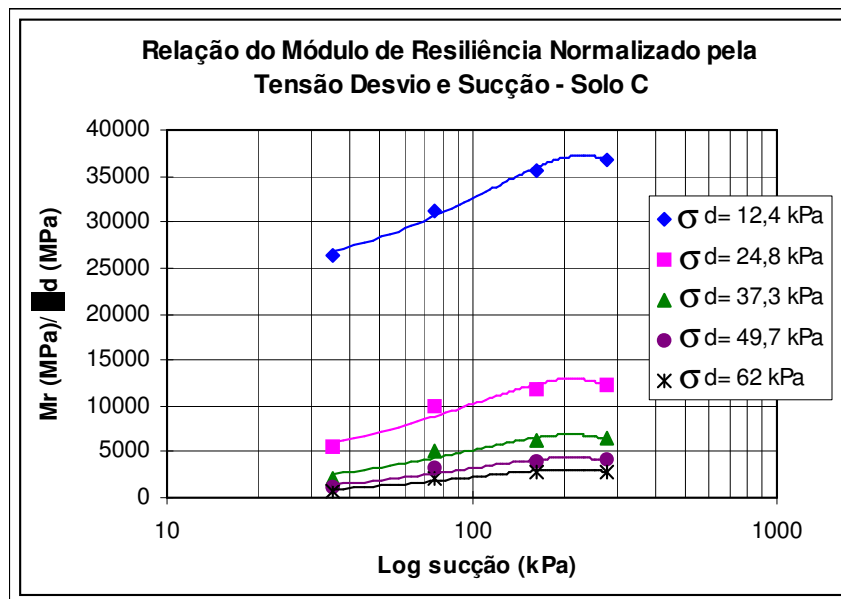


Figura 4.31 - Relação entre módulo de resiliência normalizado pela tensão desvio e a sucção para amostras compactadas na umidade ótima, com secagem ou umedecimento para o solo A.

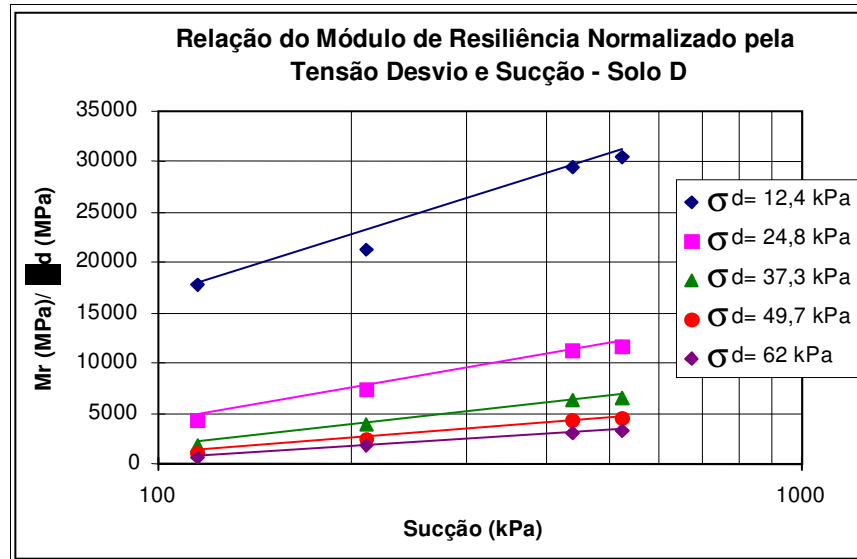


**Figura 4.32 - Relação entre módulo de resiliência normalizado pela tensão desvio e a sucção para amostras compactadas na umidade ótima, com secagem ou umedecimento para o solo B.**



**Figura 4.33 - Relação entre módulo de resiliência normalizado pela tensão desvio e a sucção para amostras compactadas na umidade ótima, com secagem ou umedecimento para o solo C.**

O solo “D” (figura 4.34) apresentou, para uma tensão desvio constante, uma relação linear entre o módulo de resiliência e a sucção. Este comportamento foi observado por Phillip (1994), destacando-o para solos granulares.



**Figura 4.34 - Relação entre módulo de resiliência normalizado pela tensão desvio e a sucção para amostras compactadas na umidade ótima, com secagem ou umedecimento para o solo D.**

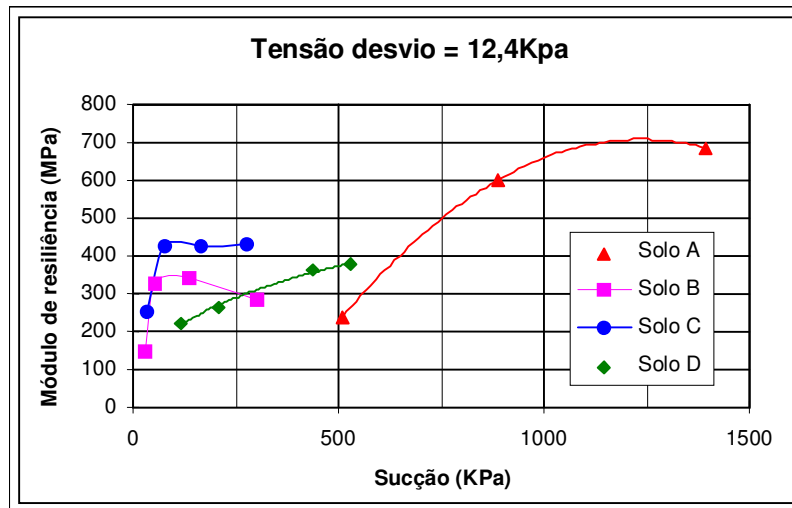
#### 4.2.3.7 Relação entre módulo de resiliência e sucção para tensões desvio constantes

Com o intuito de analisar separadamente o efeito da tensão desvio aplicada nos ensaios de módulo de resiliência, plotou-se curvas de módulo de resiliência por sucção, para cada nível de tensão desvio. Os resultados referem-se aos solos em estudo compactados nas condições ótimas.

