



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CAMPUS I – CAMPINA GRANDE
ÁREA GEOTÉCNICA

**ESTUDO DE PARÂMETROS DE COMPACTAÇÃO PROCTOR NO
COMPORTAMENTO MECÂNICO DO SOLO**

Albaniza Maria da Silva

Campina Grande – PB
Julho de 2015

Albaniza Maria da Silva

**ESTUDO DE PARÂMETROS DE COMPACTAÇÃO PROCTOR NO
COMPORTAMENTO MECÂNICO DO SOLO**

DISSERTAÇÃO APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE
CAMPINA GRANDE, COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL.

Área de Concentração – Geotécnica

Prof. Dr. Adriano Elísio de Figueirêdo Lopes Lucena
Orientador

Prof. Dra. Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes Lucena
Co – Orientadora

Campina Grande – PB
Julho de 2015

FOLHA DE APROVAÇÃO

Autor: Albaniza Maria da Silva

Título: ESTUDO DE PARÂMETROS DE COMPACTAÇÃO PROCTOR NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO SOLO

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de Concentração – Geotécnica

Dissertação defendida e aprovada em: 10/07/2015

Pela Banca Examinadora

(Assinatura):

Prof. D.Sc. Adriano Elísio de Figueirêdo Lopes Lucena
(Orientador)
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

(Assinatura):

Profa. D.Sc. Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes Lucena
(Co-Orientadora)
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

(Assinatura):

Prof. D.Sc. José Camapum de Carvalho
(Examinador Externo)
Universidade de Brasília - UNB

(Assinatura):

Profa. D.Sc. Veruschka Escarião Dessoles Monteiro
(Examinadora Interna)
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

DEDICATÓRIA

À DEUS que até aqui me guiou.

Aos meus pais, Albenor e Luciene, por serem grande exemplo na
minha vida.

Ao meu esposo Eliton, pela companhia, carinho e confiança em
mim.

À minha filha Ana Luísa, pela paciência e pela minha ausência nos
momentos de estudo.

À minha irmã, Bruna e ao meu irmão André, por estarem ao meu
lado em todos os momentos.

A toda família e aos amigos verdadeiros pelo apoio e carinho.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por estar sempre presente em minha vida. Sem ele nada disto poderia ter acontecido. No início não entendi, mas hoje vejo que me mostrou o caminho certo.

Ao meu pai, Albenor, por todo apoio, a ele todo meu amor e agradecimento.

A minha mãe, Luciene, por todo apoio e orações a mim destinadas.

Aos meus irmãos Bruna e André, pelo companheirismo.

A minha filha, Ana Luísa, pela paciência e por entender que muitas vezes eu não podia dar a atenção necessária. A ela todo meu amor.

Ao meu esposo, Eliton, pela companhia, pelo apoio de sempre, por me fazer acreditar que poderia chegar até aqui, pela confiança em mim.

A minha orientadora, Lêda, por ter aceitado a me orientar. Pela paciência no período de orientação, pelo apoio em meus momentos de desespero, pela ajuda constante quando estava em dúvida e pelas palavras de incentivo e principalmente por me ensinar a acreditar e confiar em mim. Muito obrigada!

Ao meu orientador Adriano, pela orientação e incentivo, os meus sinceros agradecimentos.

A Josiverton, meu Pivic, obrigada pela paciência, ajuda e disposição. Espero ter contribuído um pouco na sua formação.

Aos técnicos do Laboratório de Engenharia de Pavimentos, Ildinho e Jadilson, pela ajuda na fase experimental.

Aos amigos da UFCG, em especial ao que estiveram mais presentes: Manoel, Stephanny e Talita.

À empresa ATECEL por disponibilizar o material para desenvolvimento da pesquisa.

À CAPES pela bolsa de estudo concedida.

E a todos que colaboram direta e indiretamente para que este trabalho pudesse ser realizado, meus mais sinceros agradecimentos.

Muito obrigada!

RESUMO

A compactação Proctor por impacto representa o método de laboratório mais empregado mundialmente para determinar a massa específica aparente seca máxima e a umidade ótima dos solos. Variações na energia de compactação, no teor de umidade, a constituição do solo e o método de compactação utilizado podem influenciar de maneira significativa na estrutura e no comportamento mecânico desses solos. A compactação Proctor preconizada pela norma NBR 7182/86 permite que o ensaio seja realizado por quatro processos distintos: mecânica com reuso, manual com reuso, manual sem reuso e manual sem reuso 24h, utilizando três energias (Normal, Intermediária e Modificada). Este trabalho teve como objetivo comparar os quatro processos de compactação supracitados tendo como pretensão avaliar os seus efeitos no comportamento mecânico do solo com variações de umidade ($\pm 2\%$). A fase experimental foi dividida em quatro (4) etapas: ensaios de caracterização do solo, ensaios de compactação Proctor, ensaio de sucção para obtenção da curva característica do solo, e por fim os ensaios mecânicos (Índice de Suporte Califórnia - ISC, Resistência à Compressão Simples - RCS, Resistência à Tração por Compressão Diametral - RT e Módulo de Resiliência - MR). De um modo geral, esta pesquisa mostrou que a energia de compactação exerce influência na variação dos resultados, pois o aumento da energia de compactação promoveu incrementos significativos nos valores das massas específicas aparentes secas máximas e nos resultados de comportamento mecânicos em termos de ISC, RCS e RT. Em relação à umidade de compactação verificou-se que os corpos de prova moldados nas umidades inferiores à ótima foram os que forneceram melhores resultados mecânicos, tal comportamento foi justificado pela ação da sucção. Conclui-se que embora a norma NBR 7182/86 permita que a compactação seja executada de quatro formas distintas, estas podem ter influências significativas nos resultados.

Palavras Chave: Compactação Proctor; energia; umidade.

ABSTRACT

Proctor compaction represents the laboratory method mostly used worldwide to determine soils' maximum dry density and optimal moisture content. Variations in compaction energy, moisture content, soil composition, and compaction method used may influence significantly the structure and mechanical behavior of such soils. Proctor compaction preconized by norm NBR 7182/86 allows tests to be performed through four distinct processes: mechanical with reuse, manual with reuse, manual without reuse, and manual without 24hrs reuse, utilizing three energies (standard, intermediary, and modified). This work aims to compare the four previously mentioned processes in order to assess their effect on soils' mechanical behavior with moisture variations ($\pm 2\%$). The experimental phase was divided in four stages: soil characterization tests, Proctor compaction tests, suction tests to determine soil's characteristic curve, and mechanical tests (California Bearing Ratio - CBR, Unconfined Compressive Strength - UCS, Tensile Strength - TS, and Resilient Modulus - RM). In a general manner, this research shows that compaction energy has influence in result's variation, because the increase of compaction energy promoted significant raises on maximum dry density values and on results of mechanical behavior considering CBR, UCS and RT. Regarding compaction moisture, it was verified that specimen molded with lower to optimal moisture levels were the ones that provided better mechanical results, behavior justified by the action of suction. We conclude that although norm NBR 7182/86 allows compaction to be performed in four different ways, these ways may significantly influence results.

Key-words: Proctor compaction; energy; moisture.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Energia de compactação necessária para obter peso específico seco máximo (BELL, 1977).	26
Figura 2 – Compactação Proctor por impacto de um solo.	31
Figura 3 – Aspecto da curva de compactação de um solo.....	33
Figura 4 – Influência de diferentes níveis de energia de compactação nas curvas de compactação de um mesmo solo (adaptado do DNIT, 2006).....	34
Figura 5 – Efeito da energia de compactação na estrutura de um solo argiloso compactado sob diferentes teores de umidade e densidades seca máxima. (LAMBE, 1958).....	35
Figura 6 – Curvas de compactação de solos compactados com a mesma energia. (SOBREIRA, 2014).....	36
Figura 7 – Compactação de solos na energia do ensaio Proctor normal, considerando-se granulometria na faixa das argilas aos pedregulhos (Modificado de PINTO, 2006).	37
Figura 8 – Prensa utilizada na compactação estática.....	40
Figura 9 – Esquema do compactador giratório Superpave (LUCENA, 2009).....	47
Figura 10 – Y's máx versus número de giros para cps de 1000g e tensão normal de 600 kPa (DANTAS, 2013).	50
Figura 11 – Y's máx versus número de giros para cps de 1800g e tensão normal de 600 kPa (DANTAS, 2013).	50
Figura 12 – Equipamento de compactação vibratória ASTM D4253.	52
Figura 13 – Soquete utilizado na compactação por pisoteamento.....	53
Figura 14 – Curva característica de uma amostra calcária (CRONEY <i>et al.</i> , 1952).....	59
Figura 15 – Descrição das curvas de secagem e de umedecimento e o estado inicial do solo em campo (FREDLUND, 2002).	60
Figura 16 – Curva característica típica mostrando zonas de dessaturação (VANAPALLI <i>et al.</i> , 1999).....	60
Figura 17 – Atividades realizadas na pesquisa.	63
Figura 18 – Solo estudado na pesquisa.....	64
Figura 19 – Indicação da localização da coleta do solo.	65
Figura 20 – (a) Série-padrão de peneiras para o ensaio de granulometria por peneiramento e (b) Provetas com solos mais solução para ensaio de granulometria por sedimentação.	67

Figura 21 – Equipamento EDX 720 da Shimadzu utilizado na pesquisa.....	69
Figura 22 – Equipamento Shimadzu XDR-6000 utilizados na pesquisa.....	69
Figura 23 – Equipamento utilizado para realização do ensaio de azul de metileno.....	71
Figura 24 – Execução do ensaio de compactação manual.....	73
Figura 25 – Amostras de solo em processo de cura por 24 horas.	74
Figura 26 – Compactador mecânico utilizado na pesquisa.	75
Figura 27 – Procedimentos para determinação da curva característica.....	77
Figura 28 – (a) Imersão e (b) Execução do ensaio de ISC.	80
Figura 29 – Posicionamento do corpo de prova para ensaio de resistência à tração.	81
Figura 30 – Compactador Marshall.	82
Figura 31 – Corpos de prova em processo de cura.....	83
Figura 32 – Ruptura do corpo de prova por tração indireta.....	83
Figura 33 – (a) Prensa utilizada para RCS e (b) corpo de prova após execução do ensaio.	85
Figura 34 – Esquema de distribuição de tensões no ensaio de compressão diametral (LEANDRO, 2005).	87
Figura 35 – Esquema do traçado dos círculos de Mohr Coulomb a partir dos resultados dos ensaios de compressão simples e compressão diametral para determinação do intercepto coesivo (c) e do ângulo de atrito (ϕ) (LEANDRO, 2005).	88
Figura 36 – Corpo de prova utilizado no ensaio de MR.....	90
Figura 37 – Corpo de prova da compactação mecânica moldados em umidades superiores a Hótima.	91
Figura 38 – Etapas do ensaio de módulo de resiliência.....	93
Figura 39 – Curva granulométrica do solo.	95
Figura 40 – Difratoograma de raios-X do solo em estudo.	99
Figura 41 – Curva de compactação: Proctor mecânico.	101
Figura 42 – Curva de compactação: Proctor manual com reuso.	102
Figura 43 – Curva de compactação: Proctor manual sem reuso.	102
Figura 44 – Curva de compactação: Proctor manual sem reuso 24h.....	103
Figura 45 – Curvas de compactação dos quatro processos de compactação Proctor para a energia normal.	103
Figura 46 – Curvas de compactação dos quatro processos de compactação Proctor para a energia intermediária.	104

Figura 47 – Curvas de compactação dos quatro processos de compactação Proctor para a energia modificada.....	104
Figura 48 – Curvas características experimentais do solo: (a) Sucção matricial x teor de umidade gravimétrica e (b) Sucção matricial x grau de saturação.	108
Figura 49 – Curvas características transformadas (e.pF), na energia intermediária: (a)Compactação manual com reuso; (b)Compactação mecânica; (c)Compactação manual sem reuso; (d)Compactação manual sem reuso 24h.	110
Figura 50 – Curvas características da compactação mecânica obtidas por meio de extrapolação: (a) Sucção x umidade e (b) Sucção x grau de saturação.	112
Figura 51 – Curvas características da compactação manual com reuso obtidas por meio de extrapolação: (a) Sucção x umidade e (b) Sucção x grau de saturação.	113
Figura 52 – Curvas características da compactação manual sem reuso obtidas por meio de extrapolação: (a) Sucção x umidade e (b) Sucção x grau de saturação.	114
Figura 53 – Curvas características da compactação manual sem reuso 24h obtidas por meio de extrapolação: (a) Sucção x umidade e (b) Sucção x grau de saturação.	115
Figura 54 – ISC: Compactação mecânica.....	117
Figura 55 – ISC: Compactação manual com reuso.	118
Figura 56 – ISC: Compactação manual sem reuso.....	118
Figura 57 – ISC: Compactação manual sem reuso 24 h.....	118
Figura 58 – Valores de ISC para os tipos de compactação Proctor moldados na energia intermediária e umidade ótima.	120
Figura 59 – RT: Compactação mecânica.....	123
Figura 60 – RT: Compactação manual com reuso.	123
Figura 61 – RT: Compactação manual sem reuso.....	124
Figura 62 – RT: Compactação manual sem reuso 24h.....	124
Figura 63 – Valores de RT para os tipos de compactação Proctor moldados na energia intermediária e umidade ótima.	125
Figura 64 – RCS: Compactação mecânica.	127
Figura 65 – RCS: Compactação manual com reuso.....	127
Figura 66 – RCS: Compactação manual sem reuso.	128
Figura 67 – RCS: Compactação manual sem reuso 24h.	128
Figura 68 – Valores de RCS para os tipos de compactação Proctor moldados na energia intermediária e umidade ótima.	130
Figura 69 – Curvas de RCS versus pF/e para compactação mecânica.....	132

Figura 70 – Curvas de RCS versus pF/e para compactação manual com reuso.....	132
Figura 71 – Curvas de RCS versus pF/e para compactação manual sem reuso.	133
Figura 72 – Curvas de RCS versus pF/e para compactação manual sem reuso 24h. ...	133
Figura 73 – Curvas de RCS versus pF/e para todas as compactações nos três níveis de energia.	134
Figura 74 – Curvas de RCS versus pF/e para todas as compactações nos três níveis de energia, no ramo seco e úmido.	134
Figura 75 – Curvas de iso-sucção do solo estudado para a compactação mecânica. ...	136
Figura 76 – Curvas de iso-sucção do solo estudado para a compactação manual com reuso.	136
Figura 77 – Curvas de iso-sucção do solo estudado para a compactação manual sem reuso.	137
Figura 78 – Curvas de iso-sucção do solo estudado para a compactação manual sem reuso 24 h.	137
Figura 79 – Curvas de iso-sucção do solo considerando a curva característica interpolada de todos os resultados das compactações e apenas os resultados da compactação mecânica.	138
Figura 80 – Curvas de RCS versus pF/e para os quatro processos de compactação: (a)Mecânica; (b)Manual com reuso; (c)Manual sem reuso; (d)Manual sem reuso 24h.	139
Figura 81 – Curvas da compactação mecânica: (a) RCS versus índice de vazios e (b) RCS versus sucção.	140
Figura 82 – Curvas da compactação manual com reuso: (a) RCS versus índice de vazios e (b) RCS versus sucção.	141
Figura 83 – Curvas da compactação manual sem reuso: (a) RCS versus índice de vazios e (b) RCS versus sucção.	142
Figura 84 – Curvas da compactação manual sem reuso 24h: (a) RCS versus índice de vazios e (b) RCS versus sucção.	143
Figura 85 – Valores de MR para os tipos de compactação Proctor moldados na energia intermediária e umidade ótima.	153

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de energia do ensaio Proctor (NBR 7182/1986).	39
Tabela 2 – Características inerentes a cada energia de compactação, segundo a NBR 7182/86 (ABNT,1986).	39
Tabela 3 – Evolução do compactador giratório (Adaptado de Harman <i>et al.</i> , 2002).	44
Tabela 4 – Ensaio realizado para caracterização física, química e mineralógica do solo.	66
Tabela 5 – Normas utilizadas para o ensaio de compactação do solo.	72
Tabela 6 – Valores de energia do ensaio Proctor (Adaptada da NBR 7182/86).	73
Tabela 7 – Ensaio realizado para caracterização mecânica do solo.	79
Tabela 8 – Número de golpes por energia para moldagem dos corpos de prova.	83
Tabela 9 – Valores de energia do ensaio Proctor (Adaptada da NBR 7182/86).	85
Tabela 10 – Pares de tensões e número de ciclos utilizados na fase de condicionamento.	92
Tabela 11 – Pares de tensões e número de ciclos utilizados na segunda fase do ensaio.	92
Tabela 12 – Coeficientes de uniformidade e curvatura para o solo estudado.	96
Tabela 13 – Limites de Atterberg e massa específica real do solo.	97
Tabela 14 – Composição química dos solos.	98
Tabela 15 – pH em água e pH em KCl do solo em estudo.	99
Tabela 16 – Classificação dos solos segundo o potencial hidrogeniônico (Bigarella <i>et al.</i> 1996, <i>apud</i> Pessoa 2004).	100
Tabela 17 – Resultados comparativos dos parâmetros ótimos das curvas de compactação.	105
Tabela 18 – Variações de $\gamma_{s_{m\acute{a}x}}$ nos ensaios de compactação Proctor.	106
Tabela 19 – Variações de $H_{\acute{o}t}$ obtida na compactação Proctor manual com reuso em relação às demais compactações para os três níveis de energia.	107
Tabela 20 – Valores da expansão dos ensaios de ISC.	122
Tabela 21 – Parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo para a compactação Proctor mecânica.	145
Tabela 22 – Parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo para a compactação Proctor manual com reuso.	146
Tabela 23 – Parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo para a compactação Proctor manual sem reuso.	146

Tabela 24 – Parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo para a compactação Proctor manual sem reuso 24h.....	147
Tabela 25 – Resumo dos valores de k_1 , k_2 e k_3 obtidos pela regressão linear dos três modelos estudados.....	151

LISTA DE ABREVIATURAS

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM – American Society for Testing Materials

C – Intercepto coesivo

CGS – Compactador Giratório Superpave

CP – Corpo de prova

CTC – Capacidade de Troca de Íons

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte

DRX – Difração de Raios-X

EDX – Espectrometria de Florescência de Raios-X

GTM – Gyrotory Test Machine

H – Teor de umidade

Hót – Teor de umidade ótima

HRB – Highway Research Board

IP – Índice de plasticidade

ISC – Índice de Suporte California

kPa – Quilopascal

LCPC – Laboratoire Central des Ponts ET Chaussées

LL – Limite de liquidez

LP – Limite de plasticidade

LVDT – Linear Variable Differential Translucers

ME – Método de Ensaio

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

MPa – Megapascal

MR – Módulo de Resiliência

NBR – Norma Brasileira

PCG – Prensa de Cisalhamento Giratório

RCS – Resistência à Compressão Simples

SHRP – Strategic Highway Research Program

RT – Resistência à Tração por Compressão Diametral

Sm – Sucção matricial

So – Sucção osmótica

St – Sucção total

SUCS – Sistema Unificado de Classificação de Solos

SUPERPAVE – Superior Performing Asphalt Pavements

USACE – U.S. Army Corps of Engineers

W – Umidade

γ_g – Massa Específica dos Grãos

γ_s – Massa Específica Aparente Seca

$\gamma_{s_{m\acute{a}x}}$ – Massa Específica Aparente Seca Máxima

ϕ – Ângulo de atrito

SUMÁRIO

1.0	INTRODUÇÃO.....	19
3.1	Objetivos.....	21
3.1.1	Objetivo Geral.....	21
3.1.2	Objetivos Específicos.....	21
3.2	Organização da Dissertação.....	22
2.0	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	23
2.1	Compactação de Solos.....	23
2.2	Fatores que Influenciam na Estrutura e no Comportamento Mecânico de Solos Compactados.....	24
2.3	Métodos de Compactação em Laboratório.....	30
2.3.1	Compactação Dinâmica ou por Impacto.....	31
2.3.2	Compactação Estática ou por Pressão.....	40
2.3.3	Compactação por Amassamento.....	42
2.3.4	Métodos de Compactação Menos Utilizados.....	51
2.3.4.1	Compactação por Vibração.....	52
2.3.4.2	Compactação por Pisoteamento.....	53
2.4	Sucção.....	54
2.4.1	Método de Medida da Sucção – Método do Papel Filtro.....	56
2.4.2	Curva Característica do Solo.....	58
2.5	Considerações Finais.....	61
3.0	MATERIAIS E MÉTODOS.....	63
3.1	Materiais.....	64
3.1.1	Solo.....	64
3.2	Métodos.....	65
3.2.1	Ensaio de Caracterização do Solo.....	66
3.2.1.1	Análise Granulométrica.....	67
3.2.1.2	Fluorescência de Raios X (EDX).....	68
3.2.1.3	Difração de Raios X (DRX).....	69
3.2.1.4	PH.....	69
3.2.1.5	Azul de Metileno.....	70

3.2.2	Ensaio de Compactação Proctor	72
3.2.3	Ensaio da Curva Característica da Sucção	75
3.2.4	Ensaio de Caracterização Mecânica do Solo	78
3.2.4.1	Ensaio de Índice de Suporte Califórnia – ISC	79
3.2.4.2	Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral – RT.....	81
3.2.4.3	Ensaio de Resistência à Compressão Simples – RCS.....	84
3.2.4.4	Obtenção do Intercepto Coesivo e do Ângulo de Atrito por meio dos Resultados de RCS e RTCD	86
3.2.4.5	Ensaio de Módulo de Resiliência.....	89
4.0	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	94
4.1	Ensaio de Caracterização Física	94
4.1.1	Análise Granulométrica	94
4.1.2	Determinação das Propriedades Físicas	97
4.2	Ensaio de Caracterização Química e Mineralógica.....	97
4.2.1	Fluorescência de Raios-X (EDX).....	97
4.2.2	Difração de Raios-X (DRX)	98
4.2.3	PH e Capacidade de Troca Catiônica (CTC).....	99
4.3	Ensaio de Compactação Proctor.....	101
4.4	Curva Característica.....	108
4.5	Ensaio Mecânicos.....	117
4.5.1	Ensaio de Índice de Suporte Califórnia – ISC.....	117
4.5.2	Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral – RT	123
4.5.3	Ensaio de Resistência à Compressão Simples – RCS	126
4.5.3.1	Análise do comportamento mecânico (RCS) em função das curvas características de sucção	131
4.5.4	Obtenção do Intercepto Coesivo e do Ângulo de Atrito	144
4.5.5	Módulo de Resiliência	150
5.0	CONCLUSÕES	154
5.1	Sugestões para Futuras Pesquisas	155

1.0 INTRODUÇÃO

A compactação é um método mecânico que consiste na expulsão do ar dos poros do solo, diminuindo o seu volume e índice de vazios, sendo um processo que, essencialmente, altera a estrutura do solo.

A compactação dos solos tem sido usada em várias obras de engenharia tais como: aterros, diques, estradas e barragens de terra como um método de construção destas estruturas. Esta é realizada com o intuito de evitar-se problemas, como recalques excessivos em rodovias e aterros, ruptura de taludes e de barragens, etc. Na pavimentação, o procedimento de compactar solos normalmente é guiado pelas especificações de projeto, que determinam as características construtivas para cada uma das camadas constituintes do pavimento. Estas especificações recomendam propriedades geotécnicas desejáveis aos solos constituintes das camadas, tais como: granulometria, índices de consistência, umidade, massa específica aparente seca, etc. Todas elas objetivando o bom desempenho mecânico e maior durabilidade da estrutura do pavimento.

Segundo Holtz e Kovacs (1981) os benefícios ou melhorias das propriedades do solo que ocorrem como resultados da compactação são: aumento da estabilidade; melhoria da capacidade de rolamento em subgrades de pavimento; redução e/ou prevenção de adensamento do solo; e minimização de variações de volume devido à ação de geada, inchaço e encolhimento.

O ensaio de compactação de laboratório mais difundido no mundo foi apresentado na década de 30 pelo engenheiro americano Ralph R. Proctor, o qual estabeleceu que a compactação é uma função da massa específica do solo, teor de umidade, intensidade da energia de compactação e do tipo de solo. No Brasil, o ensaio de compactação Proctor é normatizado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (NBR 7182/1986), com o nome de *Solo – ensaio de compactação*, e pelo Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (DNIT – ME 164/2013, com o nome de *Solos – compactação utilizando amostras não trabalhadas* e DNIT – ME 162/1994, com o

nome de *Solos – compactação utilizando amostras trabalhadas*). A norma permite que a compactação Proctor possa ser feita com reuso de material, sem reuso de material, após 24 horas de umedecimento da amostra para a uniformização da umidade e também com o uso de um compactador mecânico. Segundo Massad (2003) o reuso da mesma porção de solo na obtenção dos diversos pontos da curva de compactação pode provocar quebra de partículas, tornando o solo mais fino, ou uniformizar melhor a umidade.

De acordo com Sivrikaya *et al.* (2013) a determinação dos parâmetros ótimos de compactação (Y_s máx e $Hót$), em vários níveis energia, é um processo importante, visto que o comportamento de solos compactados depende massa específica aparente seca, teor de água, , do tipo de solo e sua graduação. Segundo Ohu *et al.* (1986) fatores como massa específica do solo, teor de umidade, energia aplicada para a compactação e tipo de solo afetam a resistência ao cisalhamento de solos compactados.

Estudos realizados por Adekalu *et al.* (2007) e García *et al.* (2012) concluíram que o efeito da umidade no enfraquecimento da resistência ao cisalhamento foi significativo. Os autores verificaram que a força de cisalhamento diminuiu com o aumento do conteúdo de água no solo, essa diminuição foi atribuída às menores forças delimitadoras devido à menor sucção. A maior força de cisalhamento foi alcançada com umidade inferior a umidade ótima, apoiando o argumento de que a resistência do solo compactado é uma função da umidade do solo.

Diante da influência do método de compactação Proctor no comportamento mecânico dos solos e visando avançar o estado de conhecimento nessa área, houve motivação para estudar a influência dos quatro processos de compactação Proctor permitidos pela norma NBR 7182/86 na estrutura e no comportamento do solo compactado, variando parâmetros, e avaliar como a ação da sucção pode influenciar nesse comportamento, tendo como pretensão contribuir na busca de respostas para certas questões ainda pouco estudadas sobre o real comportamento dos solos compactados.

Pelo fato de alguns ensaios utilizados nesta pesquisa serem voltados para a área da pavimentação, não significa dizer que os resultados obtidos nesta pesquisa não possam ser aplicados em outras áreas da engenharia, como barragens de terras, aterros, cortes, fundações e estabilidade de encostas.

3.1 Objetivos

3.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a influência do método de compactação Proctor empregado em laboratório, por quatro processos diferentes – Proctor Mecânico com Reuso, Proctor Manual com Reuso, Proctor Manual sem Reuso e Proctor Manual sem Reuso com 24 horas de umedecimento prévio, no comportamento mecânico do solo.

3.1.2 Objetivos Específicos

- realizar uma caracterização física e mineralógica do solo;
- avaliar a influência da energia de compactação no comportamento mecânico do solo;
- estudar a influência da umidade de compactação no comportamento mecânico do solo;
- avaliar a influência da sucção no solo por meio da curva característica;
- estudar a influência dos quatro processos de compactação Proctor adotados, considerando resultados de ensaios de compactação e de resistência mecânica (Resistência à compressão simples, Resistência à tração, Índice de Suporte Califórnia e Módulo de resiliência).

3.2 Organização da Dissertação

Esta dissertação é composta de cinco capítulos, a seguir é apresentada uma breve descrição do assunto abordado em cada um deles.

Capítulo 1 – Composto de introdução, objetivos e organização do trabalho.

Capítulo 2 – Compreende a fundamentação teórica, onde são abordados os assuntos mais relevantes ao desenvolvimento deste trabalho tais como: compactação dos solos, fatores que influenciam na estrutura e no comportamento de solos compactados, métodos de compactação em laboratório, e por fim um estudo da sucção dos solos por meio da curva característica.

Capítulo 3 – São descritos todos os materiais utilizados na pesquisa, bem como os procedimentos experimentais adotados para o desenvolvimento desta dissertação.

Capítulo 4 – São apresentados e analisados os resultados obtidos no programa experimental.

Capítulo 5 – Apresentam-se as conclusões que foram obtidas neste trabalho, além de sugestões para pesquisas futuras.

Por fim estão inseridas as referências bibliográficas e os apêndices.

2.0 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são tratados os assuntos relevantes para o desenvolvimento desta pesquisa, tendo por objetivo o direcionamento das informações bibliográficas sobre o estudo da influência dos métodos de compactação no comportamento mecânico dos solos, enfatizando a compactação Proctor ou por impacto. Primeiramente, fez-se uma abordagem sobre os fundamentos dos diferentes tipos de compactação de solos em laboratório, seguido de uma revisão sobre sucção e a medição desta por meio do método do papel filtro para obtenção da curva característica.

2.1 Compactação de Solos

A compactação consiste na redução do índice de vazios do solo, por meio da ação de uma força mecânica, melhorando as propriedades mecânicas deste. Este procedimento gera deformações contínuas que modificam a estrutura do solo, obtendo assim um solo, com propriedades diferentes do original, que deve apresentar um comportamento apropriado para aplicação a que se destina. O processo de compactação está envolvido comumente em diversos projetos de terraplanagem, tais como rodovias, ferrovias, pavimentação de aeroportos, barragens de terra e aterros, que necessitam de um grau de compactação do solo para um teor de umidade desejado.

Mitchell (1964) relacionou as principais razões para realizar a compactação de solos em termos de propriedades destes, entre elas estão a redução da compressibilidade (redução da variação de volume), aumento da resistência, controle de tendência de variação volumétrica (com variação de umidade), redução da permeabilidade (redução de vazios) e controle de propriedades resilientes.

Os fundamentos da compactação do solo de laboratório foram estabelecidos historicamente, na década de 1930 pelo engenheiro norte americano Ralph R. Proctor que publicou, nos Estados Unidos, as suas observações sobre a compactação de aterros

de solos. Em 1933, Proctor observou que a massa específica atingida na compactação do solo, ou seja, com o emprego de uma energia de compactação, depende da umidade do solo no momento da compactação. Com essa observação, ocorreu uma evolução nas técnicas de compactação, que até então eram realizadas de maneira empírica. Iniciou-se a formulação de uma técnica de compactação e a determinação prévia de qual a umidade mais adequada para a obtenção de uma máxima massa específica na compactação, em determinada energia. O autor mostrou que, ao se aplicar uma determinada energia de compactação, representada por certo número de passadas de um determinado equipamento no campo ou por certo número de golpes de um soquete sobre o solo contido num molde em laboratório, haveria uma relação única entre a massa específica aparente seca e o teor de umidade de compactação (RICARDO & CATALANI, 1990; SENÇO, 1997).

Segundo Pinto (2006) a padronização internacional do ensaio de compactação, com pequenas variações, baseou-se nesses estudos de Proctor, sendo mais conhecido como *Ensaio Proctor*, podendo-se referir no Brasil às Normas Técnicas NBR 7182/86 (ABNT, 1986), DNIT – ME 162/94 e DNIT – ME 164/13.

Quando se tratar de solos compactados deve-se considerar o tipo de compactação empregada (campo ou laboratório), e o fator relativo à destruição total, ou a permanência ou a remanescência de uma estrutura original no solo resultante da compactação. Cada um dos diversos tipos de compactação irão originar estruturas de solos bastante distintas. A compactação de solo em laboratório é alcançada principalmente por meio de impacto e a compactação de campo depende do tipo de solo a ser compactado (BROWNE, 2006).

2.2 Fatores que Influenciam na Estrutura e no Comportamento Mecânico de Solos Compactados

A estrutura de um solo compactado está diretamente ligada aos fatores que afetam o ensaio de compactação: a umidade do solo, o número e a espessura das camadas, a energia de compactação e o tipo equipamento utilizado. Logo, a estrutura de um solo compactado depende da constituição do solo, do tipo e do estado inicial do solo, e também do tipo de compactação. Devido a grande diversidade dos solos e ao

número significativo de fatores que influenciam na compactação e na estrutura do solo, torna-se indispensável o seu conhecimento, para que possam ser estudados e adaptados a fim de se conseguir interpretar os resultados obtidos.

O conhecimento das características iniciais do solo é fundamental para a definição da técnica de compactação apropriada. Na construção rodoviária, o uso da vibração em um solo granular é geralmente a técnica mais indicada. No entanto, se esse material granular é constituído por concreções lateríticas ou cimentado por carbonato de cálcio, esta solução pode não ser a mais indicada, por provocar a quebra das concreções. Entretanto, caso esta seja utilizada na construção de uma barragem de terra, com finalidade de represamento da água, a quebra dos agregados contribui para a redução da permeabilidade (AGUIAR, 2010).

As propriedades do solo tem grande importância na definição da estrutura dos solos compactados, pois o conhecimento da estrutura deste permite a interpretação qualitativa e o entendimento do seu comportamento mecânico e hidráulico, determinado a partir de ensaios de laboratório e/ou de campo (AGUIAR, 2010). Para Mitchell (1993) a estrutura é um dos fatores de maior importância na determinação do comportamento de um solo compactado e está diretamente ligada aos fatores que afetam o ensaio de compactação.

Segundo Badillo & Rodríguez (1976) dentre os fatores que influenciam a compactação obtida em um caso específico, dois são os mais importantes: umidade inicial e energia de compactação. Outros fatores também são citados:

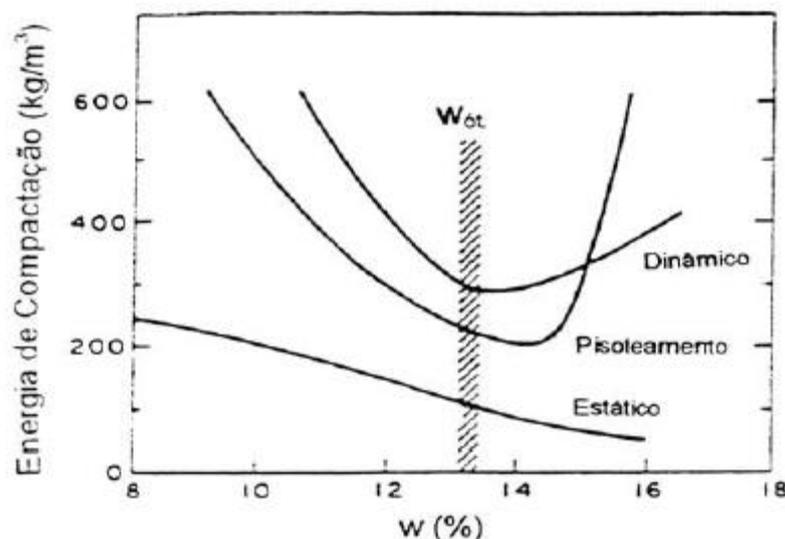
- tipo de solo;
- reutilização e secagem prévia do solo;
- tipo de compactação.

A energia de compactação empregada em campo ou laboratório depende da pressão e da velocidade de aplicação desta e do número e espessura das camadas. A energia de compactação transmitida ao solo cresce até certo ponto com o aumento da pressão e do número de aplicações, da mesma forma, esta mesma energia decresce com o acréscimo da espessura da camada compactada. O aumento da energia de compactação aplicada para qualquer tipo de solo resulta na diminuição da umidade

ótima e no aumento da massa específica aparente seca máxima (RICARDO & CATALANI, 1990).

Estudos realizados por Bell (1977) com o objetivo de obter relações entre as características dos diferentes métodos de compactação, onde compactaram amostras de um mesmo solo utilizando os métodos de compactação estática, por pisoteamento e dinâmico. Os autores mostraram que as amostras obtidas pelas compactações por pisoteamento e estática foram compactadas para apresentarem as mesmas características finais de umidade ótima e massa específica máxima da amostra compactada pelo método dinâmico. Para isso foi necessário aplicar diferentes energias de compactação nos primeiros métodos, para atingir as características do solo compactado pelo método dinâmico.

Figura 1 – Energia de compactação necessária para obter peso específico seco máximo (BELL, 1977).



Segundo Camapum de Carvalho *et al.* (1987) e Aguiar (2010) o comportamento dos solos compactados pode ser influenciado pelos seguintes fatores:

- variação da energia de compactação;
- modificação da umidade antes e após a compactação;
- tempo de armazenamento entre a compactação e a realização dos ensaios mecânicos.

Segundo Sivrikaya *et al.* (2013) a compactação melhora as características do solo, tais como aumento no módulo do solo, redução na condutividade hidráulica e aumento da resistência ao cisalhamento.

García *et al.* (2012) estudaram o efeito da umidade de um determinado solo, com o objetivo de avaliar a relação entre a resistência ao cisalhamento e variância entre os parâmetros de massa específica seca e umidade do ensaio Proctor. Nos resultados, foi verificado que a maior força de cisalhamento dos solos foi alcançada com umidade inferior a umidade ótima. Concluiu-se, portanto que o efeito da umidade no enfraquecimento da resistência ao cisalhamento foi significativo. Os resultados deste estudo apoiam o argumento de que a resistência do solo compactado é uma função do conteúdo de água. Algumas informações importantes sobre permeabilidade do solo, a tenacidade, mudanças de volume, estado de tensão e distribuição granular são obtidas a partir da relação solo-água (ZHOU JIAN, 2005).

Ohu *et al.* (1986) *apud* García *et al.* (2012) relataram que a resistência ao cisalhamento de solos compactados é afetada por muitos fatores, incluindo a massa específica do solo, teor de umidade, energia aplicada para a compactação e tipo de solo. A compactação do solo aumenta a resistência ao cisalhamento dos solos, independentemente do grau de umidade. Jianqiang e Jing (2000) relataram que a resistência ao cisalhamento aumenta com o incremento da massa específica, mas a razão desse aumento é maior quando se tem menores umidades.

Adekalu *et al.* (2007) ao trabalharem com solos arenosos e argilosos verificaram que nos níveis de energia de compactação mais elevados ocorre aumento da massa específica e da força de cisalhamento, enquanto a força de cisalhamento diminuiu com o aumento do conteúdo de água no solo; para todos os níveis de compactação, a massa específica aumentou com o acréscimo do teor de água até atingir um valor máximo e diminuiu com progressiva agregação de água. A taxa de aumento da resistência ao cisalhamento diminuiu com o aumento da umidade, essa diminuição é atribuída às menores forças delimitadoras devido à menor sucção. Conseqüentemente, o teor de umidade é o fator mais importante que afeta o valor da força de cisalhamento. Mullins *et al.* (1990); McKyes *et al.* (1994) observaram que a sucção contribui para o aumento da resistência à tração e resistência ao cisalhamento do solo.

Wulfsohn *et al.*, (1996) relataram que a utilização da umidade no solo para relacionar sucção matricial e teor de água ou o grau de saturação e resistência do solo só é válida para a estrutura do solo na qual foi obtida. Se a estrutura é alterada significativamente sob o umedecimento e secagem ou devido à perturbação mecânica, os parâmetros de resistência, bem como a umidade no solo, também serão alterados. Prevendo essas mudanças estruturais é necessária uma compreensão do efeito da tensão variável sobre as características de deformação e de água no solo.

Sivrikaya *et al.* (2013) fizeram um estudo dos parâmetros da compactação para solos de granulação grossa. Segundo os autores a determinação dos parâmetros de compactação de solos, a massa específica aparente seca máxima (γ_s máx) e do teor ótimo de água ($H_{ót}$), em vários níveis energia de compactação é um processo importante, visto que o comportamento de solos compactados depende do peso específico seco, teor de água, energia de compactação, tipo de solo e sua graduação. O objetivo deste estudo foi desenvolver correlações, a fim de estimar a parâmetros dependentes da energia de compactação para solos de granulação grossa sobre o qual estudos limitados existem na literatura, e apresentar modelos simples para estimar $H_{ót}$ e $\gamma_{smáx}$ para uma arbitrária energia de compactação.

As análises foram utilizadas na derivação das correlações para a previsão de γ_s máx e $H_{ót}$ obtido a partir dos ensaios Proctor Padrão e Proctor modificado e propriedades de índice de solos de granulação grossa com vários parâmetros. Para validar o modelo, um total de 86 conjuntos de dados (amostras que foram recuperados a partir do campo em diferentes regiões da Turquia) foram coletados de laboratórios de universidades na Turquia e seis parâmetros, tais como conteúdo cascalho, teor de areia, Teor de finos, limite de liquidez (LL) e índice de plasticidade (IP) e energia de compactação (E), são utilizados. Os resultados revelaram que os modelos GEP (Programação Expressão Gênica) e MLR (Regressão Multi Linear) são abordagens bastante promissoras para a predição da massa específica seca máxima e do teor de umidade ótimo dos solos.

Na literatura, existem poucos estudos sobre a compactação de solos de granulação grossa. Wang & Huang (1984) desenvolveram correlações para estimar o teor de umidade ótimo e a massa unitária máxima seca para solos que consistem em misturas de argila de bentonite, silte, areia e cascalho fino; nessas correlações, enquanto

a umidade ótima ($H_{ót}$) é estimado a partir do limite de plasticidade (LP), módulo finura (MF) e coeficiente de uniformidade (C_u) de solos, $\gamma_{smáx}$ é estimada utilizando a massa específica dos grãos (γ_g), tamanho de grão efetivo (D_{10}), MF e LP. Nos estudos de Sivrikaya *et al.* (2013), considerando-se as correlações entre $H_{ót}$ e o parâmetros de consistência dos solos, verificou-se que a correlação mais adequada é entre o teor de umidade ótimo e o limite de liquidez (LL). Portanto, concluiu-se que a umidade ótima ($H_{ót}$) tem uma melhor correlação como limite de liquidez (LL) do que com o limite de plasticidade (LP) e a $\gamma_s máx$ pode ser mais precisamente estimado a partir de $H_{ót}$ ao invés dos índices de propriedades dos solos.

Segundo os autores a umidade ótima e a massa específica aparente seca máxima são os principais parâmetros para controlar compactação no campo em que as energias de compactação aplicadas podem variar dependendo das exigências do campo e o tipo de solo. A determinação dessas propriedades desempenha um papel importante na concepção de projetos de compactação. Dentre alguns parâmetros adicionais importantes na compactação são citados a rugosidade da superfície dos grãos, a forma de grãos, e a composição mineralógica.

Muitas tentativas têm sido feitas para se obter o teor ótimo de água e a massa específica aparente seca máxima ($\gamma_s máx$) de solos compactados de granulização fina. As equações de correlação para solos finos relacionam a umidade ótima e a massa específica aparente seca máxima ($\gamma_s máx$) a fatores usando descritores de classificação do solo (limites de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP), massa específica dos grãos do solo e a distribuição granulométrica) (Sivrikaya *et al.*, 2013).

Alguns autores procuraram esclarecer as características de estruturas resultantes de solo compactados por diferentes métodos e sua relação com o módulo de resiliência, considerando a influencia da umidade (PHILLIP e CAMERON, 1995; RODRIGUES, 1997; entre outros). De acordo com Gehling *et al.* (1997) sabe-se que as variações ambientais, caracterizadas por alterações na sucção, causam diferenças nos valores de módulo de resiliência, além do estado de tensões. A umidade do subleito do pavimento pode sofrer variações devido às próprias alterações ambientais da região onde se encontra que podem ser causadas por precipitações pluviométricas, temperatura, vegetação e vento, podendo facilitar as deformações irreversíveis e/ou reversíveis; que

adicionadas à ação do tráfego, podem afetar a deformabilidade elástica dos materiais (WERK, 2000).

De acordo com Klinsky *et al.* (2014) vários fatores influenciam no comportamento elástico dos materiais utilizados em pavimentação, tais como: características físicas, o estado de tensão a que está sujeito, teor de umidade e grau de compactação, além de fatores climáticos.

2.3 Métodos de Compactação em Laboratório

Atualmente a compactação de amostras de solo em laboratório pode ser realizada por meio de diversos métodos, sendo que todos foram idealizados com o intuito de assemelhar-se ao máximo com a compactação executada no campo. Contudo, os mecanismos de compactação dos equipamentos de campo são de difícil reprodução em laboratório, visto que, um mesmo equipamento, em geral, executa a compactação por meio de diversas ações simultaneamente, tais como: amassamento, impacto e vibração. Porém, compactar solos em laboratório é muito importante, pois permite que se obtenham os parâmetros umidade ótima e massa específica seca máxima de forma mais rápida, precisa e econômica. A escolha do método de compactação deve considerar as características do solo.

Os métodos de compactação em laboratório podem ser categorizados em cinco tipos:

- compactação por impacto ou dinâmico, caracterizada pela ação de queda de um soquete sobre uma amostra de solo, confinada em um molde cilíndrico;
- compactação estática ou por pressão, em que é exercida uma pressão constante (ou variável) sobre uma amostra de solo confinada em um molde em uma velocidade relativamente baixa;
- compactação por amassamento, na qual a amostra de solo é compactada pela ação de amassamento de um compactador giratório;
- compactação por pisoteamento, na qual golpes são aplicados a amostra de solo por meio de um pistão com mola;

- compactação por vibração, em que se aplica com ou sem uma sobrecarga a ação de vibração sobre a amostra de solo.

Nos próximos itens, serão apresentados com maiores detalhes os métodos de compactação mencionados anteriormente:

2.3.1 Compactação Dinâmica ou por Impacto

A compactação de solos por impacto ou dinâmica ainda é a forma mais empregada mundialmente para realização do ensaio de compactação e consiste basicamente em deixar cair sobre uma camada de solo, com espessura determinada, colocada em um cilindro padrão, um certo peso (peso do soquete), de uma certa altura, um número determinado de vezes - NBR 7182/86 (Figura 2). Segundo Balmaceda (1991) todas estas variáveis dependem do tipo de energia de compactação aplicada, ou seja, variando esses fatores (altura, peso, número de golpes, ou espessura da camada) varia-se a energia de compactação e, com isso, o resultado que se pretende obter.

Figura 2 – Compactação Proctor por impacto de um solo.

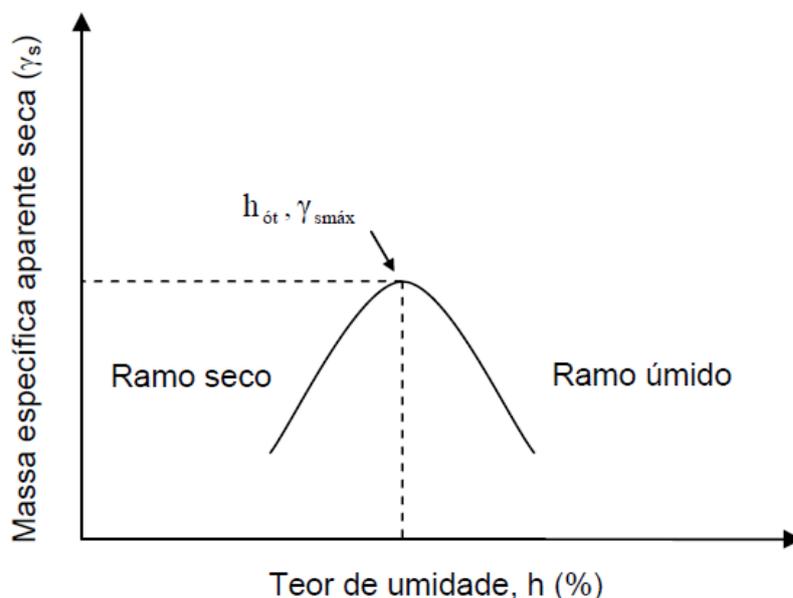


Em 1933, Proctor publicou uma série de artigos sobre suas observações acerca do processo de compactação de solos na construção de barragens e o controle de compactação em campo. Por meio do ensaio de compactação, Proctor verificou que a massa específica seca máxima (γ_s máx) é característica de uma determinada umidade, denominada de umidade ótima ($H_{ót}$), e de um dado esforço de compactação aplicado e expôs de maneira gráfica a relação existente entre o teor de umidade, a massa específica seca e o esforço de compactação imprimido a um solo.

Os pares de pontos (teor de umidade e massa específica aparente seca) plotados em um gráfico originam a denominada Curva de Compactação, sendo que esta é característica de cada material. Em geral, a relação entre os parâmetros massa específica aparente seca (γ_s) e teor de umidade (H) pode ser descrita por uma curva de formato aproximadamente parabólico com concavidade voltada para baixo. Indica-se como conveniente um mínimo de cinco pontos experimentais para defini-la, de forma que dois se encontrem no ramo seco (trecho ascendente da curva), um próximo da densidade máxima e os restantes no ramo úmido (trecho descendente da curva) (SENÇO, 1997). A curva tem seu ponto máximo definido pelo par de valores massa específica aparente seca máxima ($\gamma_{smáx}$) e umidade ótima ($H_{ót}$) para o solo em questão em um determinado nível de energia aplicado, segundo a terminologia empregada pela ABNT (NBR 7182) (Figura 3).

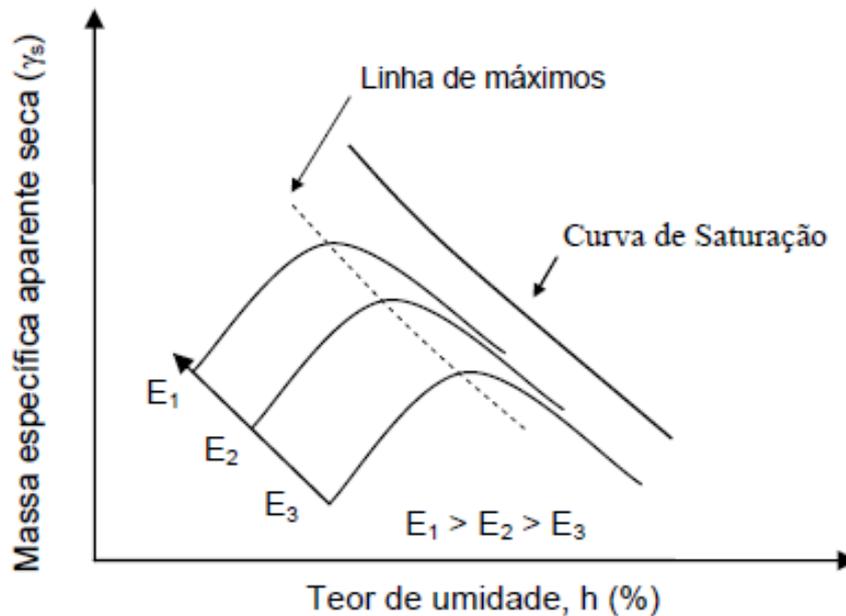
Nesta condição dita ótima tem-se a maior quantidade de partículas sólidas por unidade de volume, ou seja, obtém-se uma rigidez mais estável desse solo. Assim, para toda e qualquer execução de obras que necessitem da construção de aterros, a obtenção das maiores massas específicas possíveis é fator de segurança e estabilidade, inclusive pela melhoria da impermeabilidade deste solo compactado (SENÇO, 1997).

Figura 3 – Aspecto da curva de compactação de um solo.



Esse ponto de máximo significa que se o solo for compactado no teor de umidade ótimo e com um nível de energia equivalente ao que foi empregado no ensaio, ele apresentará massa específica seca máxima. Os valores do par ordenado ($H_{ót}$, $\gamma_s máx$) somente têm sentido se relacionados com a quantidade de energia aplicada no ensaio, pois de acordo com a quantidade de energia empregada um mesmo solo terá pares de valores diferentes. Ou seja, quando um mesmo solo é compactado segundo um mesmo método de compactação, mas com a aplicação de diferentes níveis de energia de compactação, verifica-se que, na medida em que a energia de compactação aumenta, a umidade ótima diminui e a massa específica seca máxima aumenta, conforme pode ser visto na Figura 4. Observa-se que a curva de compactação desloca-se para cima e para esquerda do plano cartesiano.

Figura 4 – Influência de diferentes níveis de energia de compactação nas curvas de compactação de um mesmo solo (adaptado do DNIT, 2006).

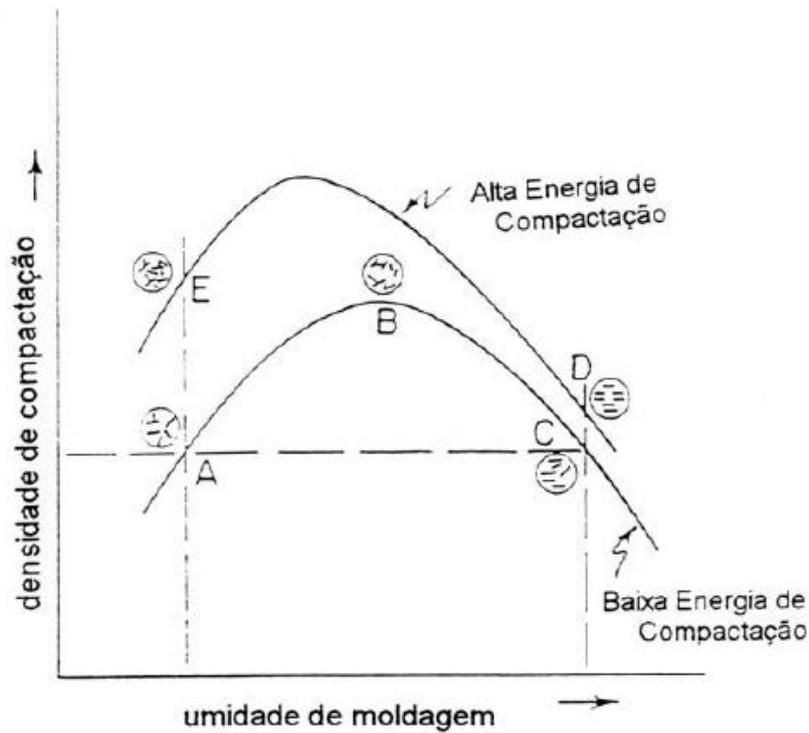


A estrutura de um solo compactado depende da relação umidade-energia de compactação aplicada por ocasião da compactação e também do tipo de solo. A Figura 5 indica esquematicamente as estruturas de um solo argiloso sob o efeito da compactação dinâmica em função destes parâmetros. Pode-se observar que para um mesmo esforço de compactação e peso específico seco a estrutura do solo se modifica conforme o teor de umidade utilizado na compactação do corpo de prova.