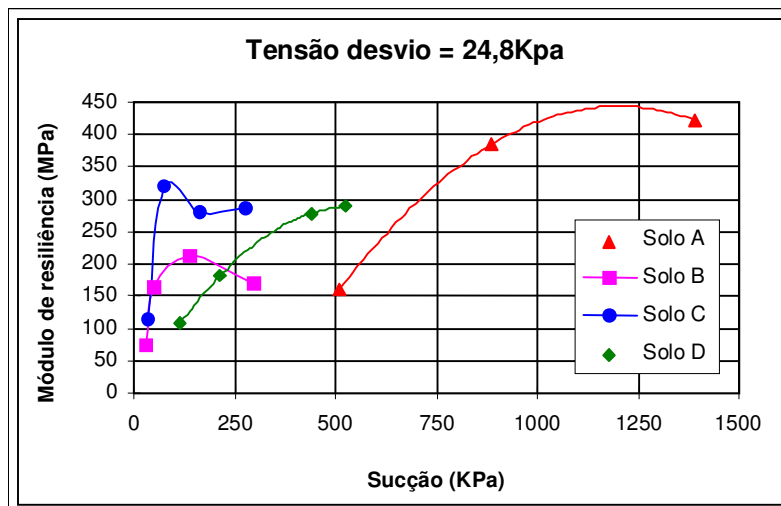
As figuras 4.35, 4.36, 4.37, 4.38 e 4.39 apresentam conjuntamente, para os solos em estudo, a relação de módulo de resiliência e sucção, para níveis de tensão desvio constante (12,4 kPa , 24,8 kPa , 37,3 kPa , 49,7 kPa e 62,0 kPa, respectivamente).

O solo “A” apresenta os maiores valores de módulo de resiliência para qualquer nível de tensão desvio. Os módulos de resiliência para os solos “B”, “C” e “D” para baixos

níveis de tensões apresentam valores muito próximos e para níveis de tensões mais elevados apresentam diferenças significativas. O solo “B” apresentou menores valores de módulo de resiliência para a mesma sucção, quando comparado com os solos “C” e “D”, independente da tensão desvio. Os módulos de resiliência dos solos em estudo decrescem signitivamente quanto maior o nível de tensão desvio aplicada.

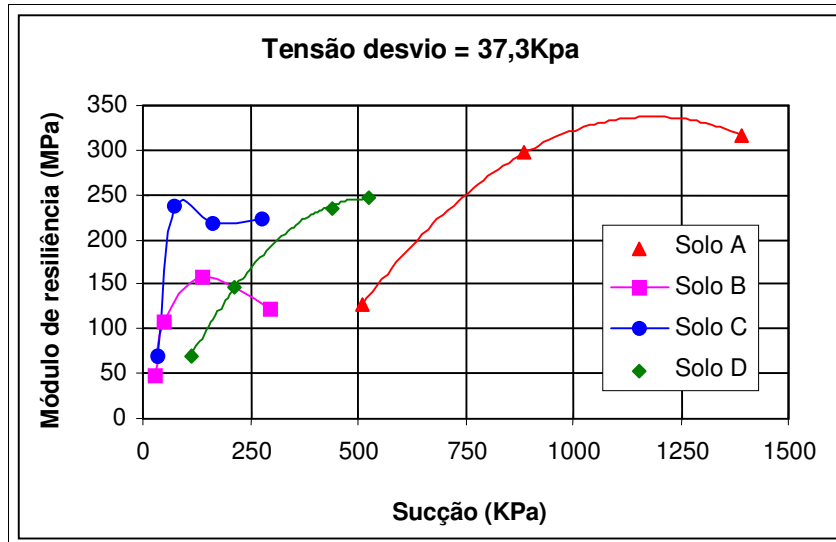


**Figura 4.35 - Relação entre módulo de resiliência e sucção para amostras compactadas na umidade ótima, com secagem ou umedecimento para tensão desvio constante de 12,4 kPa para os solos em estudo.**

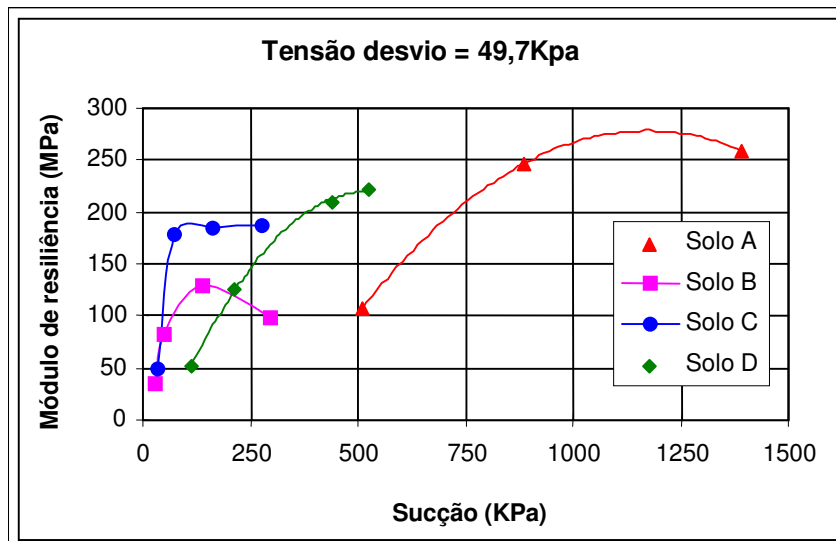


**Figura 4.36 - Relação entre módulo de resiliência e sucção para amostras compactadas na umidade ótima, com secagem ou umedecimento para tensão desvio constante de 24,8 kPa para os solos em estudo.**

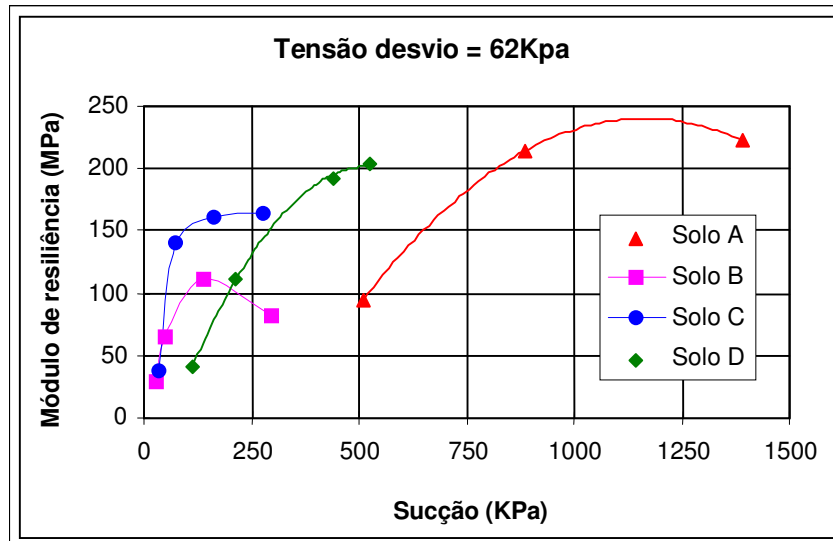
Com os resultados encontrados neste estudo o solo A apresenta melhor comportamento elástico que os demais solos, indicando o seu desempenho favorável quando utilizado como material de subleito em estruturas de pavimentação.



**Figura 4.37 - Relação entre módulo de resiliência e sucção para amostras compactadas na umidade ótima, com secagem ou umedecimento para tensão desvio constante de 37,3 KPa para os solos em estudo.**



**Figura 4.38 - Relação entre módulo de resiliência e sucção para amostras compactadas na umidade ótima, com secagem ou umedecimento para tensão desvio constante de 49,7 KPa para os solos em estudo.**



**Figura 4.39 - Relação entre módulo de resiliência e sucção para amostras compactadas na umidade ótima, com secagem ou umedecimento para tensão desvio constante de 62 KPa para os solos em estudo.**

### 4.3 RESULTADOS DE ENSAIOS DE CAMPO

Os resultados de campo foram obtidos para o solo A, que foi utilizado como reforço do subleito, do pavimento da pista experimental da Área de Pesquisas e Testes de Pavimentos. Estes resultados se dividem em:

- Medidas de sucção nas pistas experimentais, através de tensiômetros;
- Medidas de deflexão para obtenção do módulo de resiliência por retroanálise;
- Relação do módulo de resiliência e sucção de campo;
- Comparação entre resultados obtidos da relação entre sucção e módulo de resiliência de laboratório e campo.



### 4.3.1 Medidas de sucção

Durante o período de solicitação da pista experimental pelo Simulador de Tráfego, foram realizadas medidas diárias de sucção, com o uso de tensiômetros (JET FILL da Soilmoisture Equipment Corporation, figura 3.11). As medidas de sucção foram realizadas no período compreendido entre julho de 1996 e junho de 1997. Estes resultados referem-se à medidas realizadas durante a solicitação de quatro pistas, sendo o setor 10 da pista 01, os setores 13 e 08 da pista 04, os setores 12 e 10 da pista 08 e o setor 12 da pista 07. Os valores máximos e mínimos estão apresentados na figura 4.40, e estão grupados por semana.

No momento da instalação, foi medido o teor de umidade do subleito, estes valores eram de aproximadamente 25% e a sucção inicial de 10kPa, ou seja, o teor de umidade estava acima do teor de umidade ótimo de compactação (21%). Este fato indicou que o subleito apresentou o grau de saturação bastante elevado, motivo pelo qual as medidas de sucção não ultrapassaram os 14kPa, apresentando em certas ocasiões valores de sucção nulos (saturação 100%). Os valores de sucção nula foram registrados em períodos de altas precipitação e/ou temperaturas.

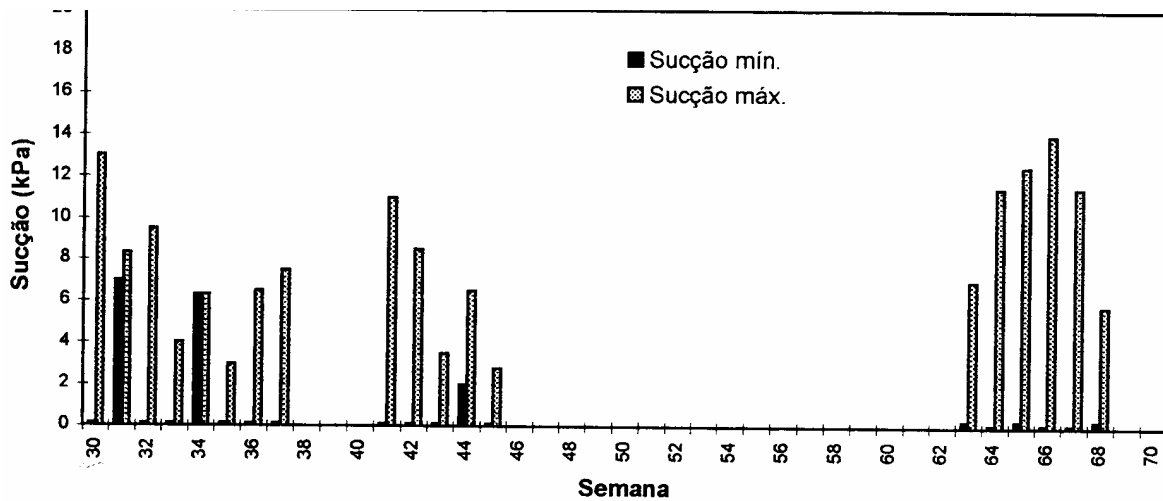


Figura 4.40 - Sucções máximas e mínimas durante o período de tráfego nas pistas 01, 04, 08 e 07.

### 4.3.2 Determinação do módulo de resiliência

Para a obtenção do módulo de resiliência em campo, do subleito (solo A), foi utilizada a técnica de retroanálise de bacias de deformação sob carga padrão de 82 kN, empregando-se viga Benkelman. Os levantamentos foram realizados antes do início do carregamento e após as aplicações de carga de trabalho (100 kN por eixo), no setor 08 da pista 04 da Área de Pesquisas e Testes de Pavimentos.

Com uso da metodologia proposta por Noureldim (1993) apresentada por Albernaz (1994) determinou-se por retroanálise das bacias de deformação os módulos de resiliência. A tabela 4.4 apresenta os resultados obtidos para o setor 08 da pista 04, representados graficamente na figura 4.41.