No ramo úmido onde se tem maiores teores de umidade, o método de compactação empregado influencia na estrutura final e nas propriedades do solo compactado, originando estruturas dispersas, pois nestas condições de umidade ocorre uma maior repulsão entre as partículas, e a compactação as orienta. Em contrapartida, no ramo seco, onde o grau de saturação é baixo o método de compactação empregado pouco interfere na estrutura e nas propriedades do solo resultante, pois a atração face a face das partículas não é vencida pela energia aplicada, e geralmente originam-se estruturas floculadas (caracterizadas pelo arranjo desordenado das partículas). Para uma mesma umidade, quanto maior a energia, maior o grau de dispersão. Este modelo representa de forma simplificada a complexa estrutura dos solos compactados,

permitindo justificar as diferenças de comportamento dos mesmos (LAMBE, 1958; SEED *et al.*, 1962; CRUZ, 1967).

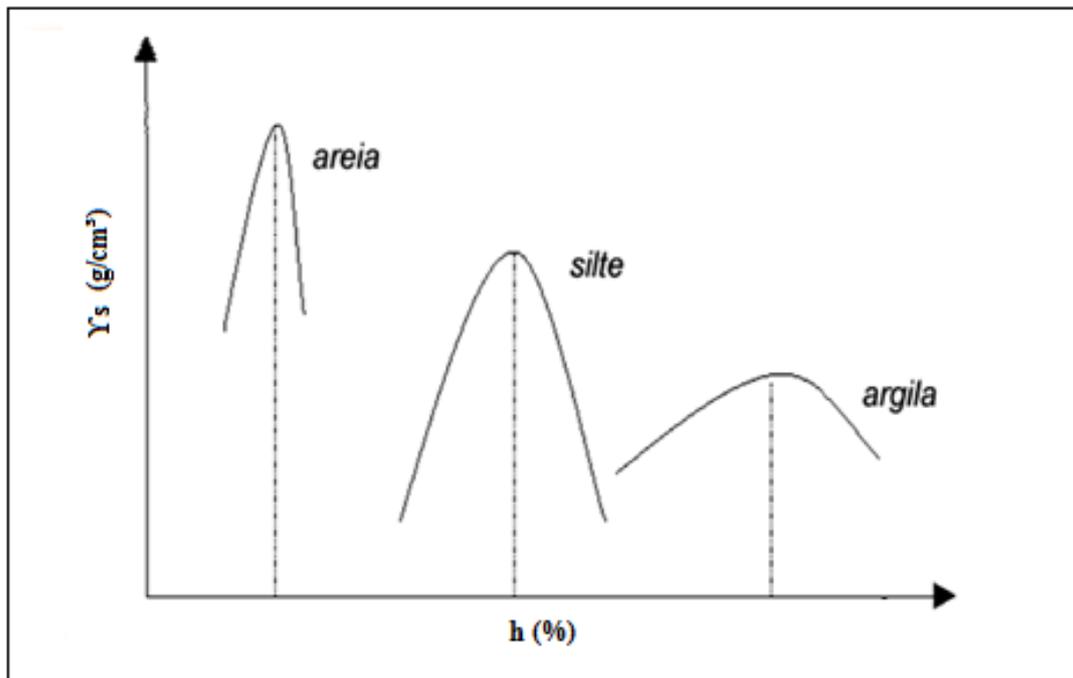
Figura 5 – Efeito da energia de compactação na estrutura de um solo argiloso compactado sob diferentes teores de umidade e densidades seca máxima. (LAMBE, 1958).



Segundo Lambe & Whitman (1979) um solo com estrutura floclada em geral tem maior resistência, baixa compressibilidade, e maior permeabilidade do que o mesmo solo com o mesmo índice de vazios, porém em estado disperso. De acordo com Medina (1997) quando submetidos a esforços cisalhantes pequenos, os solos com estrutura floclada são menos deformáveis do que os com estrutura dispersa.

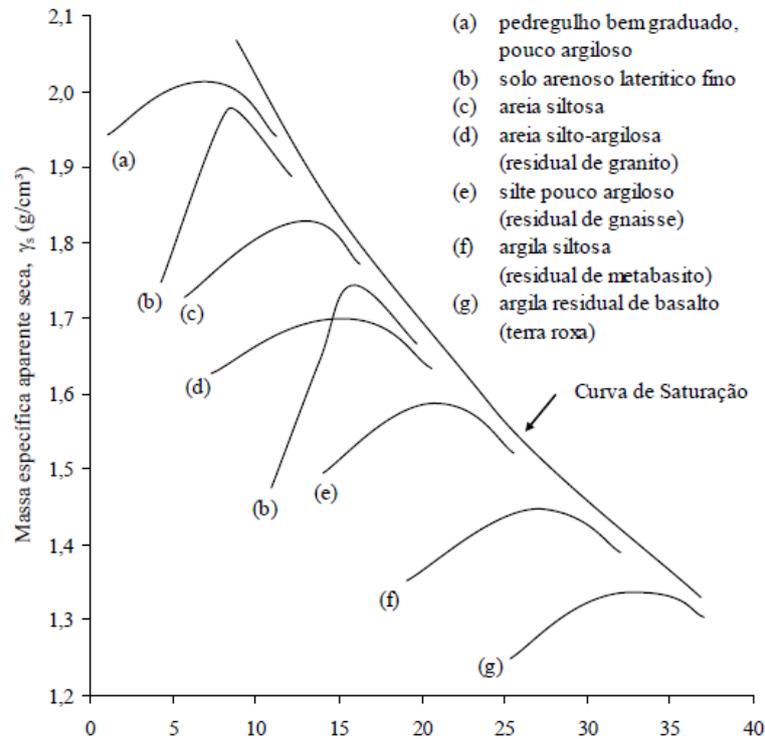
O tipo de solo também influencia na curva de compactação, pois observa-se que, em geral, com o emprego da mesma energia de compactação solos de granulometria diferente apresentam valores de teor de umidade ótimos e massa específica seca máxima e resultam em curvas de compactação características a cada tipo de material apresentado na Figura 6.

**Figura 6 – Curvas de compactação de solos compactados com a mesma energia.
(SOBREIRA, 2014).**



Na Figura 7 observa-se que os solos argilosos apresentam maiores valores de umidades ótimas e menores valores de massas específicas aparentes secas máximas quando comparados aos solos siltosos e arenosos. Dessa forma, dentre os principais fatores que influem na compactação de um solo pode-se citar o teor de umidade e a energia de compactação. Outros fatores como a secagem prévia e reutilização do material também influenciam nos resultados.

Figura 7 – Compactação de solos na energia do ensaio Proctor normal, considerando-se granulometria na faixa das argilas aos pedregulhos (Modificado de PINTO, 2006).



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

O ensaio de compactação dinâmica idealizado por Proctor foi o primeiro a ser normatizado e talvez, por isso, seja até hoje o mais utilizado nos laboratórios. Foi inicialmente normatizado pela, hoje, *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)* dos Estados Unidos da América e é conhecido como *AASHTO Standard* ou Ensaio Proctor normal. No Brasil, o ensaio de compactação Proctor é normatizado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas

(NBR 7182/86), com o nome de *Solo – ensaio de compactação*, e pelo Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (DNIT – ME 164/2013, com o nome de *Solos – compactação utilizando amostras não trabalhadas* e DNIT – ME 162/1994, com o nome de *Solos – compactação utilizando amostras trabalhadas*).

Em ambas as normas, o ensaio pode ser realizado em três níveis de energia, normal, intermediária e modificada, variando-se com esta finalidade as dimensões do molde e do soquete, número de camadas e de golpes. A norma também estabelece que a compactação possa ser feita com reuso de material, sem reuso de material, e também com o uso de um compactador mecânico (Compactação Proctor mecânico). Alguns solos quando compactados apresentam uma constante quebra de suas partículas. De acordo com Massad (2003) a compactação com reuso pode provocar quebra de partículas (tornando o solo mais fino) ou uniformizar melhor a umidade. Para determinados solos onde a uniformização da umidade quando da incorporação da água pode apresentar dificuldades, a norma recomenda que a amostra a ser ensaiada após a adição da água e o revolvimento do material, seja colocada em um saco plástico vedado e mantido em processo de cura durante 24 horas.

Na moldagem de corpos-de-prova de dimensões que fogem àquelas prescritas pela NBR 7182/86 ou pelo DNER-ME 129/94, pode-se empregar uma equação, que fornece o número de golpes de um soquete não padronizado para compactar um determinado volume de solo em uma energia pré-estabelecida. A Tabela 1 apresenta os valores de energia especificados pela norma NBR 7182/86, onde é possível verificar que a energia aplicada no Proctor Modificado é um pouco mais que o dobro do Proctor Intermediário e a energia deste é também um pouco mais que o dobro do Proctor Normal.

Tabela 1 – Valores de energia do ensaio Proctor (NBR 7182/1986).

PROCTOR	Energia (J/cm ³)
Normal	0,59
Intermediária	1,30
Modificada	2,78

A Tabela 2 mostra as características do ensaio de compactação normatizado pela ABNT – NBR 7182/1986, contemplando além da energia normal, as energias intermediária e modificada.

Tabela 2 – Características inerentes a cada energia de compactação, segundo a NBR 7182/86 (ABNT,1986).

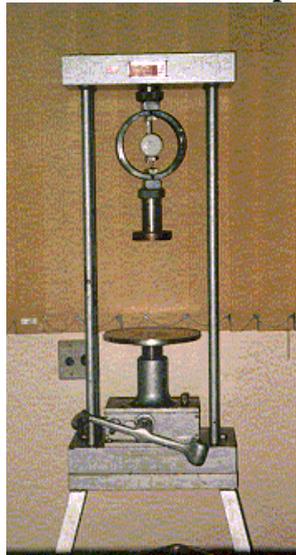
CILINDRO	Características inerentes a cada energia	ENERGIA DE COMPACTAÇÃO		
		NORMAL	INTERMEDIÁRIA	MODIFICADA
PEQUENO	Soquete	Grande	Grande	Grande
	Número de camadas	3	3	5
	Número de golpes por camada	26	21	27
GRANDE	Soquete	Grande	Grande	Grande
	Número de camadas	5	5	5
	Número de golpes por camada	12	26	55

Diante da influência de uma série de parâmetros envolvidos no processo de compactação e como a norma NBR 7182/86 permite a realização da compactação Proctor por quatro tipos distintos verifica-se que o método de compactação Proctor a ser utilizado pode influenciar na estrutura e no comportamento mecânico dos solos, assim como o teor de umidade utilizado na moldagem dos corpos de prova, onde não necessariamente é na umidade ótima que são obtidos melhores resultados mecânicos.

2.3.2 Compactação Estática ou por Pressão

A compactação estática consiste em confinar uma amostra de solo em um molde e pressioná-la por meio de uma carga estática, por meio de um pistão, geralmente hidráulico, ou seja, consiste em compactar cada camada de solo com uma prensa (Figura 8), aplicando uma pressão determinada durante certo período de tempo. Em laboratório, a energia específica para este tipo de compactação depende do tamanho do molde, da pressão aplicada e também, do tempo de aplicação da mesma carga. Esta técnica de compactação é empregada principalmente quando se deseja moldar corpos de prova para ensaios mecânicos, pois ela permite repetir com maior precisão os resultados obtidos no ensaio Proctor em relação à compactação por impacto (DANTAS, 2013; SOBREIRA, 2014).

Figura 8 – Prensa utilizada na compactação estática.



Este método baseia-se em aplicar uma pressão sobre o solo de forma uniformemente distribuída, sendo mais empregado para reproduzir em laboratório as características dos solos granulares compactados em campo. A compactação estática é a que introduz menores tensões de cisalhamento, podendo resultar numa estrutura floculada ou dispersa (BALMACEDA 1991).

A moldagem de corpos de prova na prensa estática é uma forma já consagrada de reprodução de corpos de prova em uma determinada massa específica seca e umidade. A compactação estática é recomendada pela norma AASHTO T 307-99 –

Standard Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials, que descreve o método de ensaio e o cálculo do módulo de resiliência de solos.

Segundo SEED e CHAN (1959) em seu trabalho sobre a influência do método de compactação nas propriedades do solo, quando amostras são compactadas com alto grau de saturação, ramo úmido da curva de compactação, por meio do método estático, o qual induz a pequenas ou nenhuma tensão de cisalhamento, a estrutura gerada é do tipo floculada. A compactação por pisoteamento, impacto ou vibração, porém, induz progressivamente a grandes quantidades de deformações cisalhantes e, conseqüentemente, levando a estruturas mais dispersas. De acordo com SEED *et al.* (1962) existe uma similaridade entre a relação tensão deformação de uma amostra compactada por pisoteamento com um baixo grau de saturação e então umedecida, e uma amostra compactada estaticamente já na condição final, saturada. Os autores também observam que as deformações elásticas de amostras indeformadas são coerentes com as amostras compactadas por pisoteamento no laboratório; porém, são muito maiores do que as amostras compactadas estaticamente.

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

Segundo Rico e Del Castillo (1976) ensaios de laboratório utilizando compactação estática são tão antigos quanto os ensaios dinâmicos, sendo mais utilizados na compactação de solos granulares, no entanto, sem suficiente justificativa para este uso restrito. Esses autores relatam uma metodologia para a compactação estática em laboratório, atribuída a O. J. Porter. Nesta o solo (passante na peneira de 25,4 mm) é compactado em um molde cilíndrico de 15,24 cm de diâmetro, disposto em três camadas acomodadas com 25 golpes de uma vareta com ponta arredondada (em formato de bala) e então compactado por meio da aplicação de uma pressão de aproximadamente 14 MPa, durante um minuto. Os autores apresentam algumas comparações para diferentes solos entre a compactação estática, segundo a concepção de Porter e a compactação dinâmica. O estudo foi realizado com dezessete solos variando de pedregulhos até argilas de alta plasticidade. As conclusões relatadas

indicam que, para solos variando de areias grossas a pedregulhos, limpos ou com finos não plásticos, os resultados da compactação estática são semelhantes aos obtidos com a compactação dinâmica na energia Proctor normal. Em areias grossas e pedregulhos com finos plásticos, areias finas e argilas de plasticidade média, os resultados são próximos dos obtidos com a energia Proctor modificado, bem como em argilas de plasticidade alta os resultados alcançados compactando-se estaticamente são superiores (cerca de 10%) àqueles do Proctor modificado.

Venkatarama Reddy e Jagadish (1993) classificam a compactação estática em dois tipos: tensão máxima constante – carga variável; e tensão máxima variável – carga constante. No primeiro, a amostra de solo é confinada em um molde e submetida à aplicação gradual de uma tensão que varia segundo uma (ou mais) taxa, até que a tensão máxima seja atingida; a altura do corpo de prova é variável, dependendo do teor de umidade, pois o processo de compactação é encerrado quando a tensão máxima é alcançada. No segundo tipo de compactação estática, uma carga constante é aplicada gradualmente sobre uma amostra de solo confinada em um molde até que uma altura específica seja alcançada; o critério de parada do processo de compactação é a altura determinada a ser atingida, ou seja, um determinado volume.

2.3.3 Compactação por Amassamento

Segundo Harman *et al.*(2002) o primeiro compactador giratório do Texas era manual e usado em pesquisas de 1939 a 1946. Em 1939, esse Departamento iniciou pesquisas sobre projeto e controle de misturas asfálticas, estabelecendo dois critérios para os métodos de avaliação em laboratório, no primeiro, o método deveria ser adaptável tanto ao controle de campo das misturas quanto ao projeto e no segundo, o método deveria produzir essencialmente a mesma massa específica aparente seca ou razão de vazios, que aquela obtida no pavimento fiscalizado. Logo o compactador giratório foi idealizado com objetivo de simular mais fielmente a compactação em campo, assim como a degradação dos agregados causada pela produção, compactação e carregamento do tráfego ao longo dos anos. Por este motivo e principalmente pelo histórico de sucessos, o compactador giratório acabou tornando-se a maneira mais

eficiente de compactar misturas asfálticas em laboratório, sendo atualmente o principal método de compactação de misturas asfálticas nos Estados Unidos.

As normas que especificam a dosagem de misturas asfálticas usando o compactador giratório são a AASHTO T 312 - *Standard Method of Test for Preparing and Determining the Density of Hot Mix Asphalt (HMA) Specimens by Means of the Superpave Gyratory Compactor* - e a ASTM D6925 - *09 Standard Test Method for Preparation and Determination of the Relative Density of Hot Mix Asphalt (HMA) Specimens by Means of the Superpave Gyratory Compactor*. No entanto, o emprego do compactador giratório restringe-se a compactação de misturas asfálticas, não havendo normas que especifiquem sua utilização para compactação de solos.

Os conceitos do compactador giratório do Texas serviram de base para diversas pesquisas que resultaram no desenvolvimento de outros compactadores giratórios, como por exemplo, o GTM (Gyratory Test Machine) do Corpo de Engenheiros dos Estados Unidos (USACE) e o PCG (Prensa de Cisalhamento Giratório) do Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), na França. O compactador giratório passou por muitas evoluções desde sua concepção em 1939. A Tabela 3 apresenta uma linha do tempo do progresso do compactador giratório e as principais agências responsáveis pelo desenvolvimento (DANTAS, 2013).

Tabela 3 – Evolução do compactador giratório (Adaptado de Harman *et al.*, 2002).

Linha do Tempo	Equipamento/Agência	Dimensão do CP (mm)	Características da Compactação
1939	Concepção, Dep. de Transportes do Texas	D: 101,6 H: 50,8	P: Desconhecida A: Manual F: manual
1946	Departamento de Transportes do Texas (normatização do procedimento)	D: 101,6 e 152,46 H: 50,8 e 76,2	P: Variável A: Fixada em 6° F: 60 rpm
1957	GTM / Corpo de Engenheiros dos EUA	D: 152,4 H: Variável	P: Variável A: Oscilando de 0 a 3 ° F: Variando de 12 a 18 rpm
1960	Primeiro protótipo do compactador Texano no LCPC, França	D: Desconhecido H: Desconhecido	P: Variável A: Variável F: Variável
1968	Segundo protótipo do compactador Texano no LCPC, França	D: 80 ou 120 H: Variável	P: Variável A: Oscila de 0,5 a 5 ° F: Variável M: Molde aquecido
1974 - 1985	PCG ₁ , PCG ₂ , LCPC, França	D: 160 H: Fixada de 80 a 300	P: 600 KPa A: Fixado de 1 a 4° F: Fixado de 6 a 30 rpm
1991	Equipamento de ensaio de cisalhamento giratório modificado/FHWA	D: 152,4 H: 95,3	P: 600 kPa A: Variável
1993	SHRP / Compactador Giratório Superpave, EUA	D: 150 H: 115	P: 600 kPa A: Fixado em 1,25° F: 30 rpm
1996	PCG ₁ / LCPC, França	D: 150 H: Fixada de 100 a 160	P: Fixada de 500 a 800 kPa A: Fixado de 0,5 a 2° F: Fixado de 6 a 30 rpm

Legenda: D: diâmetro
H: altura
P: tensão normal

A: ângulo de giro
F: frequência de giros

O processo de compactação na prensa giratória do Texas consistia em colocar o material em um molde de aço de 101,6 mm de diâmetro interno, que era colocado entre placas paralelas, sob um ângulo de 6 graus. Em seguida, era aplicada uma pressão de, aproximadamente, 345 KPa por meio de um macaco hidráulico e o molde era girado por três vezes com o auxílio de alavancas. Após a realização deste procedimento verificava-se uma tendência da pressão diminuir e o processo ter que ser reiniciado. Logo, um novo ciclo de carregamento era iniciado com a remoção do ângulo e a pressão reajustada em 345 KPa. O procedimento de três giros se repete até que a pressão de 1034 KPa seja atingida após um curso completo do macaco hidráulico; depois disso, uma carga adicional de aproximadamente 17 MPa é aplicada para finalizar a compactação.

Na década de 50, John L. McRae, que pertencia ao Corpo de Engenheiros do Exército Americano – USACE, baseando-se nos princípios do Departamento de Rodovias do Estado do Texas, EUA, da década de 30, desenvolveu um compactador por amassamento giratório, o GTM – Gyrotory Testing Machine. McRae justificou seus estudos em resultados de pesquisas conduzidas pelo USACE, que indicavam que o compactador desenvolvido por Bruce Marshall, o mais utilizado na época, não simulava adequadamente as densidades das misturas asfálticas sobre o efeito de tráfego pesado, bem como suas propriedades mecânicas (DANTAS, 2013).

No compactador criado por J. L. McRae, o ângulo de giro era obtido por dois pontos, pois o intuito era fazer com que este ângulo oscilasse durante a compactação. Os parâmetros ângulo de giro, altura da amostra e pressão aplicada eram armazenados automaticamente pelo computador e incorporados ao procedimento de projeto (HARMAN *et al.*, 2002).

Segundo Ping *et al.*, (2003a) Mc Rae apresentou como resultados aos seus estudos que o aumento da pressão vertical causavam incrementos significativos no peso específico, e que o ângulo de giro deveria estar entre um ou dois graus.

As pesquisas coordenadas por McRae proporcionaram que o USACE propusesse um procedimento de ensaio para compactação de solos utilizando o GTM, no qual as pressões verticais do equipamento eram baseadas nas pressões verticais teóricas produzidas pelo carregamento de roda previsto. Por meio desse procedimento o USACE

fez análises comparativas com os dados obtidos em campo no pós-tráfego com aqueles obtidos em laboratório, para duas seções experimentais, construídas com solos de características arenosas. As análises comparativas mostraram que as massas específicas aparentes secas obtidas no compactador giratório apresentaram uma melhor correlação com as massas específicas aparentes secas em campo pós tráfego em relação às obtidas no Proctor modificado (MEDEIROS, 2009; DANTAS, 2103; SOBREIRA, 2014).

A partir dos conceitos do compactador giratório do Texas, foi desenvolvido nas décadas de 60 e 70, pelo Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) na França, a Prensa de Cisalhamento Giratório (PCG), que apresenta como configurações para sua primeira versão: uma tensão normal constante de 600 kPa e um ângulo de giro de um grau (HARMAN *et al.*, 2002).

O Strategic Highway Research Program (SHRP) foi um dos principais colaboradores para o desenvolvimento do Compactador Giratório Superpave (CGS), por meio do seu programa Superpave – Superior Performing Asphalt Pavements. Assim como os outros compactadores giratórios desenvolvidos, o CGS foi projetado para simular a orientação e a degradação dos agregados, a compactação em campo e a degradação da mistura asfáltica durante a produção, compactação e carregamento do tráfego (HARMAN *et al.*, 2002). Ou seja, tinha como finalidade a criação de um procedimento de dosagem baseado na seleção de materiais e projeto de misturas.

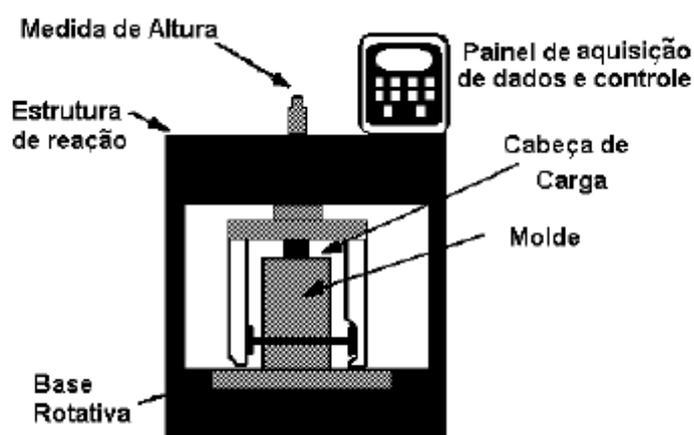
O programa supracitado foi um dos produtos finais do programa SHRP, e seu intuito era apresentar um sistema que especifica materiais, projeta, analisa misturas asfálticas e prevê desempenho de pavimentos incluindo equipamentos de ensaios, métodos e critérios, de forma que a compactação da amostra de mistura betuminosa fosse mais próxima da compactação em campo, e que as densidades finais fossem aquelas obtidas no pavimento através de condições reais de clima de carregamento.

O programa SHRP, atualmente é bastante difundido nos Estados Unidos e no Canadá, onde se constitui um avanço tecnológico na área de projeto e de controle do desempenho de revestimentos constituídos de cimentos asfálticos. No Brasil esta metodologia ainda está em fase de testes por ser mais difundida a dosagem Marshall. A Dosagem SUPERPAVE se diferencia da Dosagem Marshall principalmente com relação ao tipo de compactação dos corpos-de-prova, onde a dosagem SUPERPAVE

utiliza um compactador giratório, que aplica energia por amassamento. O CGS (compactador giratório SUPERPAVE) foi adotado pela SHRP para fazer com que os corpos de prova fossem compactados o mais próximo possível da compactação feita em campo, reproduzindo as condições reais de carregamento (SANTOS, 2012).

Este dispositivo mecânico possui os seguintes componentes principais: a estrutura de reação, base rotativa e motor, medidor de altura e sistema de registro de dados e de carregamento, cabeça de carga, medidor de pressão e o molde e placa base (SOUZA, 2012). Segundo Marques (2004) a estrutura de reação do CGS é constituída por um pórtico não deformável. A base do CGS é afixada nesta estrutura suportando o molde e permitindo seu giro. Durante a compactação a cabeça de carga é que faz a compressão do corpo-de-prova e o seu diâmetro corresponde nominalmente ao diâmetro interno do molde (**100 ou 150 mm**). Para que o molde seja posicionado no ângulo de giro são usados mancais. A forma de compactação do Compactador Giratório Superpave (CGS) se compara a de um rolo compressor que, em vez de aplicar golpes de impacto, faz a compactação exercendo uma tensão de amassamento na mistura. A Figura 9 apresenta um esquema simplificado do Compactador Giratório Superpave.

Figura 9 – Esquema do compactador giratório Superpave (LUCENA, 2009).



Nos Estados Unidos, existem atualmente pelo menos oito modelos de compactadores giratórios sendo produzidos, e a maior parte deles possibilita o ajuste e o controle dos quatro principais parâmetros que influenciam a compactação de misturas

asfálticas em laboratório que são o ângulo de giro, frequência de giros, tensão normal e número de giros. Paralelamente ao desenvolvimento do CGS, o programa Superpave produziu resultados que possibilitaram a elaboração de um procedimento de compactação de misturas asfálticas com uso do compactador giratório (DANTAS, 2013).

Existem poucas pesquisas acerca da compactação de solos com uso do compactador giratório. Dois estudos realizados nos Estados Unidos sobre uso do CGS para compactar solos merecem ser destacados: Ping, Leonard e Yang (2003a e 2003b) e Browne (2006). No Brasil, Dantas (2013) e Sobreira (2014), avaliaram o efeito do processo de compactação utilizando o compactador giratório no comportamento geotécnico dos solos.

Em 2003, no Departamento de Transportes do Estado da Florida, EUA, Ping *et al.* (2003a 2003b) publicaram um relatório no qual foram feitas comparações entre as densidades secas encontradas no campo no período pós-tráfego, com as densidades secas obtidas do Proctor Modificado e do compactador giratório tipo Superpave para solos com características granulares. Na comparação *campo – Proctor Modificado*, Ping *et al.* (2003b) encontraram resultados que mostraram grande disparidade entre as densidades secas. Contudo, na comparação *campo – compactador giratório* houve uma boa correlação entre as densidades secas de campo com as obtidas no compactador giratório. Nesse mesmo estudo, os autores também fizeram análises acerca do procedimento de compactação de solos no compactador giratório, por meio da observação da influência do número de giros, do ângulo de giro, da tensão normal e da frequência de giros. Ao final da pesquisa, Ping *et al.* (2003b) recomendaram uma configuração padrão para se executar o ensaio de compactação de solos com uso do compactador giratório:

- tensão normal de 200 kPa;
- ângulo de giro de 1,25°;
- número de giros igual a 90;
- e, frequência de 20 giros por minuto.

Os estudos de Browne (2006) avaliaram a viabilidade da utilização do compactador giratório Superpave para compactar amostras de solo. A compactação

giratória foi realizada em quatro tipos de solo com teores de umidade variados. Para avaliar o grau de compactação do solo conseguida pelo compactador giratório, os resultados dos testes foram comparados com os resultados do Proctor. Browne (2006) observou que os pesos específicos secos máximos obtidos após a compactação giratória foram capazes de superar os ensaios Proctor, em três dos quatro tipos de solo. Este estudo apontou um futuro promissor para a compactação dos solos utilizando a compactação giratória.

Na pesquisa de Dantas (2013) foi analisada a viabilidade do uso do compactador giratório Superpave na execução de ensaios de compactação de um solo argiloso. A partir dos ensaios de compactação realizados com o CGS foi possível chegar a algumas conclusões acerca das características de execução do ensaio, como massa úmida por corpo de prova, tensão normal aplicada e número de giros. O objetivo principal desta pesquisa foi comparar os métodos de compactação por impacto e amassamento, representados, respectivamente, pelo ensaio Proctor e pelo Compactador Giratório Superpave (CGS), para um solo argiloso. Igualmente aos ensaios de compactação, também foram realizados ensaios de compressão simples, compressão diametral e módulo de resiliência em corpos de prova moldados na prensa estática e no CGS.

Quanto à tensão normal aplicada durante a compactação no CGS ficou constatado que esta compõe uma parcela muito importante da energia aplicada no ensaio, onde a tensão de 600 kPa mostrou-se a melhor por ter conduzido a resultados menores de γ e maiores para a $\gamma_{sm\acute{a}x}$. Em relação ao número de giros utilizado nos ensaios de compactação, o número de 500 giros mostrou-se um valor muito elevado para sua execução. As curvas $\gamma_{sm\acute{a}x}$ versus número de giros de todos os ensaios apresentaram comportamento assintótico após 75 giros, indicando incrementos muito discretos na $\gamma_{sm\acute{a}x}$ (Figura 10 e Figura 11).

Figura 10 – γ_s máx versus número de giros para cps de 1000g e tensão normal de 600 kPa (DANTAS, 2013).

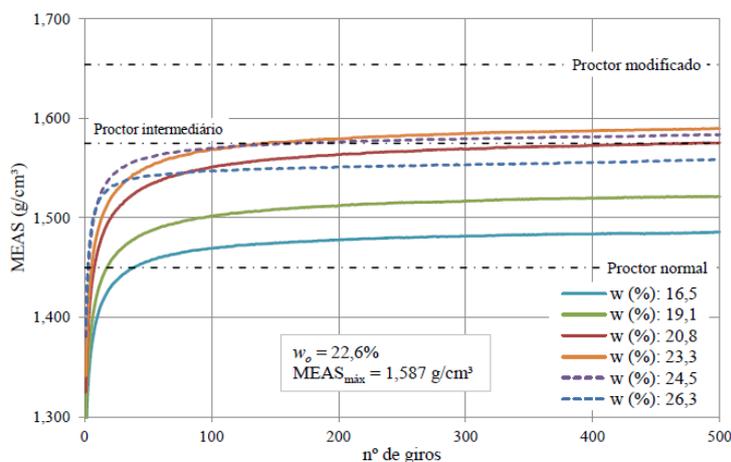
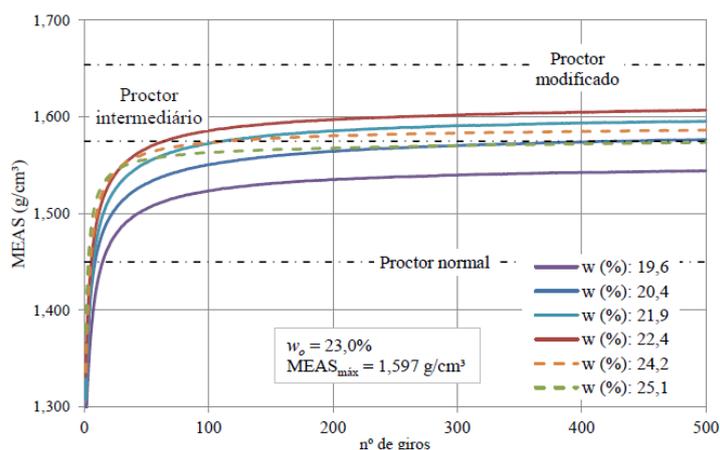


Figura 11 – γ_s máx versus número de giros para cps de 1800g e tensão normal de 600 kPa (DANTAS, 2013).



A comparação entre valores de γ_s máx dos ensaios de compactação realizados pelo método Proctor e no CGS mostrou que o método Proctor teve valores mais elevados de γ_s máx, apesar de ter sido utilizado 500 giros no CGS. Segundo o autor os valores mais elevados de γ_s máx apresentados pelo ensaio Proctor quando comparados àqueles do CGS podem ter sido influenciados pelo número de camadas dos corpos de prova, pois enquanto no Proctor os CPs foram moldados em 3 ou 5 camadas, no CGS os CPs foram moldados em camada única. Assim, acredita-se que o fato de se fazer mais de uma camada na moldagem dos CPs possivelmente conduza a valores mais elevados de γ_s máx. Quanto aos ensaios mecânicos, os corpos de prova moldados no CGS apresentaram, de maneira geral, melhores resultados de resistência à compressão

simples e resistência a tração por compressão diametral que os CPs moldados estaticamente.

Sobreira (2014) fez uma comparação do efeito da Compactação utilizando três energias (Normal, Intermediário e Modificado) e da Compactação Superpave (por amassamento) em três tipos de solos (arenoso, siltoso e argiloso), avaliando os efeitos desses processos de compactação no comportamento geotécnico destes solos. Pode-se destacar que os valores de $\gamma_{sm\acute{a}x}$ dos ensaios de compactação obtidos pelo método Proctor foram, em sua maioria, ligeiramente superiores aos obtidos no CGS. Esta diferença foi explicada em virtude de que no método de compactação Proctor os corpos de prova foram moldados em 5 camadas, já no CGS os corpos de prova foram moldados em camada única. Assim, acredita-se que o fato de se fazer mais de uma camada na moldagem dos corpos de prova Proctor, possivelmente, tenha conduzido a valores mais elevados de $\gamma_{sm\acute{a}x}$.

Quanto aos ensaios mecânicos, de modo geral ocorreu um aumento no valor do RT para os solos quando realizado o processo de compactação CGS em relação ao processo de compactação Proctor. Tal fato só não foi observado para a amostra de solo siltoso. Isto foi explicado em função da maior perda de umidade (umidade de moldagem x umidade de compactação) ocorrida durante o processo de compactação Proctor quando comparado com o CGS. Em relação ao ensaio de resistência a compressão simples, os CPs moldados no CGS para os solos siltoso e argiloso apresentaram maiores valores que o processo de compactação Proctor, entretanto, tal fato não ocorreu para o solo arenoso. Os resultados gerais de ISC foram melhores para o Proctor, estes foram justificados em razão da existência de espaços vazios quando realizada a transferência do corpo de prova moldado no CGS para o molde padrão Proctor e posterior operação de imersão do CP na água.

2.3.4 Métodos de Compactação Menos Utilizados

Alguns métodos de compactação são menos utilizados, devido a alguns materiais, serem bem específicos. Dentre esses métodos podem ser citados a compactação por pisoteamento e a compactação por vibração.

2.3.4.1 Compactação por Vibração

A compactação por vibração é um método que surgiu como uma alternativa a ineficiência do ensaio Proctor com solos arenosos e também para apresentar resultados mais consistentes do que a compactação por impacto para solos granulares, pois o efeito vibração em solos arenosos é fundamental. O intuito era proporcionar uma melhor correlação entre o campo e os resultados de laboratório, já que a maioria de compactação de campo é realizada com equipamento de compactação vibratória onde são utilizadas máquinas motorizadas que além de seu peso é adicionado um sistema vibratório. Em placas compactadoras geralmente é um eixo excêntrico e em compactadores de percussão é um sistema combinando pistão com molas. Esta vibração ou impacto é transmitida ao solo em uma sequência de vibrações ou golpes por minuto, resultando em um alto grau de interferência nas partículas do solo, agregando-as e solidificando o terreno (DANTAS, 2013; SOBREIRA, 2014).

O ensaio de laboratório mais comum que utiliza a compactação vibratória é o ASTM D 4253 (Figura 12). Seu mecanismo de compactação é baseado na vibração do conjunto molde-solo. A ação de vibração geralmente é executada por uma mesa ou placa vibratória e pode ser auxiliado pela colocação de uma sobrecarga sobre a amostra de solo. Muitos fatores influenciam neste processo, tais como a frequência, a amplitude e a aceleração da mesa vibratória, as sobrecargas, a granulometria e o teor de umidade do solo.

Figura 12 – Equipamento de compactação vibratória ASTM D4253.



Ping (2003b) ressaltou que uma desvantagem surgiu durante o ensaio de vibração, que está associada ao fato da parte inferior do molde de compactação não ser removível, diferente das compactações por impacto e giratórias que utilizam alguma ferramenta ou pressão de ar para remover as amostras de solo facilmente.

Desde o desenvolvimento do ensaio ASTM D 4253, vários outros métodos têm sido apresentados, mas nenhum recebeu aceitação generalizada. A Concrete e Laboratório de Solos da AB Vibram- Verken, Solna, Suécia na década de 1960 desenvolveu um procedimento de compactação vibratória, alegando que os resultados obtidos durante a compactação de solos granulares foram semelhantes aos obtidos pelo teste da compactação por impacto Proctor Modificado. Mas, nenhum outro método proposto de compactação vibratória provou ser o mais adequado, como o procedimento de ensaio ASTM D 4253 (PING, 2003b).

2.3.4.2 Compactação por Pisoteamento

A compactação por pisoteamento é um método executado a partir da aplicação sucessiva de golpes sobre áreas pequenas da amostra, por meio de um sistema composto por uma haste em barra de metal pelo qual uma peça cilíndrica (pistão), contendo uma mola no seu interior, é pressionada verticalmente no sentido da amostra, realizando a compactação, com pressões que variam com o tempo, crescendo e decrescendo, ciclicamente (Figura 13).

Figura 13 – Soquete utilizado na compactação por pisoteamento.



Este tipo de compactação é utilizado para simular a ação em campo do rolo pé-de-carneiro, sendo por isso, recomendado principalmente para solos coesivos e não indicada para solos granulares, pois seu mecanismo de ação faz com que haja a desagregação dos grumos do solo, ou seja, desmancham-se os agregados das partículas do solo. A energia de compactação é função da pressão aplicada, das características do sistema de pressão, do tamanho do molde e do número de aplicações. Para solos muito brandos, com umidade elevada, se corre o risco de que a haste chegue ao fundo do molde, com isso, não se consegue o principal objetivo de uma compactação completa e correta. Solos muito rígidos, com baixa umidade, a compactação pode ser insuficiente (BALMACEDA, 1991).

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

2.4 Sucção

A sucção é o elemento condicionante das características dos solos não saturados, e pode ser entendida como a quantidade de energia que representa a capacidade do solo de reter água. Quando a água livre migra dentro do solo, ela será retida ou adsorvida por esse solo. Para liberar a água adsorvida, uma energia externa tem que ser aplicada para contrapor-se à força de retenção da água.

A sucção total de um solo é o resultado da soma de duas parcelas: a sucção matricial e a sucção osmótica. A sucção matricial é o resultado de forças capilares e de

absorção que surgem devido à interação entre a água e as partículas do solo. A sucção osmótica deve-se (presença de diferentes concentrações de sais dissolvidos na fase líquida existentes nos vazios do solo). A manifestação física da sucção é na forma de uma pressão negativa na água que cria uma forte ligação entre as partículas de solo aumentando sua resistência ao cisalhamento e a rigidez da estrutura (Marinho, 1997).

A sucção total pode ser descrita através da Equação abaixo:

$$St = Sm + So \quad (1)$$

Onde,

St: sucção total

Sm : sucção matricial, sendo igual a diferença entre a pressão do ar e a pressão de água

So: sucção osmótica

A sucção total ou energia livre da água do solo é a sucção equivalente derivada da medida da pressão parcial de vapor de água em equilíbrio com a água do solo, relativa à pressão parcial de vapor de água em equilíbrio com a água pura livre. A Sucção osmótica é a sucção equivalente à capacidade de retenção devida a pressões osmóticas que surgem em função dos solutos existentes na água e a sucção matricial é equivalente à capacidade de retenção de água devido à matriz do solo, ou seja, do tipo de partículas e seu arranjo estrutural (Marinho, 1997).

Röhm (1993) cita a grande divergência existente nos princípios que regem os solos não saturados, ressaltando duas correntes ideológicas. Por um lado, vários autores, entre eles Alonso *et al.* (1987) afirmam que o comportamento dos solos não saturados é regido apenas pela sucção matricial, pois é o mais importante e suficiente parâmetro para o estudo dos efeitos da variação da umidade no comportamento mecânico dos solos não saturados. Por outro lado, Richards *et al.* (1986) defendem que o comportamento dos solos não saturados é governado pela sucção total, ou seja sucção matricial mais osmótica. A sucção osmótica varia com as mudanças das condições químicas e térmicas, além do fato de sua importância estar relacionada à presença de uma concentração salina significativa ou que apresentem teores de umidade baixos; para solos com alto teor de umidade este componente se torna desprezível.

Dentre os fatores que influenciam a sucção nos solos estão a granulometria e mineralogia, estrutura do solo, trajetória de umedecimento e secagem na curva característica (NETO e CARVALHO, 1995; RODRIGUES, 1997).

O comportamento mecânico de solos compactados está diretamente ligado ao teor de umidade utilizado, assim a sucção é um importante parâmetro para o estudo dos efeitos da variação de umidade nesses solos, pois não necessariamente são obtidos melhores resultados mecânicos em corpos de prova moldados na umidade ótima. Desta forma o estudo da sucção, por meio da curva característica é um eficiente e importante instrumento para explicar sua influência no comportamento mecânico desses solos.

2.4.1 Método de Medida da Sucção – Método do Papel Filtro

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

Existem diversos métodos diretos ou indiretos para medir sucção. Entre eles podem ser citados como:

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

Estes métodos relacionam a sucção com o teor de umidade ou grau de saturação do solo, por meio destas correlações obtém-se a curva característica de retenção de água do solo (MARINHO 1995 (a, b); NETO e CARVALHO, 1995).

O método mais utilizado é o do papel filtro que consiste na utilização de um material poroso que possua a capacidade de absorver água e atingir um equilíbrio de sucção com a amostra. A sucção obtida depende do tipo de transferência de água do

solo para o papel filtro, que pode se dar por capilaridade (sucção matricial) ou por meio de vapor (sucção total). Na sucção matricial, há uma interação entre o papel filtro e a água do poro, ocorre fluxo capilar por meio das partículas do solo e das fibras do papel sem que a água perca continuidade. Na sucção osmótica, as moléculas de água escapam da água do poro vencendo as forças capilares do solo e, devido à presença de sais, o fluxo ocorre por meio do vapor, neste caso o papel não fica em contato com a amostra (MARINHO 1995a; NETO e CARVALHO, 1995).

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

O papel filtro mais usualmente empregado é o do tipo o Whatman N°.42, cuja umidade inicial no estado seco ao ar é aproximadamente 6%, permitindo que sucções de 0 até 29 MPa (máxima sucção que o solo pode ter para que o papel filtro absorva água do mesmo) sejam medidas (MARINHO, 1995a). Torna-se necessário a calibração do papel filtro a ser utilizado, essa calibração realizada no papel filtro Whatman N°. 42 foi proposta por Chandler *et al.*(1992) na qual apresenta equações para o cálculo da sucção de amostras de solo.

O método do papel filtro é muito utilizado em laboratório, principalmente devido a sua simplicidade de execução e de materiais e também pelo baixo custo, já que necessita apenas de papel filtro calibrado, recipientes hermeticamente fechados, pinça, pincel e uma balança de precisão (no mínimo 0,0005g de acurácia). Entretanto,

justamente pela sua facilidade de uso implica em resultados dispersos, devido à falta de cuidado na execução do ensaio.

Algumas recomendações devem ser seguidas para garantir a obtenção da acurada medida da umidade por meio deste método, além dos já citados: o tamanho do papel (quanto menor o tamanho, menor a sensibilidade da medida), o tempo de equilíbrio (no mínimo 7 dias para a medição de sucção matricial), o conjunto amostra - papel filtro deve ser firmemente envolvido com filme plástico e saco plástico para se evitar a perda de umidade ou um deficiente contato), entre outros.

Segundo Marinho (1995a) a técnica do papel filtro tem se mostrado muito útil na medição da sucção, porém, deve-se salientar que a simplicidade deste método pode levar a erros, principalmente devido à falta de uma adequada execução.

2.4.2 Curva Característica do Solo

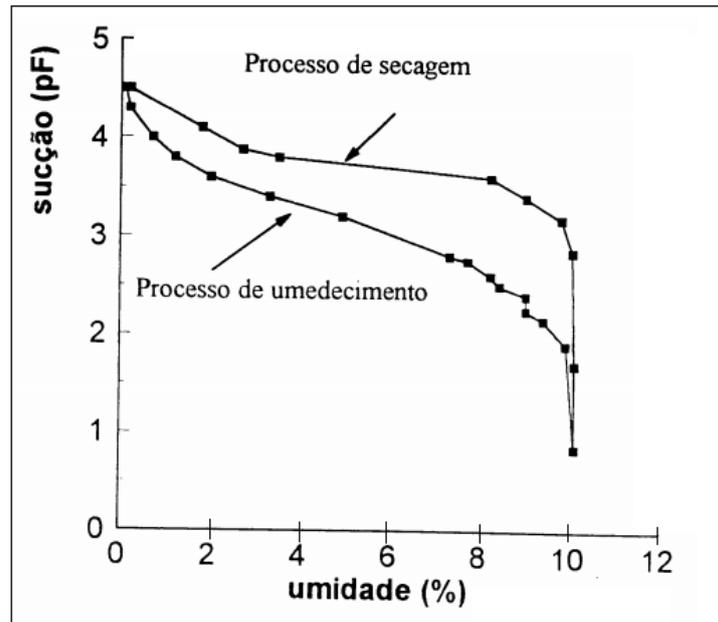
A curva característica de um solo é a representação da variação da sucção com a variação da umidade ou grau de saturação em trajetórias de umedecimento e secagem, sendo que, quanto mais saturado se encontra um solo, menor será a sucção.

Segundo Tan Yun-Zhi *et al.* (2005) a curva característica é a relação entre teor de água e sucção matricial, e reflete a capacidade de suportar a água sob a sucção matricial. Informações importantes sobre a permeabilidade do solo, a tenacidade, mudanças de volume, estado de tensão e distribuição granular são obtidos a partir da relação solo-água. A curva característica de um solo não saturado é o conteúdo principal da sua relação constitutiva (ZHOU JIAN, 2005).

Entre os fatores que influenciam no comportamento da curva característica dos solos pode-se citar estrutura do solo, índice de vazios, granulometria, textura, trajetória de tensões e mineralogia. Destes a estrutura do solo, a granulometria e a mineralogia apresentam maior influência no comportamento da curva característica. Assim, cada tipo de solo apresenta uma única curva característica, sendo que para solos argilosos (poros menores, grãos menores, maiores as forças capilares) a sucção será maior do que para solos arenosos. Verificou-se, no entanto, que a curva característica apresenta

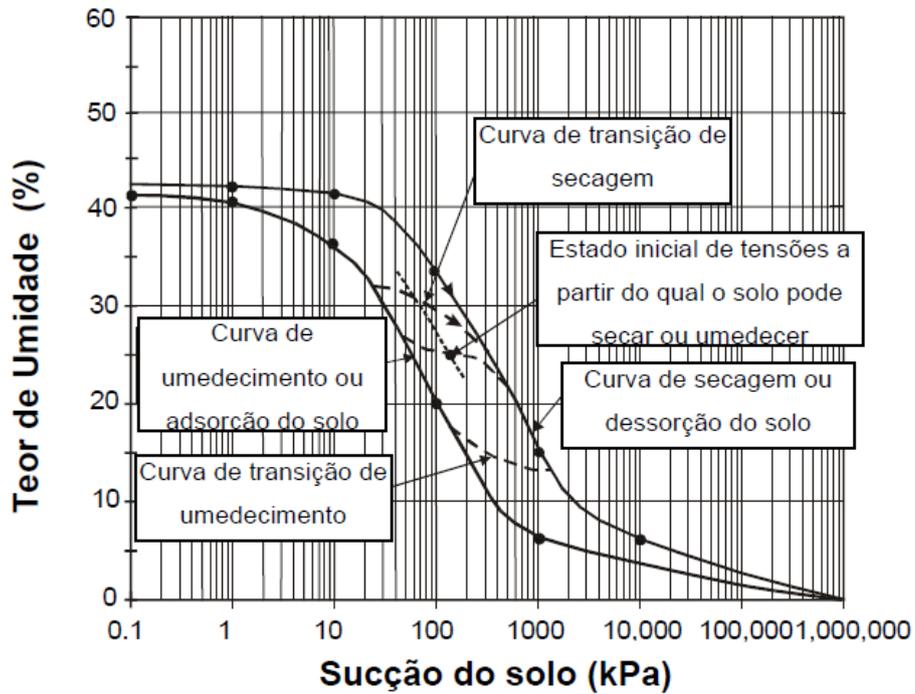
resultados distintos conforme é obtida, por processo de secagem (seca-se as amostras ao máximo e umedece-as até o teor de umidade desejado) ou por processo de umedecimento (umedece-se as amostras ao máximo e seca-as até o teor de umidade desejado) da amostra de solo, como pode ser verificado na Figura 14 (NETO e CARVALHO, 1995).

Figura 14 – Curva característica de uma amostra calcária (CRONEY *et al.*, 1952).



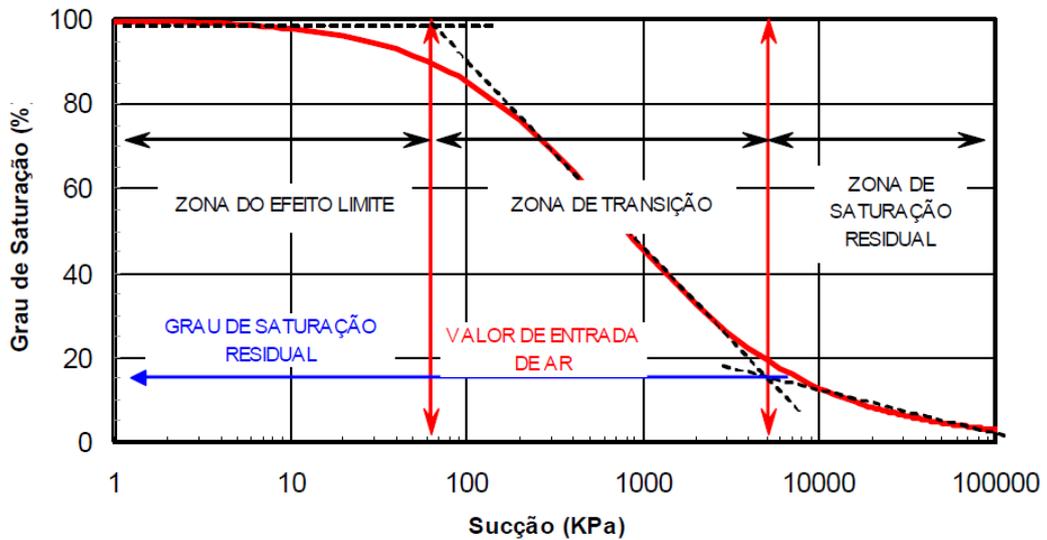
A curva característica de sucção é dependente da trajetória seguida durante o ensaio, ou seja, de secagem, umedecimento ou mista, e este fenômeno é denominado histerese. Em alguns casos há uma pseudo-histerese devido a uma mudança física do solo. A curva de secagem e a curva de umedecimento formam os limites extremos para a curva característica de um dado solo. Entre essas curvas existem infinitas outras curvas que representam a relação umidade sucção do solo. As curvas de secagem e de umedecimento são assintóticas nos extremos (umidade tendendo a zero e sucção tendendo a zero), como mostra a Figura 15. O fenômeno da histerese é explicado por meio de diferentes causas, como a geometria não uniforme dos poros intercomunicados por pequenas passagens, o efeito do ângulo de contato que varia em função da trajetória seguida, a ocorrência de bolhas de ar aprisionadas que influenciam a trajetória de umedecimento e as variações de volume sofridas por expansão e retração (MACHADO & ZUQUETTE, 2004).

Figura 15 – Descrição das curvas de secagem e de umedecimento e o estado inicial do solo em campo (FREDLUND, 2002).



Na Figura 16 é mostrada a configuração de uma curva característica típica, do teor de saturação com a sucção matricial, com suas zonas de transição.

Figura 16 – Curva característica típica mostrando zonas de dessaturação (VANAPALLI *et al.*, 1999).



O primeiro estágio identificável da curva característica é a zona de limite de entrada de ar, que inicia com um valor de sucção próximo a zero e vai até a sucção correspondente ao valor de entrada de ar. Nesta zona quase todos os poros do solo encontram-se preenchidos por água. O valor de entrada de ar identifica o valor de sucção no qual o ar começa a entrar no maior poro do solo. O próximo estágio da curva característica é a zona de transição, a qual inicia no valor de entrada de ar e termina no valor de sucção correspondente ao ponto de saturação residual. O solo começa a dessaturar no estágio de transição e a sucção aumenta significativamente com o decréscimo do teor de umidade.

O último estágio da curva característica é a zona de saturação residual que inicia no ponto de saturação residual e vai até a máxima sucção, ou seja, aquela correspondente ao teor de umidade zero. Nesse estágio grandes aumentos de sucção conduzem a variações muito pequenas no teor de umidade. O ponto de saturação residual pode ser considerado como o teor de umidade além do qual se torna difícil remover água do solo por drenagem, ou seja, a fase líquida encontra-se descontínua. A determinação do grau de saturação residual e do valor de entrada de ar, apesar de importante para a geotecnia, agronomia e geologia entre outras ciências, é ambígua. No teor de umidade residual a fase água é descontínua e isolada, com finos filmes de água circundando as partículas de solo e o ar (VANAPALLI, *et al.*, 1999).

2.5 Considerações Finais

A influência de parâmetros de compactação tem sido objeto de estudo de diversos pesquisadores (Adekalu *et al.*, 2007; Aguiar, 2010; García *et al.*, 2012; Sivrikaya *et al.*, 2013). Os autores concluíram que variações na energia de compactação, tipo de solo, tempo de estocagem, teor de umidade e método de compactação utilizado na moldagem dos corpos de prova podem influenciar de maneira significativa na estrutura e no comportamento mecânico dos solos compactados.

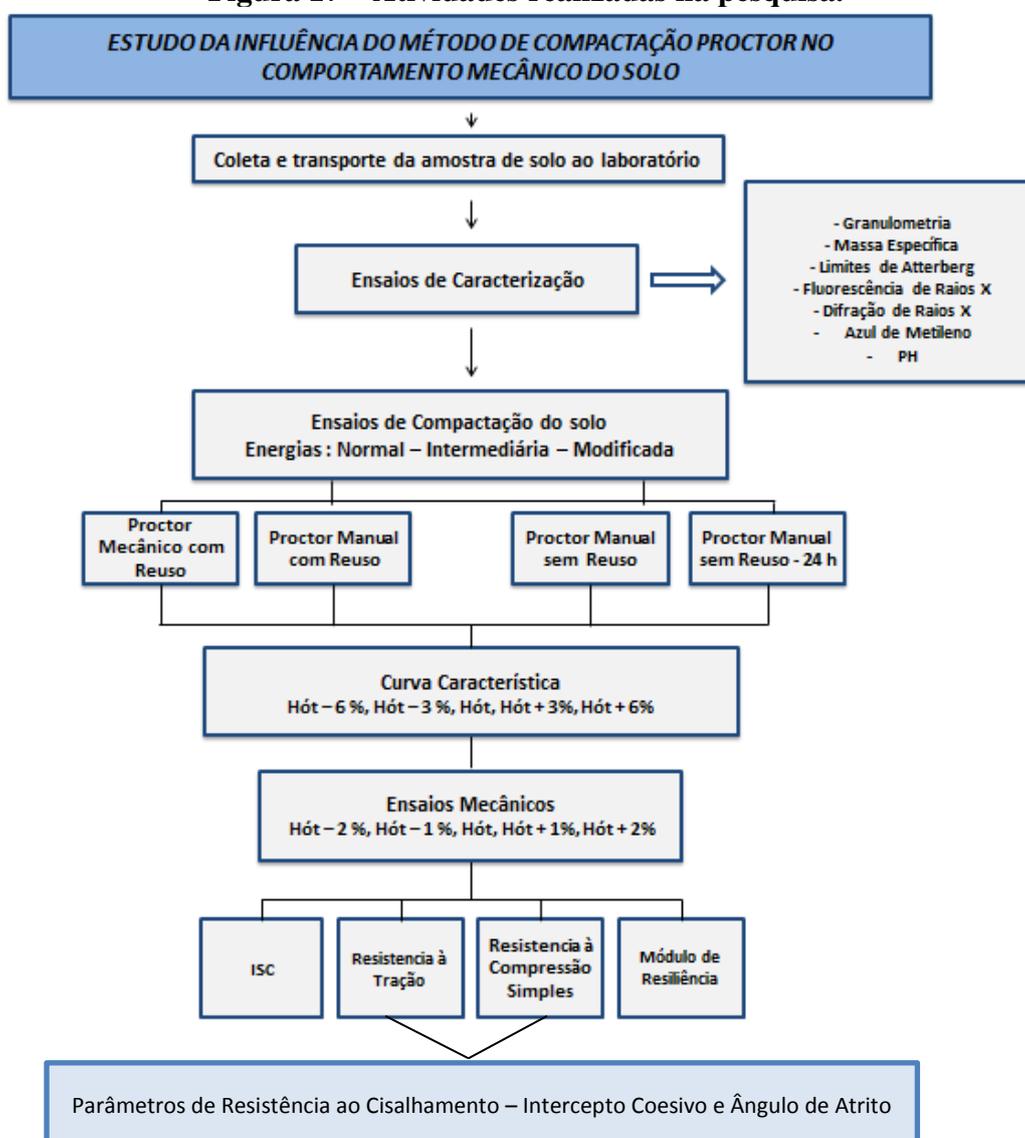
Como a norma NBR 7182/86, que preconiza o ensaio de compactação, permite a realização da compactação Proctor por quatro processos distintos e diante da revisão da literatura realizada verificou-se que, embora permitido por norma, a variação da forma

de compactação Proctor pode ter reflexo no comportamento mecânico dos solos, assim como pequenas variações de umidade podem alterar a estrutura do solo e, conseqüentemente, na resposta deste as solicitações impostas por forças externas, esta pesquisa teve como motivação avaliar a influência dos processos de compactação Proctor nas energias: normal, intermediária e modificada. e verificar o quão rigoroso deve ser o controle o teor de umidade da compactação em campo por meio de variações de umidade ($\pm 2\%$).

3.0 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo estão descritos os materiais utilizados durante a fase experimental da pesquisa (solo), além dos procedimentos e especificações para a obtenção das propriedades físicas e do comportamento mecânico do solo. O Fluxograma da Figura 17 apresenta a sequencia das atividades realizadas no desenvolvimento desta pesquisa.

Figura 17 – Atividades realizadas na pesquisa.



O programa experimental dessa pesquisa foi dividido em duas etapas. A primeira etapa da pesquisa teve o intuito de obter, preparar e caracterizar o solo. A segunda etapa teve o objetivo de analisar a resistência mecânica do solo, por meio dos ensaios de Índice de Suporte Califórnia, Resistência à Compressão Simples, Módulo de Resiliência e Resistência à Tração por Compressão Diametral.

3.1 Materiais

3.1.1 Solo

O solo estudado nesta pesquisa foi fornecido pela empresa ATECEL, cuja caracterização visual indica ser um material de coloração marrom (Figura 18). O solo foi proveniente de uma jazida próxima ao sítio Lucas, distrito de Catolé de Boa Vista na cidade de Campina Grande-PB, sob as coordenadas geográficas ($7^{\circ}16'23.41''$ S Latitude) e ($36^{\circ}5'3.56''$ O Longitude) (Figura 19).

Figura 18 – Solo estudado na pesquisa.

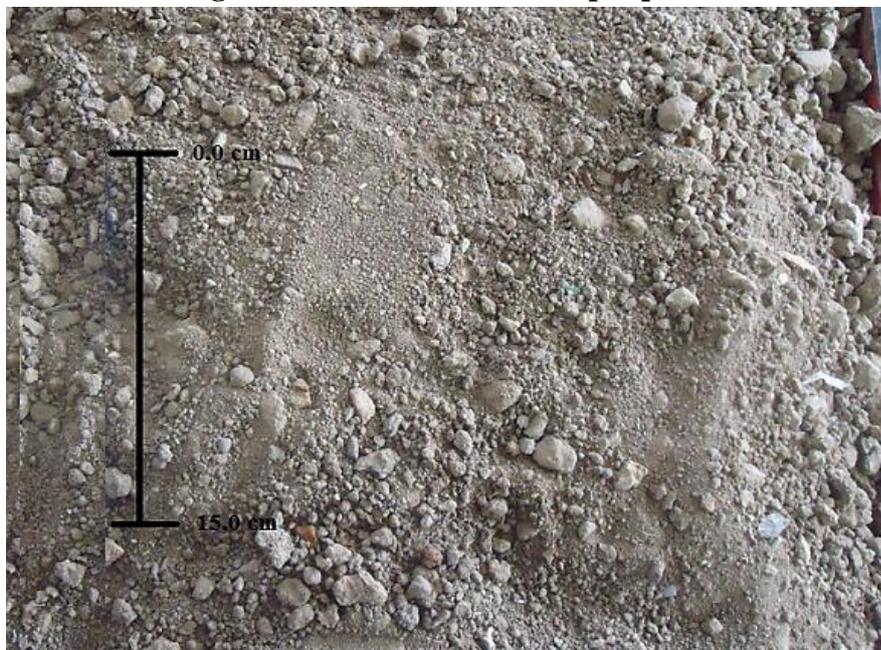
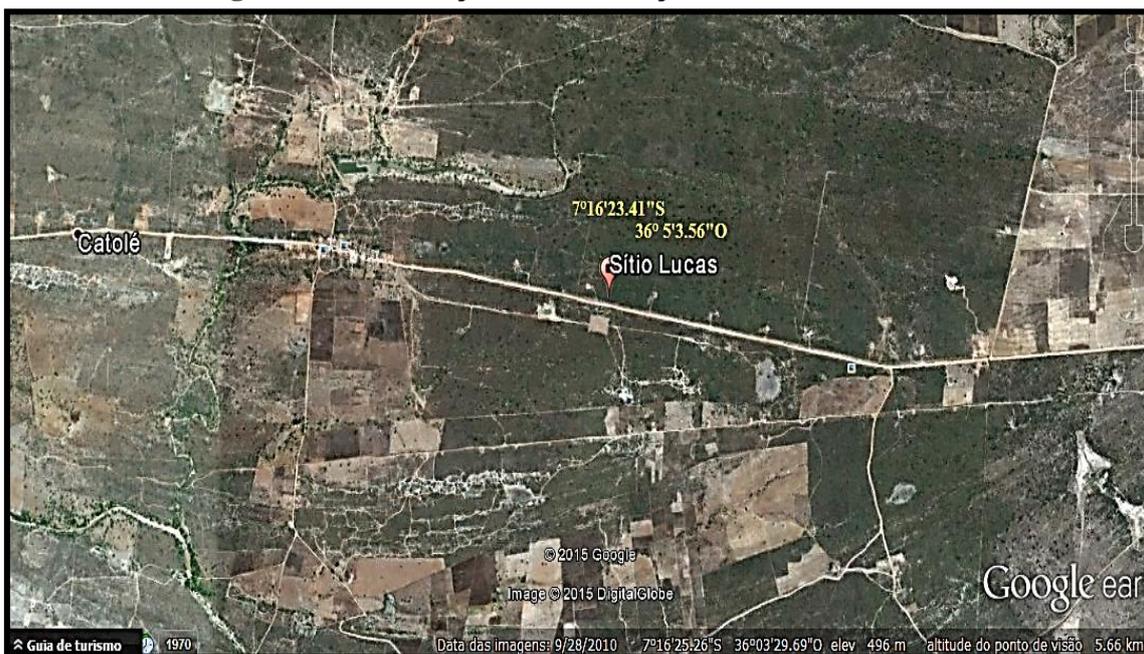


Figura 19 – Indicação da localização da coleta do solo.



O material coletado foi transportado para o Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), onde foram armazenados em sacos de 50 kg. Em seguida, os solos eram colocados em bandejas metálicas para secagem ao ar de acordo com a demanda de ensaio semanal. Posteriormente, efetuava-se a mistura e o quarteamento dos solos com o auxílio de pás para a devida homogeneização; por fim, os solos eram destorroados e passados na peneira de $\frac{3}{4}$ polegadas (# 19,1mm) e armazenados em sacos plásticos devidamente identificados.

3.2 Métodos

Para atingir os objetivos sugeridos neste trabalho foram adotadas metodologias e informações contidas na literatura. Os métodos de ensaios utilizados foram baseados em normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), da American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) e pela Norma Francesa (NF).

Nesta pesquisa foram realizados os ensaios de caracterização física, mineralógica e química do solo, além de ensaios mecânicos.

3.2.1 Ensaios de Caracterização do Solo

Os ensaios de caracterização física (granulometria, massa específica real dos grãos e limites de Atterberg) foram realizados no Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) da Unidade Acadêmica de Engenharia Civil (UAEC) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). A preparação das amostras de solo foi realizada de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 1986) – *Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*, para execução dos ensaios supracitados.

Os ensaios de análise química e mineralógica (fluorescência de raios X (EDX), difração de raios X (DRX), azul de metileno e pH) foram realizados no Laboratório de Engenharia de Materiais do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMA) da UFCG.

A Tabela 4 apresenta os ensaios de caracterização física e mineralógica do solo estudado nesta pesquisa, com as respectivas normas utilizadas para cada ensaio.

Tabela 4 – Ensaios realizados para caracterização física, química e mineralógica do solo.

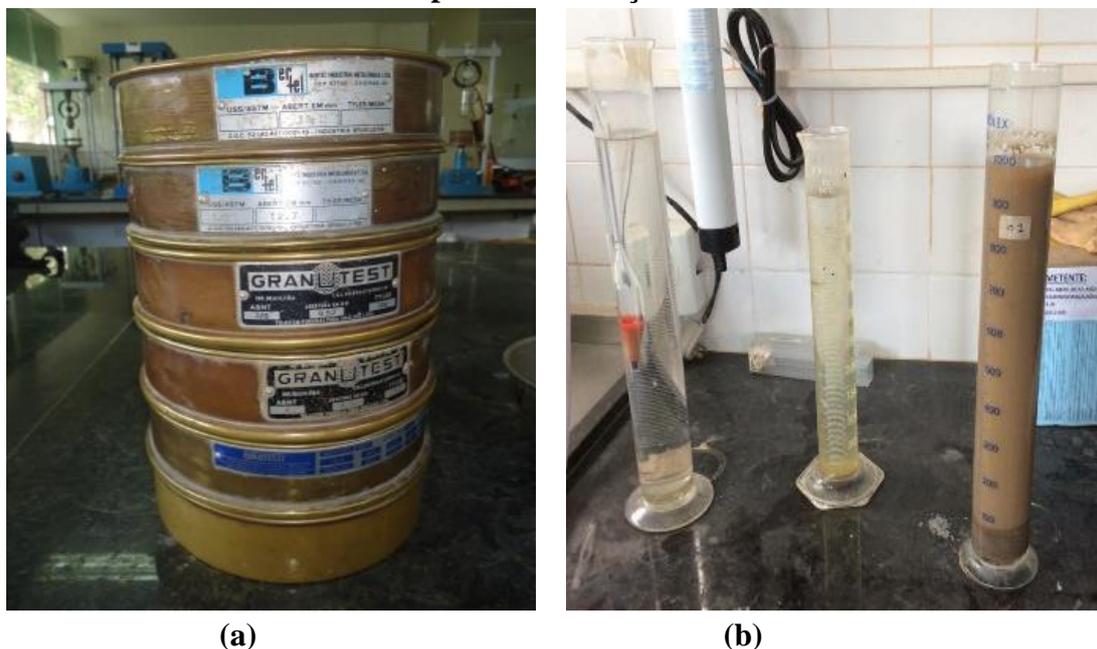
ENSAIO	NORMA
Análise granulométrica	ABNT – NBR 7181/1984
Determinação da massa específica	ABNT – NBR 6508/1984
Determinação do limite de liquidez	ABNT – NBR 6459/1984
Determinação do limite de plasticidade	ABNT – NBR 7180/1984
Fluorescência de Raios X - EDX	-
Difração de Raios X - DRX	-
Azul de Metileno	NF P 18 – 592

3.2.1.1 Análise Granulométrica

O ensaio de granulometria é o processo utilizado para a determinação da percentagem em massa que cada faixa especificada de tamanho de partículas representa na massa total ensaiada. Com os resultados obtidos nesse ensaio é possível a construção da curva de distribuição granulométrica, importante para a classificação dos solos.

A distribuição granulométrica dos solos foi determinada por meio do ensaio de granulometria por peneiramento e sedimentação, normatizado pela NBR 7181 (1984) – Solo – Análise granulométrica. Conforme a norma, para a realização dessas análises, uma amostra de cada material estudado foi separada e submetida ao peneiramento em uma série-padrão de peneiras, cuja abertura de malhas tem uma sequência definida (Figura 20).

Figura 20 – (a) Série-padrão de peneiras para o ensaio de granulometria por peneiramento e (b) Provetas com solos mais solução para ensaio de granulometria por sedimentação.



Nesta pesquisa a determinação da granulometria por sedimentação foi feita com e sem o uso do defloculante. De acordo com Camapum de Carvalho *et al.* (1996) a realização de ensaios de granulometria com e sem o uso de defloculante em solos

tropicais pode gerar diferenças muitas vezes substanciais. Assim, quando se realiza o ensaio de granulometria com o uso de defloculante, pode-se não obter a granulometria real do solo. Devido este fato optou-se pela realização de duas análises granulométricas por amostra de solo: uma com o uso de defloculante (hexametáfosfato de sódio) e outra apenas com água destilada.

Guimarães (2002) estudando um perfil de solo do Distrito Federal concluiu que a granulometria está associada ao processo de alteração, sendo que as maiores diferenças entre as curvas granulométricas obtidas nos ensaios realizados com e sem defloculante ocorrem para os solos com maior concentração de hidróxidos de alumínio (gibbsita), ou seja, a agregação é tanto maior quanto maior é o grau de intemperização do solo.

3.2.1.2 Fluorescência de Raios X (EDX)

A técnica utilizada para determinação da composição química do solo foi a fluorescência de raios-X (EDX). As amostras foram passadas em peneira ABNT N° 200 (abertura de 0,074mm) e submetidas à análise química por fluorescência de raios X em equipamento EDX 720 da Shimadzu (Figura 21). A geração de raios X é feita por meio de um tubo com alvo de Rh.

Esta técnica baseia-se no princípio de que a absorção de raios-X pelo material provoca ionização interna dos átomos, gerando uma radiação característica conhecida como “fluorescência”. Esta análise permite verificar os óxidos que estão presentes no solo como SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, MgO, K₂O, Ti₂O, entre outros.

Figura 21 – Equipamento EDX 720 da Shimadzu utilizado na pesquisa.



3.2.1.3 Difração de Raios X (DRX)

Para determinação dos principais materiais cristalinos (quartzo, caulinita, sepiolita, clorita, entre outros) que compõe o solo estudado, as amostras foram passadas em peneira ABNT N° 200 (abertura de 0,074mm) e submetidas à análise mediante a utilização de um equipamento Shimadzu XDR-6000 utilizando radiação de $\text{CuK}\alpha$, tensão de 40kV, corrente de 30mA, varredura de $2^\circ < 2\theta < 30^\circ$ e $\lambda = 1,54\text{\AA}$ (Figura 22).

Figura 22 – Equipamento Shimadzu XDR-6000 utilizados na pesquisa.



3.2.1.4 pH

Para determinação dos pHs foram utilizadas 5 gramas de solo para o pH em água e 10 g de solo para o pH em KCl, passadas em peneira ABNT n° 325 (abertura de 0,044mm). Realizou-se a diluição da amostra de solo em água e por meio do phmetro determinou-se o pH em água do solo. Em seguida, o pH em KCl foi determinado a partir de dois líquidos extratores, água destilada (1,0:2,5) e KCL 1N (1,0:1,0), onde procedeu-se da seguinte forma: em um becker de 50ml, colocou-se 10 gramas de solo e 25 ml de água destilada ou 10 ml de solução KCL 1N. Agitou-se a solução com um bastão de vidro ou um agitador mecânico por 5 minutos, em seguida a solução ficou em repouso por uma hora, e depois procedeu-se as leituras de pH em KCl.

3.2.1.5 Azul de Metileno

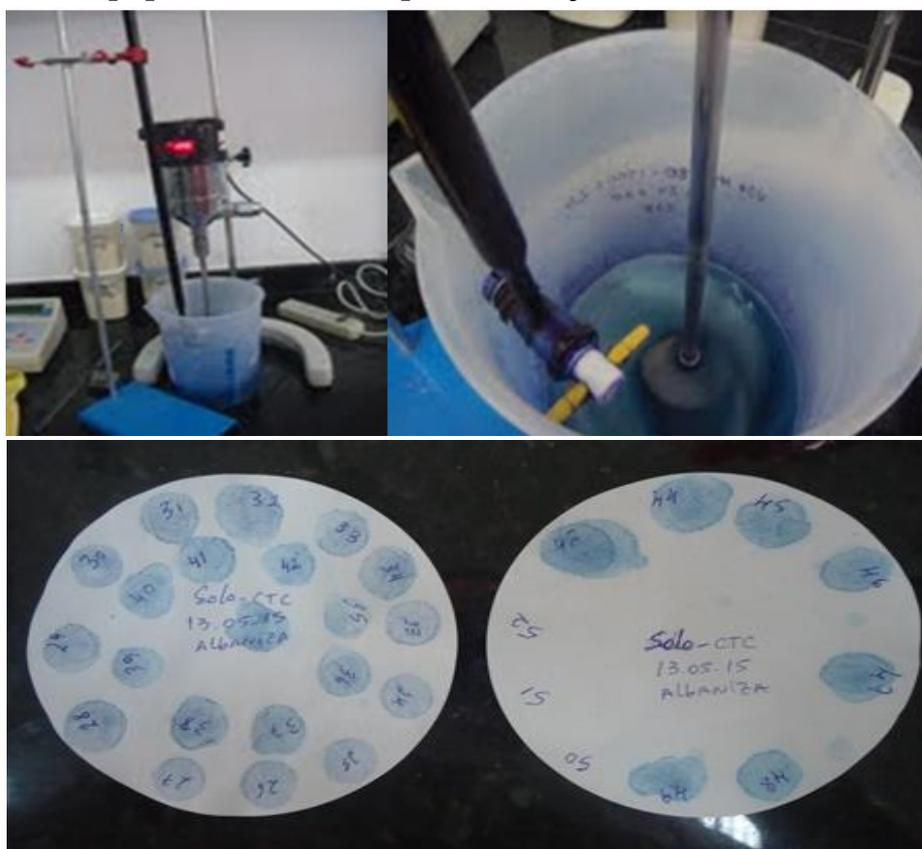
O ensaio de adsorção de azul de metileno permite determinar da capacidade de troca catiônica (CTC) dos argilominerais. O ensaio de azul de metileno consistiu em introduzir quantidades crescentes de solução de azul de metileno, por doses sucessivas, até que a superfície das partículas que têm capacidade de adsorção esteja coberta. O mecanismo da adsorção de azul de metileno pelas partículas consiste na permuta iônica entre os cátions (de cálcio, sódio, magnésio e potássio, e os cátions resultantes da dissociação da molécula de azul de metileno em solução aquosa) existentes na superfície dessas partículas. Em consequência desta troca catiônica forma-se à volta da partícula uma camada monomolecular de azul de metileno. Conhecidas as dimensões da molécula de azul de metileno e admitindo ser monomolecular a camada adsorvida, pode então estimar-se a superfície específica das partículas adsorventes.

O ensaio de azul de metileno foi realizado de acordo com a Norma Francesa - NF P 18 – 592, onde foram utilizadas 5 gramas de solo, passadas em peneira ABNT n° 325 (abertura de 0,044mm). A amostra de solo foi colocada em um Becker de 500 ml e misturada com 300 ml de água destilada. Agitou-se a suspensão e adicionou-se gota a gota solução de 0,01N de Na_2CO_3 até atingir o pH da suspensão de aproximadamente 9,0 e continuou-se a agitação por 5 minutos para homogeneização. Após esse procedimento, adicionou-se solução de 0,01N de HCl para baixar o pH da suspensão até

3,5; neste pH supõe-se que todo o azul de metileno esteja na forma monomolecular e apresenta os melhores resultados.

Titulou-se a suspensão acima preparada com a solução padrão (3,7g/l) de azul de metileno contido numa bureta, da seguinte forma: a solução de azul de metileno foi adicionada, inicialmente de 1,0 em 1,0 ml, sendo que, após cada adição de azul de metileno a suspensão foi agitada continuamente durante 2 min.; então, com uma bagueta de vidro, pingou-se uma gota da suspensão num papel de filtro Whatman n^o 50. Esse procedimento deve prosseguir até que uma leve coloração azul apareça ao redor do círculo formado pelas partículas de solo. Quando aparecer esse anel azulado, agitar por mais 2 minutos e pingar uma nova gota no papel de filtro. Se o anel azulado persistir, está alcançando o ponto da viragem; se desaparecer o anel azulado, adicionar mais 0,5 ml de solução de azul de metileno, agitar por mais 2 min. e pingar nova gota no papel de filtro. Continuar esse processo até que o anel azulado não mais desapareça. A Figura 23 apresenta o equipamento utilizado para realização deste ensaio.

Figura 23 – Equipamento utilizado para realização do ensaio de azul de metileno.



3.2.2 Ensaios de Compactação Proctor

Os ensaios de compactação do solo foram realizados no Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). A Tabela 5 apresenta as normas utilizadas para realização dos ensaios.

Tabela 5 – Normas utilizadas para o ensaio de compactação do solo.

ENSAIO	NORMA
Ensaio de compactação - Solo	ABNT – NBR 7182/1986
	DNIT – ME 162/1994
	DNIT – ME 164/2013

Para se alcançar o objetivo principal desta pesquisa foram realizados quatro tipos de ensaios de compactação – compactação manual com reuso de material, compactação mecânica com reuso de material, compactação manual sem reuso de material e compactação manual sem reuso de material com 24 horas de umedecimento prévio. Todos os tipos de compactação realizados estão de acordo com a metodologia Proctor e seguem as recomendações das normas: NBR – 7182/1986, DNIT – ME 162/1994 e DNIT – ME 164/2013. Os ensaios de compactação Proctor foram executados nas energias Normal, Intermediária e Modificada.

O ensaio de compactação Proctor manual consistiu na compactação de camadas de uma amostra de solo confinado em um molde padrão (15,2 cm de diâmetro, altura de 11,6 cm, volume de 1000 cm³), na qual aplicou-se golpes com um soquete (Figura 24). Conforme a energia de compactação é definida, variam-se o número de camadas, o peso do soquete e o volume do molde, como mostra a Tabela 6.

Figura 24 – Execução do ensaio de compactação manual.



Tabela 6 – Valores de energia do ensaio Proctor (Adaptada da NBR 7182/86).

CILINDRO	Características inerentes a cada energia	ENERGIA DE COMPACTAÇÃO		
		NORMAL	INTERMEDIÁRIA	MODIFICADA
GRANDE	Soquete	Grande	Grande	Grande
	Número de camadas	5	5	5
	Número de golpes por camada	12	26	55

Na compactação Proctor manual com reuso de material utilizou-se 6 Kg de solo, que foi usado para determinar os cinco pontos da compactação seguindo a trajetória de umedecimento. Diferentemente da compactação Proctor sem Reuso de material na qual para cada ponto da compactação foram utilizadas amostras virgens, ou seja, no total foram utilizados 30 Kg de solo.

A compactação Proctor manual sem reuso de material com 24 horas de umidade seguiu a mesma metodologia que a anterior, porém as cinco amostras são preparadas 24 horas antes do ensaio. Pois a norma recomenda que para solos com dificuldades na uniformização da umidade, a amostra a ser ensaiada, após a adição da água, seja colocada em um saco plástico vedado e mantido em processo de cura durante 24 horas

(Figura 25). A quantidade de água adicionada para cada ponto dessa compactação foi baseada nas umidades atingidas para cada ponto da compactação manual sem reuso.

Figura 25 – Amostras de solo em processo de cura por 24 horas.



A compactação Proctor mecânica com reuso de material seguiu o procedimento análogo à compactação manual com reuso, entretanto utilizou-se um processo mecânico por meio de um compactador mecânico (Equipamento da Solotest) (Figura 26). Para a base do soquete do compactador mecânico foi projetada uma peça em aço em formato de “pizza”, que atendesse as características da compactação manual, em termos de peso, de distribuição de golpes e energia. Os golpes eram distribuídos em torno de 45° em volta do molde cilíndrico.

Figura 26 – Compactador mecânico utilizado na pesquisa.



3.2.3 Ensaio da Curva Característica da Sucção

A sucção dos solos é composta de duas componentes, a matricial e a osmótica, onde a soma das duas fornece a sucção total, sendo que a determinação de cada uma depende da técnica utilizada para medição. Pode ser entendida como a quantidade de energia que representa a capacidade do solo de reter água, já a capilaridade é um mecanismo de tensão superficial nos líquidos, onde há uma combinação de forças de adesão e coesão.

Para esta pesquisa utilizou-se a técnica do papel filtro, com medidas de sucção mátrica, por meio do papel Whatman nº 42, baseando-se nas metodologias apresentadas em Marinho (1995) e Guedes (2013).

A ASTM D 5298 (2003) prescreve que o papel filtro deve ser seco em estufa por no mínimo 16 horas antes do uso e guardado em um dessecador até o momento de utilização. Segundo Marinho (1995) existem discussões sobre este procedimento, visto que ele pode alterar as características de absorção do papel filtro. Marinho (1995) aconselha a utilização do papel filtro diretamente da caixa.

A metodologia adotada nesta pesquisa para a determinação da curva característica do solo pelo método do Papel Filtro foi a seguinte:

- a) inicialmente foram moldados cinco corpos de prova na prensa Marshall, para cada uma das compactações Proctor utilizadas na pesquisa, ou seja, foram moldados um total de cinco amostras para a obtenção de cada curva, totalizando vinte corpos de prova. Com nas umidades ótimas obtidas nos ensaios de compactação e na umidade higroscópica presente no solo estes corpos de prova foram moldados em umidades definidas ($H_{ót} - 6\%$, $H_{ót} - 3\%$, $H_{ót}$, $H_{ót} + 3\%$, $H_{ót} + 6\%$) (Figura 27-a);
- b) após a moldagem dinâmica, os corpos de prova foram retirados do molde cilíndrico e foram cravados gabaritos de latão com 2 cm de altura e 7 cm de diâmetro aproximadamente com auxílio de uma prensa (Figura 27-b, Figura 27-c e Figura 27-d). Determinou-se o peso bruto úmido (anel + solo úmido) de cada corpo de prova (Figura 27-e). Os anéis garantiam a integridade das amostras e facilitavam o processo de pesagem;
- c) em seguida cada corpo de prova recebeu Papel Filtro (Whatman N° 42), colocado cuidadosamente com o auxílio de uma pinça, em cada uma de suas faces, em seguida o conjunto foi envolvido com duas camadas de filme de PVC e uma camada de papel alumínio para evitar perda de umidade e logo em seguida identificado por meio da colocação de uma etiqueta, e permaneceram sete dias em repouso no interior de uma caixa de isopor (Figura 27-g e Figura 27-h);
- d) após o término do tempo mínimo de equilíbrio estabelecido, os papéis filtro foram pesados numa balança de precisão de 1.10^{-4} gramas e em seguida colocados em capsulas e levados para estufa e, após 48 horas, foram novamente pesados na mesma balança, obtendo-se assim a umidade (Figura 27-i e Figura 27-j);
- e) Com a umidade do papel e as curvas de calibração, obteve-se a sucção utilizando-se as Equações 2 (para umidades do papel filtro maiores que 47%) e 3

(para umidades do papel filtro menores ou iguais a 47%) propostas por Chandler *et al.* (1992) *apud* Marinho (1995a) para o papel filtro utilizado.

$$\text{Sucção (kPa)} = 10(6,05 - 2,48 \log w) \quad (2)$$

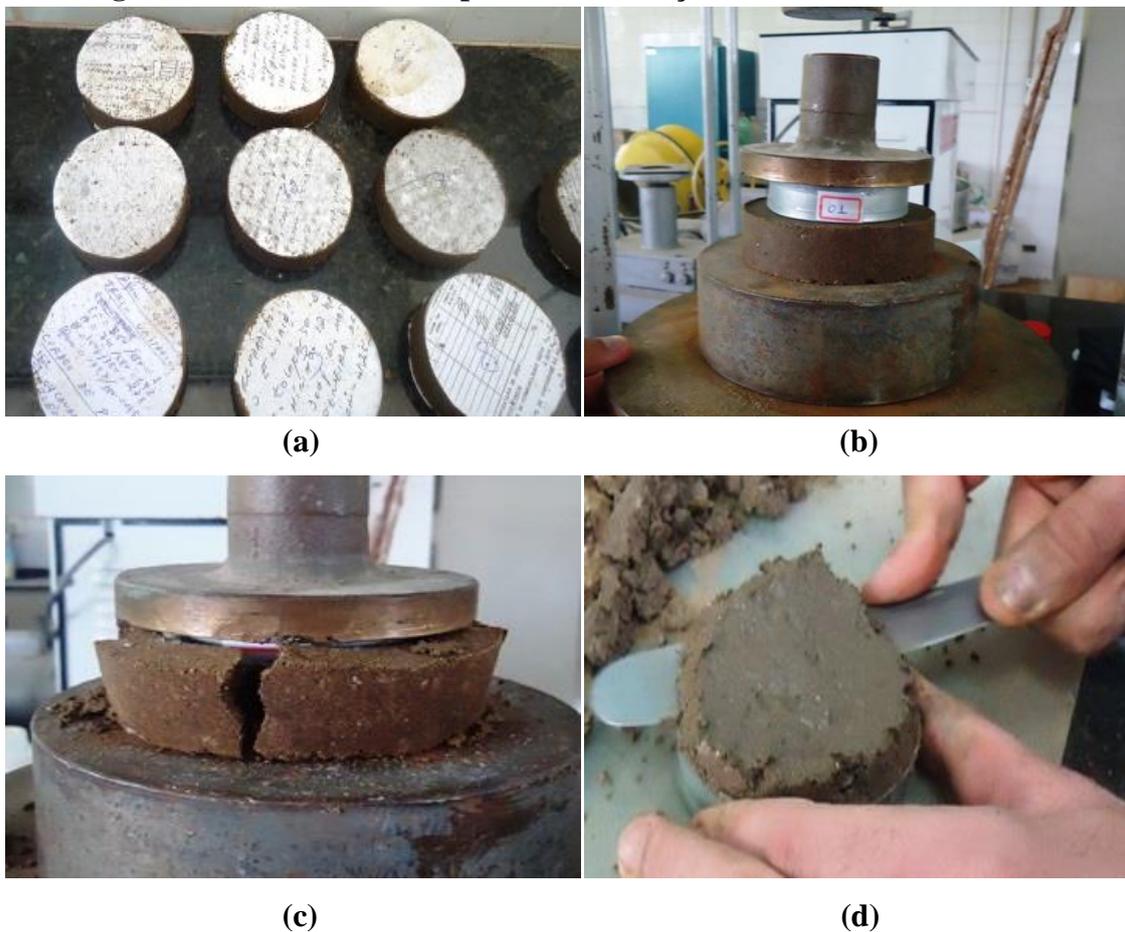
$$\text{Sucção (kPa)} = 10(4,84 - 0,0622 \log w) \quad (3)$$

Onde:

w = umidade do papel filtro.

Os procedimentos descritos para obtenção da curva característica pelo método do papel filtro encontram-se resumidamente ilustrados na Figura 27.

Figura 27 – Procedimentos para determinação da curva característica.





(e)



(f)



(g)



(h)



(i)



(j)

3.2.4 Ensaios de Caracterização Mecânica do Solo

Os ensaios para avaliar as propriedades mecânicas dos solos foram realizados no Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). A Tabela 7 apresenta os ensaios realizados nessa pesquisa para análise do comportamento mecânico, bem como as normas utilizadas para realização dos ensaios.

Tabela 7 – Ensaios realizados para caracterização mecânica do solo.

ENSAIO	NORMA
Determinação do Índice de Suporte Califórnia	DNIT – ME 049/1994
Determinação de Resistência à Tração por Compressão Diametral	DNIT – ME 136/2010 * DNIT – ME 181/1994 *
Ensaio de resistência à Compressão Simples	ABNT – NBR 12025/1990
Módulo de Resiliência	DNIT – ME 134/2010
Curva Característica da Sucção	-

*Adaptada

3.2.4.1 Ensaio de Índice de Suporte Califórnia – ISC

O ensaio de Índice de Suporte California foi realizado de acordo com a norma DNIT – ME 049/1994. O ISC pode ser definido como a relação percentual entre a pressão necessária para fazer penetrar, de maneira padronizada, um pistão numa amostra de solo convenientemente preparada e a pressão para fazer penetrar o mesmo pistão, à mesma profundidade, numa amostra padrão de pedra britada, ou material equivalente.

Os corpos de prova foram moldados nas umidades: Hót – 2 %, Hót – 1 %, Hót, Hót + 1%, Hót + 2%, na qual a umidade ótima e o peso específico aparente seco máximo foram determinados a partir dos quatro métodos adotados nos ensaios de compactação supracitados; utilizando-se as energias normal, intermediária e modificada – critério este baseado ao adotado por Crispin, 2007 que utilizou as umidades: Hót – 3%, Hót, Hót + 2%. Na presente pesquisa foram moldados, no mínimo, dois corpos de prova de solo puro por condição de ensaio (tipo de compactação – energia de compactação – teor de umidade). Ou seja, realizou-se uma réplica, e caso houvesse divergência superior a 10% executou-se tréplica, obtendo-se valores médios de ISC. Portanto, para cada tipo de compactação foram moldados no mínimo 30 corpos de prova (sendo 10 CPs para cada energia) nas referidas umidades, totalizando 120 corpos de prova utilizados nesse ensaio. As amostras de solo utilizadas na moldagem dos corpos de prova, a partir dos parâmetros obtidos no ensaio de compactação manual sem reuso com 24 horas de umidade, foram umedecidas nas umidades supracitadas e

colocadas em sacos plásticos numa câmara fria para a uniformização da umidade. Ou seja, procedeu-se da mesma forma que foi conduzida a compactação manual sem reuso com 24 horas.

Os corpos de prova (CP) foram colocados em imersão por quatro dias (Figura 28-a) num tanque cheio de água e neste período foi realizado o acompanhamento da expansão de todas as amostras ensaiadas. Após a retirada destes corpos de prova da imersão foi feita a penetração por meio do puncionamento na face superior da amostra por um pistão com aproximadamente 50mm de diâmetro, sob uma velocidade de penetração de 1,25mm/min (Figura 28-b). Anotam-se as pressões do pistão e os deslocamentos correspondentes, de forma a possibilitar a plotagem de uma curva pressão-penetração.

Figura 28 – (a) Imersão e (b) Execução do ensaio de ISC.



(a)



(b)

3.2.4.2 Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral – RT

O ensaio de compressão diametral ou tração indireta foi desenvolvido por Lobo Carneiro e Barcellos, no Brasil, para determinar a resistência à tração de corpos de prova de concreto de cimento Portland. O ensaio consiste em submeter um corpo de prova à aplicação de uma carga de compressão sem confinamento ao longo de um plano diametral por meio de frisos de cargas opostos, produzindo então uma tensão de tração ao longo do plano vertical, até que ocorra a ruptura do corpo de prova (Figura 29).

Figura 29 – Posicionamento do corpo de prova para ensaio de resistência à tração.



Embora não existam normas para execução desse ensaio em solos, adaptou-se a norma DNIT-ME 136 (2010), que trata de misturas betuminosas – *determinação da resistência à tração por compressão diametral*, e a norma DNIT – ME 181(1994), que trata de solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada – *determinação da resistência à tração por compressão diametral*.

Para a realização do ensaio de resistência à tração por compressão diametral foram moldados, no mínimo, dois corpos de prova por condição de ensaio (tipo de compactação – energia de compactação – teor de umidade). Ou seja, realizou-se uma réplica, e caso houvesse divergência superior a 10% executou-se tréplica, obtendo-se valores médios de RT. Portanto, para cada tipo de compactação foram moldados no mínimo 30 corpos de prova (sendo 10 CPs para cada energia) nas referidas umidades, totalizando 120 corpos de prova utilizados nesse ensaio, todos com aproximadamente

100 mm de diâmetro e altura final média, de aproximadamente 55 mm, medidas em três pontos distantes entre si por 120°(graus).

Para a moldagem do corpo de prova utilizou-se o compactador Marshall (Figura 30) aplicando-se para as energias normal, intermediária e modificada o número de golpes em camada única apresentados na Tabela 8. Determinou-se a quantidade de golpes por camada a partir da Equação (4). Os teores de umidades ótimas utilizados na moldagem dos corpos de prova foram determinados a partir dos resultados dos parâmetros ótimos dos quatro tipos de ensaios de compactação. A moldagem dos corpos de prova para o ensaio de RT a partir dos parâmetros obtidos no ensaio de compactação manual sem reuso com 24 horas de umidade foi conduzida de maneira análoga à referida compactação.

$$E_c = \frac{P \cdot h \cdot N \cdot n}{V} \quad (4)$$

Onde,

E_c : energia de compactação por unidade de volume (J/cm^3)

P : peso do soquete (N)

h : altura de queda do soquete (m)

N : número de golpes por camada

n : número de camadas

V : volume do molde cilíndrico (cm^3)

Figura 30 – Compactador Marshall.



Tabela 8 – Número de golpes por energia para moldagem dos corpos de prova.

ENERGIAS	NORMAL	INTERMEDIÁRIA	MODIFICADA
Número de golpes	15	32	68

Após a moldagem, os corpos de prova ficaram expostos às condições atmosféricas por 24 horas, pois se observou que não havendo esse tempo mínimo não era possível a realização do ensaio por não haver resistência do corpo de prova (Figura 31). Durante esse período de 24 horas há uma desidratação do corpo de prova que propicia uma melhora de resistência. O rompimento dos corpos de prova foi realizado com uma prensa eletromecânica com velocidade de deslocamento de 0,8 mm/s. A Figura 32 mostra a ruptura do corpo de prova.

Figura 31 – Corpos de prova em processo de cura.



Figura 32 – Ruptura do corpo de prova por tração indireta.



A resistência à tração por compressão diametral tanto pode ser expressa em kgf/cm² e em MPa e foi calculada individualmente para cada corpo de prova, segundo a Equação 5.

$$RT = \frac{2xF}{\pi x D x H} \quad (5)$$

Onde:

RT: Resistência à tração por compressão diametral, em MPa;

C: Carga de ruptura, em N;

D: diâmetro de corpo de prova, em cm;

H: altura do corpo de prova, em cm.

3.2.4.3 Ensaio de Resistência à Compressão Simples – RCS

Para a realização do ensaio de resistência à compressão simples foi moldado um corpo de prova por condição de ensaio (tipo de compactação – energia de compactação – teor de umidade). Portanto, para cada tipo de compactação foram moldados no mínimo 15 corpos de prova (sendo 5 CPs para cada energia) nas referidas umidades, totalizando 60 corpos de prova utilizados nesse ensaio. Os corpos de prova apresentaram aproximadamente, 100 mm de diâmetro e altura final média de 130 mm, medida em três pontos distantes entre si por 120°. Os corpos de prova moldados na compactação mecânica apresentaram dimensões diferenciadas de aproximadamente 150 mm de diâmetro e altura final de 115 mm, pois nesta foi utilizado o cilindro grande.

Os teores de umidades ótimas utilizados na moldagem dos corpos de prova foram obtidos a partir dos quatro tipos dos ensaios de compactação. A moldagem dos corpos de prova para o ensaio de RCS a partir dos parâmetros ótimos obtidos no ensaio de compactação manual sem reuso com 24 horas de umidade foi conduzida de maneira análoga à referida compactação. Os corpos de prova foram moldados conforme preconizado na NBR 7182/86 (Tabela 9). Após moldados os corpos de prova ficaram expostos às condições atmosféricas por 24 horas.

Tabela 9 – Valores de energia do ensaio Proctor (Adaptada da NBR 7182/86).

CILINDRO	Características inerentes a cada energia	ENERGIA DE COMPACTAÇÃO		
		NORMAL	INTERMEDIÁRIA	MODIFICADA
PEQUENO	Soquete	Pequeno	Grande	Grande
	Número de camadas	3	3	5
	Número de golpes por camada	26	21	27

A prensa utilizada para o rompimento dos corpos de prova foi a SHIMADZU AG-IS (Figura 33-a) com célula de 100 kN, com velocidade de 1 mm/min, que permite traçado simultâneo da curva de resistência conforme execução do ensaio. Tomou-se como critério de parada do ensaio a queda de dez por cento da tensão máxima suportada pelo corpo de prova. A Figura 33-b mostra os corpos de prova após execução do ensaio. Determinou-se as umidades de todos os corpos de prova utilizados no ensaio de RCS no momento pós ruptura.

Figura 33 – (a) Prensa utilizada para RCS e (b) corpo de prova após execução do ensaio.



(a)

(b)

A resistência à compressão simples, expressa em MPa, foi calculada individualmente para cada corpo de prova, segundo a Equação 6 .

$$RCS = \frac{C}{A} \times 0,1 \text{ (MPa)} \quad (6)$$

Onde:

RCS: Resistência à compressão simples, em MPa;

C: Carga de ruptura, em KN;

A: Área da seção transversal do corpo de prova.

3.2.4.4 Obtenção do Intercepto Coesivo e do Ângulo de Atrito por meio dos Resultados de RCS e RTCD

Quando se deseja conhecer o comportamento quanto à ruptura de um material, o critério de Mohr Coulomb oferece uma forma fácil de trabalhar e útil para manipulação em situações práticas. Segundo Goodman (1989) o critério de ruptura pode ser determinado ajustando-se uma envoltória empírica para uma série de círculos de Mohr Coulomb representando tensões principais nas condições de pico dos ensaios em laboratório.

Segundo Goodman (1989) no ensaio de resistência à compressão diametral, além de surgir a tensão de tração horizontal (σ_x) também existem, no plano vertical, tensões de compressão (σ_y). Desse modo, a real causa da ruptura deve refletir a ação da tensão vertical de compressão combinada à tensão horizontal de tração. Segundo a teoria de ruptura de *Griffith*, o ponto crítico deve ser o centro da amostra onde a relação entre a tensão de compressão e de tração é igual a 3. Com uma razão de tensão principal de 3, a ruptura deve resultar da aplicação apenas da tensão de tração, sem qualquer interferência da compressão para a ruptura eventual do plano. A tensão de tração por compressão diametral e a tensão de compressão num dado ponto do diâmetro vertical do cilindro são calculadas pelas Equações (7) e (8).

Tensão de tração no centro da amostra:

$$\sigma_x = \frac{2xF}{\pi x D x H} \quad (7)$$

Tensão de compressão em um ponto qualquer do diâmetro vertical:

$$\sigma_y = \frac{6xF}{\pi x D x H} \quad (8)$$

Onde:

RT: Resistência à tração por compressão diametral, em MPa;

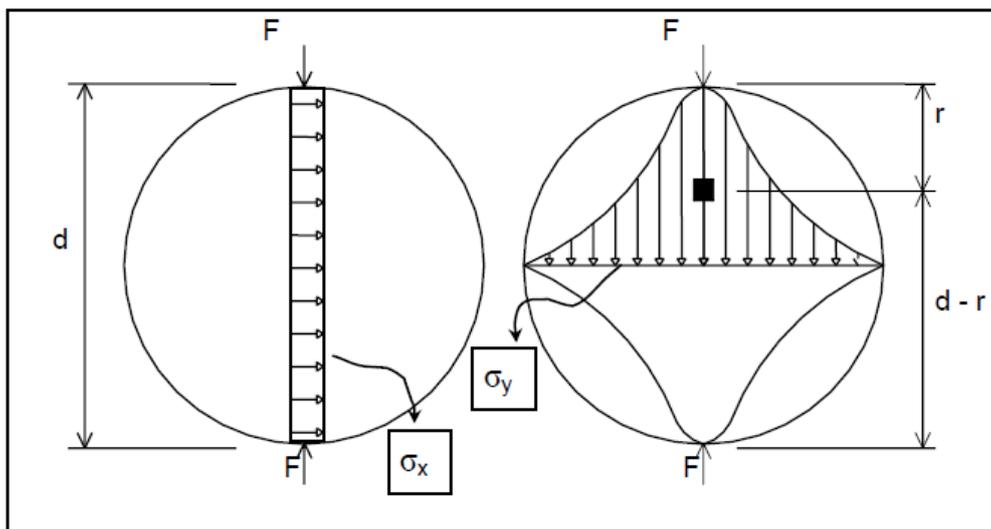
C: Carga de ruptura, em N;

D: diâmetro de corpo de prova, em cm;

H: altura do corpo de prova, em cm.

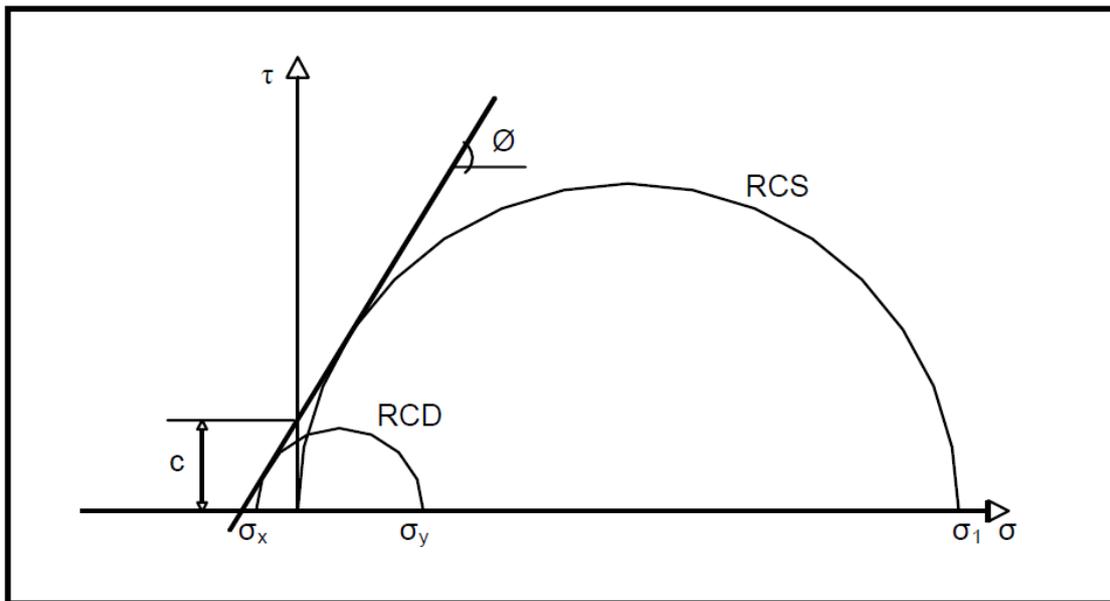
A Figura 34 apresenta um esquema de distribuições de tensões de um corpo de prova cilíndrico submetido ao ensaio de compressão diametral.

Figura 34 – Esquema de distribuição de tensões no ensaio de compressão diametral (LEANDRO, 2005).



Além dos ensaios tradicionais de cisalhamento e triaxial pode-se traçar os círculos de Mohr por meio dos resultados do ensaio de resistência à compressão diametral (σ_x e σ_y) e do ensaio de resistência à compressão simples (σ_1). Em seguida, traça-se uma reta tangente a esses dois círculos, sendo que, o intercepto coesivo é dado pela altura do eixo das abscissas até o ponto onde essa reta intercepta o eixo das ordenadas. O ângulo de atrito é a inclinação dessa reta, porém, esse parâmetro deve ser analisado com cuidado devido ao fato de que a envoltória real de ruptura é curva. A Figura 35 ilustra como traçar as envoltórias de rupturas por meio dos ensaios de compressão diametral e de compressão simples.

Figura 35 – Esquema do traçado dos círculos de Mohr Coulomb a partir dos resultados dos ensaios de compressão simples e compressão diametral para determinação do intercepto coesivo (c) e do ângulo de atrito (ϕ) (LEANDRO, 2005).