**Tabela 4.4**

$r_x$ (cm)	$D_x$ ajust. ( $10^{-2}$ mm)	$T_x$ (cm)	$E_{sg}$ (MPa)	$E_p$ (MPa)
15	33	23,04	240,02	299,39
20	25	34,12	237,722	284,87
25	19	45,93	251,04	269,44
30	15	58,46	272,43	259,45
60	4	146,58	462,94	245,68

#### Resultados de retroanálise do setor 04 da pista 08.

onde;

$r_x$  : distância radial (cm) a partir do ponto de aplicação da carga até o ponto considerado;

$D_x$  : deflexão ( $10^{-2}$  mm) correspondente ao ponto situado à distância radial  $r_x$ ;

$T_x$  : espessura efetiva do pavimento (cm) ;

$E_{sg}$  : módulo de resiliência do subleito (MPa);

$E_p$  : Módulo de resiliência efetivo do pavimento (MPa).

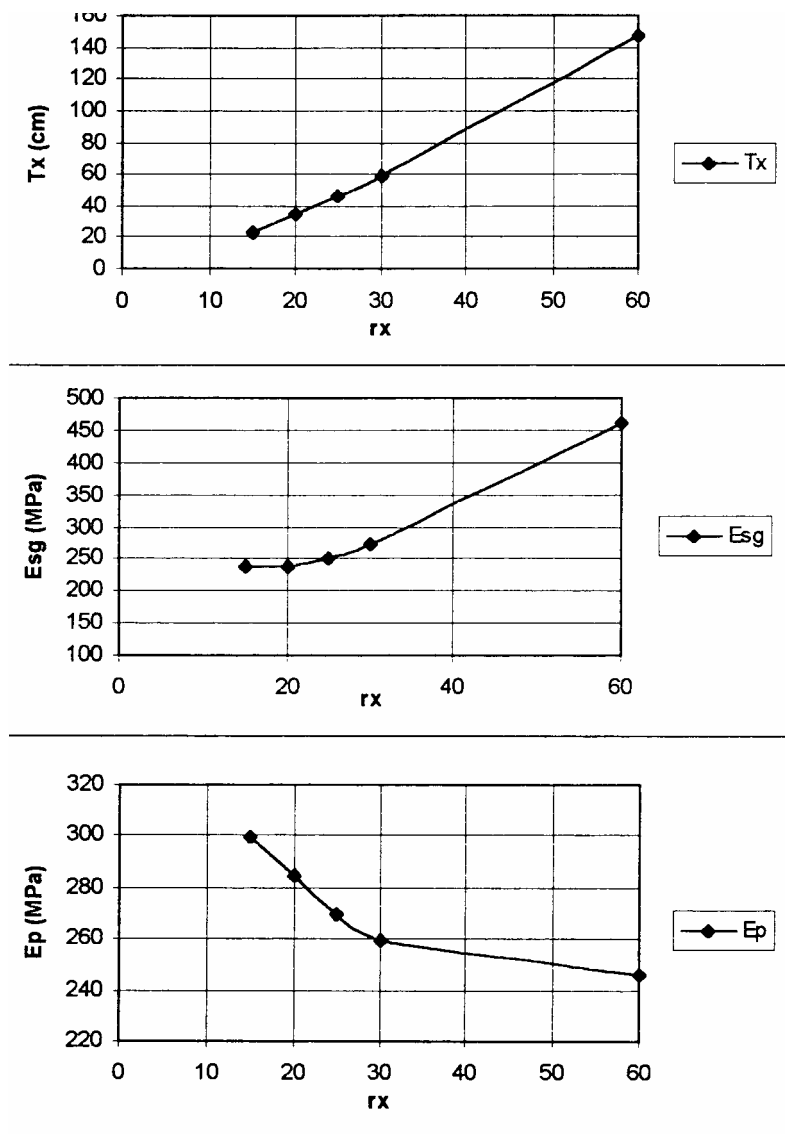


Figura 4.41 - Resultados de retroanálise do setor 04 da pista 08.

### 4.3.3 Relação entre o módulo de resiliência e a sucção de campo

A tabela 4.5 e a figura 4.42 demonstram a influência da sucção no módulo de resiliência “in situ” do solo usado como subleito ( $E_{sg}$ ), pistas experimental nº 1, 4 e 8 da Área de Pesquisas e Testes de Pavimentos.

Observa-se que a queda da sucção (ou o aumento do grau de saturação do subleito) provoca uma redução no seu módulo de resiliência. Para o conjunto de bacias retroanalisadas foi determinada a seguinte equação (4.1) de ajuste, definida para o intervalo de sucção ( $u_a - u_w$ ) de 0-14 kPa:

$$\log Mr = 2,1 + 0,0375 * (u_a - u_w) \quad (4.1)$$

onde:

Mr: Módulo de resiliência (MPa)

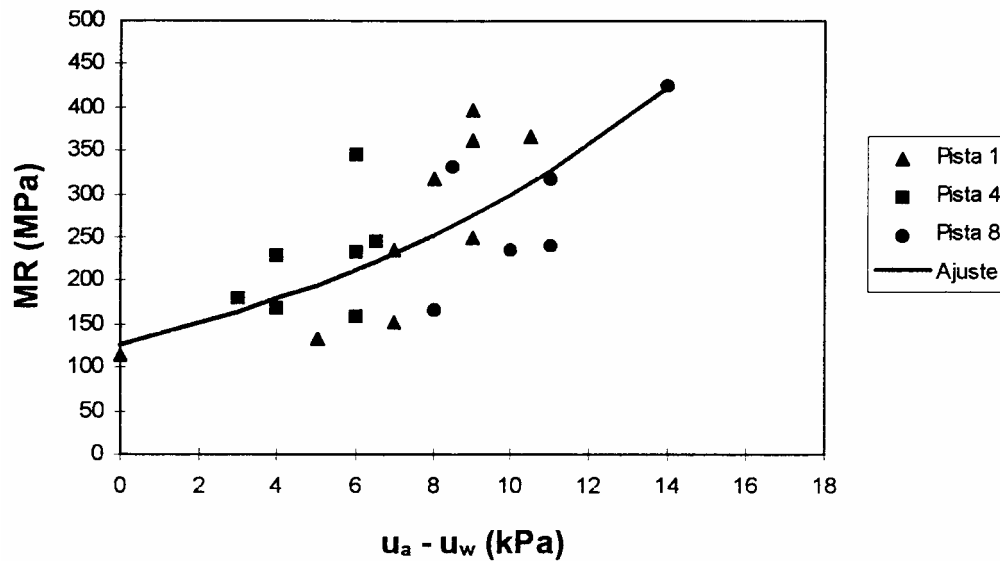
( $u_a - u_w$ ) : Sucção (kPa)

Sendo a faixa de variação da sucção “in situ” bastante estreita (0 a 14 kPa), o seu efeito no módulo de resiliência do subleito pode parecer exagerado. Entretanto, é pertinente salientar que o nível de tensões efetivas (que condicionam o comportamento dos solos quanto à deformabilidade) no topo do subleito de um pavimento é geralmente muito baixo. Para os pavimentos das pistas experimentais o valor de tensão efetiva (sucção) de até 14 kPa, que em valores absolutos pode parecer pequeno, mas quando comparado com a tensão geostática efetiva é muito significativo e justifica a redução do módulo de resiliência.