Nesta pesquisa a determinação dos parâmetros do intercepto coesivo (C) e do ângulo de atrito (ϕ), a partir dos resultados de resistência à tração por compressão diametral e de resistência à compressão simples, foram feitos por meio das Equações (9), (10) e (11).

$$Kp = \frac{RCS}{RT} - 3 \quad (9)$$

$$\text{Sen } \phi = \frac{Kp - 1}{Kp + 1} \quad (10)$$

$$C = \frac{RCS}{2\sqrt{KP}} \quad (11)$$

Onde:

RCS = Resistencia a compressão simples

RT = Resistencia a compressão diametral

Kp = Constante

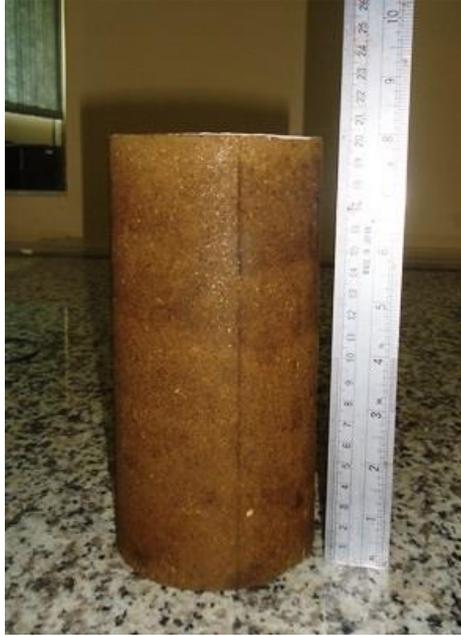
C = Intercepto coesivo

ϕ = Ângulo de atrito

3.2.4.5 Ensaio de Módulo de Resiliência

Na realização do ensaio de módulo de resiliência foram moldados corpos de prova do solo, obedecendo aos parâmetros dos quatro tipos de compactação determinados no ensaio Proctor Intermediário. Este ensaio foi realizado apenas na energia intermediária devido esta ser a mais utilizada nas especificações de projeto da área de pavimentação no Brasil. Os corpos de prova foram moldados no cilindro tripartido, em cinco camadas com dimensões de aproximadamente 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura aplicando-se vinte golpes em cada camada com soquete grande (Figura 36).

Figura 36 – Corpo de prova utilizado no ensaio de MR.



Para a compactação Proctor mecânica, os corpos de prova foram moldados também no cilindro tripartido em treze camadas com dimensões de aproximadamente 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura. Devido à dificuldade da extração dos corpos de prova do cilindro utilizado na compactação mecânica, não foi possível a realização do ensaio de Módulo de resiliência nos corpos de prova moldados nas umidades Hót + 1% e Hót + 2%, pois estes, apesar do uso da vaselina sólida, quando extraídos apresentaram grande parte de solo aderido nas paredes do cilindro (Figura 37). Uma possível solução seria usar o plástico filme, para envolver o cilindro e uma película de óleo.

Figura 37 – Corpo de prova da compactação mecânica moldados em umidades superiores a Hótima.



Após moldados os corpos de prova, da mesma forma que os ensaios anteriores ficaram expostos às condições atmosféricas por 24 horas. A moldagem dos corpos de prova para o ensaio de MR a partir dos parâmetros ótimos obtidos no ensaio de compactação manual sem reuso com 24 horas de umidade foi conduzida de maneira análoga à referida compactação.

A primeira etapa do ensaio consistiu na fase de condicionamento onde aplica-se seiscentos pulsos de carregamento, sendo esses com 0,1 segundo de aplicação de carga e 0,9 segundos de descanso. A Tabela 10 mostra as tensões de confinamento e desvio, bem como a quantidade de pulsos aplicados para cada par de tensões. Segundo Lucena (2012) o objetivo dessa fase é eliminar as deformações permanentes que ocorrem após as primeiras aplicações da tensão-desvio, como também minimizar os efeitos decorrentes da história de tensões da amostra a ser ensaiada. A segunda etapa do ensaio consistiu em submeter os corpos de prova a dezoito estágios de carregamento, formado por aplicação de três valores de tensão-desvio para cada uma das tensões confinantes pré-determinadas (Tabela 11). A cada ciclo aplicado mede-se os deslocamentos verticais por meio de instrumentos do tipo LVDT (Linear Variable Differential

Transducers). A relação entre os deslocamentos e as tensões aplicadas permite o cálculo do módulo de resiliência para cada estágio de tensão.

Tabela 10 – Pares de tensões e número de ciclos utilizados na fase de condicionamento.

σ_3 (KPa)	σ_d (KPa)	Número de ciclos
20,7	20,7	100
68,9	68,9	100
102,9	309,0	100

Tabela 11 – Pares de tensões e número de ciclos utilizados na segunda fase do ensaio.

σ_3 (KPa)	σ_d (KPa)	Número de ciclos
20,7	20,7	100
	41,4	100
	62,1	100
34,5	34,5	100
	68,9	100
	102,9	100
50,4	50,4	100
	102,9	100
	155,2	100
68,9	68,9	100
	137,9	100
	206,8	100
102,9	102,9	100
	206,8	100
	309,9	100
137,9	137,9	100
	274,7	100
	412,0	100

A Figura 38 mostra etapas de preparação dos corpos de prova para execução do ensaio de módulo de resiliência onde primeiramente coloca-se o revestimento para distribuição dos esforços (38-a), em seguida faz-se a montagem do corpo de prova na prensa com os LVDTs (38-b e 38-c) e coloca-se a célula de condicionamento (38-d).

Figura 38 – Etapas do ensaio de módulo de resiliência.



(a)



(b)



(b)



(d)

4.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES

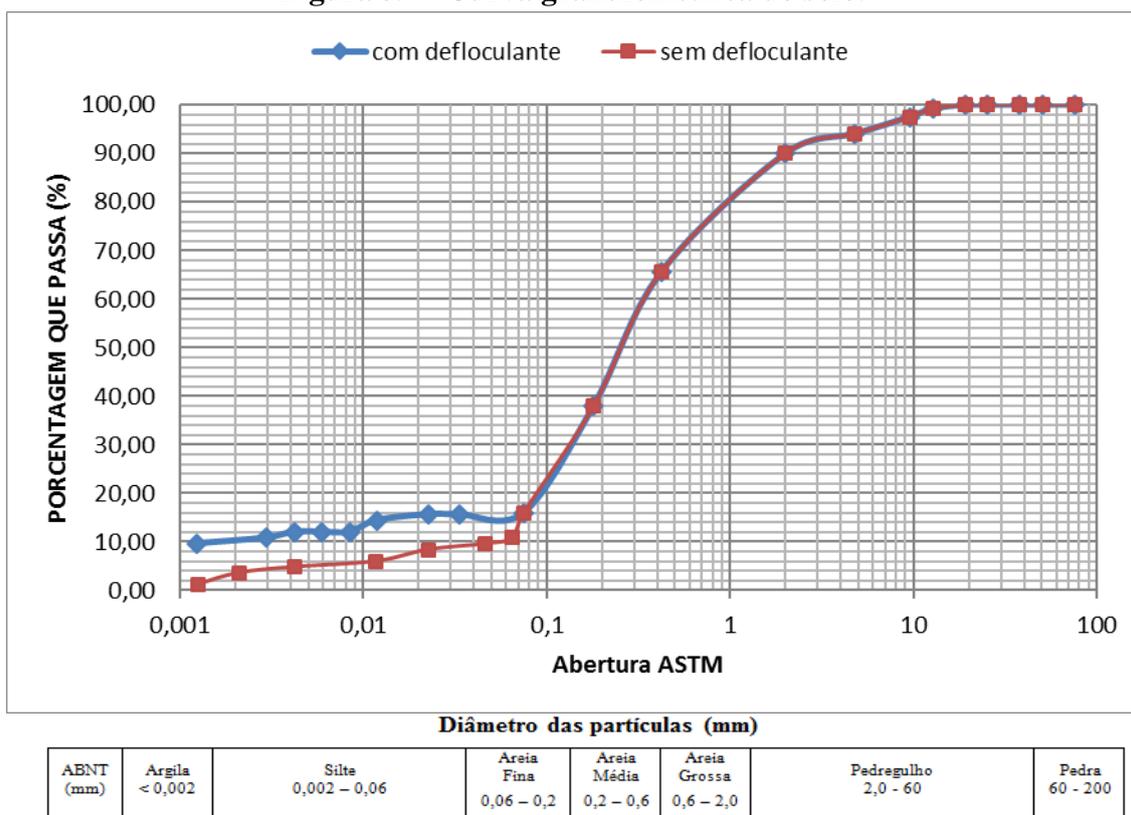
Neste capítulo estão apresentados e discutidos os resultados dos ensaios obtidos na fase experimental da pesquisa. Inicialmente serão apresentados os ensaios de caracterização física dos solos tais como: granulometria, massa específica real, limites de Atterberg - e os ensaios de caracterização de óxidos e mineralógica tais como: fluorescência de raios-x, difração de raios-x, pH e azul de metileno. Em seguida serão apresentados os resultados dos ensaios de compactação e estabelecimento das curvas características dos solos. Por fim estão apresentados os resultados dos ensaios mecânicos: índice de suporte Califórnia, resistência à tração por compressão diametral, resistência à compressão simples, resistência ao cisalhamento e módulo de resiliência.

4.1 Ensaio de Caracterização Física

4.1.1 Análise Granulométrica

A Figura 39 apresenta a curva de distribuição dos tamanhos das partículas do solo estudados com a etapa de sedimentação realizada com e sem defloculante.

Figura 39 – Curva granulométrica do solo.



A análise da Figura 39 revelou a predominância da fração areia em detrimento das frações silte e argila, apresentando, respectivamente, os seguintes percentuais 73,99%, 6,35% e 9,63%, considerando a curva com defloculante.

A adição do defloculante hexametáfosfato de sódio promoveu um aumento no percentual de argila, ou seja, ocorreu uma desagregação do solo. A diferença de cerca de 10% entre os tamanhos das partículas, com e sem defloculante, ocorre devido às partículas de argila presentes no ensaio sem defloculante encontrarem-se no solo em estado natural, agregadas formando grãos de silte. Portanto, conclui-se que o ensaio de granulometria com defloculante leva a resultados que não refletem o comportamento real do solo natural, mas ele pode ajudar a revelar o grau de agregação do solo.

A Tabela 12 apresenta o Coeficiente de Uniformidade (Cu) e o Coeficiente de Curvatura (Cc), para o solo estudado, considerando as curvas granulométricas com defloculante e sem defloculante.

Tabela 12 – Coeficientes de uniformidade e curvatura para o solo estudado.

Nomenclatura	Cu	Cc
Solo com defloculante	165	31,8
Solo sem defloculante	5,08	0,98

Os solos que apresentam $Cu < 5$ são denominados uniformes e com $Cu > 15$ desuniformes. Valores intermediários são denominados medianamente uniformes. Com relação ao coeficiente de curvatura, para um solo bem graduado, o valor de Cc deverá estar entre 1 e 3. Portanto, verificou-se coeficientes diferentes para o solo estudado, quando foram comparados os coeficientes de uniformidade e de curvatura obtidos por meio das curvas granulométricas com e sem defloculante. Para o ensaio realizado com o uso do defloculante, o solo é considerado mal graduado e desuniforme, e para o ensaio realizado sem defloculante, o solo é considerado medianamente uniforme e bem graduado.

Nos solos mal graduados há a predominância de partículas com um certo diâmetro, enquanto que, nos bem graduados existem grãos ao longo de uma faixa de diâmetros bem mais extensa, que conferem ao solo, melhor comportamento sob o ponto de vista da engenharia. Pois as partículas menores ocupam os vazios correspondentes as maiores, criando um entrosamento, conferindo ao solo maior resistência e menor compressibilidade. A escolha desses coeficientes irão depender da finalidade a que se destina, os coeficientes obtidos por meio da curva sem defloculante (bem graduado), por exemplo, são recomendados para o uso em barragens, em contrapartida os obtidos por meio da curva com defloculante (mal graduado) são recomendados para o uso na pavimentação.

4.1.2 Determinação das Propriedades Físicas

Na Tabela 13 estão apresentados os valores obtidos de limite de liquidez e plasticidade, bem como a massa específica real do solo estudado.

Tabela 13 – Limites de Atterberg e massa específica real do solo.

Massa Específica (g/cm³)	Limite de Liquidez (%)	Limite de Plasticidade (%)	Índice de Plasticidade (%)
2,72	22,35%	NP	NP

Segundo Jacintho *et al.* (2012) os resultados de massa específicas real dos grãos obtidas para solos tropicais variam bastante de local pra local. De acordo com a autora, estes dependem da mineralogia, a qual é função do tipo de rocha e da intemperização por ela sofrida ao longo do tempo. Segundo Kiehl (1979) *apud* Jacintho (2005) em regiões de clima tropical, são frequentes os solos com densidade real dos grãos próxima de 3,0 g/cm³. Logo, o valor encontrado na presente pesquisa (2,72 g/cm³) está condizente com os valores encontrados na literatura.

A partir dos resultados da análise granulométrica e dos limites de Atterberg foi possível realizar a classificação do solo. Este foi classificado segundo a metodologia HRB (Highway Research Board) como areia fina com silte não plástico (A-2-4) e pela metodologia SUCS (Sistema Unificado de Classificação de Solos) como areia siltosa (SM).

4.2 Ensaios de Caracterização Química e Mineralógica

4.2.1 Fluorescência de Raios-X (EDX)

A Tabela 14 apresenta a composição de óxidos do solo. Analisando-se os resultados pode-se observar que o solo é constituído por sílica (62%), óxido de alumínio

(18,39%), óxido de Ferro (7,7%) e baixos teores de CaO, K₂O, MgO e TiO₂. A baixa perda ao fogo mostra que o solo possui pouca quantidade de matéria orgânica. De acordo com Jacintho et al. (2012) óxidos e hidróxidos de Ferro e Alumínio são frequentemente encontrados, como minerais secundários, em solos que sofreram algum grau de intemperização. Os autores citam publicação de Nogami e Villibor (1995) que explicam que apesar destes compostos apresentarem elevadas superfícies específicas e diminutas dimensões, estes são pouco plásticos e possuem capacidade de troca catiônica desprezível. Portanto, apesar da pouca quantidade destes óxidos (26%), a presença destes pode ter contribuído para a não plasticidade do solo.

Tabela 14 – Composição química dos solos.

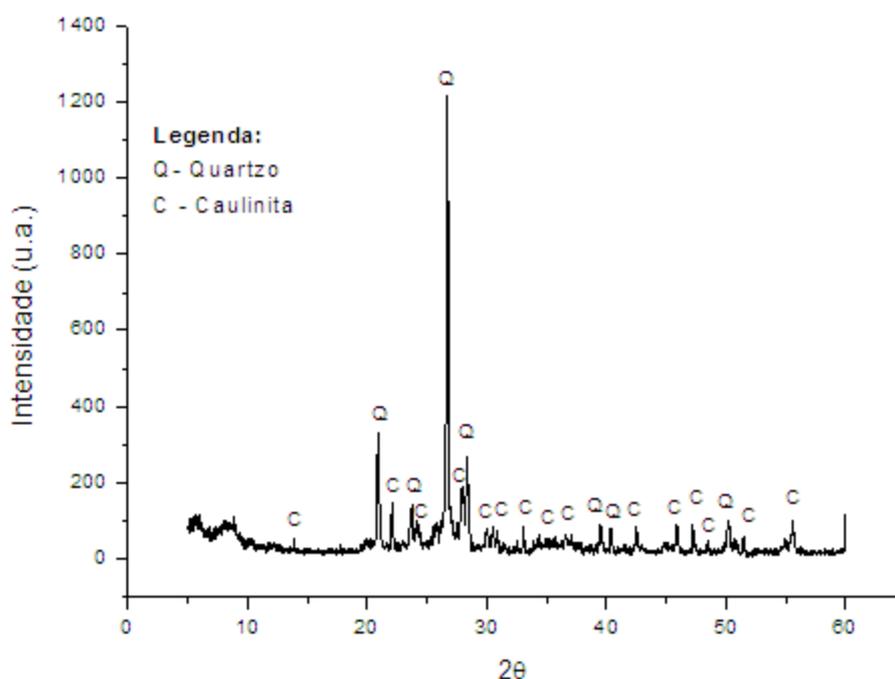
Amostra do Solo	PF (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	K ₂ O (%)	MgO (%)	TiO ₂ (%)	Outros (%)
	0,26	61,72	18,39	7,70	3,87	3,12	2,87	1,10	0,98

PF - Perda ao Fogo

4.2.2 Difração de Raios-X (DRX)

O difratograma de raios-X do solo está apresentado na Figura 40. Conforme esperado, verifica-se que o quartzo é o mineral primário mais importante e forma, praticamente, a quase totalidade da fração areia dos solos estudados, uma vez que não são encontrados outros minerais típicos desta fração como feldspatos e carbonatos. A presença do quartzo é justificada por este mineral ser de difícil intemperização. Verifica-se quantidades discretas de caulinita, o que corrobora para a baixa plasticidade apresentada no solo estudado e por este ser formado predominantemente pelas frações silte e areia.

Figura 40 – Difratoograma de raios-X do solo em estudo.



4.2.3 PH e Capacidade de Troca Catiônica (CTC)

A Tabela 15 apresenta os valores de CTC, do pH em água, do pH em KCl, do ΔpH ($\Delta\text{pH} = \text{pH KCl} - \text{pH H}_2\text{O}$) obtidos para o solo em estudo.

Tabela 15 – pH em água e pH em KCl do solo em estudo.

pH em água	pH em KCl	ΔpH	CTC (meq/100g de solo)
6,87	6,92	0,05	8,40

A CTC é a capacidade de partículas sólidas trocarem íons positivamente carregados com uma solução presente no solo, esta caracteriza então a capacidade de adsorção do mineral presente em um sólido por compostos inorgânicos. Os principais sólidos adsorventes são os argilominerais, os óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio e a matéria orgânica. A CTC depende do pH e da quantidade de cargas negativas presentes e é expressa em miliequivalentes por 100 gramas ou 100 ml de material.

Uma análise conjunta dos resultados revela que as amostras dos solos apresentam CTC de 8,4 meq/100g de solo, indicando que este solo possui alto índice de troca de cátions quando comparado com solos laterizados.

Segundo Kiehl (1979) *apud* Jacintho (2005) a CTC está relacionada à percentagem de argila dos solos. Os minerais de argila, principais constituintes da fração argila do solo, são os colóides inorgânicos responsáveis pela adsorção de cátions. Portanto, para maiores porcentagens da fração argila, maiores teores de minerais de argila e maiores CTC, diferentemente dos solos arenosos que apresentam baixo teor de matéria orgânica, poucas cargas negativas e retém menos cátions, ou seja, tem uma baixa CTC. Logo o valor encontrado para a capacidade de troca catiônica está condizente com a literatura, já que o solo em estudo é um A-2-4 (areia fina com silte não plástico).

O potencial hidrogeniônico (pH) dos solos é de grande importância na estabilização de solos, pois este fator influencia na agregação das partículas e conseqüentemente na sua estabilidade. Segundo Costa (1973) *apud* Jacintho (2005) o pH da maioria dos solos varia de 4,0 a 8,5, sendo a principal causa de acidez do solo a perda de bases arrastadas por águas de infiltração. A Tabela 16 apresenta a classificação do solo quanto ao pH.

Tabela 16 – Classificação dos solos segundo o potencial hidrogeniônico (Bigarella *et al.* 1996, *apud* Pessoa 2004).

Classificação	Ácido	Moderadamente ácido	Praticamente neutro	Neutro	Alcalino
pH	pH < 5,5	5,5 < pH < 6,4	6,5 < pH < 6,9	pH = 7,0	pH > 7,0

Com os valores de pH em água e em KCl é possível a determinação do ΔpH ($\Delta\text{pH} = \text{pH KCl} - \text{pH H}_2\text{O}$). Segundo Kiehl (1979) *apud* Jacintho (2005) um valor de ΔpH negativo indica que ocorre na amostra predominância de argilas silicatadas e a quantidade de alumínio trocável é elevada, enquanto um ΔpH positivo está relacionado com predomínio de óxidos de ferro e alumínio e conseqüentemente baixa quantidade de alumínio trocável. Verifica-se assim que de acordo com a Tabela 16 os valores encontrados dos pHs do solo utilizado na pesquisa são praticamente neutros e quanto ao

Δ pH constatou-se que este foi positivo, mas pouco significativo, pois o valor encontrado foi muito pequeno, caracterizando assim um solo que sofreu pouca intemperização, ou seja, um solo com pouca acidez.

De acordo com Jacintho *et al.* (2012) solos classificados como saprolíticos apresentam pH próximo do neutro e elevada capacidade de troca catiônica em relação aos solos laterizados. Diante dos resultados encontrados anteriormente (granulometria, plasticidade, minerais primários e secundários) e com os resultados de pH e CTC pode-se classificar este solo como saprolíticos. Ou seja, solos residuais que preservam características da rocha - mãe.

4.3 Ensaio de Compactação Proctor

Os ensaios de compactação tiveram o objetivo de analisar e comparar as umidades ótimas e as massas específicas aparentes secas máximas obtidas nos quatro tipos de compactação utilizadas na pesquisa, nas três energias de compactação. As Figuras 41 a 44 apresentam o comportamento das curvas de compactação para os processos estudados.

Figura 41 – Curva de compactação: Proctor mecânico.

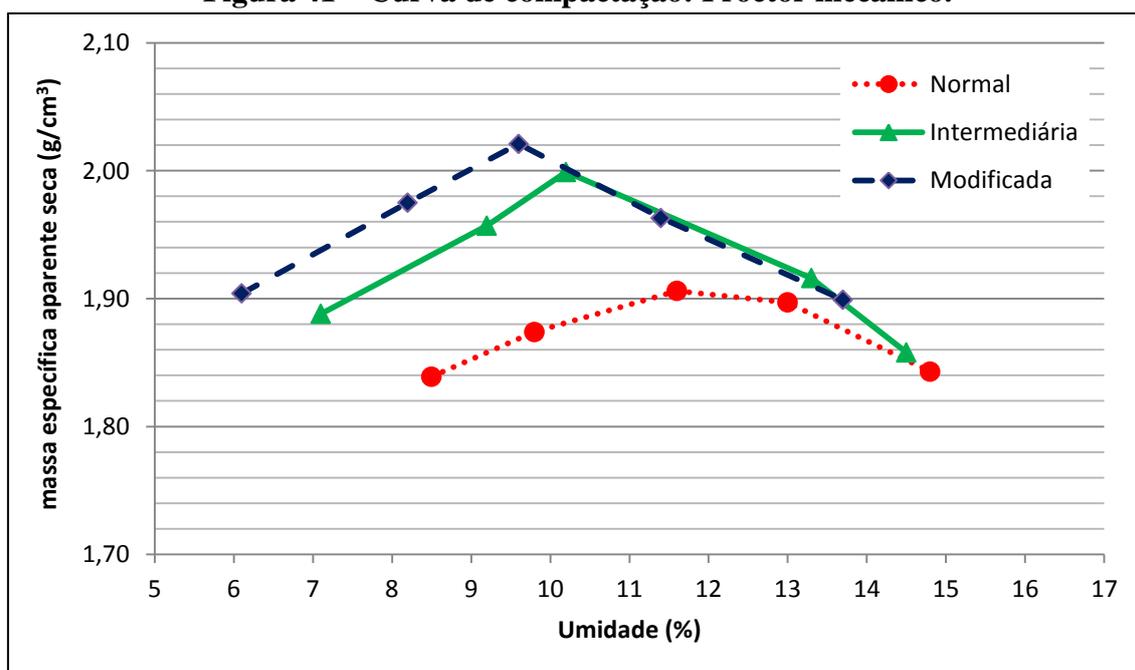


Figura 42 – Curva de compactação: Proctor manual com reuso.

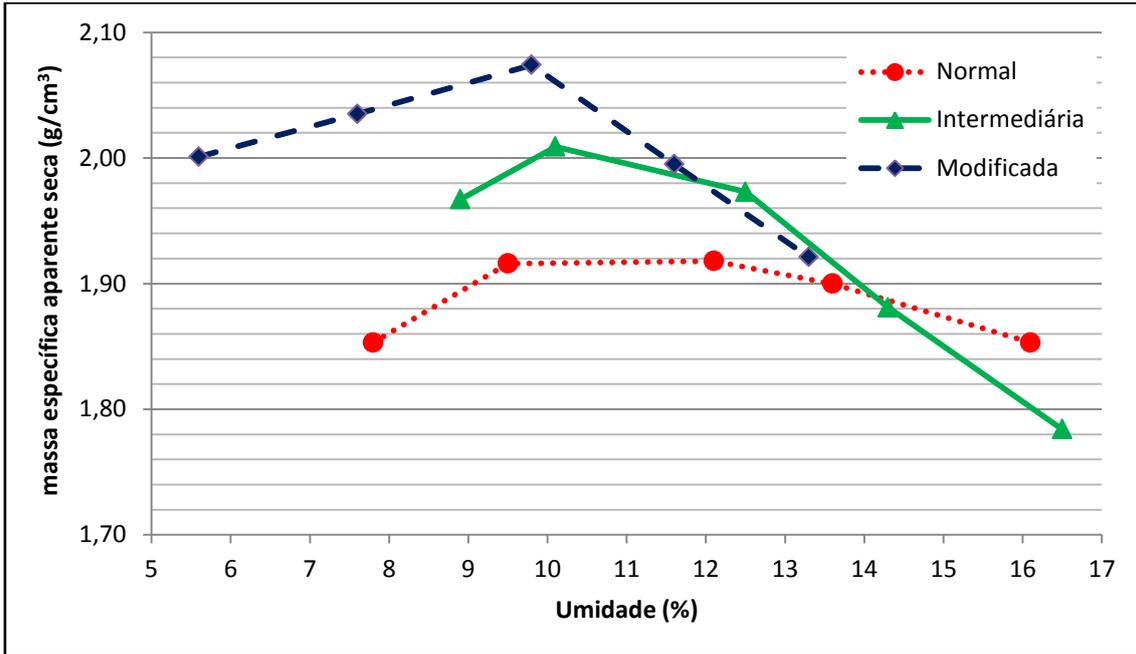


Figura 43 – Curva de compactação: Proctor manual sem reuso.

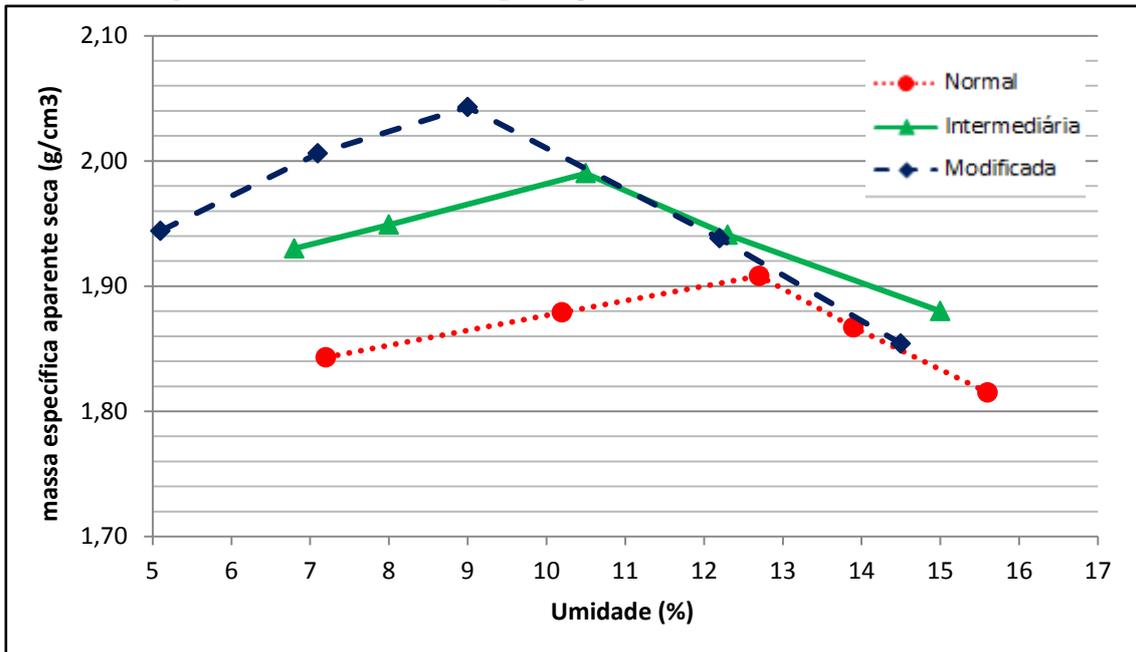
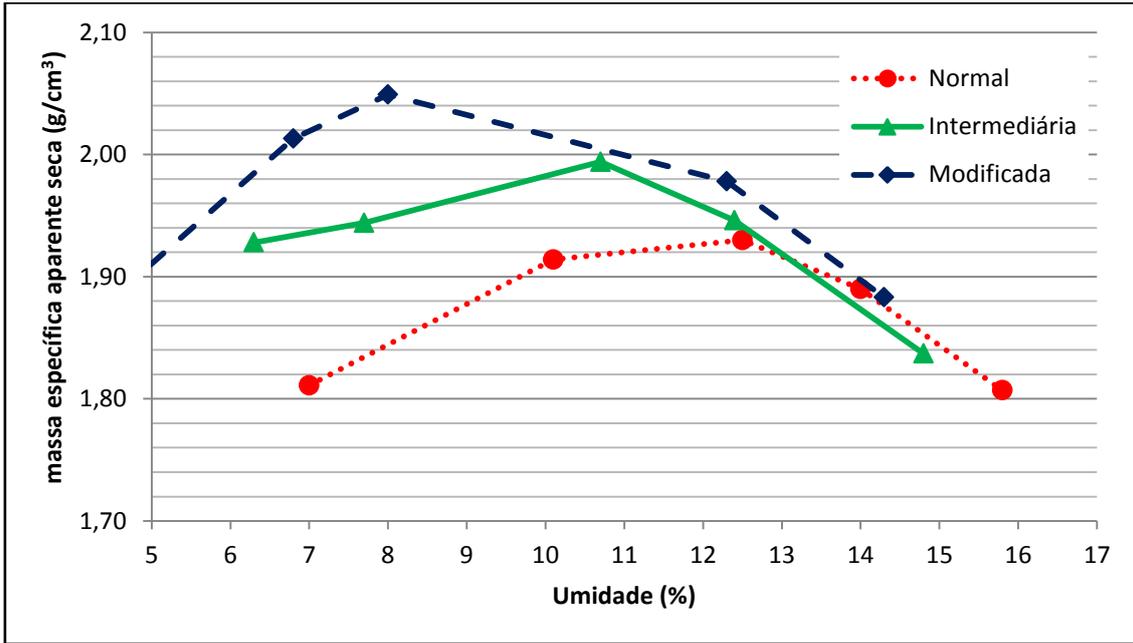


Figura 44 – Curva de compactação: Proctor manual sem reuso 24h.



As Figuras 45 a 47 apresentam o comportamento das curvas de compactação, compreendendo os quatro processos de compactação para cada energia utilizada, com a respectiva curva de saturação de 100%.

Figura 45 – Curvas de compactação dos quatro processos de compactação Proctor para a energia normal.

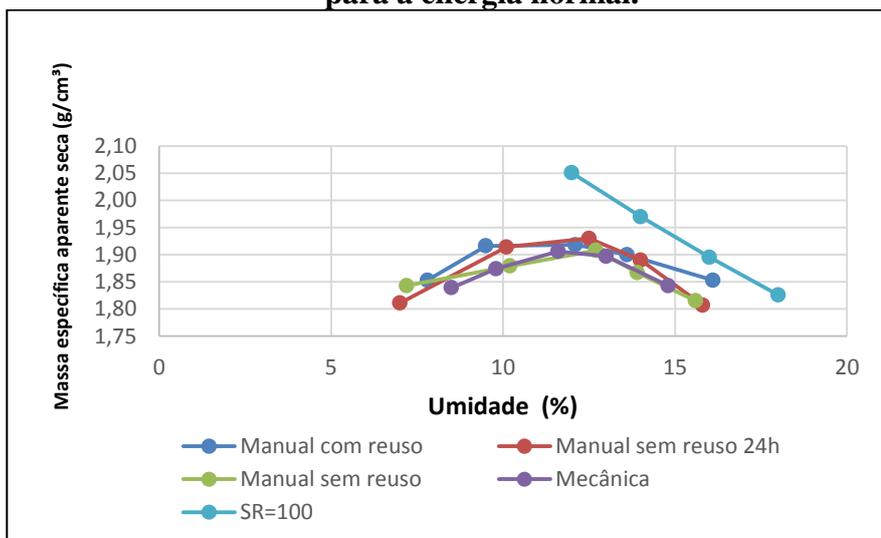


Figura 46 – Curvas de compactação dos quatro processos de compactação Proctor para a energia intermediária.

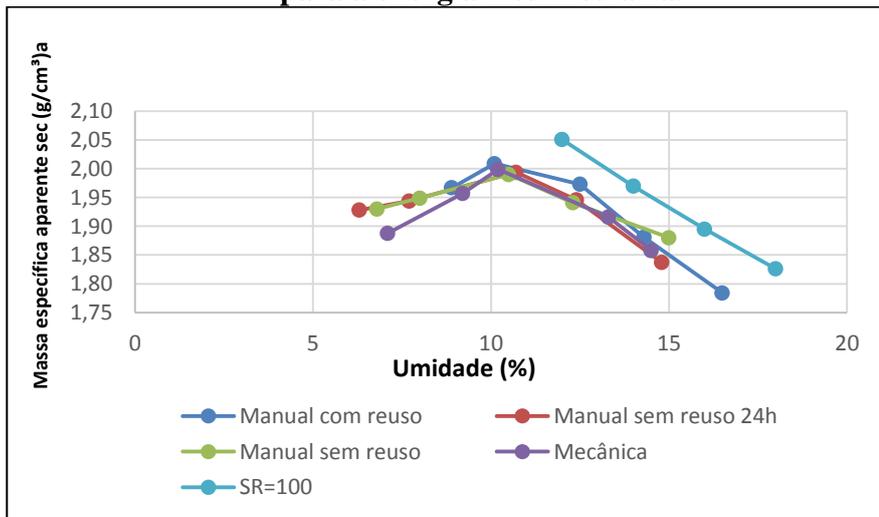
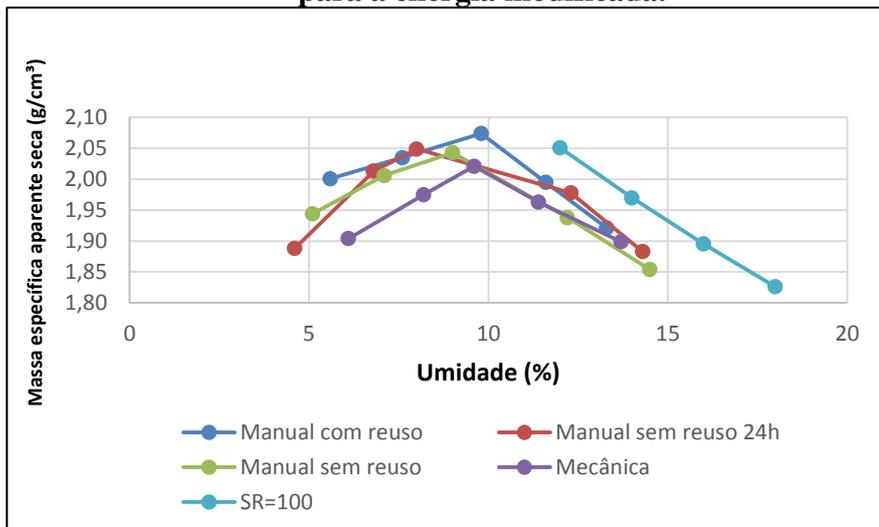


Figura 47 – Curvas de compactação dos quatro processos de compactação Proctor para a energia modificada.



A Tabela 17 apresenta os resultados dos parâmetros ótimos das quatro compactações utilizadas, obtidos por meio das curvas de compactação.

Tabela 17 – Resultados comparativos dos parâmetros ótimos das curvas de compactação.

		Normal	Intermediário	Modificado
Proctor mecânico	H _{ót} (%)	11,96	10,87	9,67
	Y _{S_{máx}} (g/cm ³)	1,907	1,999	2,021
Proctor manual c/ reuso	H _{ót} (%)	10,74	10,73	9,34
	Y _{S_{máx}} (g/cm ³)	1,926	2,015	2,078
Proctor manual s/ reuso	H _{ót} (%)	11,86	10,2	9,04
	Y _{S_{máx}} (g/cm ³)	1,920	1,991	2,043
Proctor manual s/ reuso 24 h	H _{ót} (%)	11,67	10,27	9,04
	Y _{S_{máx}} (g/cm ³)	1,935	1,997	2,058

Analisando-se as Figuras 41 a 44 e a Tabela 17, observam-se, para os quatro tipos de compactação Proctor utilizados, que o aumento da energia de compactação proporciona aumento nas massas específicas aparentes secas máximas e diminuição das umidades ótimas, comportamento de acordo com o referenciado na literatura (Adekalu *et al.*, 2007; Aguiar, 2010; García *et al.*, 2012). Pode-se observar que os valores de Y_{S_{máx}} dos ensaios de compactação obtidos pelo método Proctor Manual com Reuso foram, em sua maioria, superiores aos demais métodos.

Destaca-se que devido ao solo estudado tratar-se de um solo saprolítico, este é altamente sensível ao manuseio, ou seja, observa-se quebra das partículas com a energia aplicada durante o ensaio. Este fato vai ao encontro do relatado por Bourdeaux (1983) apud Jacintho *et al.* (2012) que cita que pode ocorrer o fracionamento textural deste solo devido as solicitações, aumento de umidade e ataque químico.

De acordo com Massad (2003) o reuso da mesma porção de solo na obtenção dos diversos pontos da curva de compactação pode provocar quebra de partículas, tornando o solo mais fino, e uniformizar melhor a umidade. Devido a este comportamento esperava-se que a compactação sem reuso do material apresentasse valores de massa específica superior às encontradas nos demais casos de compactação, mas observando as Figuras 45 a 47, verificou-se que de um modo geral esse comportamento não ocorreu para nenhuma das energias estudadas. Esse comportamento depende da estrutura formada pelo solo pelos diferentes processos de compactação

adotados. Verificou-se também que todas as curvas de compactação estão abaixo de 100% de saturação.

No entanto, foi observado que as massas específicas tiveram uma variação muito pequena em função do aumento da energia (Tabela 18). Essa observação foi relatada por Cernica (1995) que verificou que os acréscimos de massa específica raramente excedem 10%, quando se compara os resultados da energia modificada com a energia normal.

Tabela 18 – Variações de $\gamma_{s_{m\acute{a}x}}$ nos ensaios de compactação Proctor.

MUDANÇAS DE ENERGIA	VARIAÇÕES
Normal→Intermediária	3,0% – 4,6 %
Intermediária→Modificada	1,0% – 3,0%
Normal→Modificada	5,6% – 7,0%

A análise da Tabela 18 permite observar que o aumento de energia normal para intermediária conduz a um incremento de 3% a 4,6% na $\gamma_{s_{m\acute{a}x}}$ e na mudança de energia intermediária para modificada de 1,1% a 3%. Na mudança da energia normal para modificada o incremento foi de 5,6% a 7%, não excedendo 10% no acréscimo de $\gamma_{s_{m\acute{a}x}}$ conforme citado por Cernica (1995).

A Tabela 19 mostra a diferença em termos de porcentagem entre a umidade ótima obtida na compactação Proctor manual com reuso, com os valores mínimos e máximos das umidades ótimas obtidas nos demais métodos, para cada nível de energia de compactação. Em termos de umidade essa diferença foi de aproximadamente $\pm 1\%$. Verifica-se que quanto maior a energia aplicada, menor a diferença das umidades ótimas em porcentagem.

Tabela 19 – Variações de Hót obtida na compactação Proctor manual com reuso em relação às demais compactações para os três níveis de energia.

Diferenças das umidades ótimas em porcentagens		
NORMAL	INTERMEDIARIA	MODIFICADA
8,0% - 10,2%	1,3% - 5,0%	3,2% - 3,4 %

De acordo com Carvalho *et al.* (1987) solos no quais a fração areia predomina sobre a argila não são normalmente muito sensíveis à modificação da umidade na compactação. Ainda segundo os autores, no ramo seco da curva de compactação, à medida que se aumenta a umidade de compactação irá ocorrer o aumento da massa específica máxima até atingir a umidade ótima. Esse aumento ocorre por três motivos: maior lubrificação entre os grãos; diminuição da sucção / capilaridade atuando entre os grãos diminuindo a resistência do solo e facilitando a sua compactação; e com o aumento da umidade, ao diminuir a resistência do solo nos contatos entre os agregados, permite que maior energia chegue a contatos entre microagregados até então preservados, possibilitando sua quebra. A umidade ótima é atingida quando ocorre a oclusão da fase ar, momento em que parte da energia total aplicada passa a atuar na fase água gerando pressão neutra positiva e diminuindo a energia efetiva de compactação. A partir deste ponto, quanto maior a umidade, menor será a energia efetiva.

Os solos com estrutura floclada apresentam maior expansividade, maior condutividade hidráulica e maior resistência ao cisalhamento do que os solos de estrutura paralela dispersa (Martínez, 2003). Portanto, quando o solo é compactado abaixo da umidade ótima, este adquire um arranjo dos grãos semelhante ao das estruturas flocladas isso devido à predominância das forças de atração face-bordo em detrimento das forças de repulsão face-face ou bordo-bordo. No ramo úmido a estrutura é tanto mais dispersa quanto maior for a umidade e a energia de compactação (Vargas, 1977).

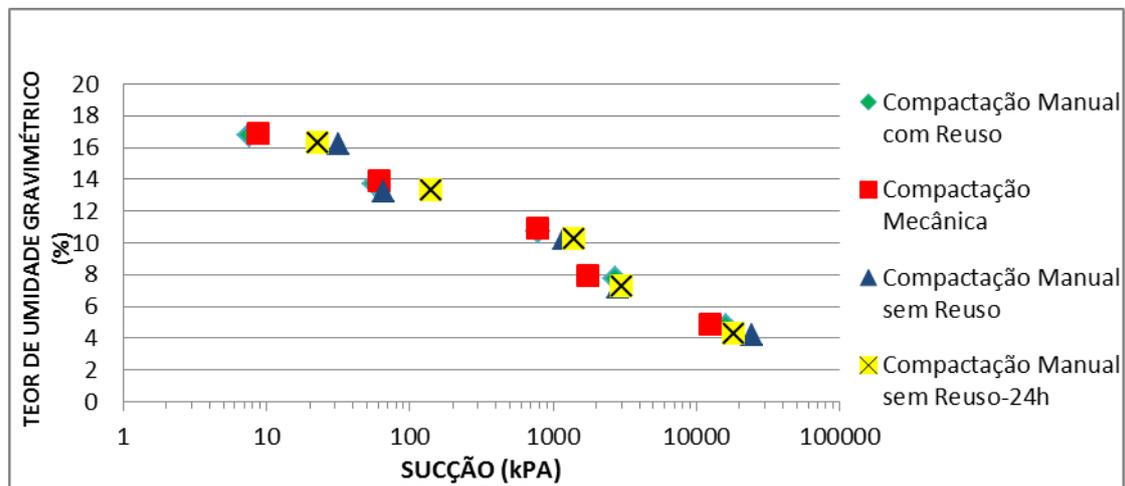
No intuito de estudar a influência da umidade no comportamento mecânico do solo, optou-se por realizar os ensaios mecânicos, nas condições de compactação e energia supracitadas, com variações de umidade ($\pm 2\%$). Estes tem o objetivo de

verificar o quão rigoroso deve ser o controle do teor de umidade durante a compactação em campo.

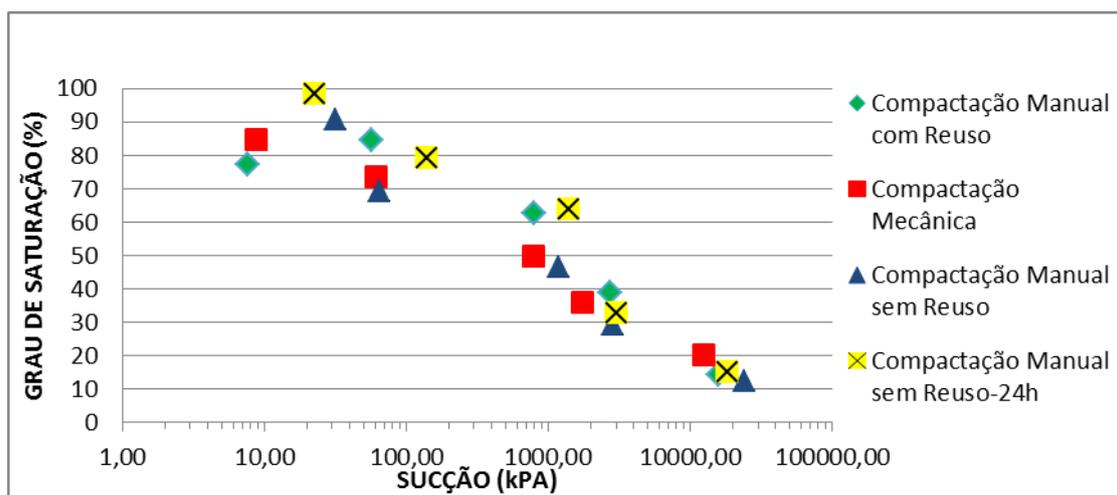
4.4 Curva Característica

As Figuras 48-a e 48-b ilustram as curvas características experimentais obtidas para cada método de compactação em função da umidade gravimétrica e do grau de saturação, respectivamente.

Figura 48 – Curvas características experimentais do solo: (a) Sucção matricial x teor de umidade gravimétrica e (b) Sucção matricial x grau de saturação.



(a)



(b)

Os pontos que estão formando as curvas características das Figuras 48-a e 48-b, não integram uma única curva característica, mas cinco, ou seja, cada ponto refere-se a uma curva característica distinta. Isto ocorreu devido a elas terem sido compactadas em umidade pré-determinadas ao invés de passar por ciclos de umedecimento e secagem. Nestas condições específicas são gerados índices de vazios, porosidades e estruturas distintas, portanto não foram definidas as curvas características do solo, apenas foram obtidos pontos de diferentes curvas características, pois para cada ponto há uma curva característica.

Segundo Camapum de Carvalho & Leroueil (2004) um solo ao ser solicitado tem o seu índice de vazios reduzido, mudando assim a curva característica. Isto devido a sucção ser função da umidade, mas também da porosidade e sendo assim, mantida a umidade muda-se a sucção ao se alterar o índice de vazios do solo. No entanto, para um índice de vazios específico tem-se uma curva característica única representativa do material, a não ser que outros fatores, como a distribuição de poros, intervenham. Sendo assim, a transformação da curva característica é realizada multiplicando-se a sucção (pF) pelo índice de vazios (e), este produto gera uma curva característica única, representativa de diferentes índices de vazios para a mesma distribuição de poros.

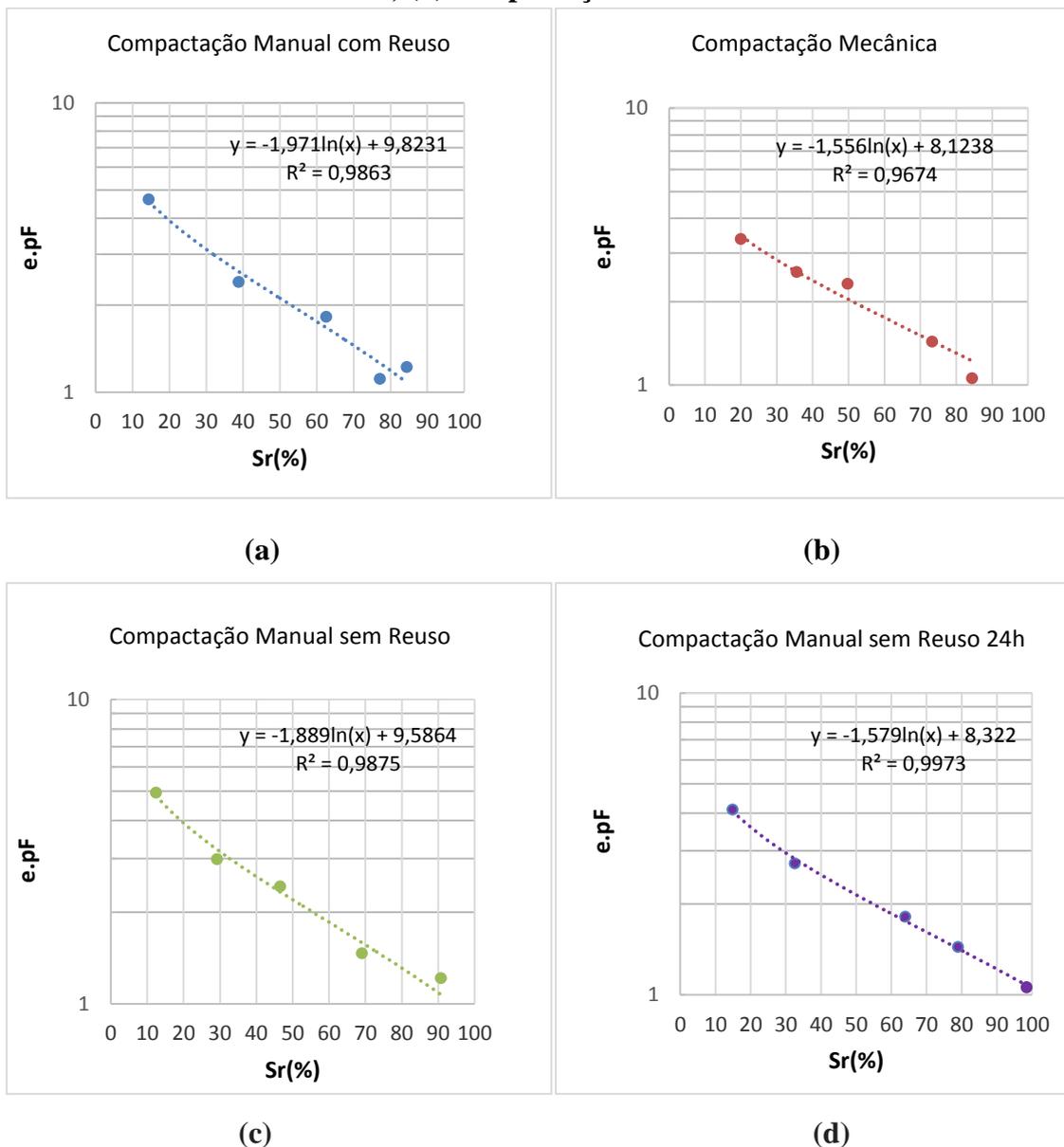
Desta forma, o modelo de transformação da curva característica de sucção, sugerido por Camapum de Carvalho & Leroueil (2004), mostra-se do ponto de vista prático, de grande relevância, tendo em vista que a partir de uma única curva característica de sucção é possível determinar a sucção do solo para índices de vazios diferentes, sem a necessidade de realização de medidas ou acompanhamentos das variações de sucção no solo para novas condições de índice de vazios. Ou seja, curvas de um mesmo material originalmente distintas, em função dos índices de vazios diferentes, assumiam uma única tendência. A técnica é particularmente útil na análise dos resultados de ensaios para estudo do comportamento mecânico realizados sobre solos não saturados sem controle de sucção.

O solo utilizado na pesquisa aparentemente não apresentou alteração significativa da distribuição de poros com a energia e umidade de compactação, pois considerando os resultados dos pontos lançados no gráfico $e.pF \times S_r$, estes aproximam-se em uma única tendência, permitindo assim recuperar as curvas características de cada ponto. Logo o uso da curva característica transformada ($e.pF$) permitiu, de modo

aproximado, chegar às curvas características do solo para diferentes índices de vazios e para os diferentes procedimentos de compactação utilizados.

A Figura 49 apresenta as curvas características transformadas individuais para os quatro processos de compactação Proctor utilizados, na energia intermediária, na função logarítmica. Verifica-se por meios das correlações que os coeficientes de determinação de ajuste estatístico R^2 foram satisfatórios, pois foram obtidos valores próximos de 100%.

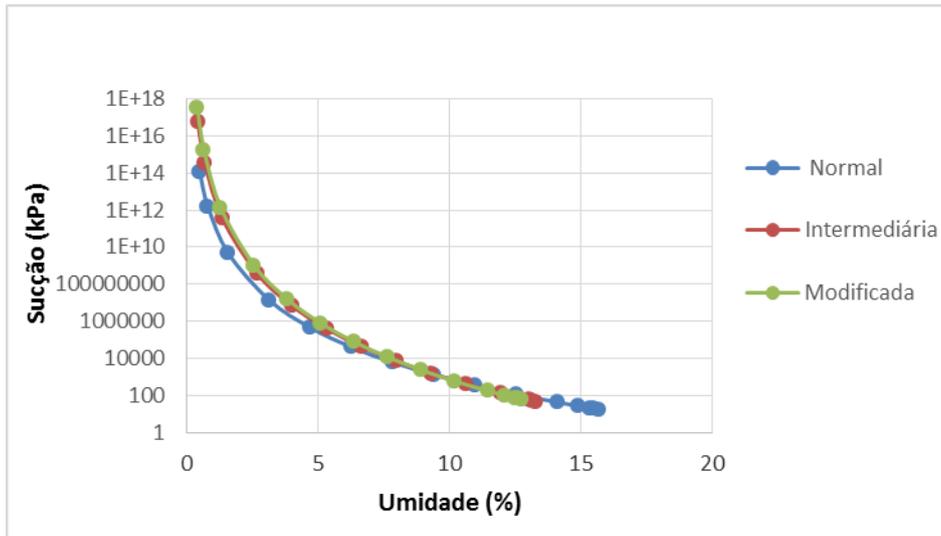
Figura 49 – Curvas características transformadas (e.pF), na energia intermediária: (a) Compactação manual com reuso; (b) Compactação mecânica; (c) Compactação manual sem reuso; (d) Compactação manual sem reuso 24h.



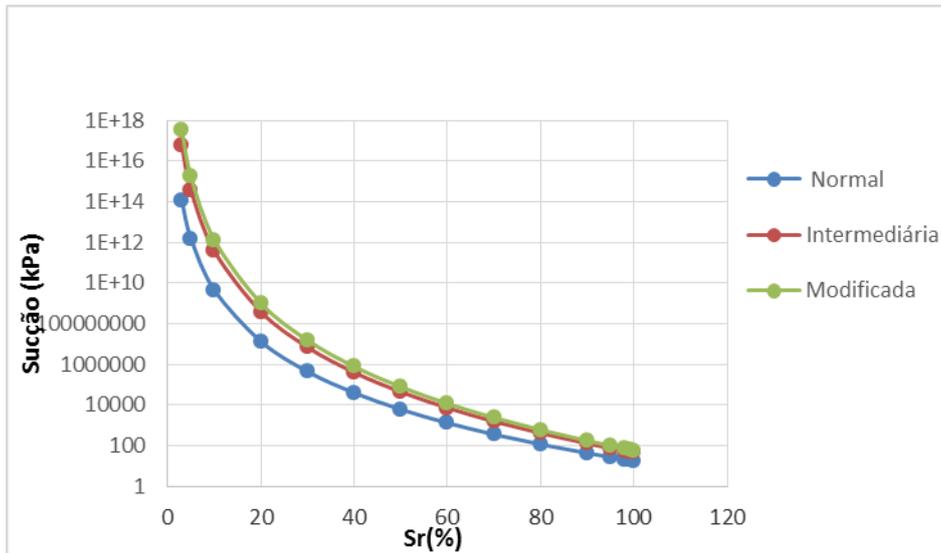
Da mesma forma que existem diferenças nas curvas característica geradas a partir dos diferentes processos de compactação Proctor, provavelmente também existirá entre as energias, devido a maior ou menor quebra de partículas. Embora não diferenças significativas na distribuição dos poros, a imposição de níveis de quebra ou mesmo materiais ligeiramente distintos entre os processos de compactação utilizados podem ter provocado diferenças nos resultados, dessa forma optou-se por trabalhar com as curvas individualizadas de $e.pF \times Sr$.

Portanto, a partir das interpolações logarítmicas obtidas para cada um dos processos de compactação, foram encontradas as curvas características próximas da real para cada porosidade dos cinco pontos utilizados anteriormente como se fosse os definidores das curvas características. Por meio da equação de $e.pF \times Sr$, do respectivo processo de compactação, variando-se o grau de saturação entre 3% e 98% e conhecendo-se o índice de vazios de cada energia de compactação correspondente a massa específica aparente seca máxima obtida em cada energia, foram obtidas as curvas características para cada um dos cinco pontos obtidos inicialmente para as energias normal, intermediária e modificada. Ressalta-se que as curvas para energia normal e modificada foram obtidas por extrapolação a partir das interpolações logarítmicas (Figura 50 a 53).

Figura 50 – Curvas características da compactação mecânica obtidas por meio de extrapolação: (a) Sucção x umidade e (b) Sucção x grau de saturação.

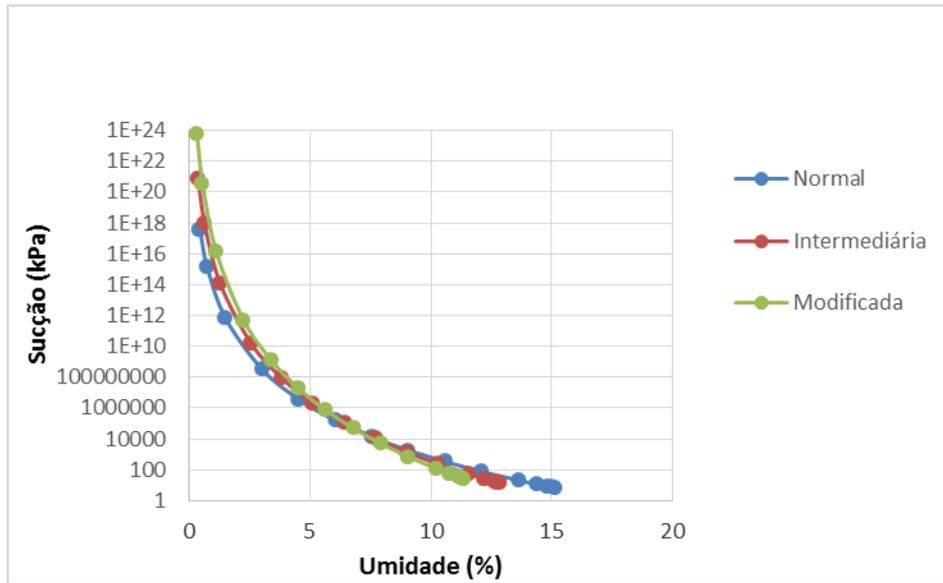


(a)

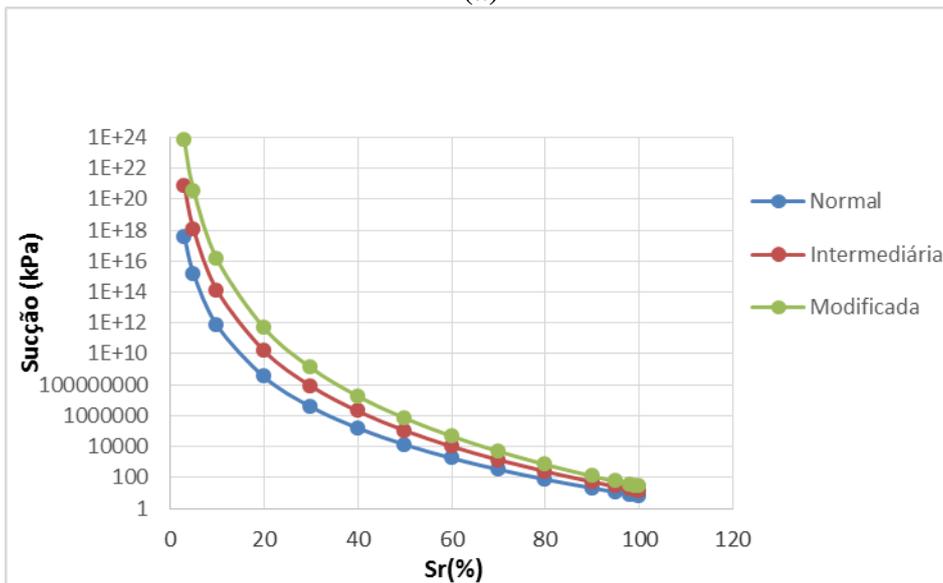


(b)

Figura 51 – Curvas características da compactação manual com reuso obtidas por meio de extrapolação: (a) Sucção x umidade e (b) Sucção x grau de saturação.

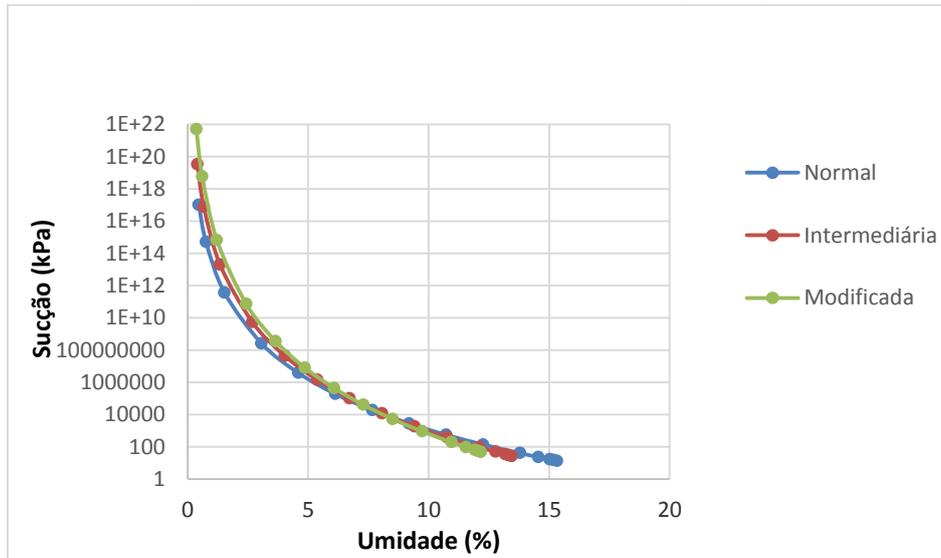


(a)

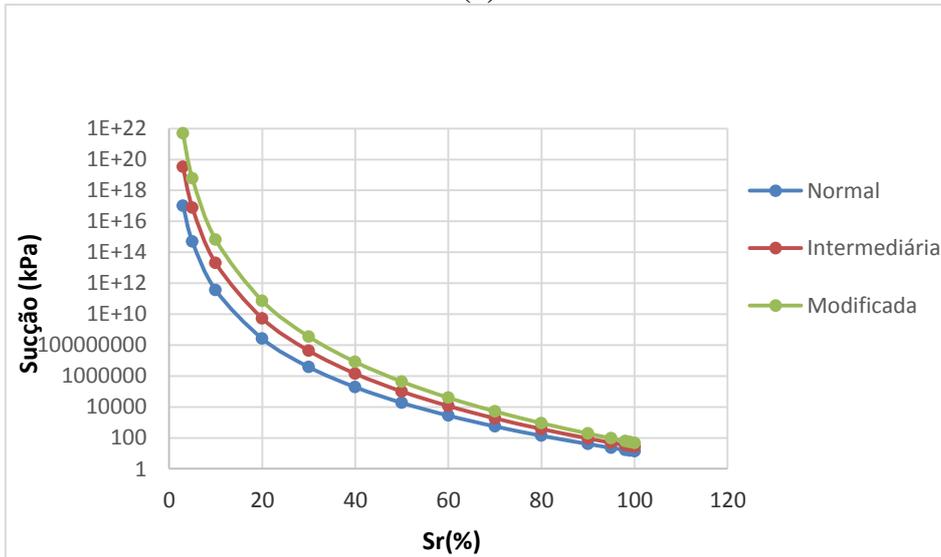


(b)

Figura 52 – Curvas características da compactação manual sem reuso obtidas por meio de extrapolação: (a) Sucção x umidade e (b) Sucção x grau de saturação.

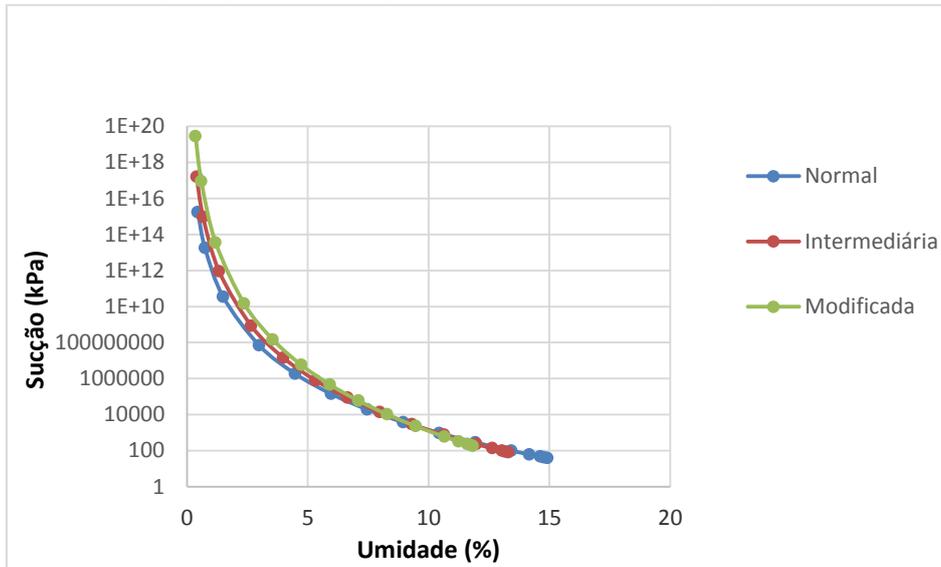


(a)

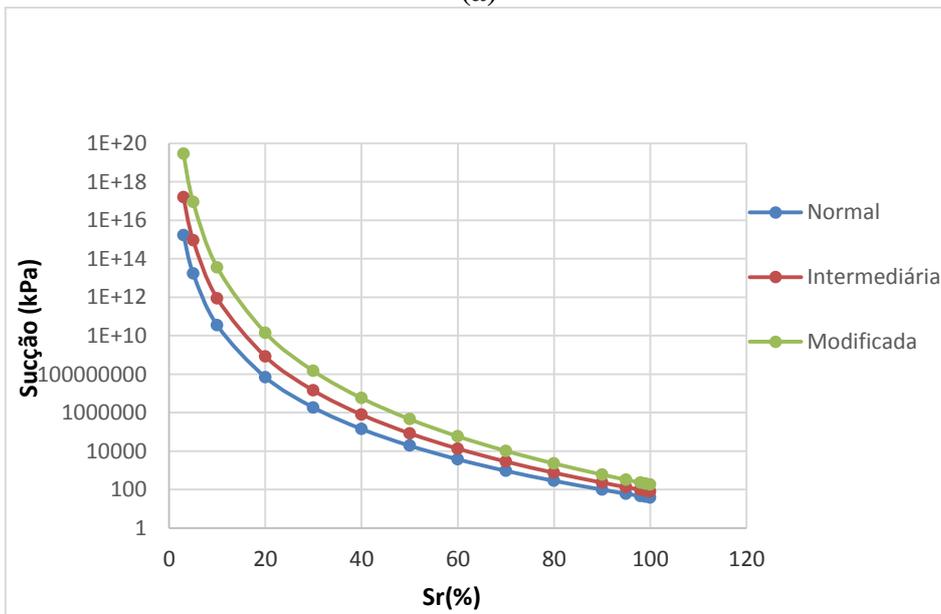


(b)

Figura 53 – Curvas características da compactação manual sem reuso 24h obtidas por meio de extrapolação: (a) Sucção x umidade e (b) Sucção x grau de saturação.



(a)



(b)

Analisando-se as Figuras 50 a 53 observa-se que as curvas características possuem um primeiro trecho onde se observa grande variação de sucção com pequena variação de umidade, seguida de um segundo trecho, onde ocorre pequena variação de sucção com elevada variação de umidade.

Segundo Camapum de Carvalho (2004) a interferência da estrutura da rocha mãe no solo depende do grau de intemperização. Nos solos pouco intemperizados (solos saprolíticos), a agregação é pequena, a estrutura é influenciada pela estrutura da rocha mãe e a distribuição de poros é relativamente homogênea (mono-modal). Portanto, as curvas obtidas nesta pesquisa estão condizentes com as obtidas na literatura para o solo estudado (saprolítico).

Observando as curvas características obtidas nas Figuras 50 a 53 percebe-se uma mesma tendência de comportamento das curvas características. Pode-se observar por meio das curvas que quanto menor o teor de umidade gravimétrico maior é a sucção no solo para ambas as compactações utilizadas. Observa-se também que com o aumento da energia de compactação houve um acréscimo nos valores de sucção. Segundo Vanapalli *et al* (1999), para solos compactados no ramo seco, a estrutura do solo é função do teor de umidade de compactação e impõe o valor de entrada de ar. Segundo o autor sob elevados valores de sucção (20000kPa a 1000000kPa), onde tem-se menores teores de umidade, as curvas características aparenta ser aproximadamente a mesma independente do tipo de compactação adotada. Isto indica que para altos intervalos de sucção a estrutura do solo não tem muita influência sobre o comportamento da curva característica.

Os ensaios de sucção pelo método do papel filtro foram realizados nas umidades ($H_{ót} \pm 6\%$). Mas, analisando os pontos de umidades ($H_{ót} - 1\%$ e $H_{ót} - 2\%$), que foram os pontos utilizados nos ensaios mecânicos e que obtiveram maior influência da sucção para os quatro tipos de compactação, observa-se que apesar das curvas tenderem a apresentar comportamentos similares, verifica-se de um modo geral maiores valores de sucção para as compactações sem reuso de material, este fato pode ser explicado devido à estrutura formada pelos diferentes tipos de compactação. A estrutura obtida na compactação manual sem reuso 24h foi um das que obteve maior influência nas referidas umidades, pois levou a maiores resultados de sucção. Provavelmente, a incorporação de água 24 horas antes da compactação promoveu uma maior uniformização da umidade, que promoveu mudanças na porosidade, distribuição dos grãos e estrutura do solo.

Os comportamentos das curvas características obtidos nessa pesquisa são de grande importância para justificar a influência da sucção no comportamento mecânico

do solo e verificar o quão rigoroso deve ser o controle o teor de umidade da compactação em campo. Essa constatação poderá ser verificada com a análise dos ensaios mecânicos nas condições de compactação e energia supracitadas, com variações de umidade ($\pm 2\%$).

4.5 Ensaios Mecânicos

4.5.1 Ensaio de Índice de Suporte Califórnia – ISC

Os resultados obtidos com os ensaios de ISC da amostra em estudo estão apresentados nas Figuras 54 a 57.

Figura 54 – ISC: Compactação mecânica.

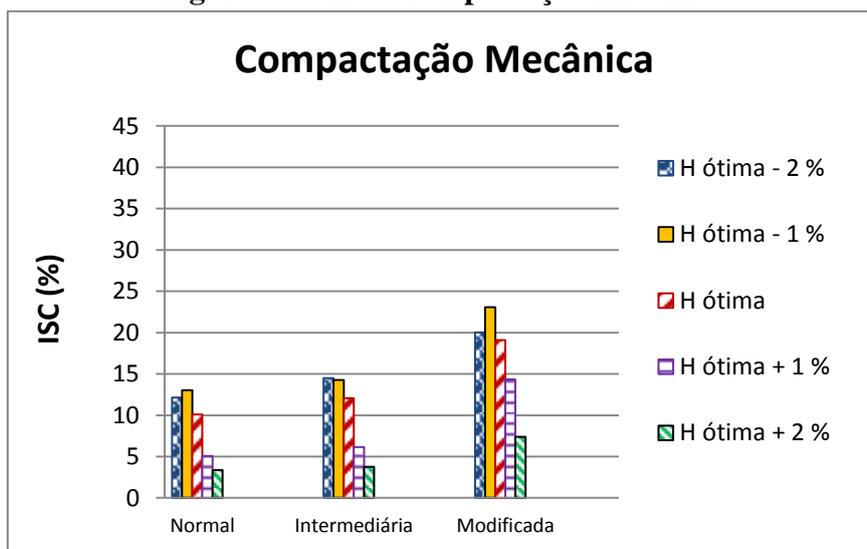


Figura 55 – ISC: Compactação manual com reuso.

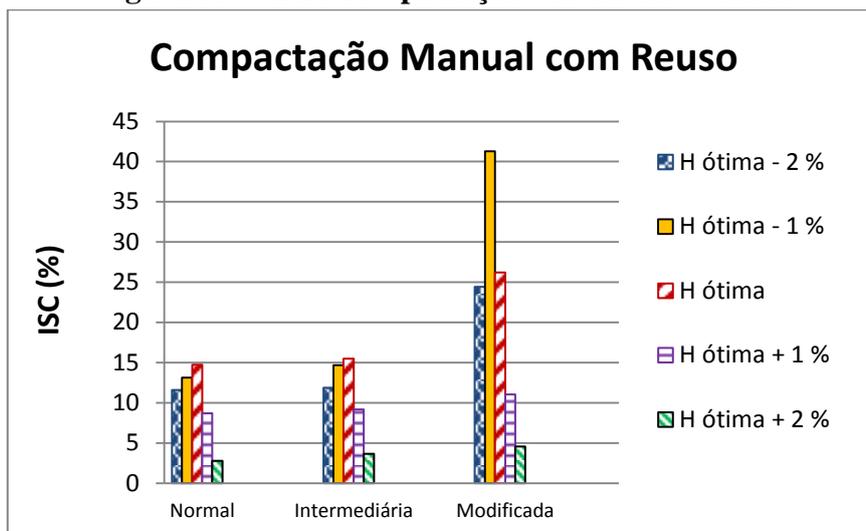


Figura 56 – ISC: Compactação manual sem reuso.

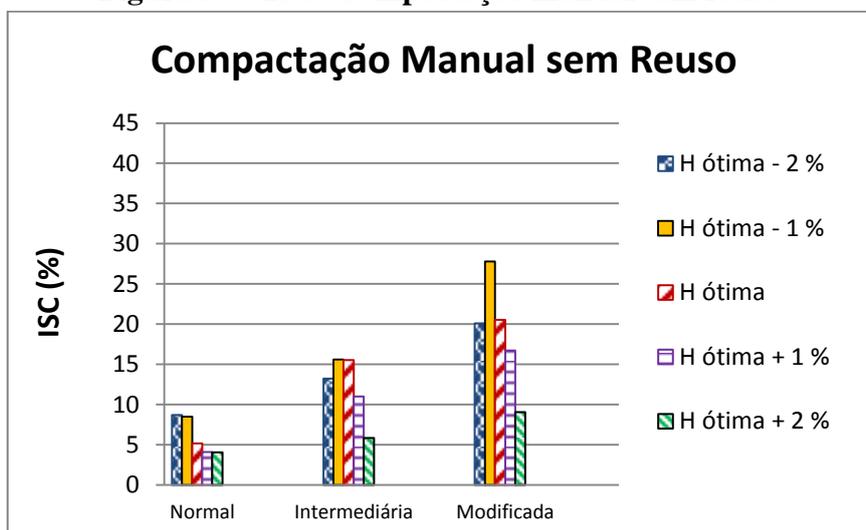
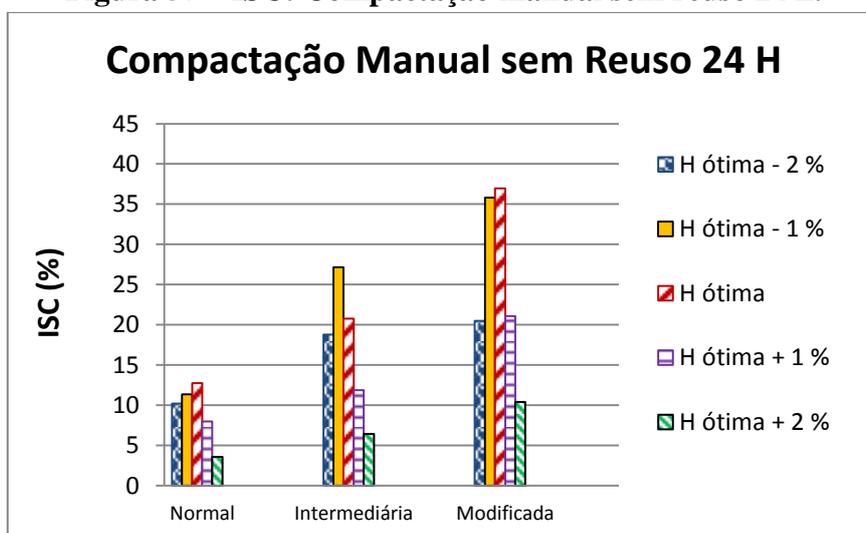


Figura 57 – ISC: Compactação manual sem reuso 24 h.



Pela análise dos resultados obtidos no ensaio de Índice de Suporte Califórnia, observa-se que quanto maior a energia de compactação aplicada, nos quatro tipos de compactação Proctor, para o solo em estudo, ocorre um aumento gradativo no valor de ISC. Ou seja, os maiores valores de ISC foram constatados na energia modificada.

Com relação ao tipo de compactação que ofereceu melhores resultados de ISC destacam-se de um modo geral a compactação manual com reuso nas energias normal e modificada, e a compactação manual sem reuso 24h na energia intermediária. Analisando esses resultados de ISC com os resultados de massa específica aparente seca máxima obtidos nos ensaios dos quatro tipos de compactações, verifica-se que o resultado de ISC para compactação manual com reuso na energia modificada está condizente com a massa específica seca máxima obtida na referida compactação, já que esta alcançou maior valor. Em relação aos demais valores de ISC, estes não condizem com os valores de massa específica, visto que para energia normal a maior massa específica obtida foi para compactação manual sem reuso 24h diferentemente de ISC que obteve maior valor na compactação manual com reuso. Na energia intermediária aconteceu o oposto, o maior valor encontrado para o ISC foi para compactação manual sem reuso 24h e o maior valor de massa específica foi obtido na compactação manual com reuso.

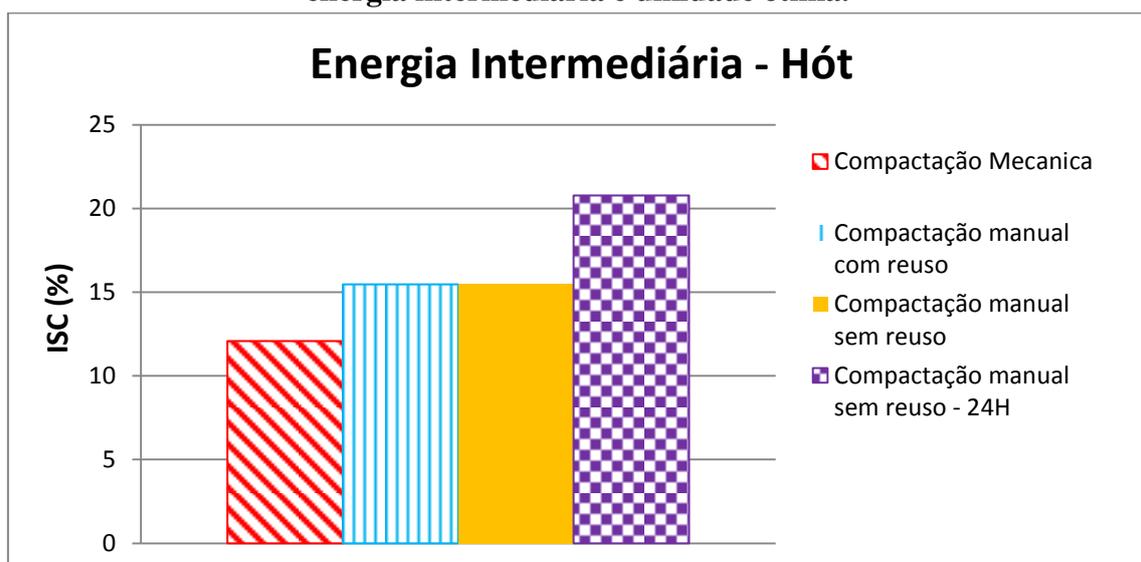
Verificou-se nesta pesquisa que, para as compactações Mecânica e Manual sem reuso, os maiores valores de ISC nos três níveis de energia foram encontrados para as umidades $H_{ót} - 2\%$ e $H_{ót} - 1\%$. Em relação à compactação manual com reuso os valores de ISC para as energias normal e intermediária foram superiores para a umidade ótima, já para a energia modificada a umidade $H_{ót} - 1\%$ alcançou maior valor de ISC. Na compactação manual sem reuso 24 h, para as energias normal e modificada os valores de ISC foram maiores para a umidade ótima, já para energia intermediária a umidade $H_{ót} - 1\%$ obteve maior valor de ISC. Constatou-se que as maiores resistências foram obtidas para os corpos de prova moldados nas umidades inferiores à ótima em 67% dos casos. Apesar dos corpos de prova ficarem imersos no ensaio de ISC, a sucção pode ter influenciado nesses resultados devido a forma de imersão, pois os corpos de prova foram colocados no tanque totalmente cheio, onde o correto seria enchê-lo gradativamente, isso pode não ter provocado a saturação completa e conseqüentemente ocasionar ar ocluso no corpo de prova. Outro motivo estaria no fato de que apenas a

parte superior do corpo de prova ficou em contato direto com a água, não ocorrendo fluxo de água nas laterais dos corpos de prova e na parte inferior em razão da configuração do molde.

Diante da influência da umidade, torna-se indispensável um controle rigoroso de umidade de compactação em campo. Pois caso a compactação ocorra numa umidade superior à ótima, o solo pode vir a ter uma diminuição de resistência de até 81% para energia normal, de até 76% para energia intermediária, e de até 82% para energia modificada, considerando todas as compactações utilizadas, caso essa variação de umidade seja de 2%.

A Figura 58 apresenta os valores de ISC obtidos, para os quatro tipos de compactação Proctor, para os corpos de prova moldados na umidade ótima e na energia intermediária. A energia intermediária foi escolhida, com o intuito de se ter um valor médio entre as energias normal e modificada. Verifica-se que o maior valor de ISC, moldados nas condições supracitadas, ocorreu na compactação manual sem reuso 24 h. Tal fato pode ser explicado em razão da preparação da amostra de solo, a qual foi umedecida 24 horas antes da compactação, que proporcionou uma melhor uniformização da umidade.

Figura 58 – Valores de ISC para os tipos de compactação Proctor moldados na energia intermediária e umidade ótima.



A Tabela 20 apresenta os valores de expansão obtidos nos ensaios de ISC. Verifica-se que a expansão, durante o período de imersão, não teve grande influência nos valores de ISC para o solo em estudo. Nota-se uma leve tendência da expansão aumentar com a energia de compactação. Essa tendência da expansão aumentar com o acréscimo de energia também foi observada por vários pesquisadores como Barroso (1996) e Souza Júnior (2005). A expansão ocorre em função da mineralogia, da estrutura e da textura do solo. Em geral acredita-se que a expansão esteja associada ao tipo e quantidade de finos que estão presentes nos solos. O solo utilizado nesta pesquisa apresentou quebra das partículas quando da aplicação das energias de compactação. Conseqüentemente, quanto maior a energia, maior é a quantidade de finos presentes no solo, justificando o porquê das maiores expansões ocorrerem na energia modificada.

A forma de imersão pode ter influenciado nos resultados de expansão, pois quando os corpos de prova foram imersos, o tanque estava totalmente cheio, isso pode não provocar a saturação completa, ocasionando ar ocluso no corpo de prova. Logo o procedimento correto seria colocar o corpo de prova no tanque sem que estivesse totalmente cheio e em seguida enchê-lo gradativamente.

Os valores de expansão são similares nas compactações mecânica e manual com reuso, entretanto para os demais tipos de compactações foram obtidos maiores intervalos de expansão, onde a compactação manual sem reuso e manual sem reuso 24h obtiveram os maiores valores. Os corpos de prova moldados nas umidades Hót – 1% e Hót – 2% foram os que apresentaram maiores valores de expansão. Este fato pode ser justificado em função dos corpos de prova moldados nas referidas umidades conterem menos água e conseqüentemente absorverem mais água no período de imersão, conferindo assim maiores valores de expansão.

Tabela 20 – Valores da expansão dos ensaios de ISC.

Compactação mecânica		Compactação manual com reuso	
Energia normal	Expansão (%)	Energia normal	Expansão (%)
H ótima	0,48	H ótima	0,33
H ótima + 1 %	0,39	H ótima + 1 %	0,32
H ótima - 1 %	0,60	H ótima - 1 %	0,28
H ótima + 2 %	0,43	H ótima + 2 %	0,45
H ótima - 2 %	0,54	H ótima - 2 %	0,49
Energia intermediária	Expansão (%)	Energia intermediária	Expansão (%)
H ótima	0,42	H ótima	0,42
H ótima + 1 %	0,45	H ótima + 1 %	0,36
H ótima - 1 %	0,50	H ótima - 1 %	0,45
H ótima + 2 %	0,33	H ótima + 2 %	0,36
H ótima - 2 %	0,57	H ótima - 2 %	0,80
Energia modificada	Expansão (%)	Energia modificada	Expansão (%)
H ótima	0,70	H ótima	0,56
H ótima + 1 %	0,61	H ótima + 1 %	0,40
H ótima - 1 %	0,87	H ótima - 1 %	0,63
H ótima + 2 %	0,70	H ótima + 2 %	0,25
H ótima - 2 %	0,94	H ótima - 2 %	0,84
Compactação manual sem reuso		Compactação manual sem reuso 24h	
Energia normal	Expansão (%)	Energia normal	Expansão (%)
H ótima	0,53	H ótima	0,43
H ótima + 1 %	0,44	H ótima + 1 %	0,36
H ótima - 1 %	1,04	H ótima - 1 %	0,63
H ótima + 2 %	0,48	H ótima + 2 %	0,44
H ótima - 2 %	0,90	H ótima - 2 %	0,61
Energia intermediária	Expansão (%)	Energia intermediária	Expansão (%)
H ótima	1,02	H ótima	0,64
H ótima + 1 %	0,86	H ótima + 1 %	0,36
H ótima - 1 %	0,67	H ótima - 1 %	0,60
H ótima + 2 %	0,59	H ótima + 2 %	0,57
H ótima - 2 %	1,03	H ótima - 2 %	0,59
Energia modificada	Expansão (%)	Energia modificada	Expansão (%)
H ótima	0,96	H ótima	0,51
H ótima + 1 %	0,79	H ótima + 1 %	0,50
H ótima - 1 %	1,01	H ótima - 1 %	0,80
H ótima + 2 %	0,47	H ótima + 2 %	0,54
H ótima - 2 %	0,69	H ótima - 2 %	1,24

4.5.2 Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral – RT

As Figuras 59 a 62 apresentam os resultados do ensaio de tração por compressão diametral para os quatro tipos de compactação nas energias normal, intermediária e modificada e nas umidades estudadas.

Figura 59 – RT: Compactação mecânica.

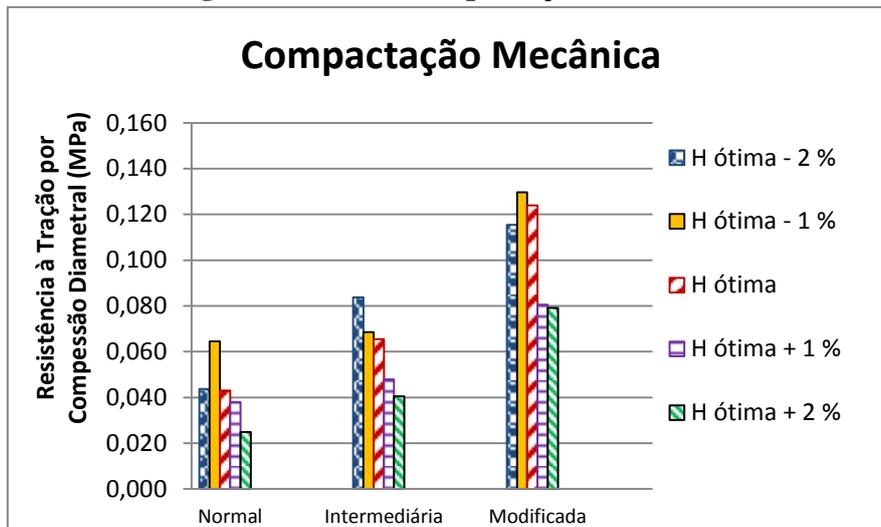


Figura 60 – RT: Compactação manual com reuso.

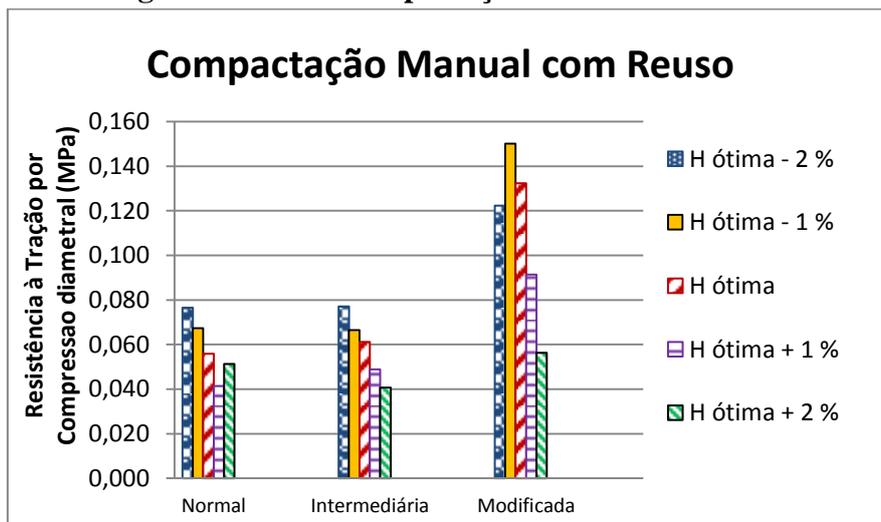


Figura 61 – RT: Compactação manual sem reuso.

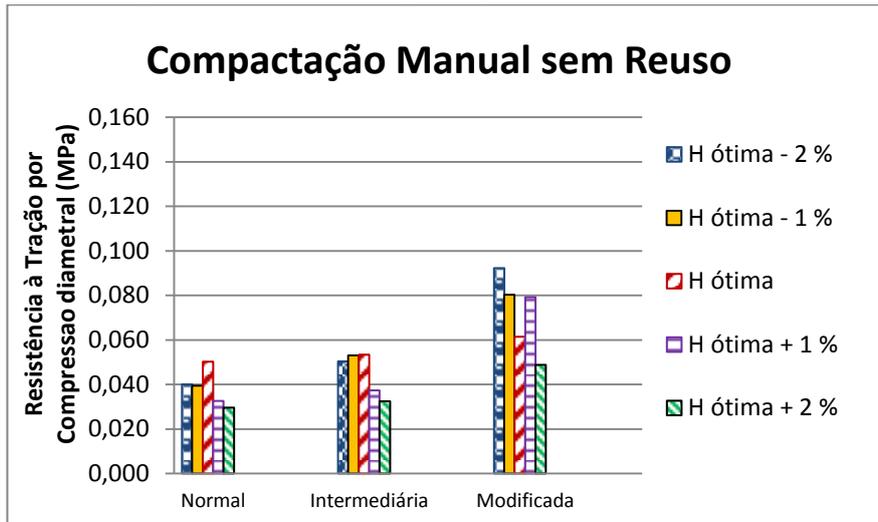
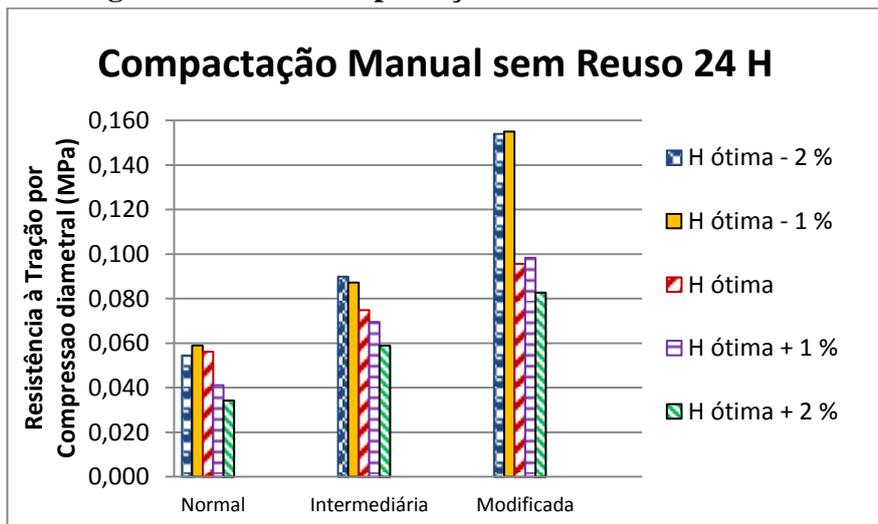


Figura 62 – RT: Compactação manual sem reuso 24h.



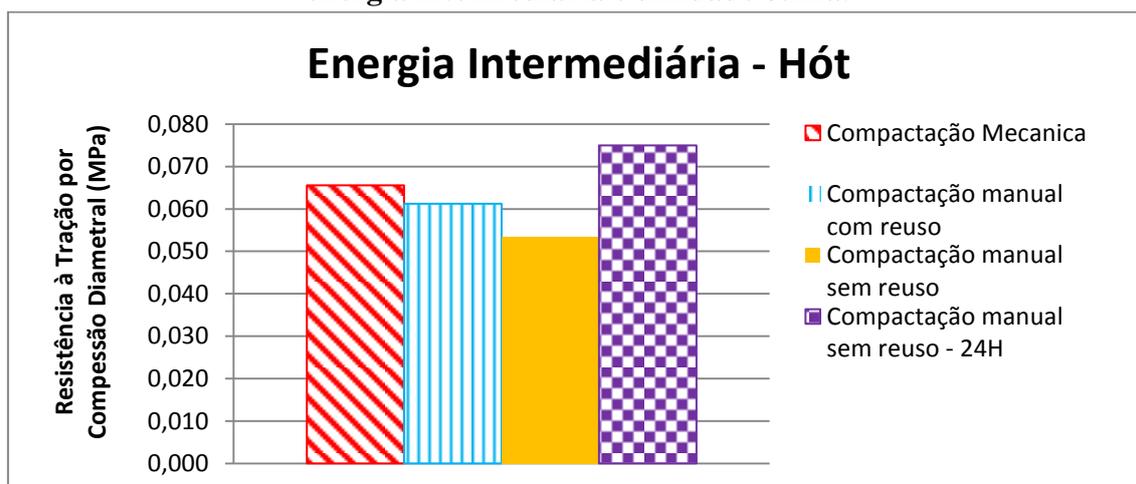
Ao analisar os resultados de Resistência à Tração por Compressão Diametral observa-se um crescimento nos valores de RT com o aumento da energia de compactação para os quatro tipos de compactação Proctor utilizados na pesquisa. De modo geral os maiores valores de RT foram obtidos no processo de compactação Proctor Manual sem Reuso 24h nos três níveis de energia. O processo de preparação da amostra, que foi umedecida 24h antes da compactação, pode ter influenciado de maneira significativa nesses resultados, pois a referida compactação pode ter gerado mudanças na estrutura do solo, e esta conferiu maior resistência ao solo.

Os maiores valores de RT foram observados nas umidades Hót – 1% e Hót – 2%. O esperado é que os maiores valores de RT fossem obtidos na umidade ótima, este fato pode ser explicado em função da maior perda de umidade (umidade de moldagem x umidade de compactação) ocorrida durante o processo de compactação. Quanto maior esta perda, maior será a influência da sucção e consequentemente maior a resistência, principalmente em solos com granulometria mais fina. Fumió (2004) explica que este aumento de resistência, devido a sucção, deve-se a tensão negativa que se opõe à saída de água dos materiais e equivale a um acréscimo de pressão útil para movimentar um volume de água unitário do arcabouço sólido de um material.

Em relação a compactação manual com reuso, esta forneceu resultados bem próximos da compactação manual sem reuso 24h, este fato pode ser explicado em razão da massa específica seca máxima obtida na referida compactação, pois a compactação com reuso obteve melhores resultados.

A Figura 63 apresenta os valores de RT obtidos para os quatro tipos de compactação Proctor, para os corpos de prova moldados na umidade ótima e na energia intermediária. A energia intermediária foi escolhida, com o intuito de se ter um valor médio entre as energias normal e modificada.

Figura 63 – Valores de RT para os tipos de compactação Proctor moldados na energia intermediária e umidade ótima.



Considerando os corpos de prova moldados na energia intermediária e nas umidades ótimas obtidas nos quatro ensaios de compactação, verifica-se que a compactação manual sem reuso 24 h forneceu os melhores resultados de RT. Comportamento análogo foi observado nos ensaios de ISC, nos quais os melhores resultados foram obtidos neste tipo de compactação na referida energia.

Analisando os resultados de RT obtidos nessa pesquisa pode-se constatar que a energia de compactação exerce uma influência bastante expressiva na variação dos resultados, visto que foi observado um aumento significativo nos valores de RT com o aumento da energia de compactação. Ou seja, observou-se diferenças de, aproximadamente, 100% do valor de RT quando comparou-se as amostras compactadas pela compactação mecânica e na compactação manual sem reuso, na umidade ótima e energia modificada. Na energia normal esta diferença foi inferior a 20%. Portanto, de forma análoga ao comportamento observado nos ensaios de ISC, quanto maior a energia empregada, maior a influência do método de compactação nos resultados mecânicos. Constatou-se ainda que o tipo de compactação utilizado exerceu uma influência significativa nos resultados de RT.

Em relação a umidade de compactação verificou-se que os corpos de prova moldados nas umidades inferiores a ótima foram os que obtiveram melhores resultados de RT. Desta forma deve-se proceder de forma rigorosa no controle do teor de umidade de compactação em campo, pois caso estes sejam compactados em uma umidade superior a ótima, podem ter decréscimo nos valores de resistência.

4.5.3 Ensaio de Resistência à Compressão Simples – RCS

Os ensaios de resistência compressão simples (RCS) foram executados com a finalidade de se obter a tensão de ruptura de cada corpo de prova para os diferentes tipos de moldagem utilizados na pesquisa. As Figuras 64 a 67 apresentam os resultados obtidos nos ensaios de Resistência à Compressão Simples.

Figura 64 – RCS: Compactação mecânica.

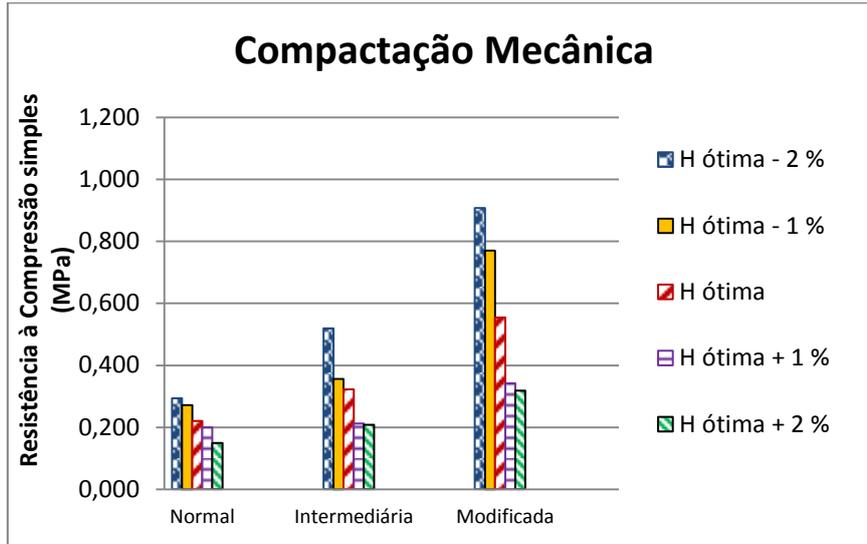


Figura 65 – RCS: Compactação manual com reuso.

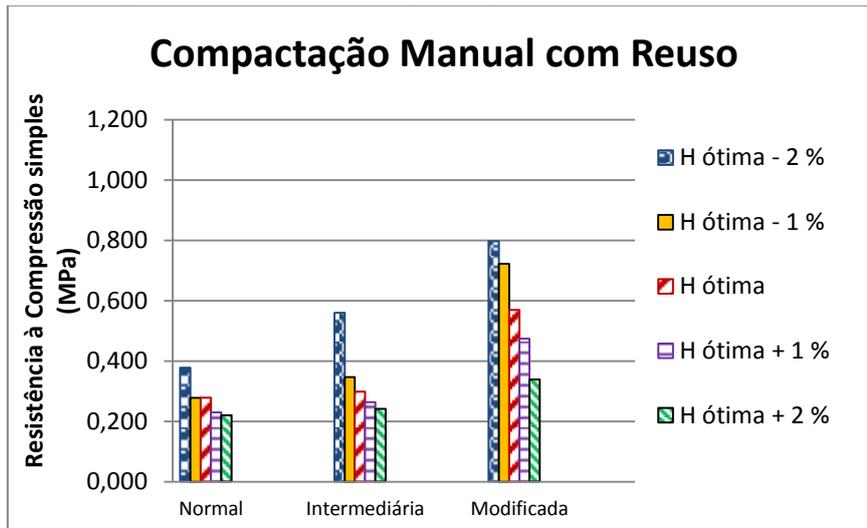


Figura 66 – RCS: Compactação manual sem reuso.

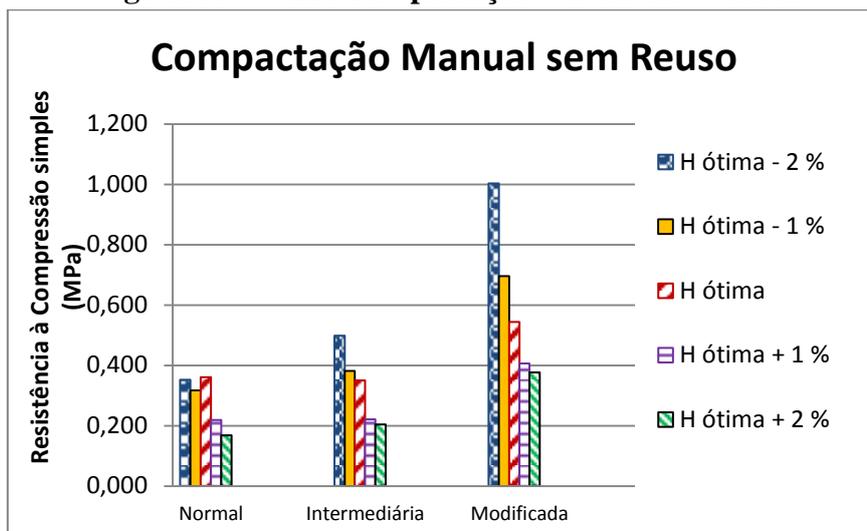
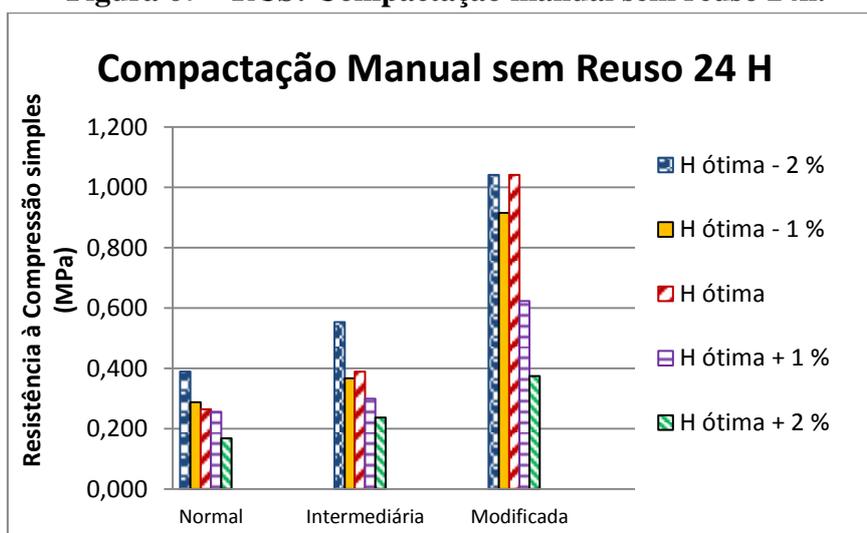


Figura 67 – RCS: Compactação manual sem reuso 24h.



Analisando os resultados de Resistência à Compressão Simples observa-se que, de maneira análoga aos ensaios anteriores, ocorre um aumento gradativo no valor de RCS conforme aumento da energia de compactação.

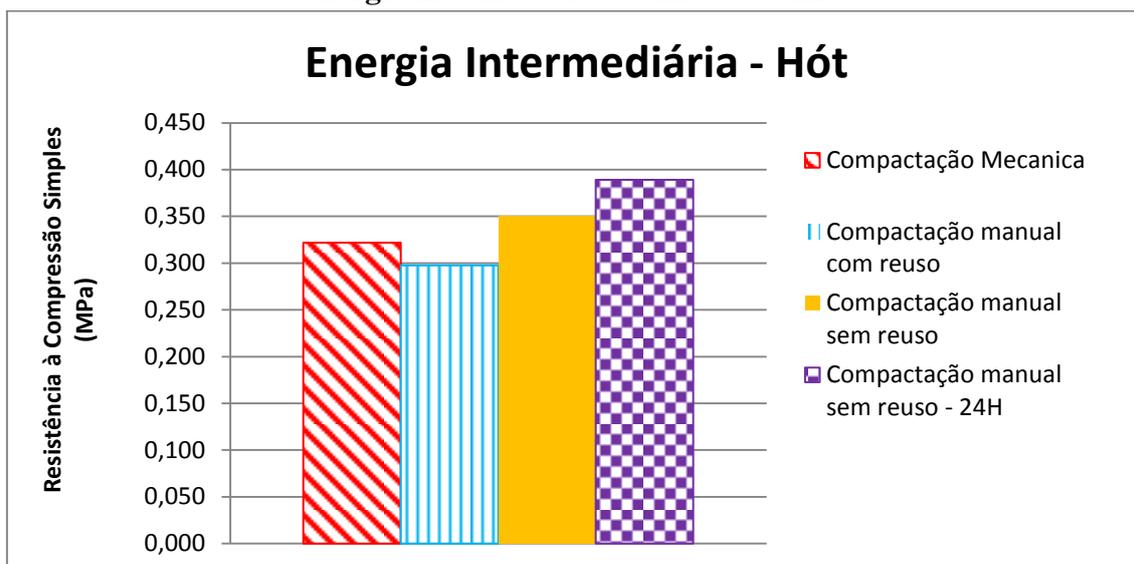
Do mesmo modo que os ensaios anteriores, os maiores valores de RCS foram obtidos no processo de compactação Proctor Manual sem Reuso 24 h nos três níveis de energia. Os maiores valores de RCS foram observados na umidade Hót - 2%. O esperado é que os maiores valores de RCS fossem obtidos na umidade ótima, este fato

pode ser explicado em função perda da umidade de moldagem – relação entre a umidade quando na ruptura dos corpos de prova e da umidade aferida após o término do ensaio, ocasionando uma maior ação da sucção devido à diminuição de umidade e com isso um aumento da resistência no solo. Verificou-se nesta pesquisa que, para as compactações Mecânica, Manual com reuso e manual sem reuso, os maiores valores de RCS, nos três níveis de energia, foram encontrados para as umidades Hót – 2% e Hót – 1%.