**Tabela 4.5**

<b>Sucção (kPa)</b>	<b>E<sub>sg</sub> (MPa)</b>
0	126
3,0	164
4,0	179
4,0	179
5,0	195
6,0	212
6,0	212
6,0	212
6,5	222
7,0	231
7,0	231
8,0	252
8,0	252
8,5	263
9,0	275
9,0	275
9,0	275
10,0	300
10,5	327
11,0	327
11,0	327
14,0	423

**Influência da sucção no módulo de resiliência do subleito (soloA)  
para o intervalo de sucção de 0 - 14 kPa.**



**Figura 4.42 - Relação da sucção e módulo de resiliência do subleito (solo A) para o intervalo de 0-14 kPa.**

#### 4.4. COMPARAÇÃO DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA E SUCCÃO DE CAMPO E LABORATÓRIO

Neste item se comparam os resultados de módulo de resiliência obtidos em laboratório e os obtidos em campo com a variável sucção para o solo “A”. As observações realizadas por Núñez et al. (1997) com relação aos módulos de resiliência são:

a) Assume-se como válida a distribuição de Boussinesq, conforme Ullitz (1987) pela equação 4.2:

$$\sigma_z = \sigma_0 \left\{ 1 - \frac{1}{\left[ 1 + \left( \frac{a}{z} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \right\} \quad (4.2)$$

onde:

$\sigma_z$  é a tensão normal à profundidade  $z$ ;

$\sigma_o$  é a tensão normal na superfície e;

**a** o raio da área carregada, considerada igual a 16,8cm conforme Albernaz (1994).

b) Os pavimentos das pistas 01 e 04 são considerados delgados. Como consequência, a tensão desvio atuante no topo do subleito é elevada. Aplicando a equação 4.2, para  $Z=17,4\text{cm}$  (espessura real do pavimento da pista 01) e para  $Z = 19,6\text{cm}$  (espessura real do pavimento da pista 04), tem-se  $\sigma_z = 0,352 \text{ MPa}$  e  $0,315 \text{ MPa}$ , respectivamente. Mesmo para a pista 08 e 07, cujos pavimentos têm espessura teórica igual a 34,5 cm, o nível de tensão no topo do subleito é ainda elevado ( $\sigma_z = 0,153 \text{ MPa}$ ).

c) Os baixos valores de sucção “in situ” (raramente superiores a 10 kPa) correspondem na relação de sucção e teor de umidade a teores de umidade superiores a 23,5% conforme a figura 4.3.

O comportamento de resiliência do solo A é regido por uma lei do tipo (4.3):

$$M_r = k_1 \cdot (0,001 \cdot \sigma_d)^{k_2} \quad (4.3)$$

onde:

$M_r$  é o módulo de resiliência em MPa;

$\sigma_d$  a tensão desvio em kPa.

A tabela 4.6 apresenta valores das constantes de regressão  $k_1$  e  $k_2$ , correspondente ao teor de umidade com os quais o solo “A” foi ensaiado.

**Tabela 4.6**

Teor de umidade (%)	$K_1$	$K_2$
19,0	19797	-0,71
21,0	2697	-0,56
23,5	394	-0,21

**Valores das constantes de regressão  $K_1$  e  $K_2$  para o solo A.**

Em função destas observações, ao aplicar-se a equação de ajuste do ensaio de módulo de resiliência obtida (tabela 4.2) para o solo A, pode-se afirmar que os módulos de resiliência laboratoriais, correspondentes aos teores de umidade de 21% (teor ótimo) e 23,5% (acima do ótimo) e às tensões desvio e de campo se encontram nos intervalos apresentados na tabela 4.7.

**Tabela 4.7**

$\sigma_d$ (MPa)	$M_{r,lab}$ (MPa)		
	w = 19,0 %	w = 21,0 %	w = 23,5 %
0,352	300	95	90
0,315	350	110	100
0,153	550	135	120

**Módulos de resiliência de laboratório para o solo A.**

Obviamente não se espera que sejam iguais os valores previstos através de ensaios laboratoriais e valores medidos. Entretanto, mesmo que as considerações teóricas (validade da teoria Boussenesq, interpolação de valores da relação de sucção e teor de umidade, etc.) possam ser questionadas, é indiscutível a coerência entre os conjuntos de módulos estimados, mostrado na tabela 4.7, e os retroanalisados reproduzidos na tabela 4.4.



## **CONCLUSÕES**

### **5.1 CONCLUSÕES E SUGESTÕES**

Neste capítulo apresentam-se os aspectos mais relevantes desta dissertação e as conclusões obtidas com os ensaios de laboratório e campo, apresentados e analisados no capítulo 4:

1 - Os resultados da caracterização mostram a grande variação das características geotécnicas entre os solos em estudo. Os solos “A” e “C” são classificados como solos argilosos de baixa e alta compressibilidade respectivamente e solos “B” e “D”, são definidos como solos arenosos. Pela classificação de MCT, os solos “A”, “C” e “D” são classificados como solos laterítico argiloso LG’ (A e C) e arenoso LA’ (D).

2 - A relação de sucção e teor de umidade determinou que esta relação está influenciada pelo tipo de solo, ou seja, quanto maior a porcentagem de argila, maior será o valor da sucção (solos A e C) para o mesmo teor de umidade. Os solos “A” e “C” (argilosos) apresentam valores de sucção matricial superior aos solos “B” e “D” (arenosos).