Observa-se que os valores de RCS obtidos na compactação mecânica para energia normal foram de um modo geral um pouco inferiores aos das demais compactações. Este fato pode ser justificado pela diferença de altura e diâmetro dos corpos de prova moldados na referida compactação conforme visto no item 3.2.4.3. Os corpos de prova moldados na compactação mecânica apresentaram maior altura e maior diâmetro do que os moldados nos outros tipos de compactação Proctor, portanto a área de atuação da força aplicada pela prensa SHIMADZU AG-IS no corpo de prova é menor que o diâmetro do corpo de prova. Esse fato pode ter levado a esforços secundários fazendo com que houvesse o decréscimo nos valores de RCS. A avaliação da distribuição das tensões e a sobreposição das cunhas de rupturas também são importantes. O ideal seria obter a relação altura/diâmetro igual 2. Na compactação mecânica essa relação foi 0.8, e nas demais compactações foi 1.3, verificando-se assim que para ambas as compactações não foram alcançadas a relação altura/diâmetro ideal. Uma alternativa para se conseguir essa relação seria rasar ou cortar o corpo de prova até se obter o resultado desejado.

A Figura 68 apresenta os valores de RCS obtidos, para os quatro tipos de compactação Proctor, para os corpos de prova moldados na umidade ótima e na energia intermediária.

Figura 68 – Valores de RCS para os tipos de compactação Proctor moldados na energia intermediária e umidade ótima.



Considerando os corpos de prova moldados na energia intermediária e nas umidades ótimas obtidas nos quatro ensaios de compactação, verifica-se que a compactação manual sem reuso 24 h obteve os melhores resultados de RCS seguindo a mesma tendência dos demais ensaios mecânicos.

Analisando os resultados de RCS obtidos pode-se constatar que a energia de compactação exerceu uma influência significativa nos resultados alcançados nos diferentes métodos de compactação. Observou-se, na umidade ótima, uma variação dos valores de RCS aproximadamente 64% e 91% para as energias normal e modificada, respectivamente.

Em relação a umidade de compactação, verificou-se que os corpos de prova moldados nas umidades inferiores a ótima foram os que obtiveram melhores resultados de RCS. Este fato foi justificado em razão da influência da sucção, por meio das curvas características do solo, onde ficou constatada sua influência principalmente quando se tem umidades inferiores a ótima, conferindo ao solo maior RCS. Assim torna-se indispensável um controle rigoroso de umidade de compactação em campo, pois caso estes sejam compactados em uma umidade superior a ótima, em cerca de 2%, pode vir a ter uma diminuição de 41%, 39% e 64% de resistência para as energias normal, intermediária e modificada, respectivamente, para a compactação manual sem reuso

24h. A umidade de equilíbrio depende da região, e como no semi-árido dificilmente é alcançada a umidade ótima, os melhores resultados mecânicos são fornecidos pelas umidades inferiores à ótima.

4.5.3.1 Análise do comportamento mecânico (RCS) em função das curvas características de sucção

A partir das curvas características de sucção transformadas ($e.pF \times Sr$) foram feitas análises do comportamento mecânico em termos de RCS em função da relação sucção/índice de vazios.

Para o estudo do comportamento mecânico, conhecendo-se o índice de vazios e a umidade dos corpos de prova pós ruptura, foi obtido o valor do grau de saturação, e com este valor a partir da equação definida pela curva característica transformada foi possível determinar o valor da sucção em pF . Com os valores de sucção em pF , com os valores do índice de vazios, e com os respectivos valores de RCS foi obtido os gráficos individualizados de comportamento mecânico para o conjunto de pontos de RCS versus pF/e para cada processo de compactação utilizado na pesquisa. De acordo com Camapum de Carvalho *et al.* (2002) quando o parâmetro em termos de resistência, coesão e módulo de resiliência varia inversamente proporcional ao índice de vazios "e" relaciona-se esse parâmetro com pF/e e se o parâmetro, como exemplo o colapso varia diretamente proporcional ao índice de vazios relaciona-se com $e.pF$. Os autores concluíram que o grau de colapso diminui com o aumento do grau de saturação, e aumenta com o acréscimo do índice de vazios. As Figuras 69 a 72 apresentam as curvas do comportamento mecânico (RCS) versus pF/e para cada processo de compactação nas energias normal, intermediária e modificada.

Figura 69 – Curvas de RCS versus pF/e para compactação mecânica.

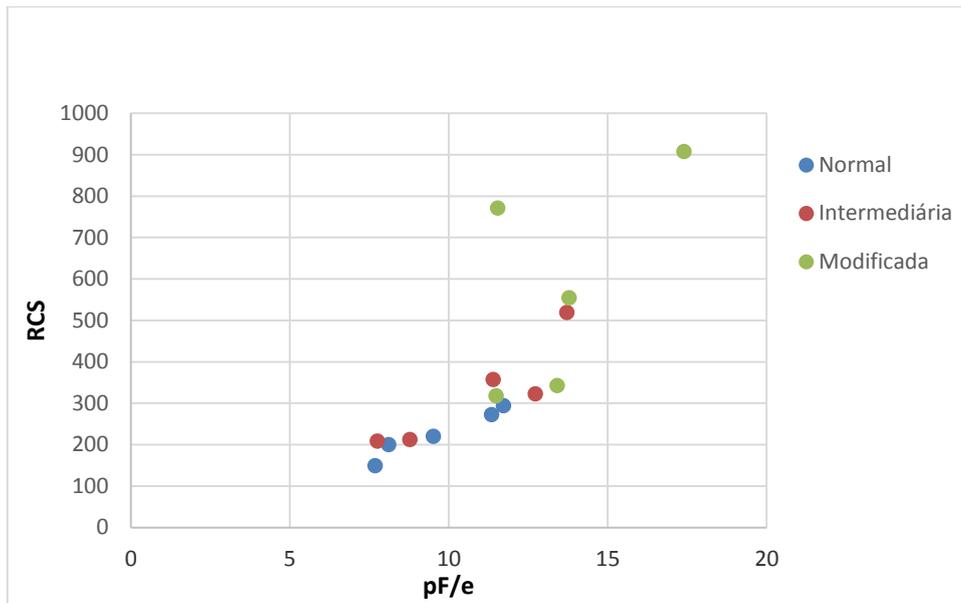


Figura 70 – Curvas de RCS versus pF/e para compactação manual com reuso.

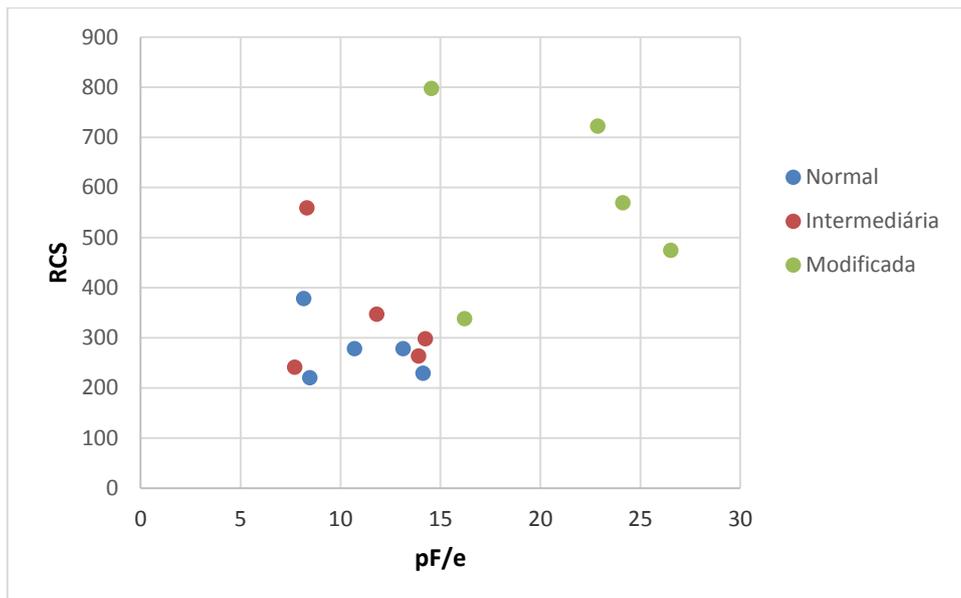


Figura 71 – Curvas de RCS versus pF/e para compactação manual sem reuso.

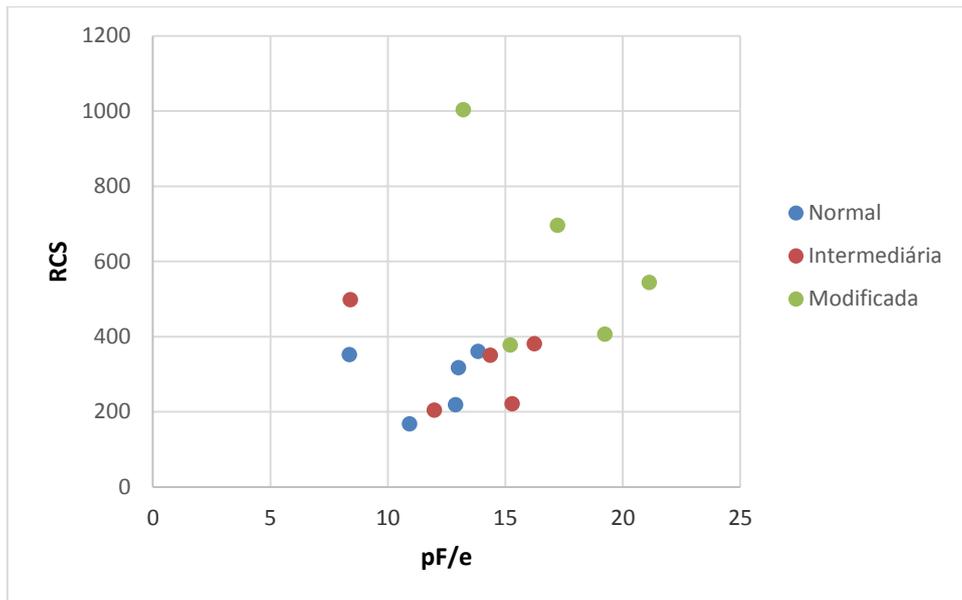
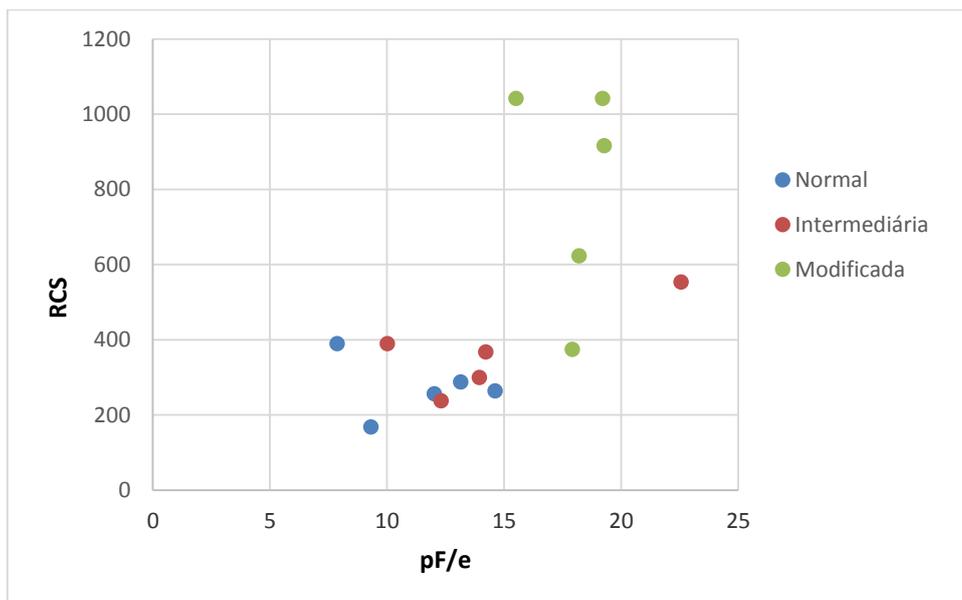
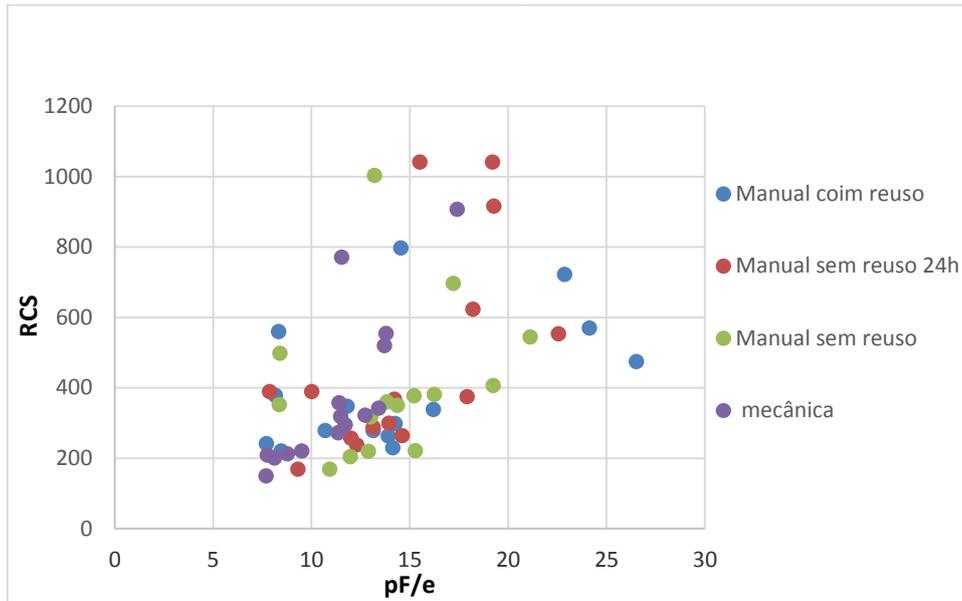


Figura 72 – Curvas de RCS versus pF/e para compactação manual sem reuso 24h.



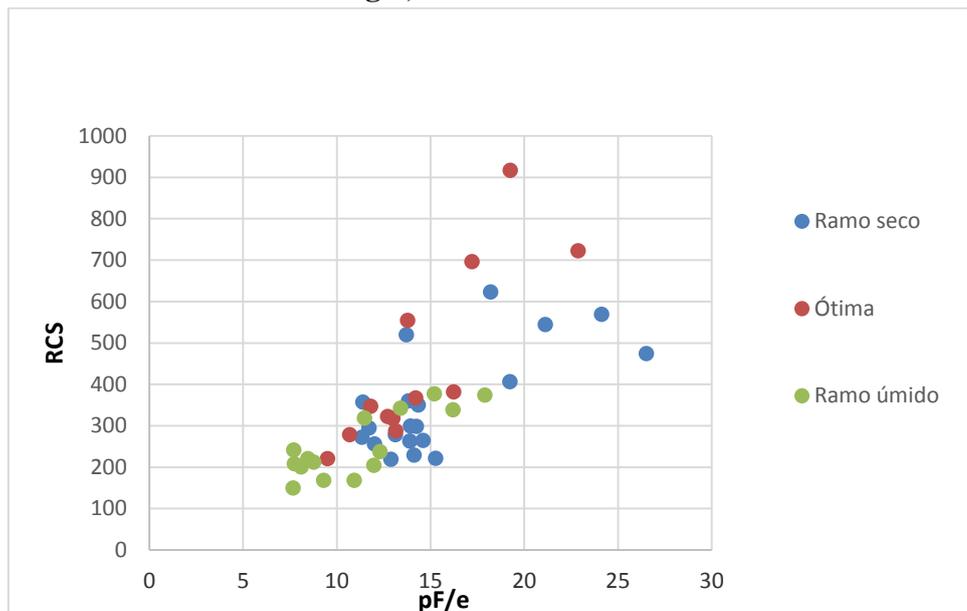
A Figura 73 apresenta as curvas do comportamento mecânico (RCS) versus pF/e para todos os processos Proctor utilizados nos três níveis de energia.

Figura 73 – Curvas de RCS versus pF/e para todas as compactações nos três níveis de energia.



A Figura 74 ilustra as curvas do comportamento mecânico (RCS) versus pF/e e compreende os processos Proctor utilizados nos três níveis de energia separados por ramo da curva de compactação, no ramo seco e no ramo úmido.

Figura 74 – Curvas de RCS versus pF/e para todas as compactações nos três níveis de energia, no ramo seco e úmido.



Verificou-se por meio das Figuras 70 a 73 que houve uma certa dispersão entre os pontos, principalmente nas compactações com reuso, sem reuso e sem reuso 24h. Em contrapartida analisando a Figura 69 verificou-se uma ótima relação para a compactação mecânica e essa é uma informação relevante, pelo tamanho dos corpos de prova e pelo melhor controle na compactação.

Pode-se verificar na Figura 74, onde os pontos estão separados por ramo da curva, que a maioria dos pontos segue certa tendência. Os pontos que tenderam a desviar da tendência foram os últimos do ramo úmido, os quais tem maior umidade. Alguns pontos foram descartados devido às umidades obtidas, pois estas foram bem discrepantes em relação às demais.

Os pontos que não seguiram a tendência devem-se, provavelmente, a influência da sucção devido ao tamanho dos corpos de prova que não obtiveram a relação h/d igual a 2. Outro motivo seria pela maior retração nos pontos do ramo úmido.

Para análises complementares foram traçadas as curvas de iso-sucção em relação às curvas de compactação. As curvas de iso-sucção são importantes para entender o comportamento do solo e os resultados da compactação. Para o traçado das curvas de iso-sucção foram utilizadas as curvas características estimadas, considerando as curvas características transformadas individuais de todos os processos de compactações Proctor utilizados na pesquisa. As Figuras 75 a 78 apresentam as curvas de iso-sucção do solo estudado para os quatro processos de compactação.

Figura 75 – Curvas de iso-sucção do solo estudado para a compactação mecânica.

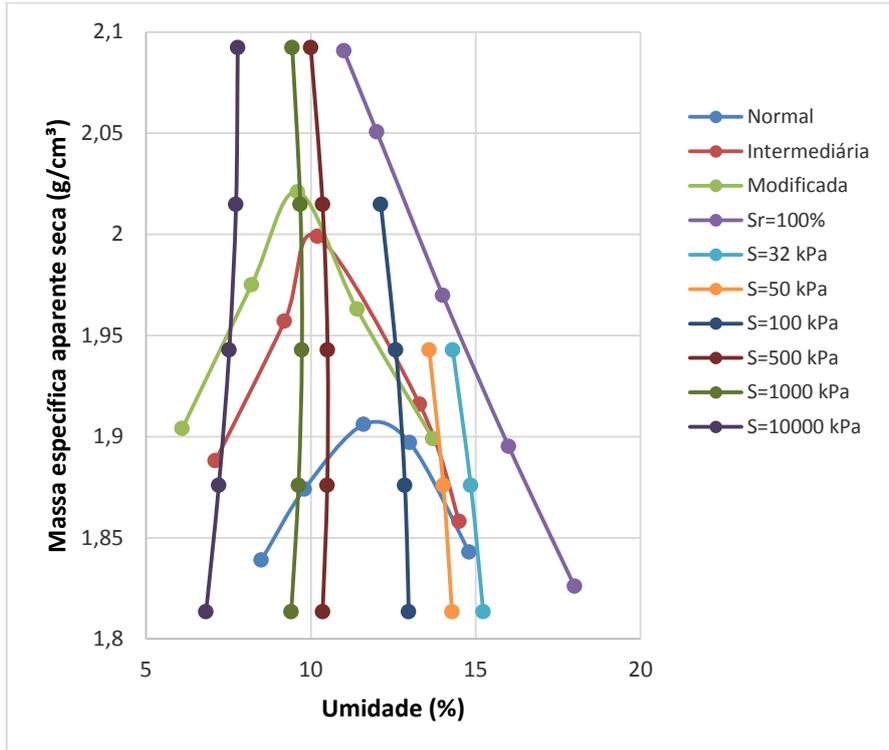


Figura 76 – Curvas de iso-sucção do solo estudado para a compactação manual com reuso.

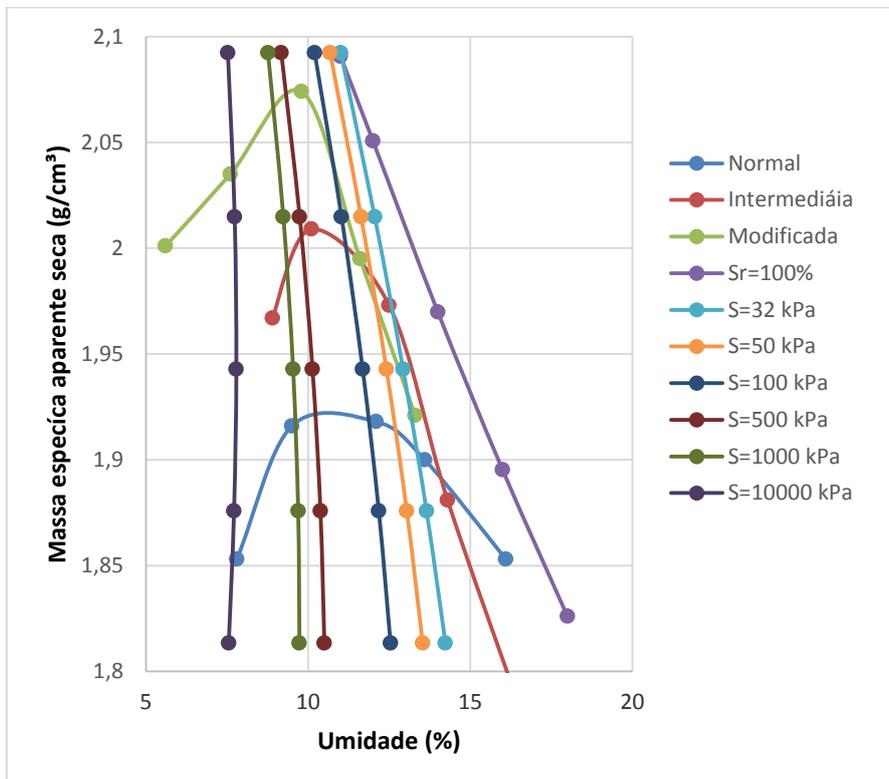


Figura 77 – Curvas de iso-sucção do solo estudado para a compactação manual sem reuso.

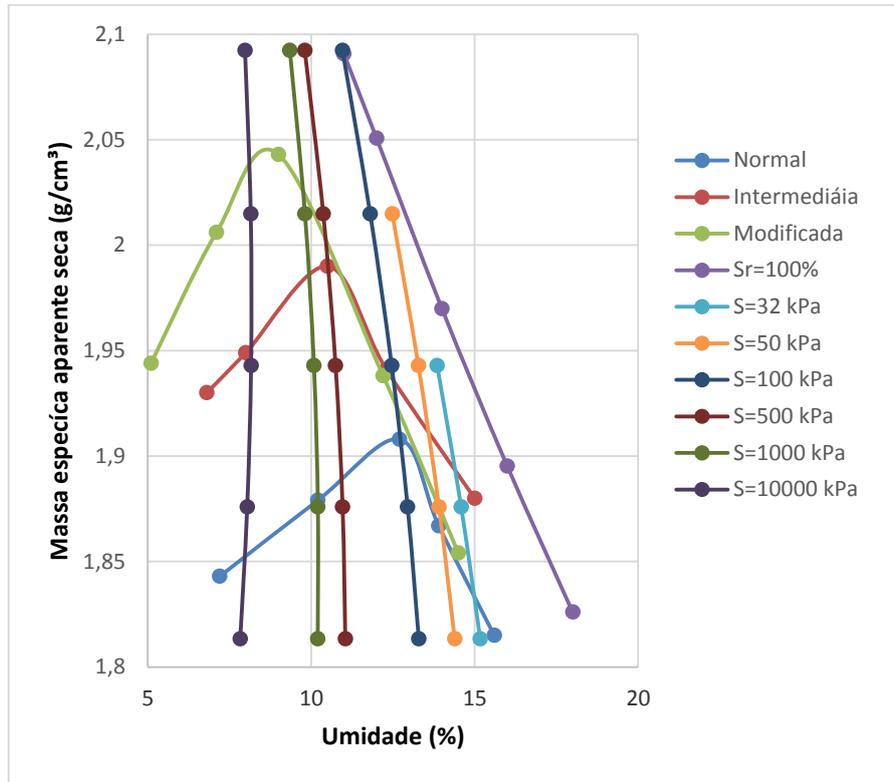
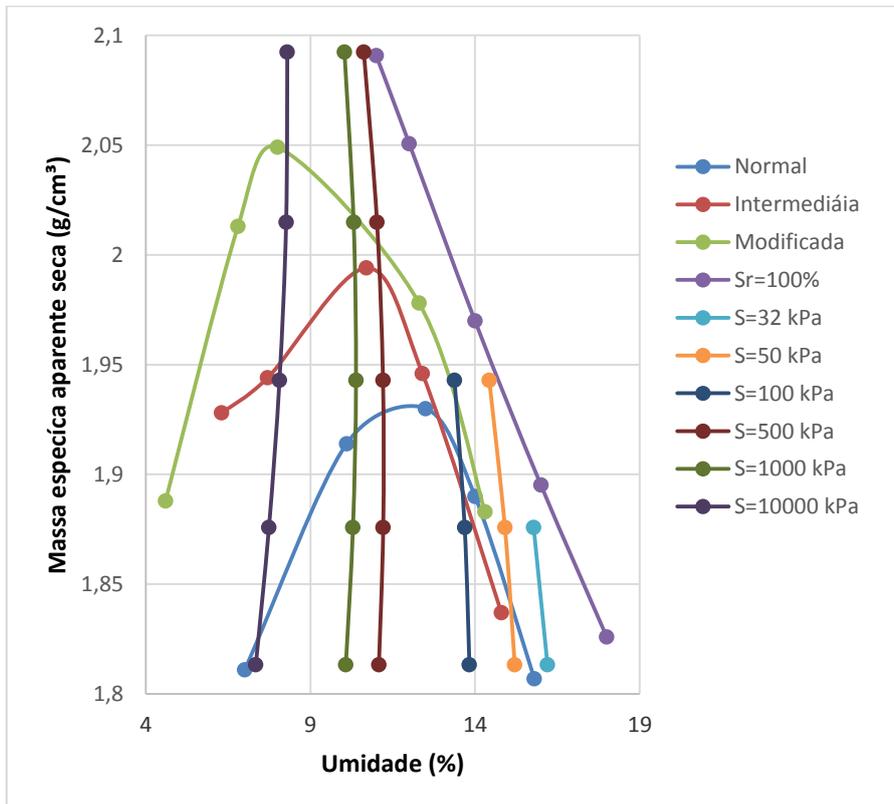


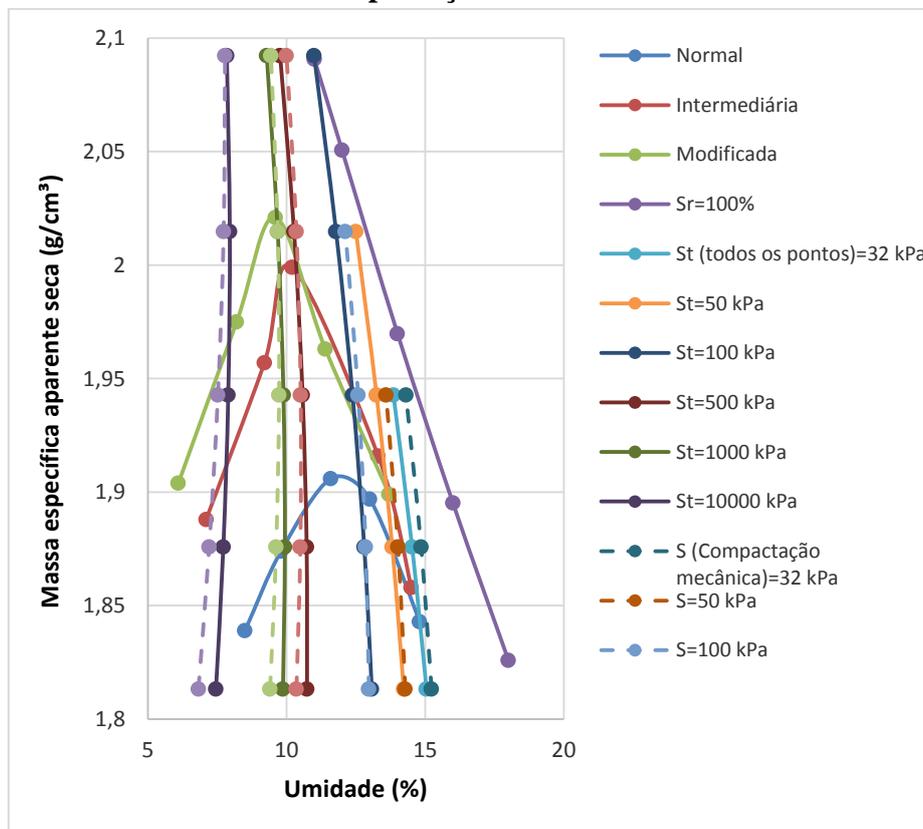
Figura 78 – Curvas de iso-sucção do solo estudado para a compactação manual sem reuso 24 h.



Analisando-se as Figuras 75 a 78 verificou-se que de um modo geral que as curvas correspondentes a maiores sucções (500kPa, 1000kPa e 10000kPa) estão situadas no ramo seco das curvas de compactação e as curvas correspondentes as menores sucções (32kPa, 50kPa e 100kPa) estão situadas no ramo úmido das curvas. Este comportamento era o esperado já que em umidades inferiores à ótima, ou seja, no ramo seco da curva, há uma maior interferência da sucção, onde os seus valores são mais elevados.

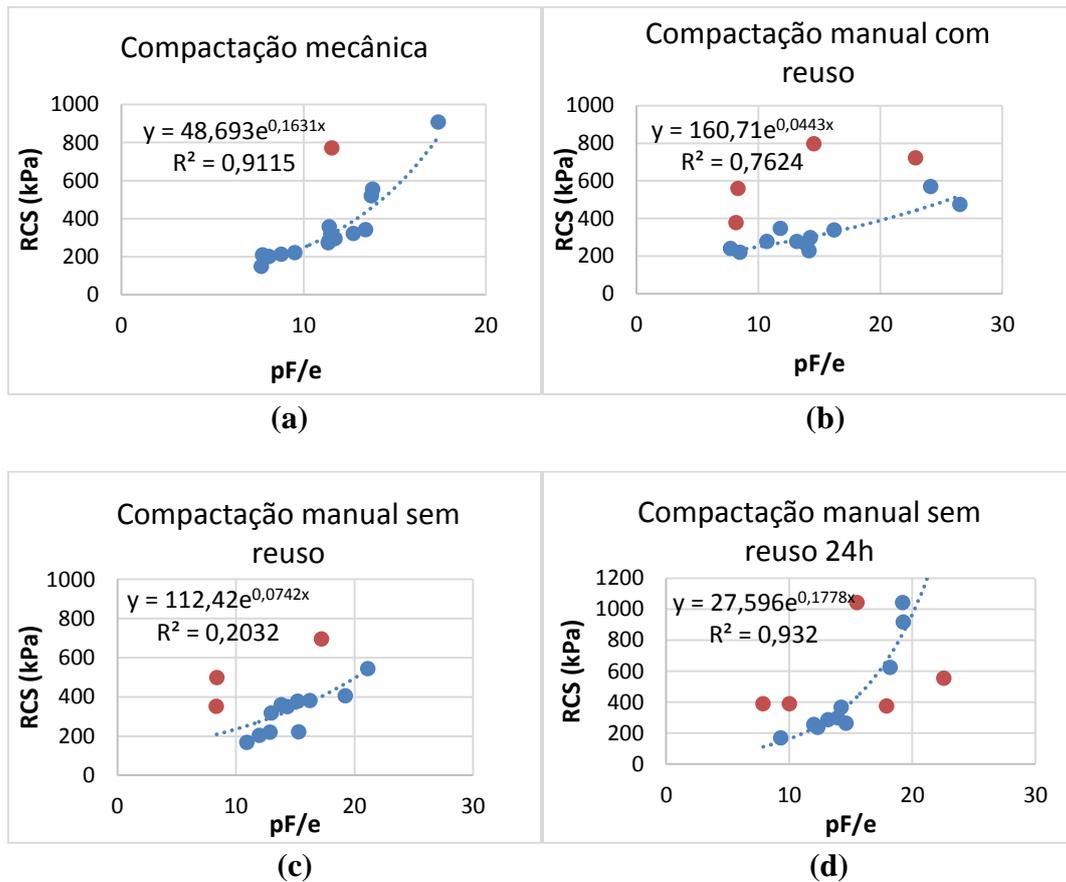
Para a compactação mecânica também foi feito o traçado da curva de iso-sucção usando a curva característica estimada considerando a curva característica interpolada de todos os resultados das compactações. A Figura 79 mostra o traçado dos dois resultados sobrepostos. Na sobreposição das curvas percebe-se uma pequena diferença entre os resultados, mas as tendências gerais são semelhantes.

Figura 79 – Curvas de iso-sucção do solo considerando a curva característica interpolada de todos os resultados das compactações e apenas os resultados da compactação mecânica.



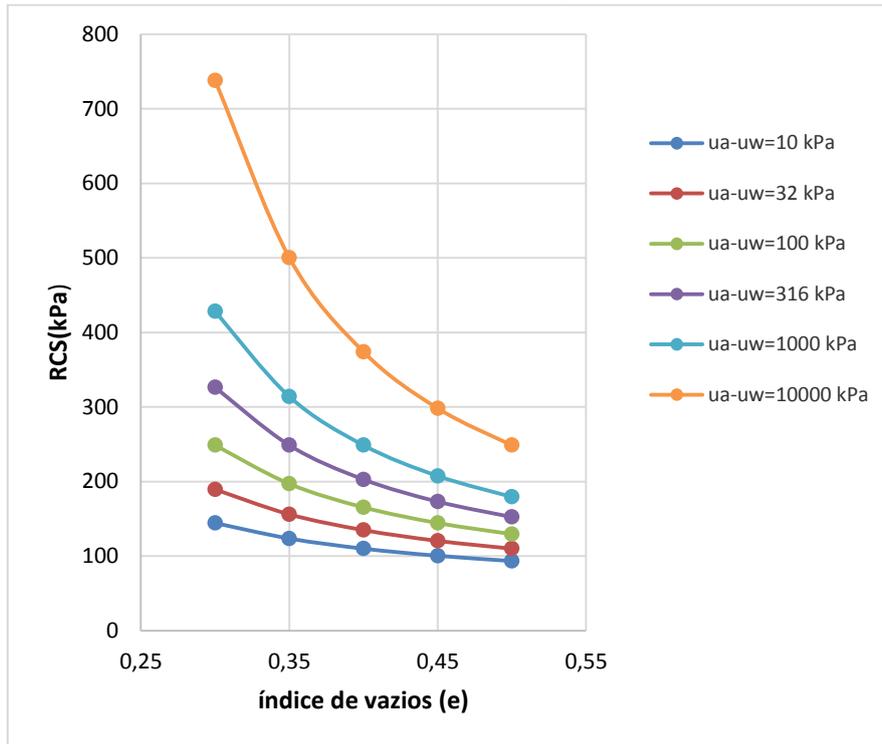
A partir das análises dos gráficos de iso-sucção foram feitos os gráficos de RCS versus pF/e na função exponencial (Figura 80). Nesta verificou-se uma melhor correlação para as compactações mecânica e manual sem reuso 24h, pois foram obtidos coeficientes de determinação R^2 superiores a 0,90, considerado satisfatório, já que este parâmetro estima a acurácia do ajuste estatístico alcançado pelas curvas.

Figura 80 – Curvas de RCS versus pF/e para os quatro processos de compactação: (a)Mecânica; (b)Manual com reuso; (c)Manual sem reuso; (d)Manual sem reuso 24h.

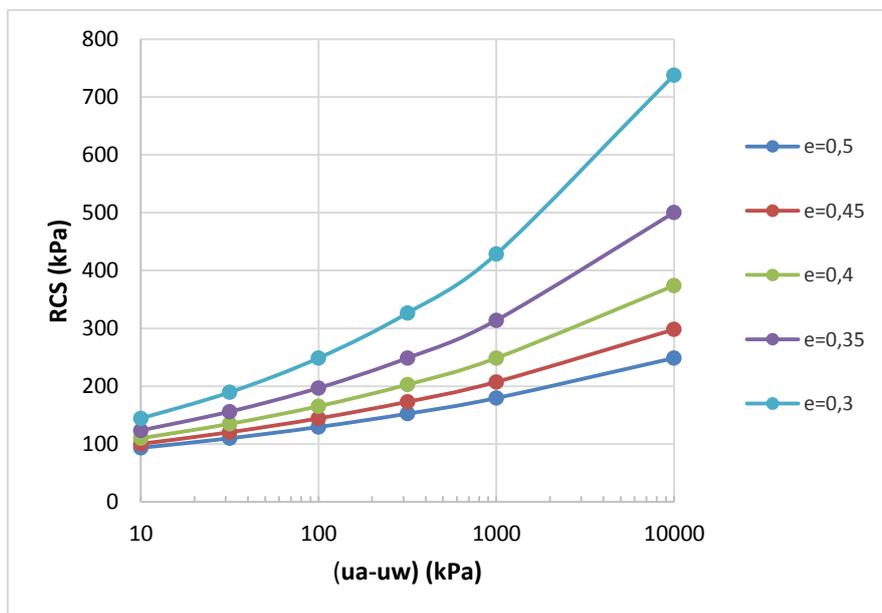


Por meio das equações obtidas dos gráficos da função logarítmica dos quatro processos de compactação supracitados foi possível traçar os gráficos da RCS em função do índice de vazios (e) e os gráficos da RCS em função da sucção ($ua-uw$) (Figura 81 a 84). Esses gráficos mostram como varia o comportamento do solo em função da sucção e do índice de vazios, e a partir do cruzamento em termos de análise com as curvas de iso-sucção pode-se entender como comporta o solo estudado.

Figura 81 – Curvas da compactação mecânica: (a) RCS versus índice de vazios e (b) RCS versus sucção.

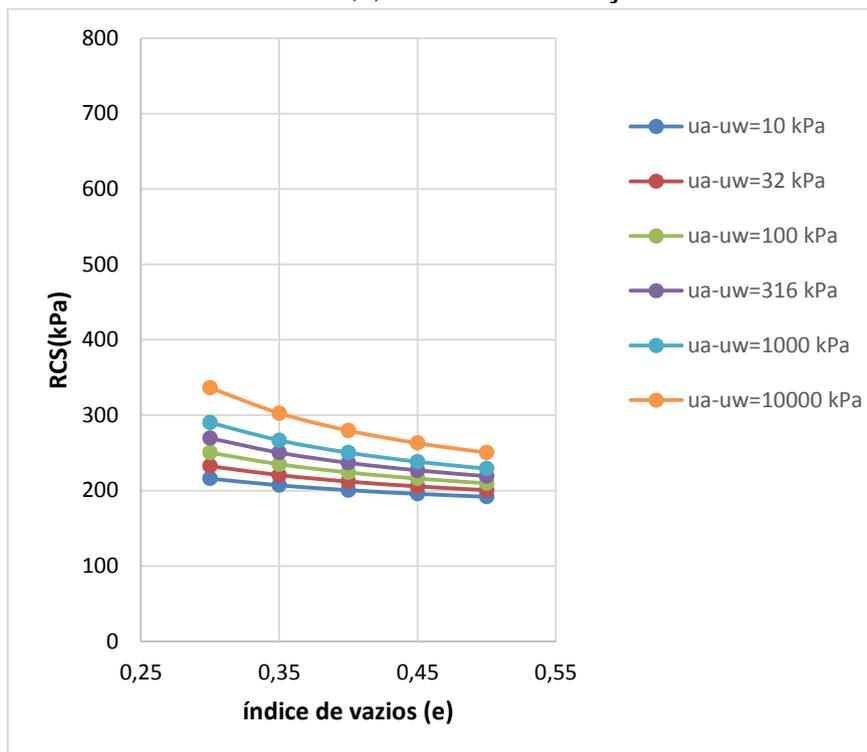


(a)

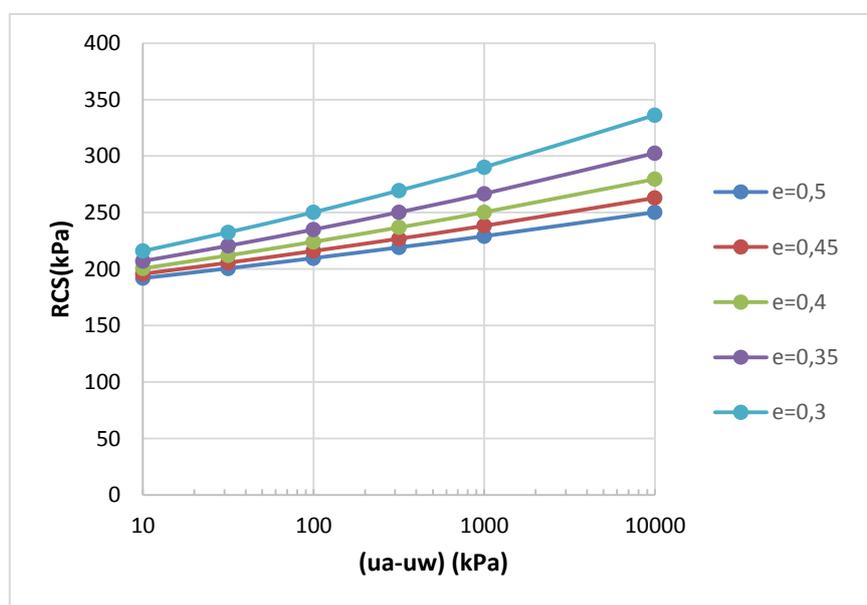


(b)

Figura 82 – Curvas da compactação manual com reuso: (a) RCS versus índice de vazios e (b) RCS versus sucção.

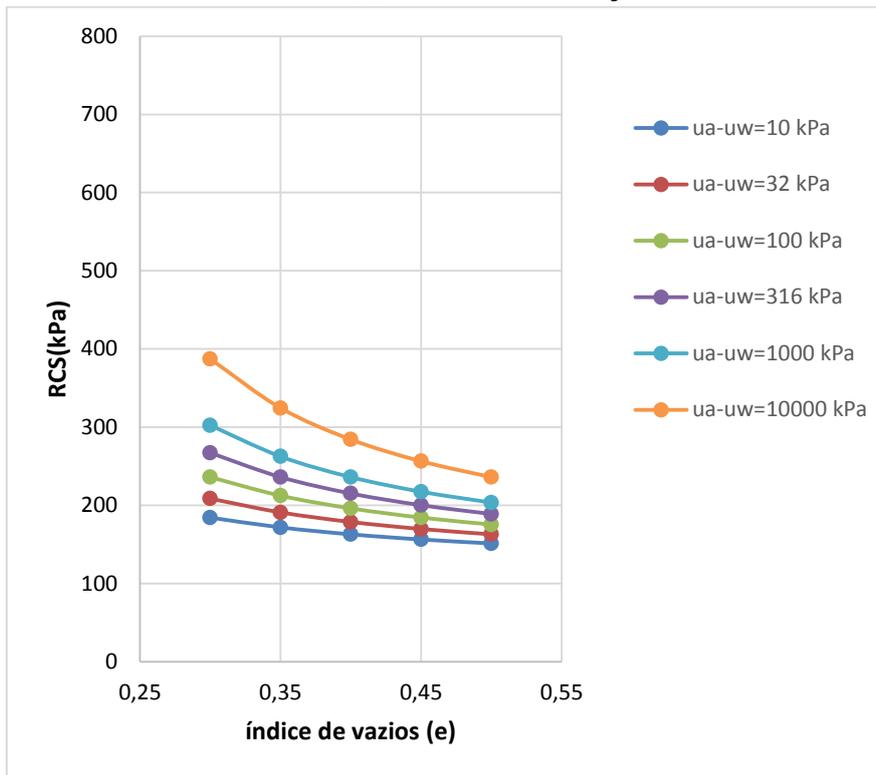


(a)

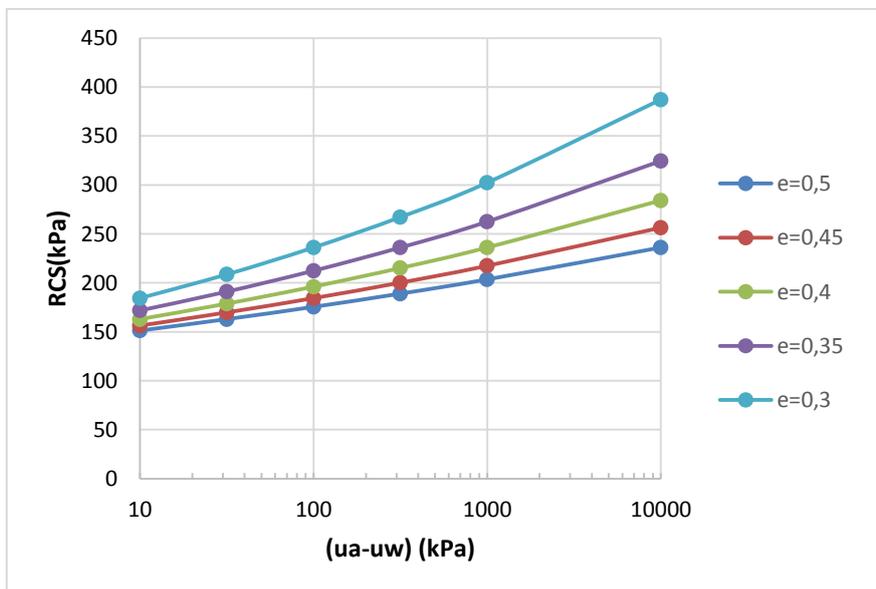


(b)

Figura 83 – Curvas da compactação manual sem reuso: (a) RCS versus índice de vazios e (b) RCS versus sucção.

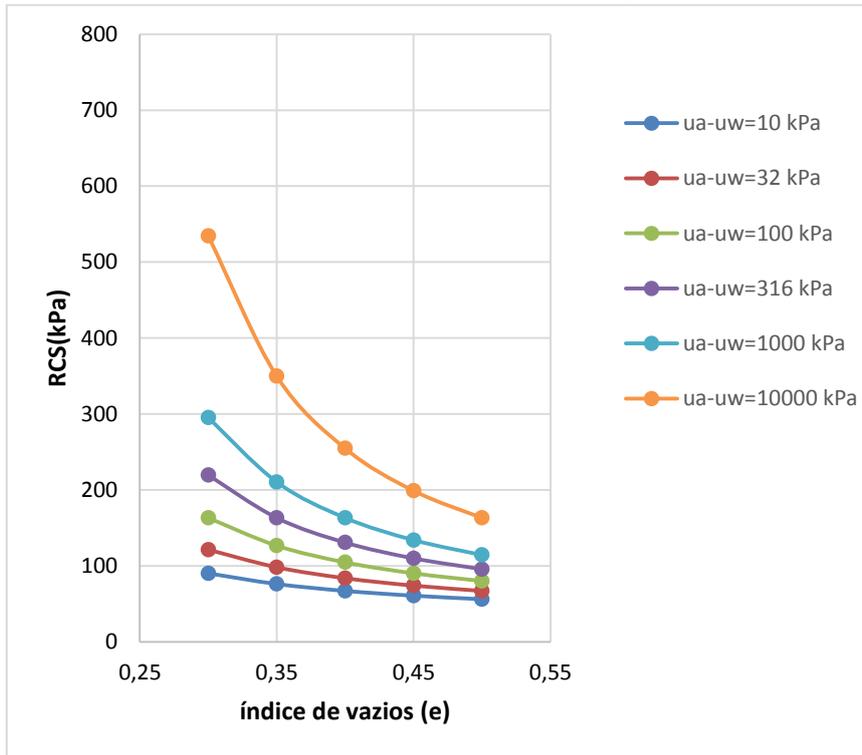


(a)

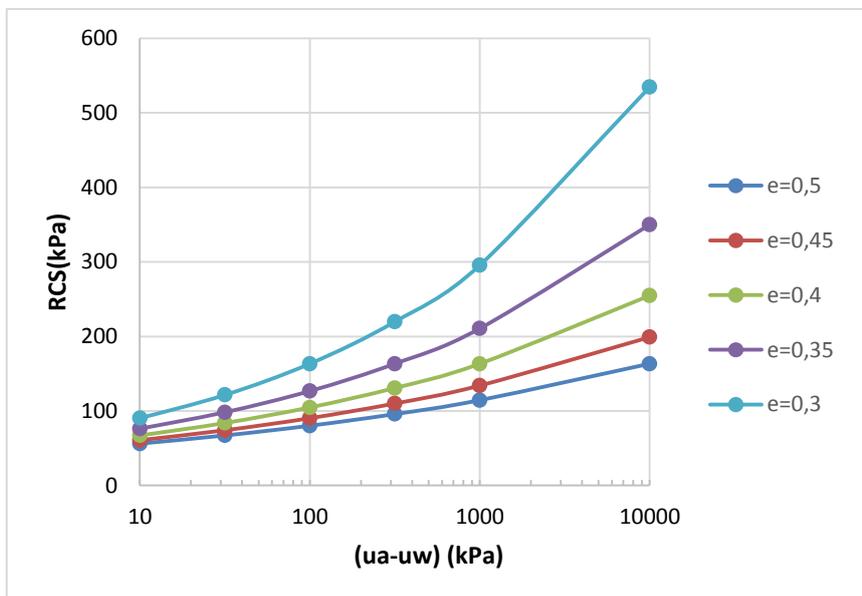


(b)

Figura 84 – Curvas da compactação manual sem reuso 24h: (a) RCS versus índice de vazios e (b) RCS versus sucção.



(a)



(b)

Analisando as Figuras 81 a 84 pode-se observar, para todos os processos de compactação, que o acréscimo da sucção promove o aumento da resistência à compressão simples (RCS) e quanto maior o índice de vazios do solo menores são as resistências (RCS). Verificou-se também que as maiores resistências foram obtidas para compactação mecânica, conforme verificado anteriormente. Essa melhor relação para a compactação mecânica pode ter sido proveniente do tamanho dos corpos de prova, já que na referida compactação os corpos de prova tiveram diâmetro e altura maiores que as demais compactações, conferindo assim maior resistência ao solo.

Estas análises adicionais do comportamento das curvas de iso-sucção são importantes pois evidenciam o rigor que se deve ter ao realizar um estudo de um determinado solo. Além disso, ela apontou a influência distinta de sucções diferentes no comportamento mecânico do solo colocado sob efeito de sobreposição de cunhas de ruptura.

4.5.4 Obtenção do Intercepto Coesivo e do Ângulo de Atrito

A resistência ao cisalhamento dos solos pode ser expressa pela equação de Coulomb:

$$\tau = c + \sigma_n \operatorname{tg}\varphi \quad (12)$$

onde:

τ : máxima pressão cisalhante suportada pelo solo;

σ_n : tensão normal a que a superfície de falhamento está submetida;

c : intercepto de coesão ou coesão aparente do solo;

φ : ângulo de atrito interno do solo, definido como sendo o ângulo que a força normal faz com a resultante das forças que o maciço terroso está submetido.

Os parâmetros c e φ são características intrínsecas dos solos e geralmente são obtidos por meio de ensaios triaxiais e de cisalhamento, entretanto de acordo com Goodman (1989) *apud* Leandro (2005) pode ser estimada a partir dos ensaios de RCS e RT.

A Tabela 21, 22, 23 e 24 mostra os valores dos parâmetros de resistência ao cisalhamento, o intercepto coesivo (c) e o ângulo de atrito (ϕ) estimados a partir dos resultados supracitados, para as quatro compactações.

Tabela 21 – Parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo para a compactação Proctor mecânica.

Compactação Mecânica					
Energia Normal	H ótima)	H ótima + 1 %	H ótima - 1 %	H ótima + 2 %	H ótima - 2 %
ϕ (graus)	20,990	22,774	5,534	29,789	35,178
Coesão (MPa)	0,076	0,066	0,123	0,043	0,076
Energia Intermediária	H ótima)	H ótima + 1 %	H ótima - 1 %	H ótima + 2 %	H ótima - 2 %
ϕ (graus)	18,218	10,117	22,005	21,319	31,582
Coesão (MPa)	0,116	0,089	0,120	0,071	0,145
Energia Modificada	H ótima)	H ótima + 1 %	H ótima - 1 %	H ótima + 2 %	H ótima - 2 %
ϕ (graus)	11,037	6,194	29,543	0,724	41,169
Coesão (MPa)	0,228	0,153	0,224	0,157	0,206

Tabela 22 – Parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo para a compactação Proctor manual com reuso.

Compactação Manual com Reuso					
Energia Normal	H ótima)	H ótima + 1 %	H ótima - 1 %	H ótima + 2 %	H ótima - 2 %
φ (graus)	19,200	25,608	3,479	7,306	18,570
Coesão (MPa)	0,099	0,072	0,131	0,097	0,136
Energia Intermediária	H ótima)	H ótima + 1 %	H ótima - 1 %	H ótima + 2 %	H ótima - 2 %
φ (graus)	17,544	24,223	22,208	29,418	38,261
Coesão (MPa)	0,109	0,085	0,117	0,070	0,136
Energia Modificada	H ótima)	H ótima + 1 %	H ótima - 1 %	H ótima + 2 %	H ótima - 2 %
φ (graus)	7,493	21,782	16,765	30,043	33,849
Coesão (MPa)	0,250	0,160	0,268	0,098	0,212

Tabela 23– Parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo para a compactação Proctor manual sem reuso.

Compactação Manual sem Reuso					
Energia Normal	H ótima)	H ótima + 1 %	H ótima - 1 %	H ótima + 2 %	H ótima - 2 %
φ (graus)	37,880	35,164	41,930	26,953	44,850
Coesão (MPa)	0,088	0,057	0,071	0,051	0,073
Energia Intermediária	H ótima)	H ótima + 1 %	H ótima - 1 %	H ótima + 2 %	H ótima - 2 %
φ (graus)	34,129	29,296	37,915	32,189	48,302
Coesão (MPa)	0,093	0,065	0,093	0,056	0,095
Energia Modificada	H ótima)	H ótima + 1 %	H ótima - 1 %	H ótima + 2 %	H ótima - 2 %
φ (graus)	45,128	21,164	44,450	40,547	50,761
Coesão (MPa)	0,112	0,139	0,146	0,087	0,179

Tabela 24 – Parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo para a compactação Proctor manual sem reuso 24h.

Compactação Manual sem Reuso 24h					
Energia Normal	H ótima)	H ótima + 1 %	H ótima - 1 %	H ótima + 2 %	H ótima - 2 %
φ (graus)	14,994	31,759	17,560	18,103	37,537
Coesão (MPa)	0,101	0,071	0,105	0,061	0,096
Energia Intermediária	H ótima)	H ótima + 1 %	H ótima - 1 %	H ótima + 2 %	H ótima - 2 %
φ (graus)	21,955	7,581	5,272	0,537	31,207
Coesão (MPa)	0,131	0,131	0,167	0,117	0,156
Energia Modificada	H ótima)	H ótima + 1 %	H ótima - 1 %	H ótima + 2 %	H ótima - 2 %
φ (graus)	50,794	32,554	29,215	11,853	35,432
Coesão (MPa)	0,185	0,171	0,268	0,152	0,269

Analisando-se os valores do intercepto coesivo para todas as variações de compactação x energia x umidade verifica-se que estes valores são bem elevados, variando de 40kPa e 268kPa. Como o solo estudado na pesquisa trata-se de um solo arenoso, os valores de intercepto coesivo obtidos são em termos de coesão aparente, já que nos solos arenosos há a influencia da coesão aparente. Esses valores dificilmente são atingidos em termos de coesão real, tais valores elevados devem-se provavelmente á atuação da sucção.

Verifica-se que o aumento da energia de compactação proporciona um acréscimo dos valores da coesão para os quatro tipos de compactação estudados, e com o aumento da umidade há o decréscimo da coesão. Esse comportamento nos valores de coesão é justificado pelo fato de que em solos arenosos a resistência ao cisalhamento é devido principalmente ao atrito, mas também pela influência da coesão aparente que é parcela da resistência ao cisalhamento de solos úmidos (parcialmente saturados). Esse tipo de coesão deve-se ao efeito da tensão capilar da água que atrai as partículas. Saturando-se totalmente o solo, esta parcela desaparece, dando o nome de aparente.

Analisando os valores do ângulo de atrito verifica-se que na maioria dos casos os corpos de prova que apresentaram maiores valores foram os moldados nas umidades inferiores a umidade ótima, ou seja, nas umidades $H_{ót} - 2\%$ e $H_{ót} - 1\%$ nos quatro tipos de compactação. Logo os resultados obtidos estão condizentes com os obtidos na literatura, pois segundo García *et al.* (2012) maiores forças de cisalhamento dos solos são alcançadas com umidade inferior a umidade ótima. Concluindo-se, portanto, que o efeito da umidade no enfraquecimento da resistência ao cisalhamento foi significativo. Ohu *et al.* (1986) relataram que a resistência ao cisalhamento de solos compactados é afetada por muitos fatores, incluindo a massa específica do solo, teor de umidade, energia aplicada para a compactação e tipo de solo.

Em alguns casos ocorreu uma discrepância de valores de ϕ a qual não era esperada. Na compactação mecânica, por exemplo, na energia normal, o valor de ϕ para $H_{ót} - 1\%$ foi bem inferior às demais umidades, comportamento não condizente ao supracitado. O mesmo comportamento ocorreu para a compactação com reuso – energia normal e compactação manual sem reuso 24h – energia intermediária. Este fato pode ser justificado em razão da aferição da carga que é muito rápida, tornando assim a leitura imprecisa, quando realizado o ensaio de RT, pois variações pequenas na leitura da carga, que são insignificativas nos valores de RT provocam grandes variações nos valores de ϕ quando estimados a partir dos ensaios de RT e RCS. Sendo assim, para uma obtenção mais precisa e correta dos parâmetros de resistência ao cisalhamento torna-se necessário ou o uso de uma aferição de leitura de carga digital, quando realizado o ensaio de RT ou a realização do ensaio tradicional de Cisalhamento Triaxial.

Esperava-se que com o aumento da energia de compactação houvesse o aumento dos valores de ângulo de atrito, pois quanto mais compacto o solo, maior o ângulo de atrito, mas de um modo geral esse comportamento também só foi observado nos corpos de prova moldados nas referidas umidades ($H_{ót} - 2\%$ e $H_{ót} - 1\%$). Pois de acordo com Adekalu *et al.* (2007) nos níveis de energia de compactação mais elevados ocorre aumento da massa específica e da força de cisalhamento, enquanto a força de cisalhamento diminuiu com o aumento da umidade no solo.

Verificou-se que a compactação que obteve maiores valores de ângulo de atrito foi a Compactação manual sem Reuso 24h, onde foram observados maiores ângulos de atrito na energia modificada, variando de $21,16^\circ$ à $50,76^\circ$, onde o maior valor foi obtido

na umidade $h_t - 2\%$. Esses resultados são justificados pela influência da sucção, pois foi observado por meio das curvas características do solo que quanto menor o teor de umidade maior é a sucção no solo. Segundo Adekalu *et al.* (2007) a taxa de aumento da resistência ao cisalhamento diminuiu com o aumento da umidade, essa diminuição é atribuída às menores forças delimitadoras devido à menor sucção. Mullins *et al.* (1990); McKyes *et al.* (1994) observaram que a sucção contribui para resistência à tração e para resistência ao cisalhamento do solo.

Segundo Dearman *et al.*, (1978) os solos de horizontes superficiais possuem propriedades de resistência muito ligadas aos processos pedológicos de formação. À medida que aumenta o grau de alteração do perfil devido à atuação do intemperismo, a resistência ao cisalhamento dos solos saprolíticos passa a condicionar o comportamento mecânico do perfil. Segundo Bastos (1991) a composição mineralógica mostrou influência sobre a resistência ao cisalhamento, principalmente nos solos saprolíticos do horizonte C.

Santos (1997) *apud* Bevilaqua, (2004) estudou os solos de Florianópolis, e ao analisar a unidade - PVg1- Podzólico Vermelho Amarelo substrato granito, com solos originados do granito Ilha (granito de textura grosseira, que origina solos bastante granulares), com amostras do horizonte C desse granito, concluiu que no estado natural, o valor da coesão apresentou uma variabilidade de 17,9 a 25,6 kN/m² e de 0 (zero) a 7 kN/m² para a condição inundada. O ângulo de atrito interno, para as mesmas condições no estado natural variou de 36 a 37° e no inundado ficou em torno de 35°. Em suas conclusões, Bevilaqua (2004) definiu que os valores para os ângulos de atrito obtidos não sofreram tanta influência da inundação, apresentando perdas pouco significativas. Para teores de umidade natural os valores do ângulo de atrito variaram de 33,2 a 54,6°. Com a inundação esses valores diminuiram para 32 a 43,3°.

Comparando os resultados obtidos para o ângulo de atrito na presente pesquisa com os obtidos por Santos (1997) verifica-se que os resultados obtidos pelos autores apresentaram perdas pouco significativas quando inundados, diferentemente dos valores obtidos na presente pesquisa, que de um modo geral apresentaram grandes perdas no estado saturado ($H_t+2\%$) quando comparados com umidades inferiores à ótima. Essa diferença entre os resultados pode ser justificada em função do ensaio realizado, já que

nas pesquisas citadas foi feito o ensaio de cisalhamento triaxial, e nesta pesquisa foi feita uma estimativa dos parâmetros a partir dos resultados de RT e RCS.

4.5.5 Módulo de Resiliência

O estado de tensões é um dos fatores que mais influenciam no comportamento resiliente dos materiais granulares. Para materiais granulares os modelos matemáticos que melhor representam a dependência do Módulo de Resiliência ao estado de tensões são definidos principalmente em função das tensões confinantes (σ_3) ou da soma das tensões principais ($\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$) (Medina, 1997).

A escolha do modelo deve ser de tal forma que descreva com a maior fidelidade possível o comportamento resiliente de um solo a fim de avaliar corretamente a deformabilidade deste material. Entre os modelos existentes, há aqueles que relacionam o MR com a tensão desvio (σ_d), com a tensão de confinamento (σ_3) conforme apresentado nas equações (13) e (14), e o modelo composto representado pela equação (15) em função das tensões de confinamento e desvio simultaneamente e representado por gráfico tridimensional. Para plotar a superfície definida pelo modelo composto foi utilizado o programa LAB Fit.

$$MR = k_1 \times \sigma_3^{k_2} \quad (13)$$

$$MR = k_1 \times \sigma_d^{k_2} \quad (14)$$

$$MR = k_1 \times \sigma_3^{k_2} \times \sigma_d^{k_3} \quad (15)$$

Onde:

MR: Módulo de Resiliência;

σ_d : tensão desvio;

σ_3 : tensão de confinamento;

k: parâmetros de modelagem que definem numericamente cada modelo.

A Tabela 25 apresenta os resultados do Módulo de Resiliência, respectivamente, para as compactações mecânica, manual com reuso, manual sem reuso e manual sem

reuso 24h, na energia intermediária, onde são apresentados os parâmetros de modelagem (valores de k) e os coeficientes de correlação (R^2) dos dois modelos clássicos utilizados e do modelo composto. As curvas obtidas a partir dos modelos estudados encontram-se no apêndice deste volume. Este ensaio foi realizado apenas na energia intermediária, devido esta ser a mais utilizada nas especificações de projeto da área de pavimentação.

Tabela 25 – Resumo dos valores de k1, k2 e k3 obtidos pela regressão linear dos três modelos estudados.

Compactação Mecânica – Energia Intermediária										
Umidades	MR=K1*σ3^{K2}			MR=K1*σd^{K2}			MR=K1*σ3^{K2}*σd^{K3}			
	K1	K2	R ²	K1	K2	R ²	K1	K2	K3	R ²
Hót – 2%	398	0,08	0,32	322	0,006	0,003	425	0,21	-0,14	0,82
Hót – 1%	1133	0,45	0,90	572	0,26	0,47	1289	0,60	-0,13	0,91
Hótima	358	0,12	0,45	269	0,02	0,02	392	0,28	-0,17	0,92
Compactação Manual com Reuso – Energia Intermediária										
Umidades	MR=K1*σ3^{K2}			MR=K1*σd^{K2}			MR=K1*σ3^{K2}*σd^{K3}			
	K1	K2	R ²	K1	K2	R ²	K1	K2	K3	R ²
Hót – 2%	845	0,17	0,59	581	0,05	0,07	964	0,37	-0,20	0,98
Hót – 1%	567	0,02	0,01	470	-0,06	0,24	654	0,24	-0,22	0,97
Hótima	846	0,26	0,65	514	0,10	0,16	997	0,46	-0,18	0,86
Hót + 1%	390	0,12	0,17	257	-0,03	0,02	472	0,45	-0,33	0,82
Hót + 2%	306	-0,05	0,04	258	-0,14	0,05	370	0,26	-0,31	0,91
Compactação Manual sem Reuso – Energia Intermediária										
Umidades	MR=K1*σ3^{K2}			MR=K1*σd^{K2}			MR=K1*σ3^{K2}*σd^{K3}			
	K1	K2	R ²	K1	K2	R ²	K1	K2	K3	R ²
Hót – 2%	1064	0,13	0,57	808	0,04	0,08	1187	0,28	-0,14	0,90
Hót – 1%	527	0,001	8*10 ⁻⁵	447	-0,07	0,31	606	0,22	-0,22	0,94
Hótima	526	0,04	0,07	428	-0,04	0,09	599	0,25	-0,20	0,92
Hót + 1%	236	-0,24	0,34	238	-0,30	0,80	247	0,15	-0,47	0,89
Hót + 2%	317	-0,02	0,005	252	-0,12	0,37	380	0,31	-0,33	0,92
Compactação Manual sem Reuso 24h – Energia Intermediária										
Umidades	MR=K1*σ3^{K2}			MR=K1*σd^{K2}			MR=K1*σ3^{K2}*σd^{K3}			
	K1	K2	R ²	K1	K2	R ²	K1	K2	K3	R ²
Hót – 2%	512	-0,07	0,12	464	-0,14	0,65	597	0,19	-0,26	0,93
Hót – 1%	635	-0,02	0,02	565	-0,08	0,44	716	0,17	-0,19	0,94
Hótima	753	0,09	0,33	582	0,005	0,001	850	0,28	-0,18	0,91
Hót + 1%	485	-0,07	0,15	449	-0,12	0,69	565	0,16	-0,23	0,94
Hót + 2%	294	-0,07	0,07	245	-0,17	0,57	375	0,30	-0,36	0,95

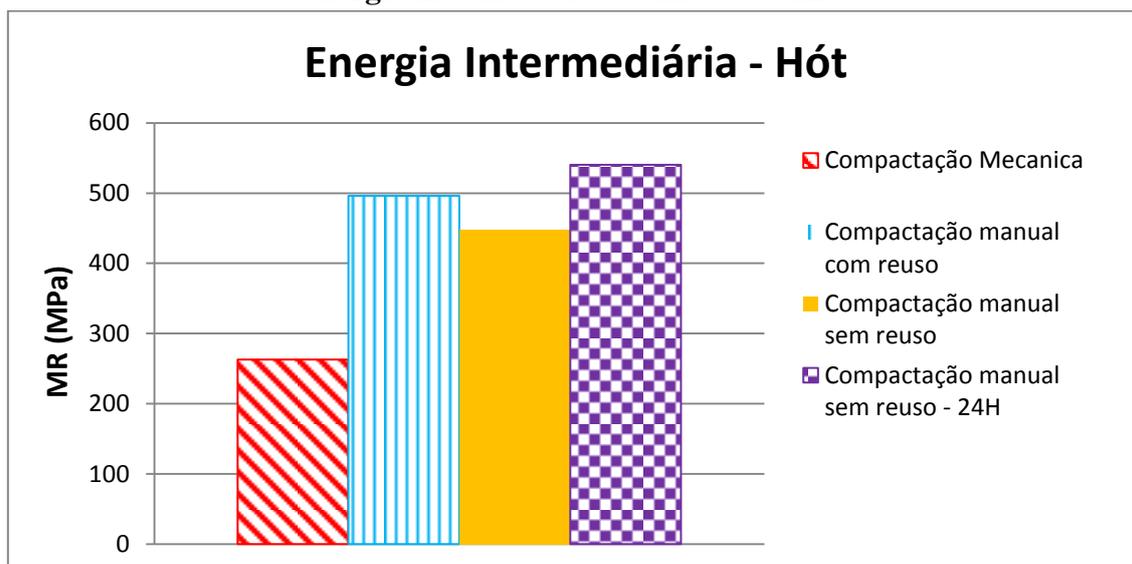
Analisando os parâmetros dos diferentes modelos, verificou-se que os coeficientes de correlação relativos aos modelos clássicos em função da tensão desvio e em função da tensão de confinamento não encontraram grande representatividade para os quatro tipos de compactações utilizadas.

O coeficiente de determinação R^2 foi utilizado como critério para avaliar os modelos, já que este parâmetro é adequado para estimar a acurácia do ajuste estatístico alcançado pelo modelo utilizado. Segundo o Guia de Dimensionamento de Pavimentos da AASHTO (2002), valores de R^2 superiores a 0,90 indicam que as equações são adequadas para representar o módulo de resiliência. Observa-se Tabela 26 que o Modelo Composto é o que apresenta maior porcentagem de ensaios com $R^2 > 0,90$. Os modelos clássicos apresentaram valores de R^2 bem abaixo do proposto. Desta forma, para as quatro compactações utilizadas na pesquisa, de todos os modelos investigados, o que melhor representou o comportamento resiliente do solo foi o modelo composto.

Analisando os coeficientes de regressão obtidos em todas as compactações, pode-se verificar que estes tiveram uma menor variação na Compactação manual sem reuso 24h, logo esta representa melhor o estado de tensão ao qual está submetido o solo.

A Figura 85 apresenta os valores de MR para os quatro tipos de compactação Proctor, para os corpos de prova moldados na umidade ótima e na energia intermediária. Os valores de MR presente na Figura 85 foram obtidos a partir do último par de tensões do ensaio de MR de cada compactação, por este ser o esforço mais severo.

Figura 85 – Valores de MR para os tipos de compactação Proctor moldados na energia intermediária e umidade ótima.



Considerando os corpos de prova moldados na energia intermediária e nas umidades ótimas obtidas nos quatro ensaios de compactação, verifica-se que a compactação manual sem reuso 24 h forneceu os melhores resultados de MR seguindo a mesma tendência dos demais ensaios mecânicos.

Observa-se por meio da Figura 85 que o valor de MR foi bem inferior para a compactação mecânica, em relação às demais compactações, fato este que poderia ser justificado em função da influência do tamanho do corpo de prova. Mas verificou-se que a relação altura/diâmetro obtidas nos corpos de prova para as quatro compactações utilizadas foi 2, logo a relação obtida foi ideal, não justificando a diferença no valor de MR para a compactação mecânica.

5.0 CONCLUSÕES

O solo utilizado nesta pesquisa foi classificado segundo a metodologia HRB (Highway Research Board) como areia fina com silte não plástico (A-2-4). A composição deste apresentou predominância de sílica, óxido de alumínio e de ferro e traços de outros materiais. Baseado nestes dados e em análises químicas (pH e CTC) verificou-se que o solo estudado nesta pesquisa é saprolítico. Ou seja, solo resultante da decomposição e/ou desagregação "in situ" da rocha matriz pela ação das intempéries (chuvas, insolação, geadas), mantendo ainda de maneira nítida a estrutura da rocha que lhe deu origem. Portanto, o comportamento do solo saprolítico está relacionado à composição químico-mineralógica das rochas de origem e ao intemperismo por elas sofrido.

Solos saprolíticos, tal qual o observado nesta pesquisa, sofrem desagregações quando submetidos a solicitações, no caso a energia de compactação. Analisando os resultados obtidos nessa pesquisa pode-se constatar que a energia de compactação exerce uma influência bastante expressiva na variação dos resultados. O aumento da energia de compactação promoveu incrementos significativo nos valores das massas específicas secas máximas e nos resultados mecânicos em termos de Índice de Suporte Califórnia, Resistência a Compressão Simples (RCS), Resistência a Tração por Compressão Indireta ou Diametral (RT).

Constatou-se ainda que o tipo de compactação utilizado exerceu uma influência significativa nos resultados, pois de um modo geral os valores de ISC, RT, RCS, MR e os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo obtidos na compactação manual sem reuso 24h foram superiores as demais compactações. Este fato pode ser justificado em função do mecanismo da referida compactação, pois durante as 24 horas parte da água migra para o interior dos agregados reduzindo a umidade capilar e aumentando a energia capilar, o que implica em melhor comportamento mecânico. Além disso, verificou-se que quanto maior a energia de compactação empregada, maior será a influência do tipo de compactação nos resultados mecânicos.

Em relação à umidade de compactação verificou-se que os corpos de prova moldados nas umidades inferiores à ótima foram os que obtiveram melhores resultados mecânicos. Este fato foi justificado em razão da ação da sucção, pois por meio do estudo das curvas características do solo foi verificado que esta tem influência significativa nos resultados mecânicos e que quanto menor o teor de umidade maior é a sua influência para ambas as compactações utilizadas. O estudo da variação de umidade foi importante para verificar o quão rigoroso deve ser o controle do teor de umidade de compactação durante a compactação em campo, uma vez que teores de umidade, superiores em até 2% da umidade ótima, podem provocar reduções de até 100% de resistência mecânica.

Conclui-se que embora a norma da NBR 7182/86 permita que a compactação seja executada de quatro formas distintas, estas podem ter influências significativas nos resultados, principalmente na energia modificada. Portanto, devem ser realizados estudos suplementares, como por exemplo, realizar a compactação sem secagem prévia e sem destorroamento prévio para correlacionar os dados de laboratório com o observado em campo a fim de escolher o método que melhor simule o comportamento em campo.

5.1 Sugestões para Futuras Pesquisas

Os estudos realizados evidenciaram a importância dos tipos e de parâmetros de compactação Proctor no comportamento mecânico do solo. Com a finalidade de ampliar os conhecimentos na área, sugere-se:

- analisar, em escala micro morfológica a estrutura gerada pelos quatro métodos de compactação empregados através de microscopia eletrônica de varredura (MEV), para fins de avaliação da ocorrência de mudanças microestruturais que venham consubstanciar os resultados obtidos nos ensaios de compactação e de resistência mecânica;
- realizar um estudo comparativo de módulos de resiliência em corpos de prova moldados nas energias normal e modificada;

- estudar a influência de outros parâmetros de compactação (tempo de estocagem, número de camadas, tipo de compactação) nos resultados mecânicos;
- construir um trecho experimental com os parâmetros ótimos de compactação obtidos a partir dos quatro tipos de compactação Proctor e comparar a $\gamma_{s_{max}}$ com a $\gamma_{s_{insitu}}$;
- analisar o coeficiente de permeabilidade a partir da moldagem de corpos de prova nos quatro tipos de compactação Proctor;
- realizar um estudo comparativo entre dados de compactações realizadas em campo com o observado em laboratório.
- realizar a compactação sem secagem prévia do solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984). NBR 6508. *Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica e os procedimentos para determinação do Limite de Plasticidade e Limite de Liquidez*. Rio de Janeiro.

_____. (1984). NBR 6459. *Solo - Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro.

_____. (1984). NBR 7180. *Solo - Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro.

_____. (1984). NBR 7181. *Solo – Análise granulométrica*. Rio de Janeiro.

_____. (1986). NBR 7182. *Solo - Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro.

_____. (1986). NBR 6457. *Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*. Rio de Janeiro.

_____. (1990). NBR 12025. *Solo-cimento – Ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO (2002). *Guide for design of pavement structures*. Washington, EUA: American Association of State Highway and Transportation Officials

_____. (2007). AASHTO T 307-99 *Standard Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials*. Washington, EUA: American Association of State Highway and Transportation Officials.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. (2003). ASTM D 5298. *Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper*.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (1994). DNIT – ME 162/94 *Solos – ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas*. Rio de Janeiro.

_____. (1994). DNIT – ME 049/94. *Solos – determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas. Método de ensaio*. Rio de Janeiro.

_____. (1994). DNIT – ME 181/94. *Solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio*. Rio de Janeiro.

_____. (2006). DNIT – ME. *Manual de Pavimentação. Diretoria de Planejamento e Pesquisa*. Rio de Janeiro.

_____. (2010). DNIT – ME 136/10. *Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio*. Rio de Janeiro.

_____. (2010). DNIT – ME 134/10. *Pavimentação asfáltica – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio*. Rio de Janeiro.

_____. (2103). DNIT – ME 164/13. *Solos – ensaio de compactação utilizando amostras não trabalhadas. Método de ensaio*. Rio de Janeiro.

ADEKALU, K. O.; OKUNADE D. A. AND OSUNBITAN, J. A. 2007. Estimating trafficability of three Nigerian agricultural soils from shear strength-density-moisture relations. *International Agrophysics 21: 1- 5*.

AGUIAR, L. A. (2010). *Contribuições para a Análise do Comportamento Mecânico de Solos Compactados para uso em Barragens*. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-184/10, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 127p.

AGUIAR, L. A. (2014). *Análise do Comportamento Mecânico de Solos Compactados e Estabilizados Quimicamente para uso em Barragens [Distrito Federal]*. xxxii, 281 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Geotecnia). Tese de Doutorado - Universidade de Brasília.

ALONSO, E. E.; GENS, A.; HIGHT, D. W. (1987). Special problems soils. General Report. In: *9° European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Proceedings. Rotterdam, A.A. Balkema, pp. 5.1- 5.60. Dublin.

BADILLO, J.; RODRÍGUEZ, R. (1976). *Mecánica de suelos: fundamentos de la mecánica de suelos*. México, 3° ed, 642p.

BALMACEDA, A. R. (1991) *Suelos compactados - un estudio teorico y experimental*. Universitat Politècnica de Catalunya. Tesis Doctoral. Barcelona.

BARROSO, S. H. A. (1996). *Estudo do comportamento de solos artificiais através da absorção de azul de metileno*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, SP. 124p.

BASTOS, C. A. B. (1991) *Mapeamento e Caracterização Geomecânica das Unidades Geotécnicas de Solos Oriundos dos Granitos, Gnaisses e Migmatitos de Porto Alegre*. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre - RS.

BEVILAQUA, F. Z. (2004). *Estudo do comportamento geomecânico de solos residuais de granito de Florianópolis*. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

BELL, J.R. (1977). Compaction energy relationships of cohesive soils. *Transportation Research Record*, n° 641, pp. 29-34.

BROWNE, M. (2006). *Feasibility of Using a Gyrotory Compactor to Determine Compaction Characteristics of Soil*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Estado de Montana, Bozeman, Montana.

BURMISTER, D. M. (1964). Environmental factors in soil compaction. *Symposium Presented at the 67th Annual Meeting ASTM*. Compaction of Soils; ASTM (American Society of Testing and Materials), pp. 47-66. Chicago.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; CRISPEL, J. J.; MEUSSENS, C.; NARDONE, A. (1987). *La recosntituion dès éprouvettes em laboratoire: théorie et pratique opératoire*. Paris, França: Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Rapport de recherche LPC N° 145, 54p.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. ; PEREIRA, J. H. F. (2002). Une approche pour la description des propriétés des sols non saturés. In: *3th International Conference On Unsaturated Soils, 2002*, Recife. Unsaturated Soils. Lisse: A.A. Balkema, 2002. v. 2. p. 501-506.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; PEREIRA, J.H.F; GUIMARÃES, F. C. (2002) Curves de rétention d'eau d'un profil d'altération. In: *Third International Conference on Unsaturated Soils – UNSAT 2002* 10-13 March, Recife, Brazil.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. & LEROUEIL, S.(2004). *Curva Característica de Sucção Transformada*. Solos e Rochas, 27(3): 231-242.

CERNICA, J. N. (1995). *Geotechnical Engineering: Soil Mechanics*. John Wiley & Sons, Inc. New York, 454 pp.

CHANDLER, R. J.; CRILLY, M. S.; MONTGOMERY-SMITH, G. 1992). A low-Cost method of assessing clay desiccation for low-rise buildings. *Proceeding of the Institute of Civil Engineering*, n° 2, pp. 82-89.

CRISPIN, F. A. (2007). *Compactação de solos: Influência de métodos e de parâmetros de compactação na estrutura dos solos*. Dissertação apresentada a Universidade Federal de Viçosa do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil para a obtenção do Título de Magister Scientiae. Minas Gerais.

CRONEY, D. (1952). The movement and distribution of water in soils. *Geotechnique*. Vol 3, pp. 1-16.

CRUZ, P. L. (1967). *Propriedades de engenharia de solos residuais compactados da região Centro - Sul do Brasil*. Escola Politécnica, USP, pp. 21-29. São Paulo.

DANTAS, G. H. S. (2013). *Estudo do emprego do Compactador Giratório Superpave na compactação de um solo argiloso*. Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes. São Carlos.

DEARMAN, W. R., BAYNES, F. J., IRFAN, T. Y. (1978) Engineering Grading of Weathered Granite. *Engineering Geology*, v.12, n.4, p.345-374.

DELGADO, A. K. C. (2007). *Estudo do Comportamento Mecânico de solos tropicais característicos do Distrito Federal para uso na Pavimentação Rodoviária*. Tese de Doutorado submetida ao Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília.

FREDLUND, D. G.; XING, A. (1994). Equations for the Soil-Water Characteristic Curve. In: *Canadian Geotechnical Journal*, pp. 521-532.

FREDLUND, D. G. (2000). The 1999 R. M. Hardy Lecture: The implementation of unsaturated soil mechanics into geotechnical engineering. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(5): 963–986. doi:10.1139/cgj-37-5-963.

FUMIÓ, B. L. C. (2004). *Solos não saturados e drenagem de camadas próximas da superfície de vias e pavimentos*. Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 96p.

GARCÍA, A. J. H.; JAIME, Y. N. M.; CONTRERAS, A. M. Z.; BASTARDO, L. D. S. e LLOVERA, F. A. S. (2012). *Savanna soil water content effect on its shear strength-compaction relationship*. Universidad de Oriente, Departamento de Ingeniería Agrícola, Núcleo de Monagas, Maturín, estado Monagas, Venezuela.

GEHLING, W. Y. Y.; CERATTI, J. A. P.; BICA, A. V. D.; NÚÑEZ, W. P.; RODRIGUES, M. R. (1997). Influência da sucção nos módulos de resiliência obtidos em laboratório e em campo para um solo típico de subleito de pavimento do Rio Grande do Sul”. *Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados*. Editores T.M.P. de Campos e E.A Vargas, vol.1, pp. 105-112. Rio de Janeiro.

GUEDES, S. B. (2013). *Estudo do desempenho mecânico de um solo-cimento microreforçado com fibras sintéticas para uso como revestimento primário em estradas não pavimentadas*. Tese de Doutorado Apresentada ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco.

GUIMARÃES, R. C. (2002). *Análise das propriedades e comportamento de um perfil de solo laterítico aplicada ao estudo do desempenho de estacas escavadas*. Dissertação de mestrado. Publicação nº G. DM – 090A/02, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 183p.

HARMAN, T.; BUKOWSKI, J. R.; MOUTIER, F.; HUBER, G.; MCG SENNIS, R. (2002). History and Future Challenges of Gyrotory Compaction - 1939 to 2001. *Transportation Research Record 1789*.

HOLTZ, R.D. and KOVACS, W.D. (1981). An introduction to Geotechnical Engineering, Prentice-Hall Inc. *Englewood Cliffs*, New Jersey, 1981. pp. 34.

JACINTHO, E. C. (2005). *Estudo do Comportamento de Misturas Solo-Emulsão para uso em Barragens*. Dissertação de Mestrado, Publicação G. DM-132/05, Departamento de Engenharia e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 160p.

JACINTHO, E. D.; CAMAPUM DE CARVALHO, J.; CARDOSO, F. B. F.; GUIMARÃES, R. C. (2012). Perfil de intemperismo e infiltração. In: *Tópico sobre infiltração: teorias e práticas aplicadas a solos tropicais*. Série Geotecnia, Universidade de Brasília, v.4. 2012.

JIANQIANG Z.; JING, L. (2000). Experimental study on soil compaction characteristics and shearing strength when changing sloping fields into terraced land in South Shaanxi Province, China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 16 (2): 36-40.

KLINSKY, L. M. G.; BARDINI, V. S. S.; FABBRI, G. T. P. (2014). *Efeito da adição de areia de fundição residual e cal a solos no módulo de resiliência*. TRANSPORTES, v. 22, n. 2, p. 1–10. Departamento de Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo.

LAMBE, T. W. (1958). *The structure of compacted clay*. Proceedings of the American Society of Civil Engineers. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. Vol. 84,n. SM2, Part 1, May.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. (1979). *Soil mechanics, SI Version*. John Wiley & Sons.

LEANDRO, R. P. (2005). *Estudo laboratorial acerca da possibilidade de aproveitamento da cinza pesada de termelétricas em bases e subbases de pavimentos flexíveis*. Dissertação apresentada à Escola de engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.

LIMA, M. C. (2003). *Degradação físico-química e mineralógica de maciços junto às voçorocas*. Tese de Doutorado, publicação G. TD-17^a/03, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 336p.

LUCENA, L. C. F. L. (2009). *Verificação da Influência de Resíduos Industriais como Fíler em Misturas Asfálticas sob o Efeito da Presença D'Água*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental – Universidade Federal de Campina Grande.

LUCENA, L. C. F. L. (2012). *Estudo da aplicação da mistura solo-lodo em base e subbase de pavimentos*. Tese de doutorado em Engenharia Civil – Universidade Federal de Pernambuco.

MACHADO, S. L.; ZUQUETE, L. V. (2004). Transporte de massa e mecanismo de retenção em solos não saturados. In: *Simpósio de Mecânica dos Solos Não Saturados*, São Carlos. Anais: ABMS v2 p 545-572. São Carlos – SP.

MARINHO, F. A. M. (2005). Os solos não saturados: *Aspectos teóricos ,experimentais e aplicados*. Texto apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para o Concurso de Livre-Docência na especialidade "Geomecânica" do Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações.

- MARINHO, F. A. M. (1995-a). A técnica do papel filtro para a medição de sucção. In: *Encontro sobre Solos Não Saturados*, pp.112-125. Porto Alegre.
- MARINHO, F. A. M. (1995-b). Cavitação e a medição direta de sucção. In: *Encontro sobre Solos Não Saturados*, pp. 126-142. Porto Alegre.
- MARINHO, F. A. M. (1997). Medidas de sucção em solos. In: *Encontro sobre Solos Não Saturados*, Rio de Janeiro. III Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, T. M. P. de Campos & E. A. Vargas Jr (eds), Freitas Bastos Editora, Rio de Janeiro, v. 2, p 373-397.
- MARQUES, G. L. O. (2004). *Utilização do Módulo de Resiliência como Critério de Dosagem de Mistura Asfáltica; Efeito da Compactação por Impacto e Giratória*. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE, Rio de Janeiro.
- MARTÍNEZ, G. S. S. (2003). *Estudo do comportamento mecânico de solos lateríticos da formação Barreiras*. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, RS, 266p.
- MASSAD, F. (2003). *Obras de terra: curso básico de geotecnia*. São Paulo: Oficina de Textos, 170 p.
- MCKYES, E.; NYAMUGAFATA, P.; NYAMAPENE, K. W. (1994). Characterization of cohesion, friction and sensitivity of two hardsetting soil from Zimbabwe. *Soil and Tillage Research* 29: 357-366.
- MEDEIROS, D. F. (2009). *Influência da Granulometria nas Características Mecânicas de Misturas Asfálticas para Aeródromos*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental – Universidade Federal de Campina Grande.
- MEDINA, J. (1997). *Mecânica dos Pavimentos*. 1º ed. Rio de Janeiro, Editora UFRJ.
- MIGUEL, M. G.; TEIXEIRA, R. S.; PADILHA, A. C. C. (2006). Soil-Water Characteristic Curves for the Lateritic Soil of the City of Londrina Region. *Revista de Ciência & Tecnologia*, Londrina, v. 12, n. 24, p. 63-74.
- MITCHELL, J. K. (1964). Panel discussion on compaction, testing, and test results. *Compaction of Soils. American Society for Testing and Materials*, pp. 80-135. Chicago.
- MULLINS, C. E.; MACLEOD, D. A.; NORTHCOTE, K. H.; TISDALL, J. M.; YOUNG, I. M. (1990). Hardsetting soils: behavior, occurrence and management. *Advances in Soil Science* 11: 37-108.
- NETO, P. M. S.; CARVALHO, J. C. (1995). Métodos para medir a sucção em solos não saturados. *Encontro sobre Solos Não Saturados*, pp. 143-158. Porto Alegre.
- NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. (1995). *Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos*. Ed. Villibor, São Paulo, SP, 240p.

NOGUEIRA, J. F. (2005). *Análise da Influência do Fluxo por Capilaridade na degradação físico-químico do solo*. Dissertação de Mestrado em Geotecnia – Universidade de Brasília.

OHU, J. O.; RAGHAVAN, G. S. V.; MCKYES, E.; MEHUYS, G. (1986). Shear strength prediction of compacted soils with varying added organic matter contents. *American Society of Agricultural Engineers*, St. Joseph, Michigan. Transactions of the ASAE 29 (2): 351- 360.

PERAÇA, V. (2007). *Qualificando solos para revestimentos primários de rodovias: uma abordagem baseada nas mecânicas dos solos e dos pavimentos*. Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto alegre.

PHILLIP, A. W.; CAMERON, D. A. (1995). The influence of soil suction on the resilient modulus of expansive soil subgrade. *Conference International on Unsaturated Soils*. E. E. Alonso & P. Delage, vol. 1, pp.171-176. Paris.

PING, W. V.; LEONARD, M.; YANG, Z. (2003a). *Laboratory Simulation of Field Compaction Characteristics (Phase I)*. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade do Estado da Florida. Tallahassee, Florida.

PING, W. V.; XING, G.; LEONARD, M., E YANG, Z. (2003b). *Evaluation of Laboratory Compaction Techniques for Simulating Field Compaction (Phase II)*. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade do Estado da Florida. Tallahassee, Florida.

PINTO, C. S. (2006). *Curso Básico de Mecânica dos solos*. 3ª edição. São Paulo: Oficina de Textos, 355p.

RICARDO, H. S.; CATALANI, G. (1990). *Manual prático de escavação*. Editora PINI.

RICHARDS, B. G.; EMERSON, W. W.; PETER, P. (1986). Discussion of Evaluation of soil suction components by T. B. Edil and S. E. Motan. *Geotechnical Testing Journal, ASTM*, pp. 41-47. Philadelphia.

RICO, A.; DEL CASTILLO, H. (1976). *La ingeniería de suelos en las vías terrestres*. México: Editorial Limusa, vol. 1, 459 p.

RODRIGUES, M. R. (1997). *Influência da sucção no módulo de resiliência do solos típicos de subleito de pavimentos do Rio Grande do Sul*. Tese de mestrado submetida ao corpo docente do Curso de Pós-Graduação de Engenharia Civil Escola da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

RÖHM, S. A. *Solos não-saturados*. (1997). Monografia Geotécnica no. 4. Publicação 081/93, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Geotecnia.

SANTOS, K. P. (2012). *Estudo da Incorporação de Argilas Montmorilonitas como Modificador em Cimentos Asfálticos de Petróleo*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental – Universidade Federal de Campina Grande.

SANTOS, G.T. (1997) *Integração de Informações Pedológicas, Geológicas e Geotécnicas Aplicadas ao Uso do Solo Urbano em Obras de Engenharia*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre - RS.

SEED, H. B.; CHAN, C. K. (1959). *Structure and strength characteristics of compacted clays*. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*. American Society of Civil Engineers.

SEED, H. B.; CHAN, C. K.; LEE, C. E. (1962). Resilience characteristics of subgrade soils and their relation to fatigue failures in asphalt pavements. International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, pp. 1-23. University of Michigan, Ann Arbor. Michigan.

SENÇO, W. (1997). *Manual de técnicas de pavimentação*. Editora PINI, Vol. 1.

SIVRIKAYA, O.; KAYADELEN, C.; CECEN, E. (2013). *Prediction of the compaction parameters for coarse-grained soils with fines content by mlr and gep*. *Acta geotechnica slovenica*.

SOBREIRA, D. S. V. (2014). *Comparação entre os métodos de compactação por impacto e por amassamento*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande.

SOUZA, L. J. S. (2012). *Estudo das Propriedades Mecânicas de Misturas Asfálticas com Cimento Asfáltico de Petróleo Modificado com Óleo de Mamona*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental – Universidade Federal de Campina Grande.

SOUZA JUNIOR, J. D. (2005). *Efeito da Energia de Compactação em Propriedades dos Solos utilizados na Pavimentação do Estado do Ceará*. Dissertação de mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia dos Transportes, universidade Federal do Ceará. Fortaleza.

TAN, Y.; WANG, S.; CHEN, Y. (2005). Soil-water characteristic curve study. *The second national symposium on unsaturated soil*, Hangzhou: Zhejiang University.

VARGAS, M. (1977). *Introdução à Mecânica dos Solos*. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil.

VAN GENUCHTEN, M. T. (1980). *A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils*. *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 44, pp. 892-898..

VANAPALLI, S. K.; FREDLUND, D. G.; PUFAHL, D. E. (1999). The influence of soil structure and stress history on soil-water characteristic of a compacted till. *Geotechnique*, v.49, n.2, p. 143-159.

VENKATARAMA REDDY, B. V.; JAGADAISH, K. S. (1993). The static compaction of soils. *Géotechnique* 43, n°2, 337-341.

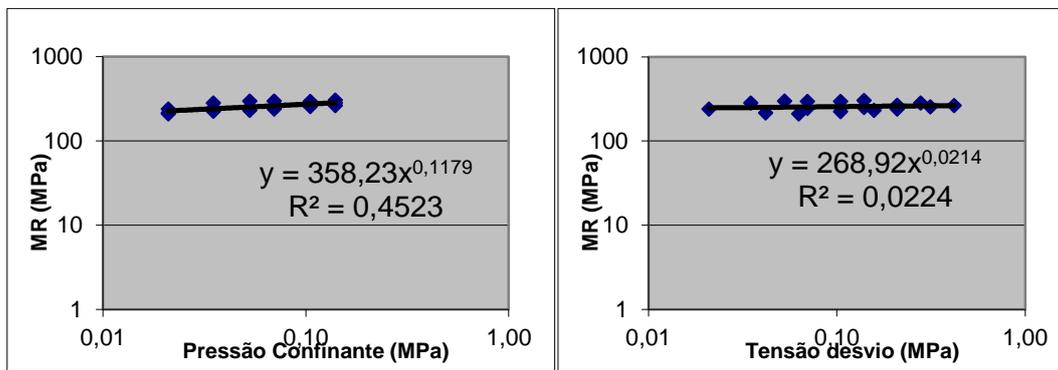
WANG, M.; HUANG, C. (1984). Soil compaction and permeability prediction models. *ASCE J. of Environ. Eng.*, Vol. 110, No. 6, pp. 1063-1083.

WERK, S. M. S. (2000). *Estudo da Influência dos Métodos de Compactação no Comportamento Resiliente de Solos*. Dissertação apresentada a Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

ZHOU, J. (2005). Research summary about main influence factors of unsaturated soil water characteristic curve. *The 2nd National Symposium on Unsaturated Soil*, Hangzhou: Zhejiang University.

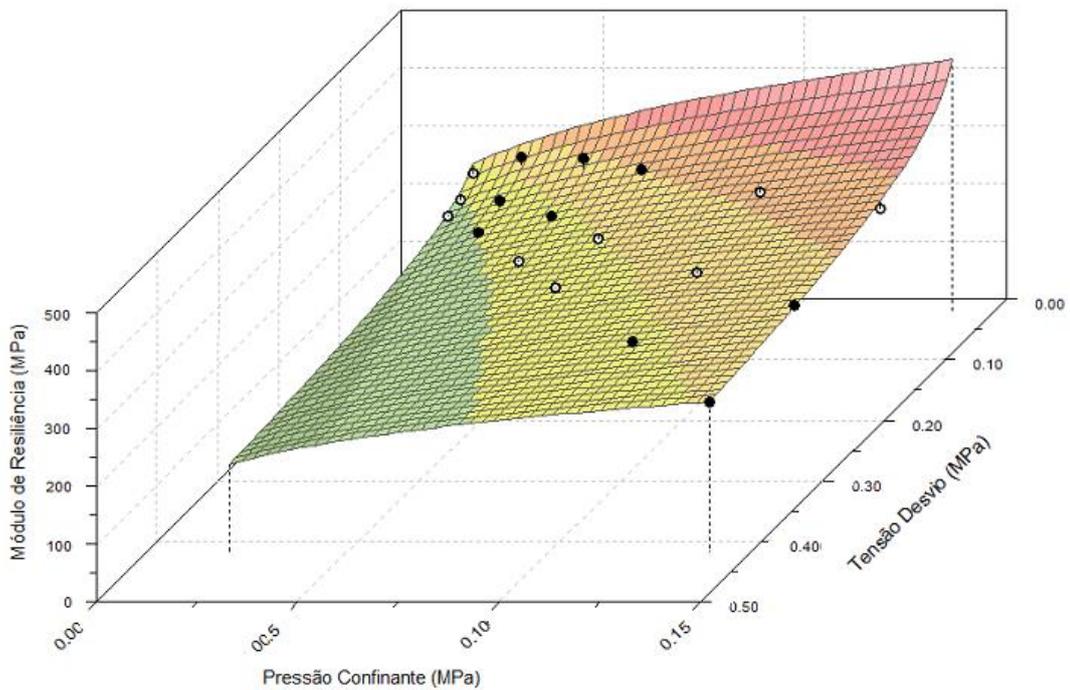
APÊNDICE A – Gráficos de Módulo de Resiliência das Compactações – Mecânica, Manual com reuso, Manual sem reuso e Manual sem reuso 24h – em função dos Modelos Clássicos (a) MR X Tensão de Confinamento (b) MR X Tensão de Desvio e em função do Modelo Composto (c) MR X Tensão de Confinamento X Tensão de Desvio.

Figura 1 – Módulo de Resiliência da Compactação Mecânica - Hótima em função dos Modelos Clássicos (a) MR X Tensão de Confinamento (b) MR X Tensão de Desvio e em função do Modelo Composto (c) MR X Tensão de Confinamento X Tensão de Desvio.



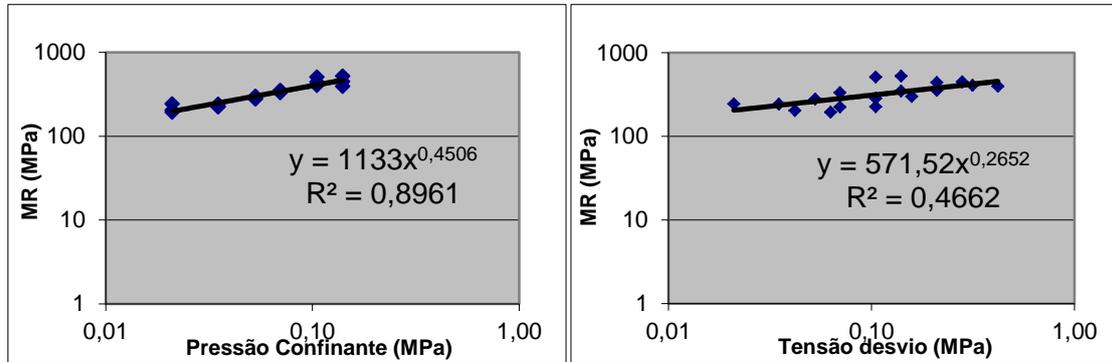
(a)

(b)



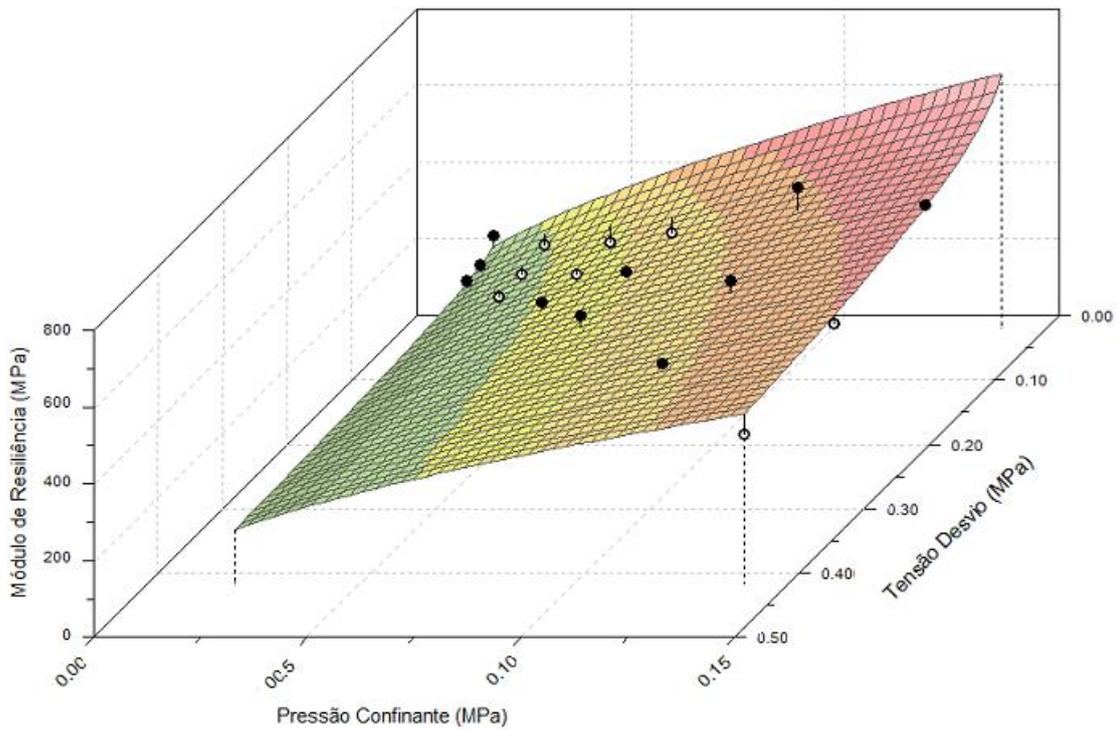
(c)

Figura 2 – Módulo de Resiliência da Compactação Mecânica - Hót – 1% em função dos Modelos Clássicos (a) MR X Tensão de Confinamento (b) MR X Tensão de Desvio e em função do Modelo Composto (c) MR X Tensão de Confinamento X Tensão de Desvio



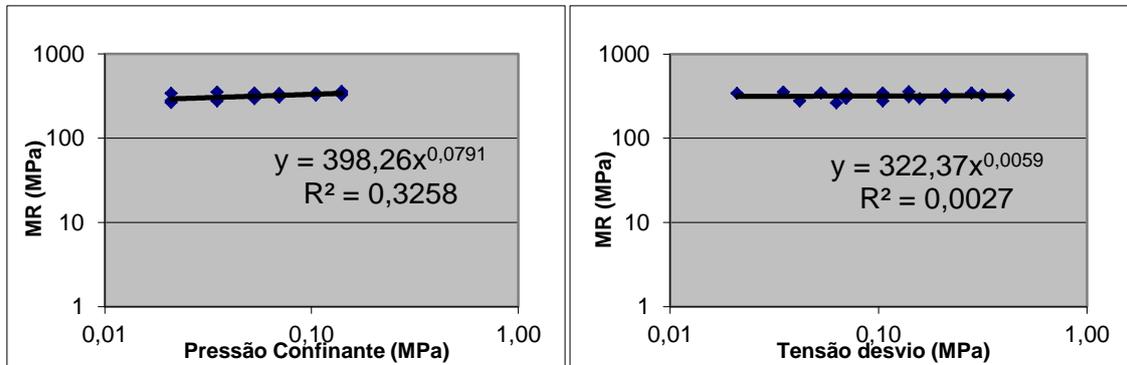
(a)

(b)



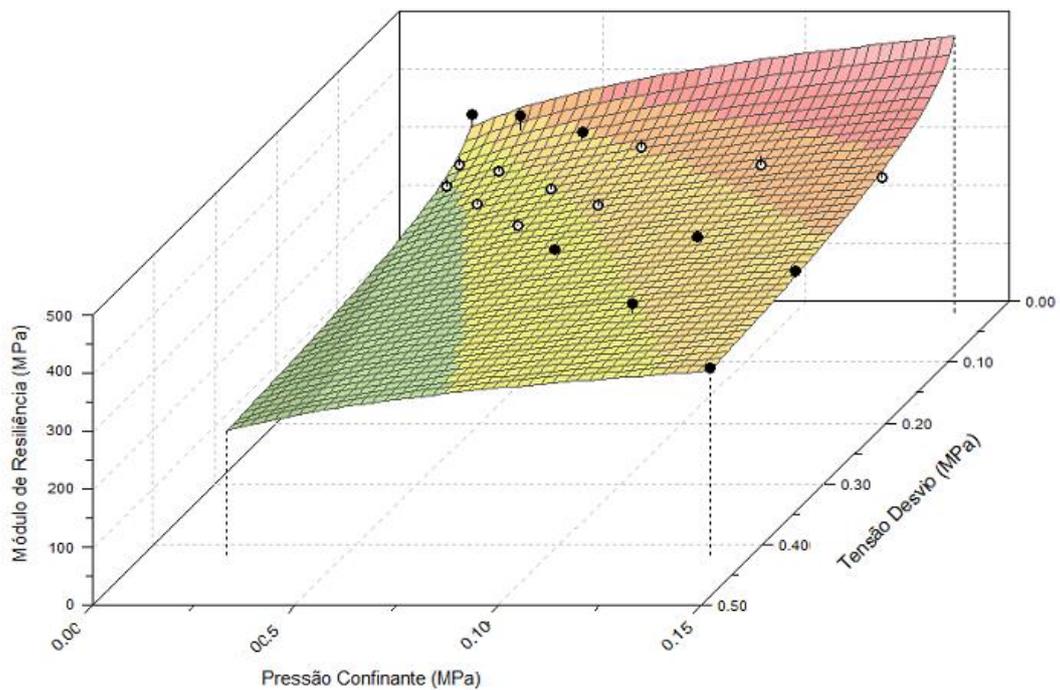
(c)

Figura 3 – Módulo de Resiliência da Compactação Mecânica - Hót – 2% em função dos Modelos Clássicos (a) MR X Tensão de Confinamento (b) MR X Tensão de Desvio e em função do Modelo Composto (c) MR X Tensão de Confinamento X Tensão de Desvio.