3 - Nas condições ótimas de compactação, o solo “A” apresentou maiores valores de módulo de resiliência enquanto que o solo “B” apresentou menores valores para qualquer

nível de tensão desvio. Não se observam variações de sucção no solo “A” durante o ensaio triaxial de carregamento repetido para o mesmo nível de tensão confinante aplicado.

4 - As alterações ambientais foram simuladas através de trajetórias de secagem ou umedecimento e secagem e umedecimento (somente solo A). Os módulos de resiliência dos solos em estudo aumentam nas trajetórias de secagem e diminuem nas trajetórias de umedecimento, indicando a influência da sucção no comportamento deformacional elástico dos solos, para qualquer nível de tensão desvio.

5 - É possível definir uma expressão que leva em consideração o módulo de resiliência com a sucção. Observa-se que um incremento na sucção provoca aumento no valor de módulo de resiliência até atingir um máximo e a partir deste, o valor do módulo de resiliência decresce ou permanece constante para qualquer nível de tensão desvio. O valor máximo do módulo de resiliência com a sucção difere para cada tipo de solo.

6 - No caso do solo “A” a relação dos valores de módulo de resiliência para amostras compactadas nas condições ótimas submetidas a processos de secagem e secagem e umedecimento atingindo valores de umidade final de 19% e 21%, apresentou uma variação linear.

7 - Os módulos de resiliência obtidos por ciclo de secagem e umedecimento simularam as alterações ambientais ocorridas em campo (demonstraram a influência da sucção).

8 - Os valores de módulo de resiliência diminuem com os ciclos de secagem e umedecimento, devido ao efeito da histerese do solo. O processo de secagem resulta em valores de sucção superiores aos valores alcançados por processo de umedecimento, comparados para a mesma umidade. Os valores de módulo de resiliência para amostras com teores de umidade igual ao teor de umidade ótimo sofreram decréscimos com o processo de secagem e umedecimento comparado aos valores obtidos em amostras moldadas no teor ótimo.

9 - Os valores de sucção obtidos após os ensaios de módulo de resiliência foram menores que os encontrados antes do ensaio triaxial de carregamento repetido. Esta diferença é devido ao ensaio de módulo de resiliência ter sido realizado não drenado, desta forma, ao aplicarem-se as tensões ocorre mudança na estrutura e a amostra sofre uma redução de vazios. O corpo de prova atinge um grau de saturação maior que o inicial, portanto menor sucção.

10 - A análise do módulo de resiliência para níveis de tensões constantes demonstrou que o valor de módulo decresce com a redução da sucção. O solo “A”, independente do nível de tensão, apresentou os maiores valores de módulo de resiliência. Os solos em estudo registraram redução nos valores de módulo de resiliência com o aumento da tensão desvio.

11 - Os valores de sucção medidos em pista experimental foram da ordem de 14kPa, determinando que o subleito estava com o grau de saturação elevado. A solicitação das pistas experimentais ocasionou uma redução da ordem de 2kPa na sucção registrada por tensiômetros, sendo este valor recuperado após a suspensão da solicitação.

12 - Os resultados de retroanálise de bacias defletométricas mostraram que o módulo de resiliência de um solo não saturado é muito sensível a variações ambientais (teor de umidade). Este fato demonstra a necessidade de controlar-se a sucção, estimando-se indiretamente o teor de umidade do subleito e seu comportamento elástico, visto a importância do subleito no desempenho global de pavimentos de rodovias de baixo volume de tráfego.

13 - A semelhança entre os valores de módulo de resiliência calculados a partir de ensaios laboratoriais e resultados de análise paramétrica valida os resultados de laboratório, indicando a sua utilização na previsão do comportamento elástico do solo.

14 - As características geotécnicas e os resultados da relação de sucção e módulo de resiliência mostram que o solo “A” apresenta o melhor comportamento elástico. Outros parâmetros devem ser analisados para caracterizar melhor o desempenho do solo do subleito de pavimentos de baixo volume de tráfego. O efeito das alterações ambientais pode ser minimizado quando realizado um sistema de drenagem eficiente para a estrutura do pavimento.

15 - A sucção de solos não saturados é alterada por variações ambientais. A forma como a sucção influencia o módulo de resiliência (linear ou não linear) depende do tipo de solo (características geotécnicas). A relação entre módulo de resiliência e sucção do solo de subleitos é muito complexa, porém a sucção é apenas um importante parâmetro a ser analisado no módulo de resiliência. Outros parâmetros devem ser investigados tais como: peso específico aparente seco e estado de tensões durante o carregamento cíclico.

## 5.2 RECOMENDAÇÕES

Com base nos resultados desta pesquisa, à fim de complementá-la, as seguintes recomendações para investigações futuras da influência da sucção no módulo de resiliência de solos não saturados são sugeridas:

1 - Determinar a relação de sucção e teor de umidade por processo de secagem e umedecimento, em amostras compactadas nas condições ótimas para o solo “A”. Verificando a existência de histerese.

2 - Determinar a relação de sucção e teor de umidade para amostras compactadas com peso específico aparente seco máximo e teores de umidades diferentes e em amostras compactadas com teores de umidades ótimo e pesos específicos aparente seco diferentes. Verificando o efeito da estrutura de compactação.

3 - Desenvolver um sistema de dimensões reduzidas e alta capacidade para medir sucção durante o ensaio triaxial de carregamento cíclico. Este sistema deve trabalhar em uma faixa de 0 à 5000kpa.

4 - Verificar a influência da sucção no módulo de resiliência de amostras compactadas com diferente peso específico aparente seco e teor de umidade ótima (constante).

5 - Realizar microscopia eletrônica em solos compactados em diferentes condições, visando identificar a estrutura resultante e relacionar com a sucção.

6 - Medir sucção em campo, nas pistas experimentais, utilizando tensiômetros elétricos e realizando uma avaliação entre os resultados medidos com este equipamento e os

apresentados nesta pesquisa, obtidos com o uso de tensiômetros Jet Fill da Soilmoisture Equipment Corporation.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AITCHISON, G. D. "Relationships of moisture stress and effective stress functions in unsaturated soils." Pore pressures and suction in soils, London, 1960. Proceedings... Butterworths, p. 47-52, 1961.

ALBERNAZ, C. A. V. "Retroanálise do módulo de resiliência de pavimentos flexíveis e de subleitos para fins de anteprojeto, análise estrutural e gerência de pavimentos." In: Reunião Anual de Pavimentação, 28, 1994, Belo Horizonte.

ALONSO, E. E.; GENS, A.; HIGHT, D. W. "Special problems soils." General Report. In: European Conference on soil Mechanics and Foundation Engineering, 9., Dublin, 1987. Proceedings. Rotterdam, A. A. Balkem. P.5.1-5.60, 1987.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS; TP46-94 Standard test method for determining the resilient modulus of soil sand aggregate materials, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA; NBR 7181/84. Análise granulométrica. Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984, 13p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA; NBR 6502. Rochas e solos. Terminologia. Rio de Janeiro, 1980, 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA; NBR 6508. Grãos que passam na peneira de 4,8mm - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984, 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA; NBR 6459. Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984, 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA; NBR 7180. Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984, 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA; NBR 7182/84. Compactação. Rio de Janeiro, 1984, 10p.

BALMACEDA, A. R. "Suelos Compactados" Un Estudio Teórico y Experimental. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de catalunya. Barcelona, 1991.

BLIGHT, G. E. "Effective stress evaluation for unsaturated soils." Soil Mechanics and Foundations Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, v. 93, n. Sm2, p.125-148, 1967.

BRODSKY, N. S. "Resilient Modulus Measurements on Cohesive Soils." Resilient Modulus of Soil, p. 15-29, 1988.

BURLAND, J. B.; RIDLEY, A. M. "The importance of suction in soil mechanics." Twelfth Southeast Asian Geotechnical Conference, Kuala Lumpur, 1996.

CAMPOS, T. M. P.; DELGADO, C. C.; TIBANA, S.; AGUILAR, S. A. S.; FONSECA, E. C. "Determinação da curva característica de sucção em laboratório." 1ª. Conferência Brasileira Sobre Estabilidade de Encostas - 1ª. COBRAE. Anais. Rio de Janeiro: 1992, v.1, p. 835-851.

CAUDURO, F. A.; DORFMAN, R. "Manual de Ensaios de Laboratório e Campo para Irrigação e Drenagem", 1992.

CHANDLER, R. J.; GUTIERREZ, C. I. "The filter paper method of suction measurement." Geotechnique, London, v.36, n.2, p.265-268, 1986.

COFFMAN, B. S.; MITCHELL, J. K. "Panel discussion on compaction, testing, and test results." (1967).

CRONEY, D. "The design and performance of road pavements." First edn., Transportation and Road Research Laboratory, UK, 1958.

EDIL, T. B.; MOTAN, S. E. "Soil-water potential and resilient behavior of subgrade soils." Transportation Research Record, n. 705, p. 54-63, 1979.

EDIL, T. B.; MOTAN, S. E. "Repetitive - load behavior of unsaturated soils." Transportation Research Record, n. 872, p. 41-48, 1984.

EMERY, S. J. "Prediction of pavement moisture content in Southern Africa." In: Regional Conference for Africa on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 8. 1994., Proceedings... balkema/Roptterdam/Boston, 1984, v.1, p. 239-250.

FLEMING, P. M.; CAMPOS, T. M. P.; VARGAS, E. A.; GUSMÃO, L. A. P. "Desenvolvimento de um sistema tensiométrico para medidas automáticas de sucção em encostas." 1ª. Conferência Brasileira Sobre Estabilidade de Encostas - 1ª. COBRAE. Anais... Rio de Janeiro: 1992, v.1, p. 239-306.

FREDLUND, D. G. "Appropriate concepts and technology for unsaturated soils." Second Canadian Geotechnical Colloquium. Canadian Geotechnical Journal, v. 16, p. 121-139, 1979.

FREDLUND, D. G. "Recent research on the soil-water characteristic curve and its application in engineering." University of Saskatchewan, Saskatoon, Sack, Canadá, 1996.



FREDLUND, D. G.; BERGAN, A. T.; SAUER, E. K. "Deformation characteristics of subgrade soils for highways and runways in Northern environments." Canadian Geotechnical Journal, v.12, n.2, p. 213-223, 1975.

FREDLUND, D. G.; BERGAN, A. T.; WONG, P. K. "Relation between resilient modulus and stress conditions for cohesive subgrade soils." Transportation Research Record, n.462, p. 73-81, 1977.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. "Soil Mechanics for Unsaturated Soils." John Wiley & Sons, New York, 1993.

GEHLING, W. Y. Y. "Suelos expansivos: estudio experimental y aplicacion de un modelo teorico." Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya, barcelona, 1994.

GERRARD, C. M.; MORGAN, J. R.; RICHARDS, B. G. "An approach to the design of flexible pavements for Australian conditions." Australian Road Research Board, v.5, n.8, p.42-58, 1975.

HANKS, R. J.; ASHOROFT, G. L. "Applied soil physics." Advanced Series in Agricultural Sciences 8. Springer- Verlag, New York, 1980.

HAUPT, F. J. "Prediction of Subgrade Moisture Conditions." In: International Conference on soil Mechanics and Foundation Engineering, 10, 1981, Stockholm. Proceedings..., v.1. pp. 149-156.

HILLEL, D. "Soil water-physical principles and processes." New York, Academic Press, 1971. Cap. 1-5.

JIN, S. M.; LEE, K. W.; KOVACS, W. D. "Seasonal variation of resilient modulus of soil subgrade." Journal of Transportation Engineering, New York: ASCE, v.120, n.4, p.603-616, 1994.

JOSA, A.; ALONSO, E. E.; LLORET, A. y GENS, A. "Stress-strain behaviour of partially saturated soils." Proc. 9<sup>th</sup> European conf. Soil Mechanics. Found. Engng. Dublin vol.2, pp.561-564, 1987.

KRAHN, J.; FREDLUND, D. G. "On total, matric and osmotic suction." Soil Science, baltimore, v.114, p.339-348, 1972.

LI, D.; SELING, E. T. "Resilient modulus for fine grained subgrade soils." Asce, v.120, n.6, p.939-957, 1994.

MARINHO, F. A. M. "A técnica do papel filtro para medição de sucção." Encontro sobre Solos Não Saturados, Porto Alegre, Brasil, pp.112-125, 1995.

MARSHALL, R. L. "A relation between permeability and size distribution of pores." *Journal of soil Science*, oxford, 9(1), P.1-8,1958.

MARTINS, F. M. "Automatização do equipamento triaxial visando o estudo de solos tropicais cimentados." Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1994.

McQUEEN, I. S.; MILLER, R. F. "Calibration and evaluation of a wide-range gravimetric method for measuring moisture stress." *soil science*, v.106, n.3, pp.225-231, 1968.

MEDINA, J.; PREUSSLER, E. S. "Características resilientes de solos em estudo de pavimentos." *Solos e Rochas*, p.03-26, 1980.

MITCHELL, J. K. "Panel of discussion on compaction, testing, and test results." p.80-135, 1961.

MOTAN, E. S.; EDIL, T. B. "Repetitive-load behavior of unsaturated soils." *Transportation Research Report*. Transportation Research Board. National Academy of science, Washington, n.872, p.41-48, 1982.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. "Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos." Editora VILLIBOR. São Paulo, 1995.

NOURELDIN, A. S. "A new scenario for back calculation of layer moduli of flexible pavements." *Transportation Research record TRB*: Washington, D.C., 1993.

NÚÑEZ, W. P. "Estabilização físico-química de um solo residual de arenito botucatu, visando seu emprego na pavimentação." Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do sul, 1991.

NÚÑEZ, W. P.; CERTTI, J. A. P.; OLIVEIRA, J. A. "Análise experimental de pavimentos com camadas estruturais em basalto alterado - A construção das pistas experimentais." In: *Reunião Anual de pavimentação*, 30, 1996<sup>a</sup>. Anais... Rio de Janeiro: ABPv, 1996, v.2 p.1427-1457.

NÚÑEZ, W. P.; CERTTI, J. A. P.; NAKAHARA, S. M.; OLIVEIRA, J. A. "Pavimentação de rodovias de baixo volume de tráfego com emprego de basalto alterado - resultados recentes da análise experimental em desenvolvimento no Rio Grande do Sul." 1º. *Simpósio Internacional de pavimentação de rodovias de Baixo Volume de Tráfego*. V.1, p.395-415, Rio de Janeiro, Brasil, 1997.

PHILLIP, A. W. "The relation between resilient modulus and suction of fine grained soil in pavement design." Dissertação de Mestrado. University of South Australian, 1996.

PHILLIP, <sup>a</sup> W.; CAMERON, D. A. "The influence of soil suction on the resilient modulus of expansive soil subgrade." In: Conference International on Saturated Soils, 1. Proceedings... v.1, p.171-176. Paris, França, 1995.

POULOVASSILIS, A. "Hysteresis of pore water, na application of the concept of independent domains." soil science, Baltimore, v.93, p.405-412, 1962.

PREUSSLER, E. S. "Ensaio triaxiais dinâmicos de um solo arenoso." Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1978.

PUFHAL, D. E.; LYITON, R. L. ;LIANG, H. S. "Temperature and suction profile beneath highway pavements, computed and measured." Journal Transportation Research Record, v.1307, p.268-276, 1990.

RICHARDS, B. G.; PETER, P. y EMERSON, W. W. "The effects of vegetation on the swelling and shrinking of soils in Australia." Geotechnique, v.33, n.2, pp.127-139, 1983.

RIDLEY, A. M. "Strength-suction - Moisture content relationships for kaolin under normal atmospheric conditions." 1st Int. Conf. On Unsaturated Soils, Paris, 1995.

RIDLEY, A. M.; BURLAND, J. B.; MONROE, A. S. "Unconfined compressive strength tests with pore pressure measurements." Proc. 11th African Regional conference on soil Mechanics and Foundation Engineering. Cairo, Egypt, 1995.

RIDLEY, A. M.; WRAY, W. K. "Suction measurement: A review of current theory and practices." 1st Int. Conf. on Unsaturated Soils, Paris, 1995.

RUSSAM, K; COLEMAN, M. "The effect of climatic factors on subgrade moisture conditions." Geotechnique, London, v.11, n.1, p.22-28, 1961.

SANTOS NETO, P. M.; CARVALHO, J. C. "Métodos para medir a sucção em solos não saturados." Encontro sobre Solos Não Saturados, Porto Alegre, Brasil, pp.143-158, 1995.

SAUER, E. K.; MONISMITH, C. L. "Influence of soil suction on behavior of glacial till subjected to repeated loading." Highway Research Record, v.215, 1968.

SEED, H. B.; MITRY, F. G.; MONISMITH, C. L.; CHAN, C. K. "Factors influencing the resilient deformations of untreated aggregate base in two-layer pavements subjected to repeated loading." Highway Research Board, Research Record, v.190, p.19-57, 1967.

SHACKEL, B. "Changes in soil suction in a sand-clay subjected to repeated triaxial loading." Highway Research Record, n. 429, p.29-39, 1973.

SIBLEY, J. W.; WILLIAMS, D. J. "A new filter material for measuring soil suction." Geotechnical Testing Journal, ASTM, Philadelphia, v.13, n.4, p.381-384, 1990.

---

STANNARD, D. I. "Tensiometers - Theory, Construction, and Use." *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, v.15, n.15, p.48-58, 1992.

SVENSON, M. "Ensaaios triaxiais dinâmicos de solos argilosos." Dissertação de Mestrado. Universidade do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1980.

TOLL, D. G. "A framework for unsaturated soil behavior." *Geotechnique*, London, v.40, n.1, p.31-44, 1990.

THORNTON, S. I.; ELLIOTT, R. P. "Resilient modulus, what does it mean?" *Proceedings...*, Highway Symposium, Arkansas Highway and Transportation Research Centre, Project TRC-94, pp.283-301., 1994.

TUNCER, B. E.; SABRI, E. M. "Soil-water potencial and resilient behavior of subgrade soils." *Transportation Research Record*, n.705, 1979.

ULLITZ, P. "Paviment analysis." Amsterdam: Elsevier, 318p., 1987.

YONG, R. N.; JAPPY, R. D.; HOW, G. "Shear strenght of partially saturated soils." *Proc 4th Asian*, Bangkok, pp.183-187, 1971