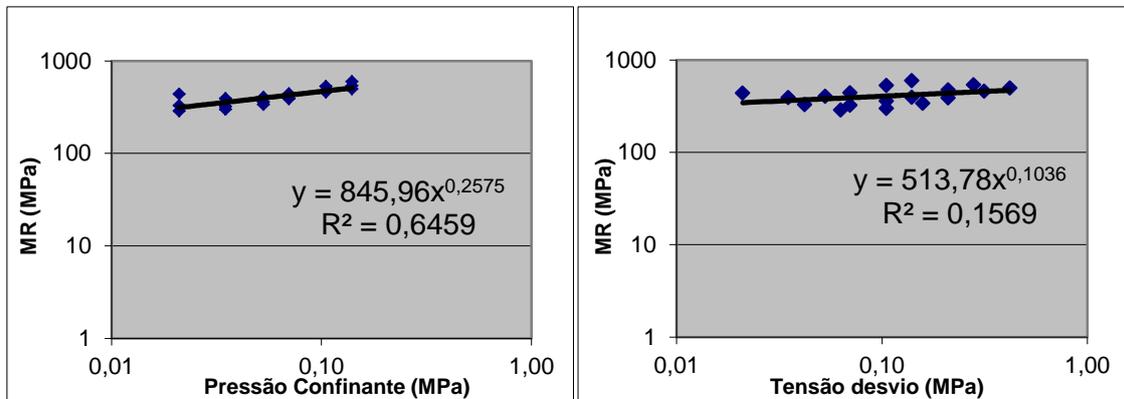
(a)

(b)



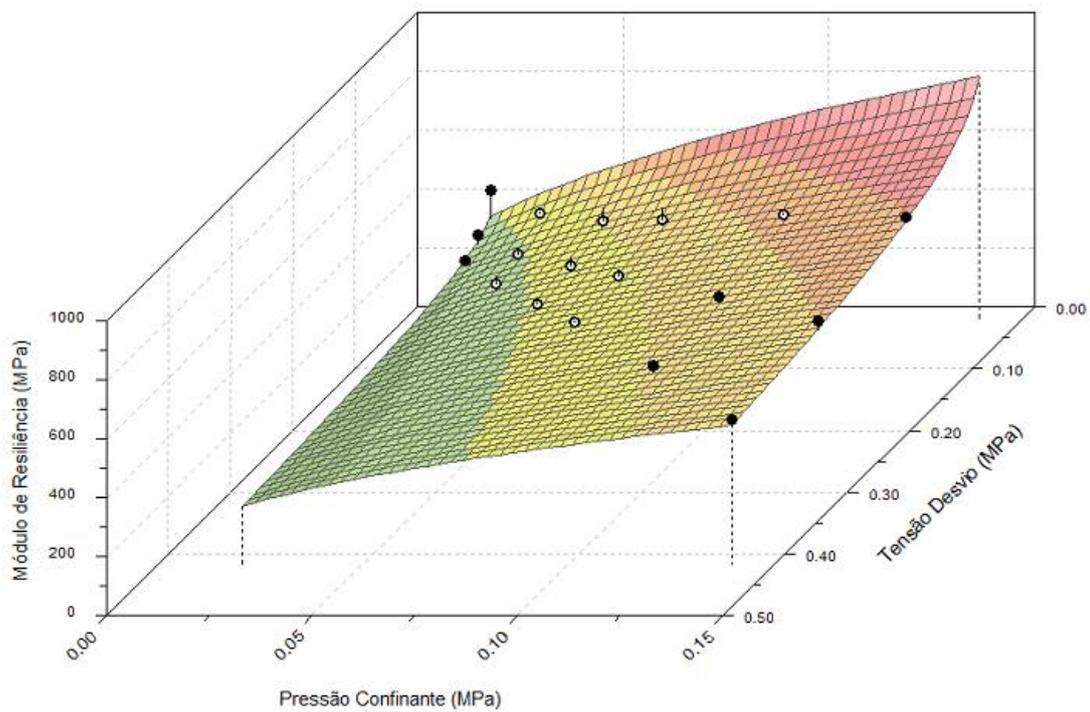
(c)

Figura 4 – Módulo de Resiliência da Compactação Manual com Reuso- Hótima em função dos Modelos Clássicos (a) MR X Tensão de Confinamento (b) MR X Tensão de Desvio e em função do Modelo Composto (c) MR X Tensão de Confinamento X Tensão de Desvio.



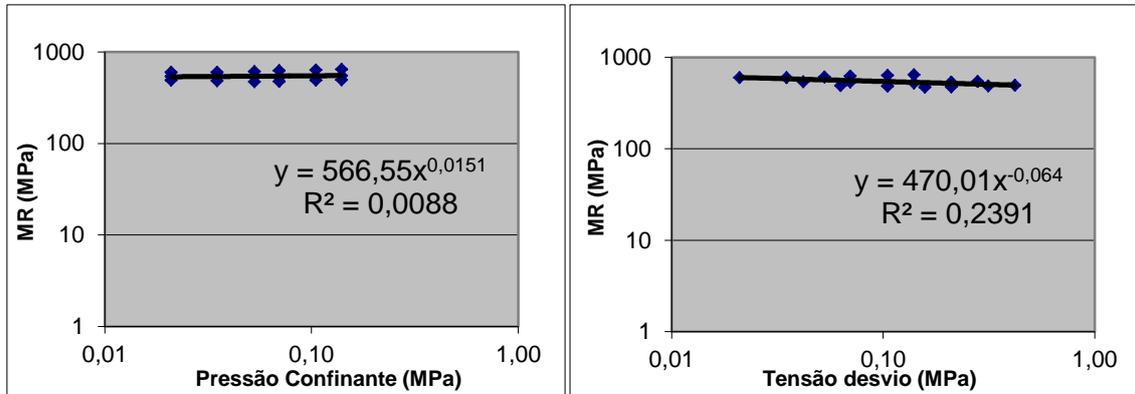
(a)

(b)



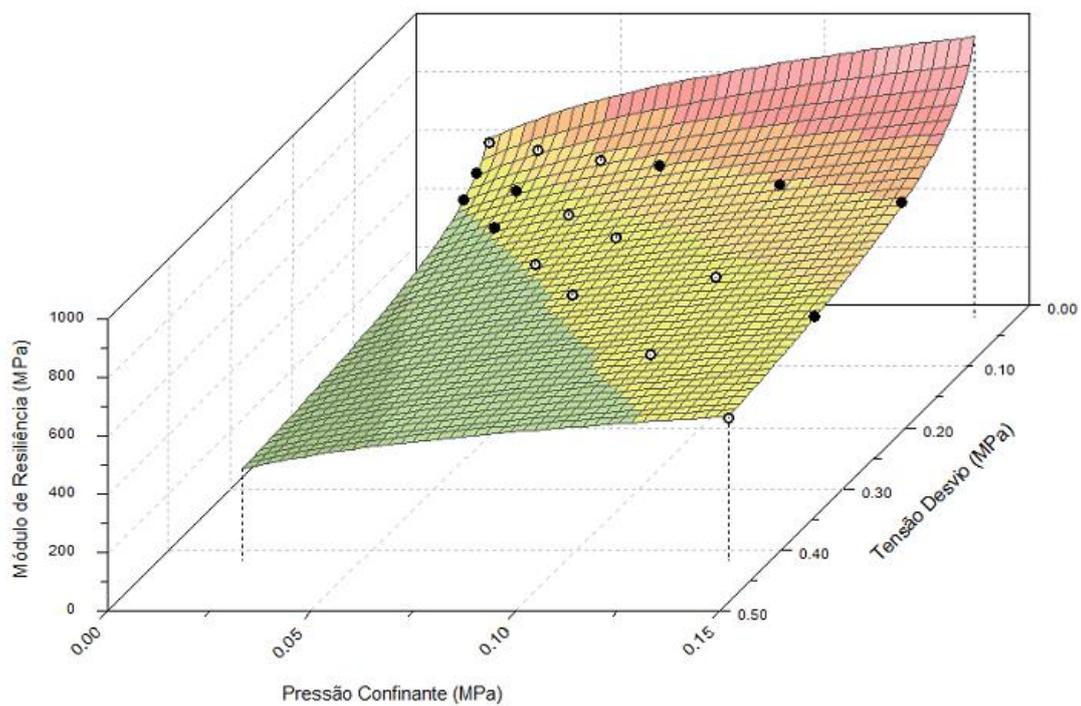
(c)

Figura 5 – Módulo de Resiliência da Compactação Manual com Reuso - Hót – 1% em função dos Modelos Clássicos (a) MR X Tensão de Confinamento (b) MR X Tensão de Desvio e em função do Modelo Composto (c) MR X Tensão de Confinamento X Tensão de Desvio.



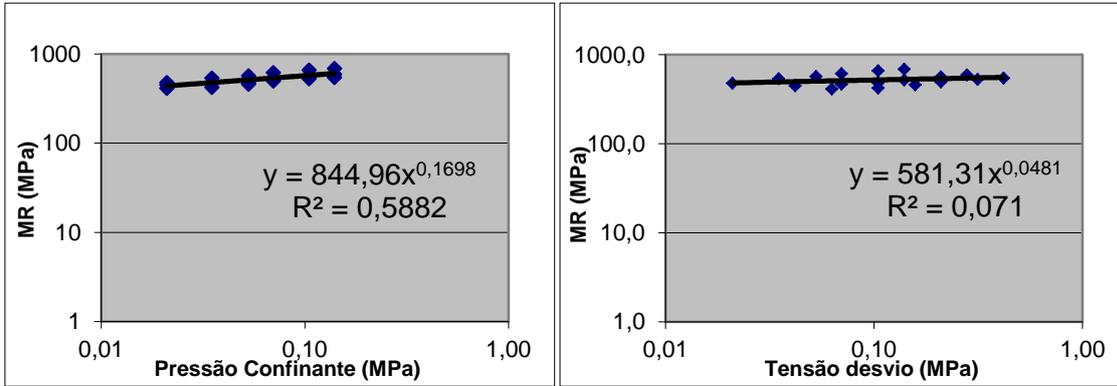
(a)

(b)



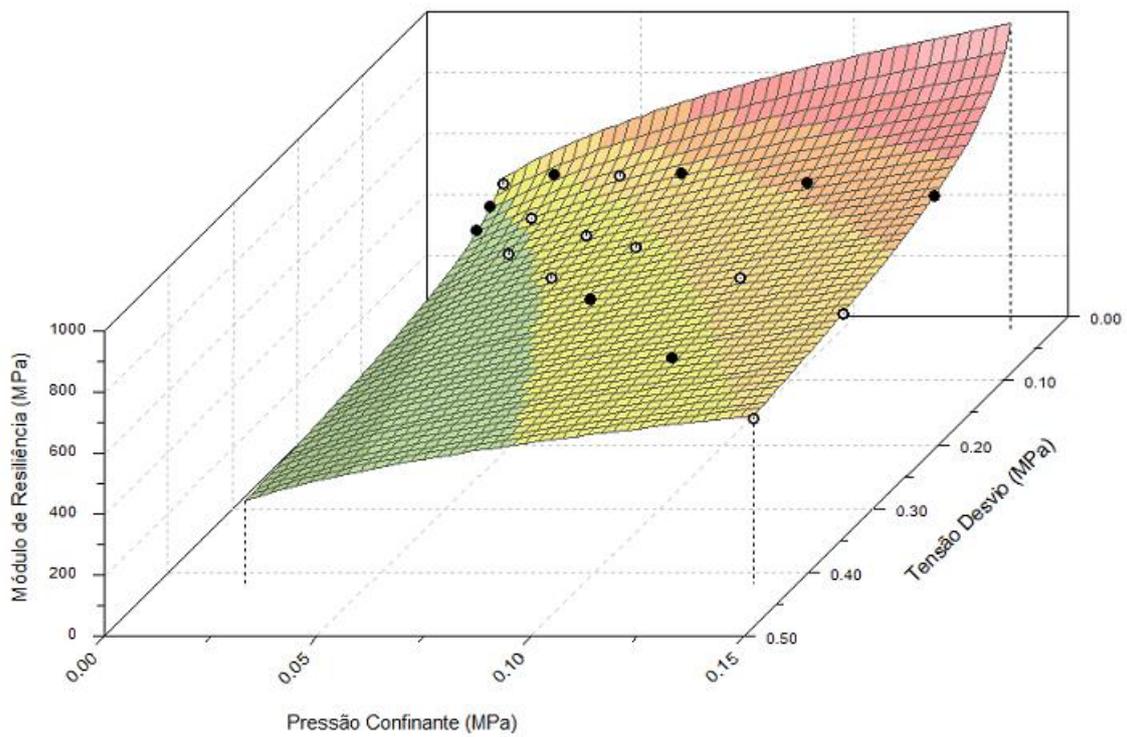
(c)

Figura 6 – Módulo de Resiliência da Compactação Manual com Reuso - Hót – 2% em função dos Modelos Clássicos (a) MR X Tensão de Confinamento (b) MR X Tensão de Desvio e em função do Modelo Composto (c) MR X Tensão de Confinamento X Tensão de Desvio.



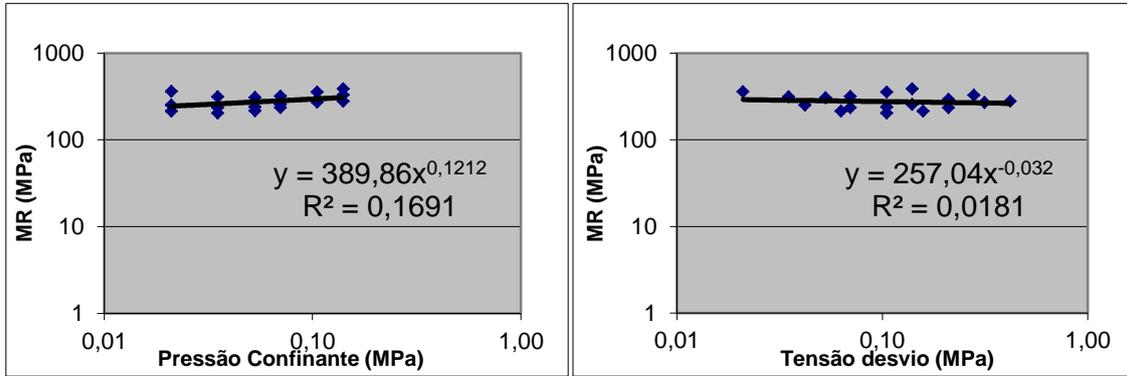
(a)

(b)



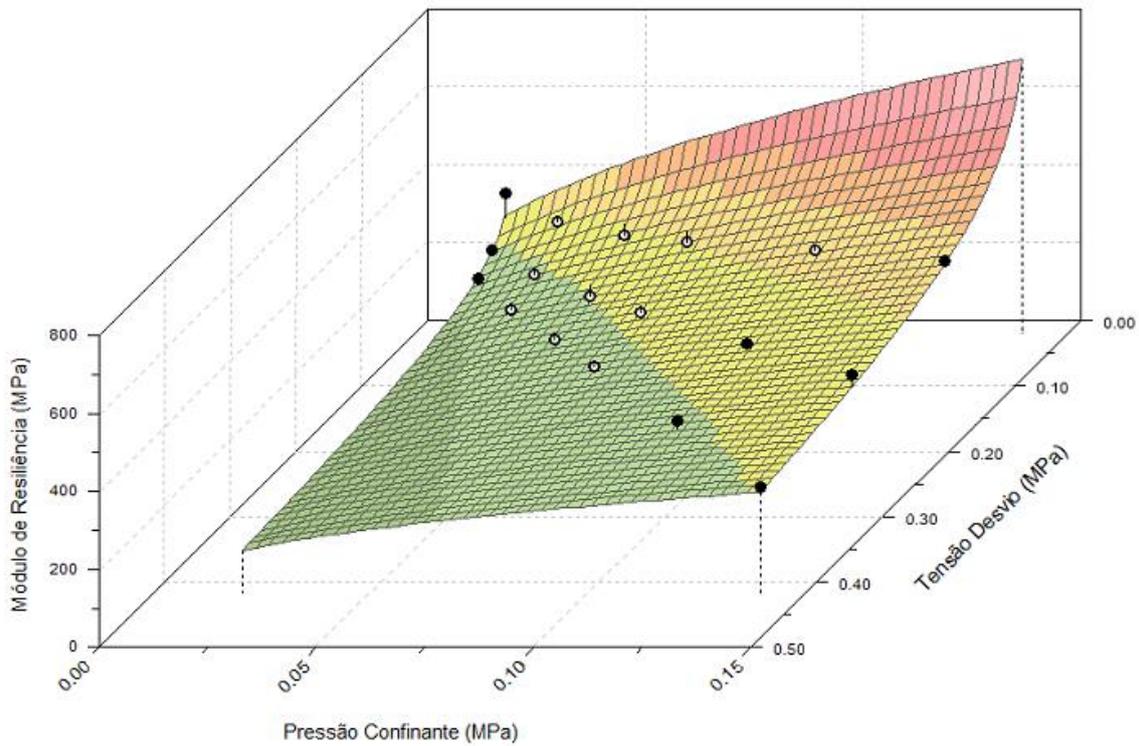
(c)

Figura 7 – Módulo de Resiliência da Compactação Manual com Reuso - Hót +1% em função dos Modelos Clássicos (a) MR X Tensão de Confinamento (b) MR X Tensão de Desvio e em função do Modelo Composto (c) MR X Tensão de Confinamento X Tensão de Desvio.



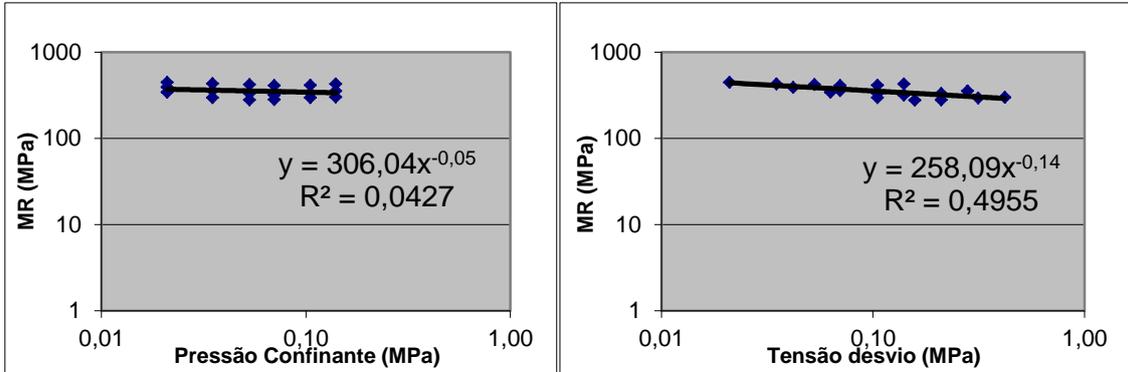
(a)

(b)



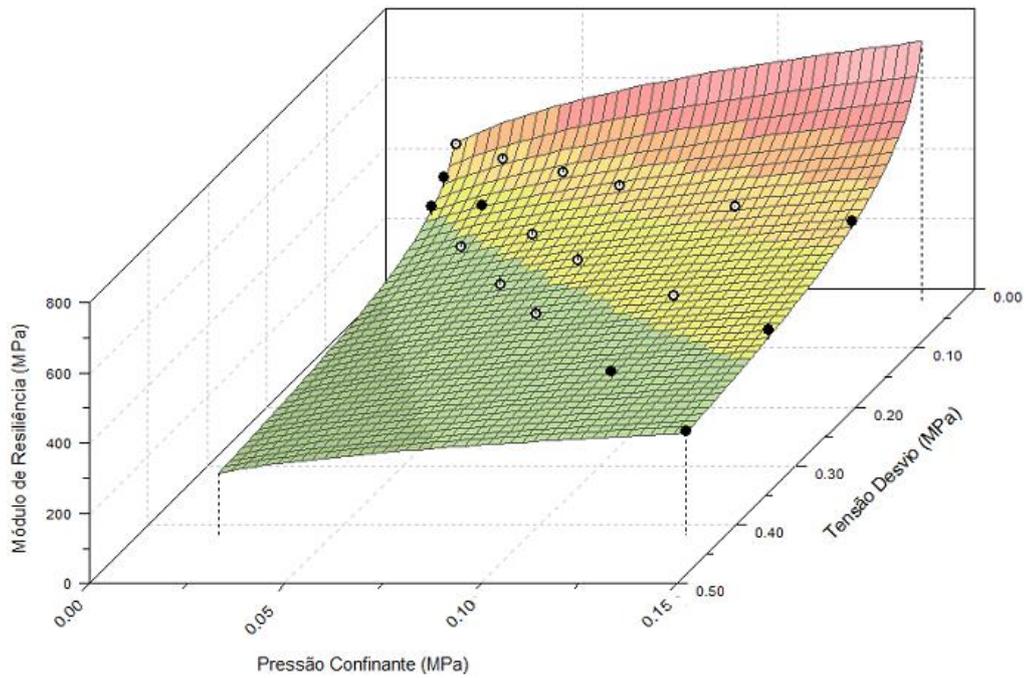
(c)

Figura 8 – Módulo de Resiliência da Compactação Manual com Reuso – Hót +2% em função dos Modelos Clássicos (a) MR X Tensão de Confinamento (b) MR X Tensão de Desvio e em função do Modelo Composto (c) MR X Tensão de Confinamento X Tensão de Desvio.



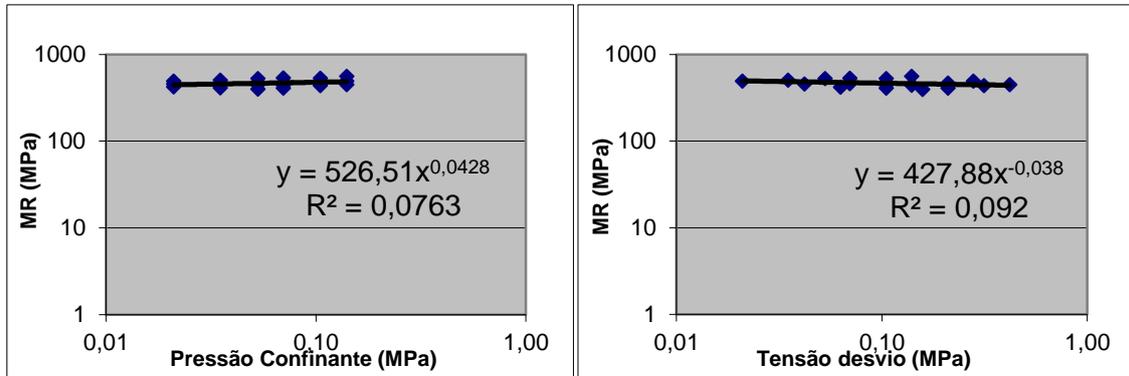
(a)

(b)



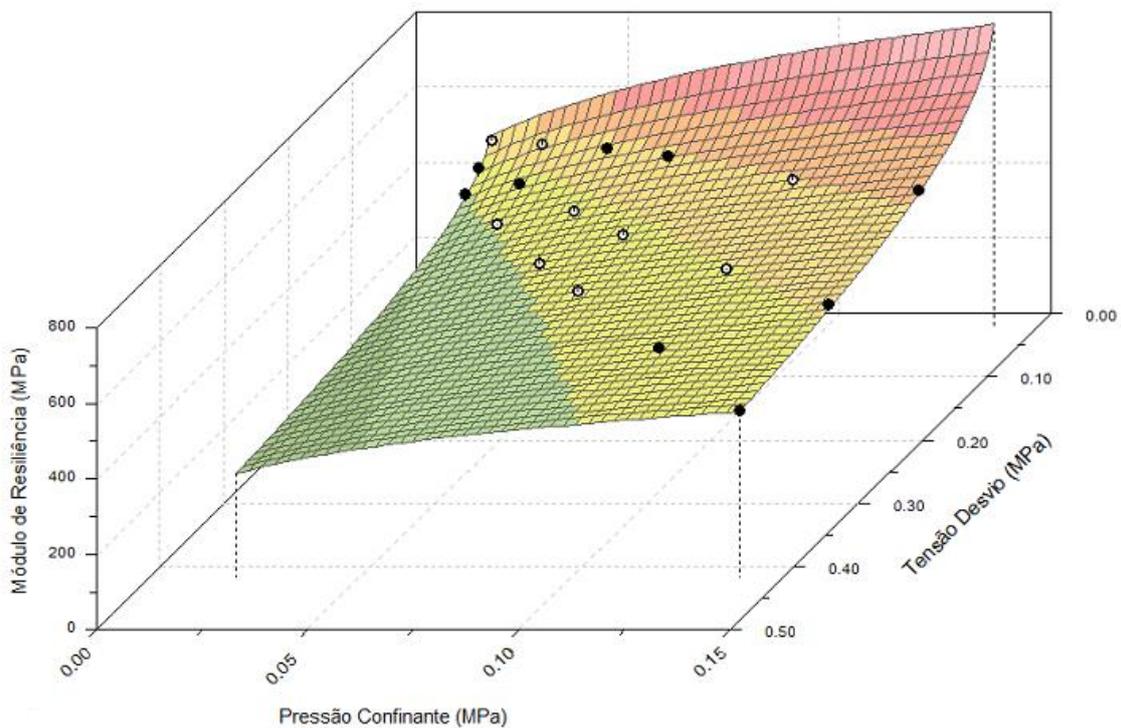
(c)

Figura 9 – Módulo de Resiliência da Compactação Manual sem Reuso- Hótima em função dos Modelos Clássicos (a) MR X Tensão de Confinamento (b) MR X Tensão de Desvio e em função do Modelo Composto (c) MR X Tensão de Confinamento X Tensão de Desvio.



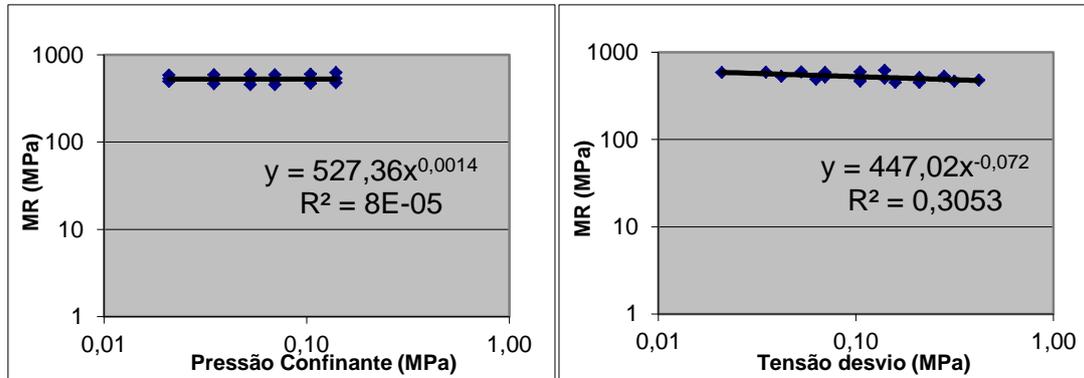
(a)

(b)



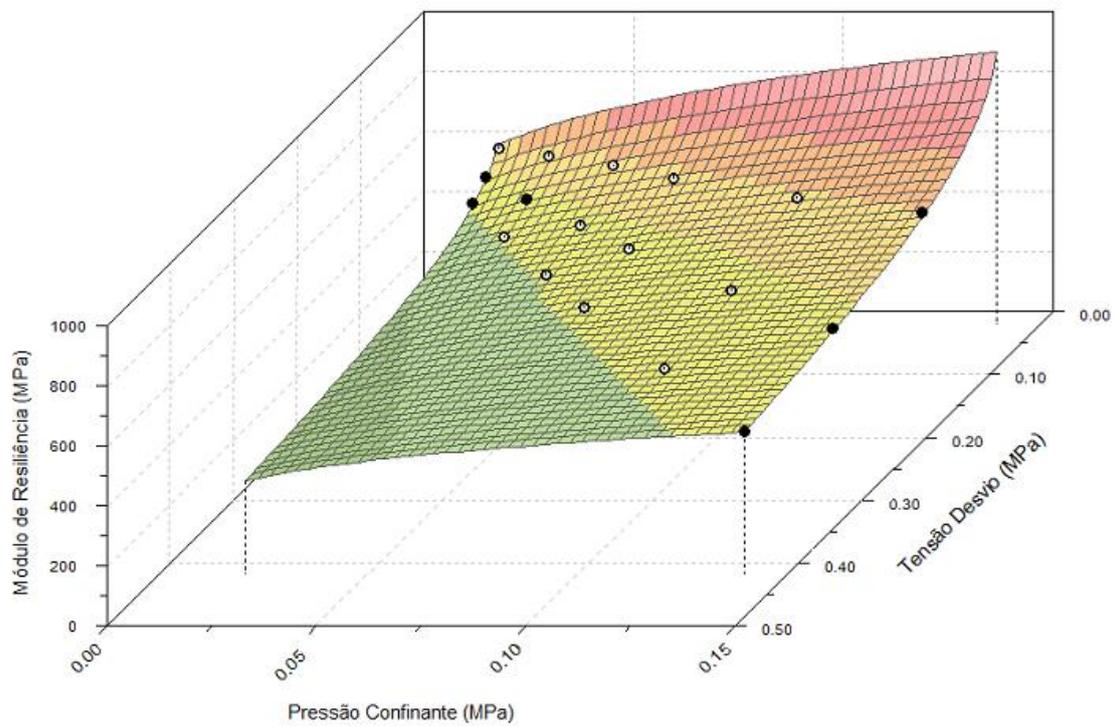
(c)

Figura 10 – Módulo de Resiliência da Compactação Manual sem Reuso - Hót – 1% em função dos Modelos Clássicos (a) MR X Tensão de Confinamento (b) MR X Tensão de Desvio e em função do Modelo Composto (c) MR X Tensão de Confinamento X Tensão de Desvio.



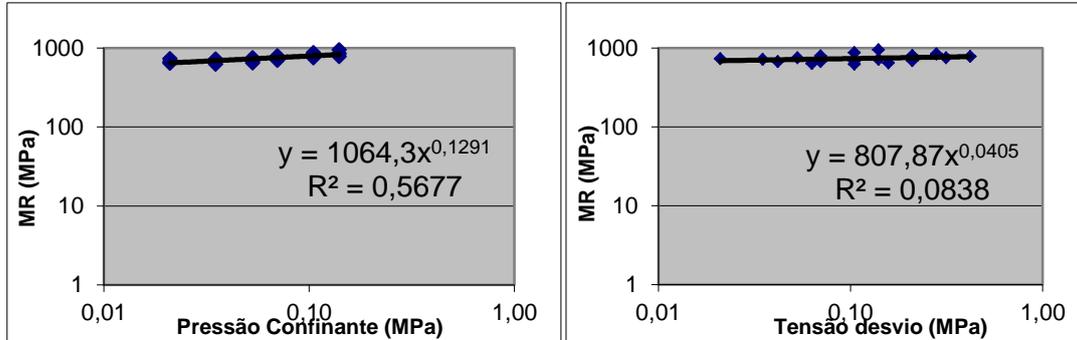
(a)

(b)



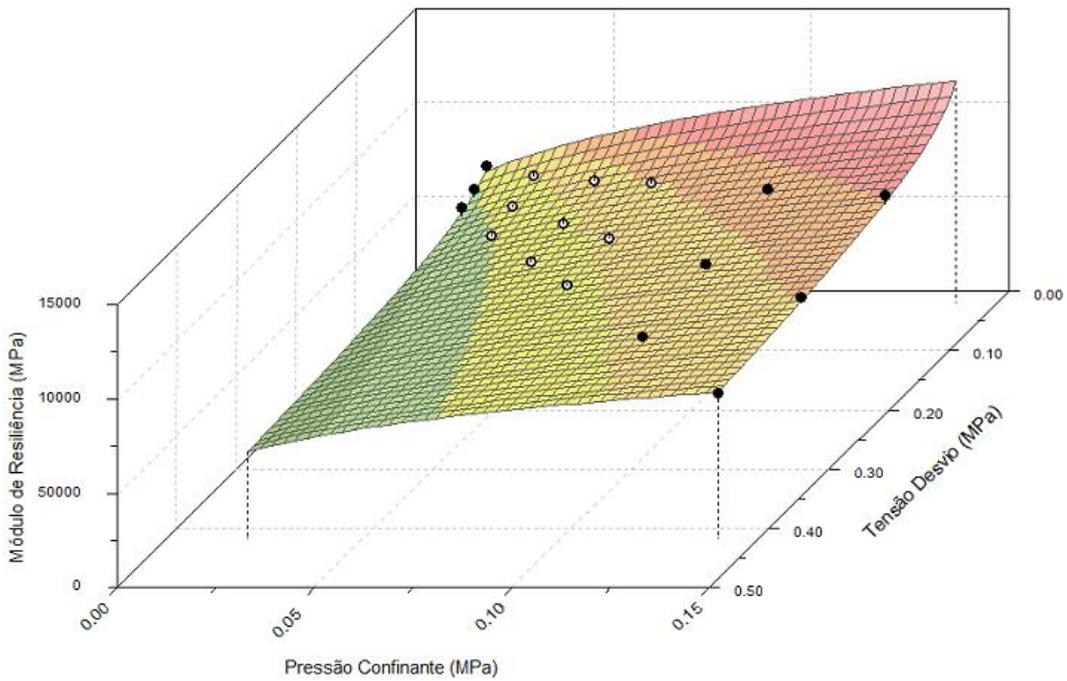
(c)

Figura 11 – Módulo de Resiliência da Compactação Manual sem Reuso - Hót – 2% em função dos Modelos Clássicos (a) MR X Tensão de Confinamento (b) MR X Tensão de Desvio e em função do Modelo Composto (c) MR X Tensão de Confinamento X Tensão de Desvio.



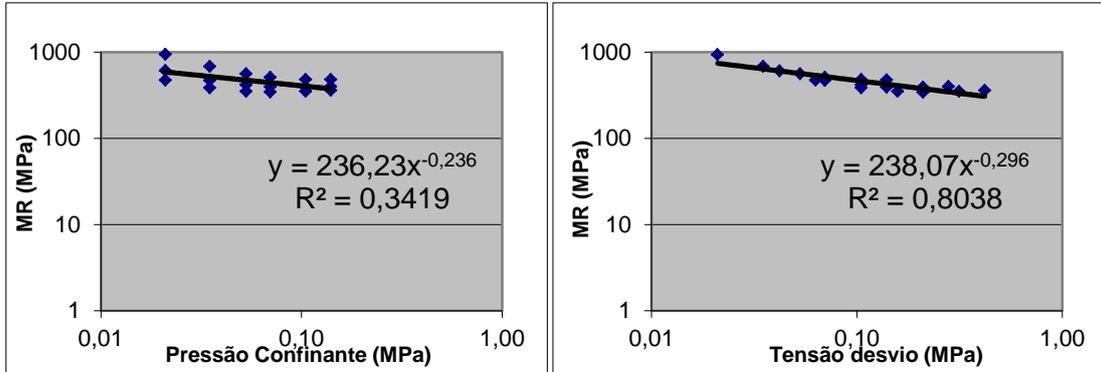
(a)

(b)



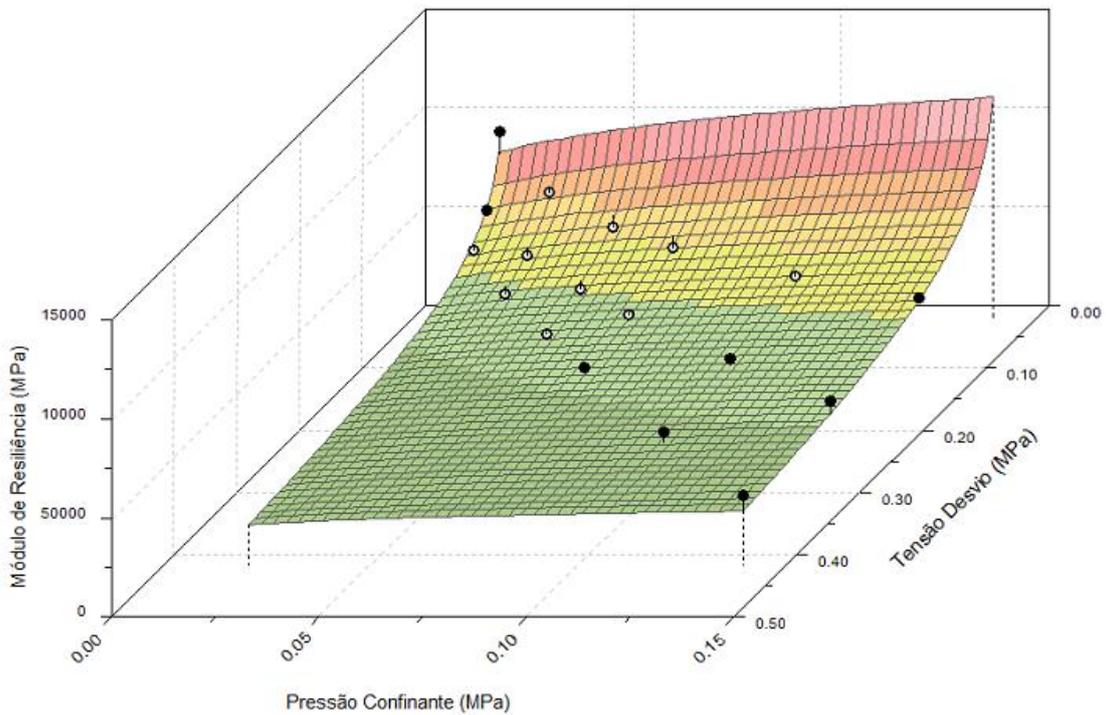
(c)

Figura 12 – Módulo de Resiliência da Compactação Manual sem Reuso - Hót +1% em função dos Modelos Clássicos (a) MR X Tensão de Confinamento (b) MR X Tensão de Desvio e em função do Modelo Composto (c) MR X Tensão de Confinamento X Tensão de Desvio.



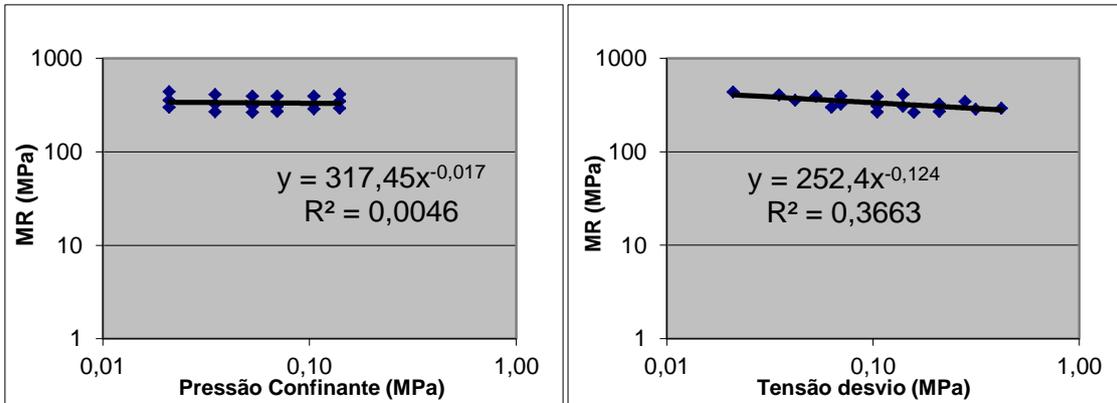
(a)

(b)



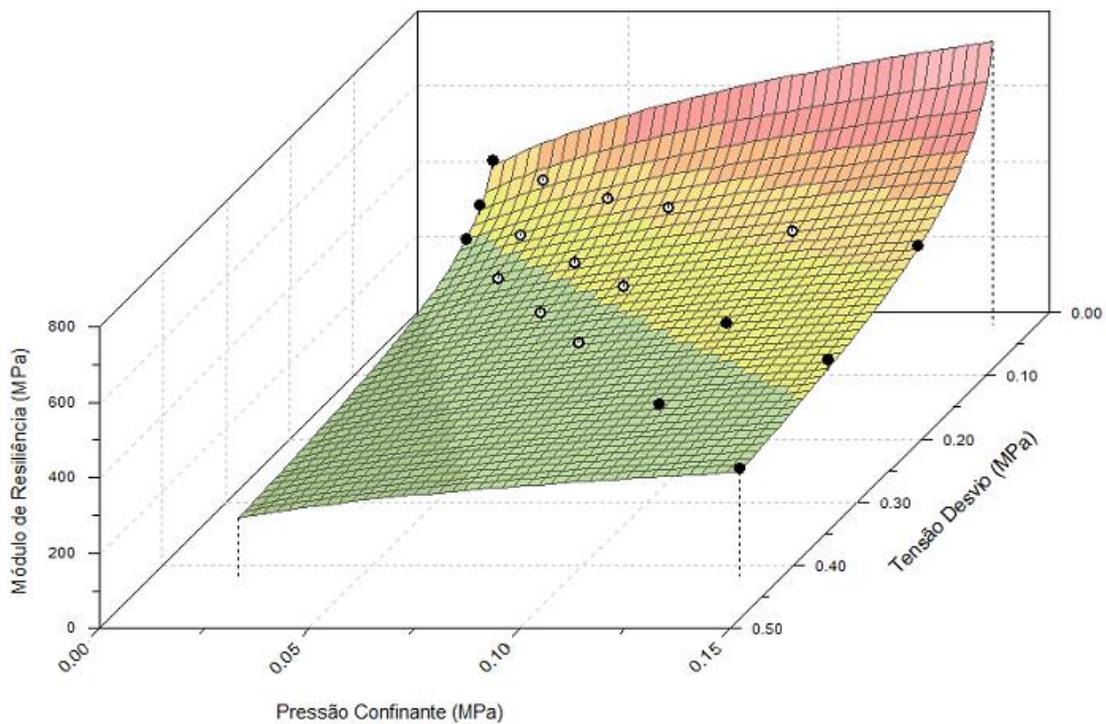
(c)

Figura 13 – Módulo de Resiliência da Compactação Manual sem Reuso - Hót +2% em função dos Modelos Clássicos (a) MR X Tensão de Confinamento (b) MR X Tensão de Desvio e em função do Modelo Composto (c) MR X Tensão de Confinamento X Tensão de Desvio.



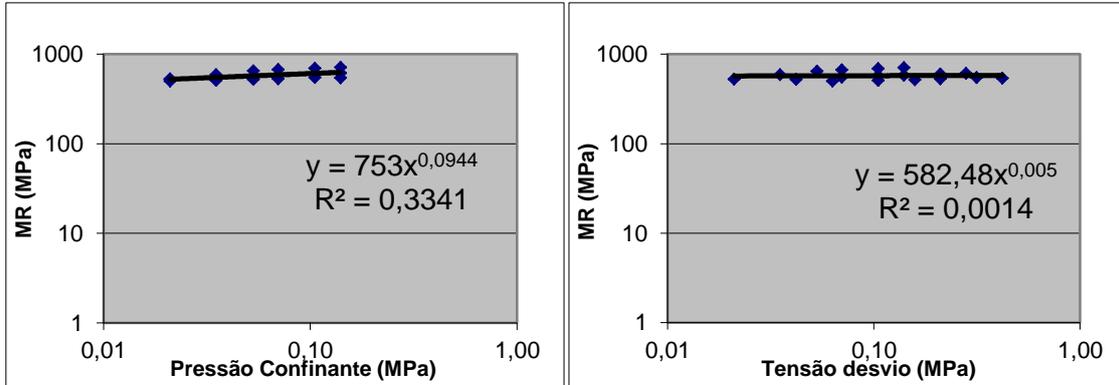
(a)

(b)



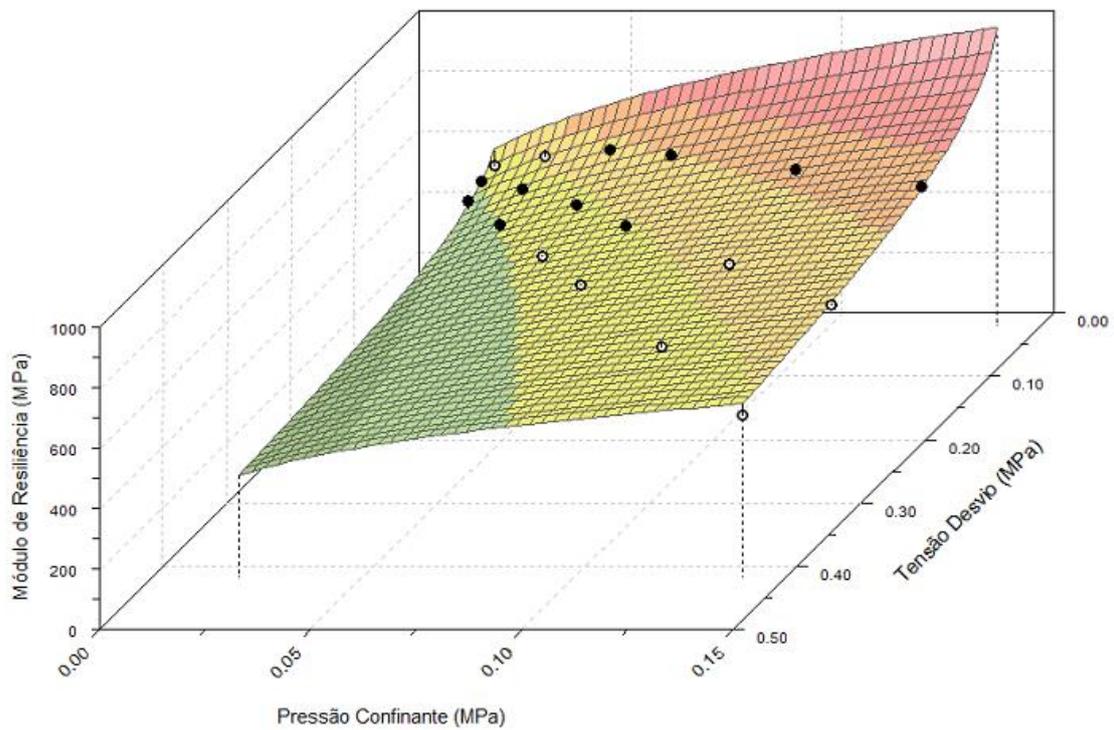
(c)

Figura 14 – Módulo de Resiliência da Compactação Manual sem Reuso 24h - Hótima em função dos Modelos Clássicos (a) MR X Tensão de Confinamento (b) MR X Tensão de Desvio e em função do Modelo Composto (c) MR X Tensão de Confinamento X Tensão de Desvio.



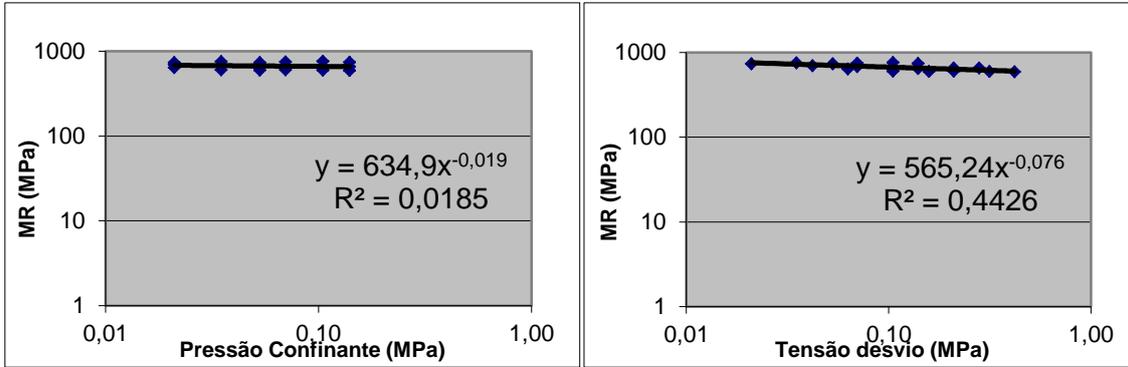
(a)

(b)



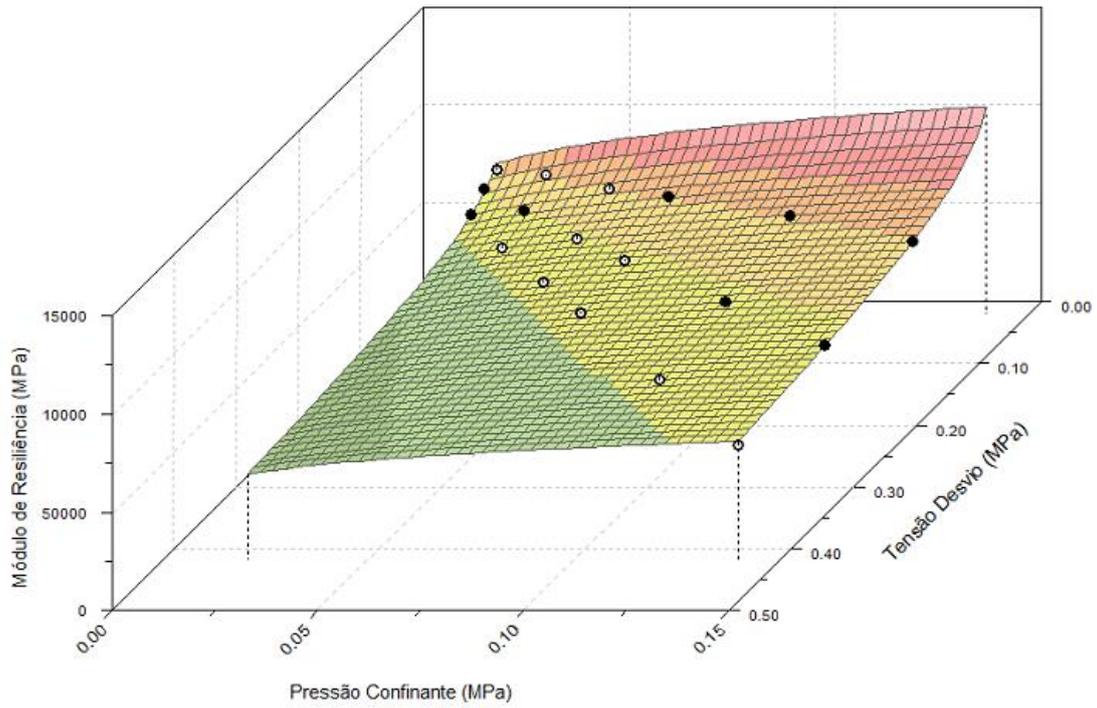
(c)

Figura 15 – Módulo de Resiliência da Compactação Manual sem Reuso 24h - Hót – 1% em função dos Modelos Clássicos (a) MR X Tensão de Confinamento (b) MR X Tensão de Desvio e em função do Modelo Composto (c) MR X Tensão de Confinamento X Tensão de Desvio.



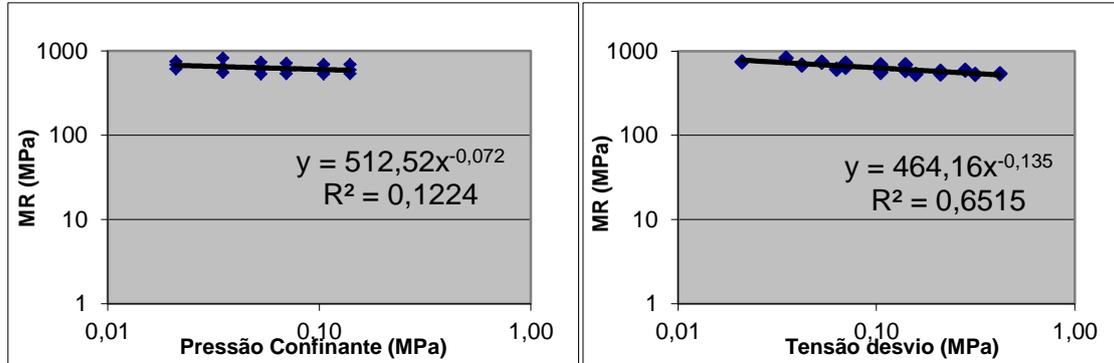
(a)

(b)



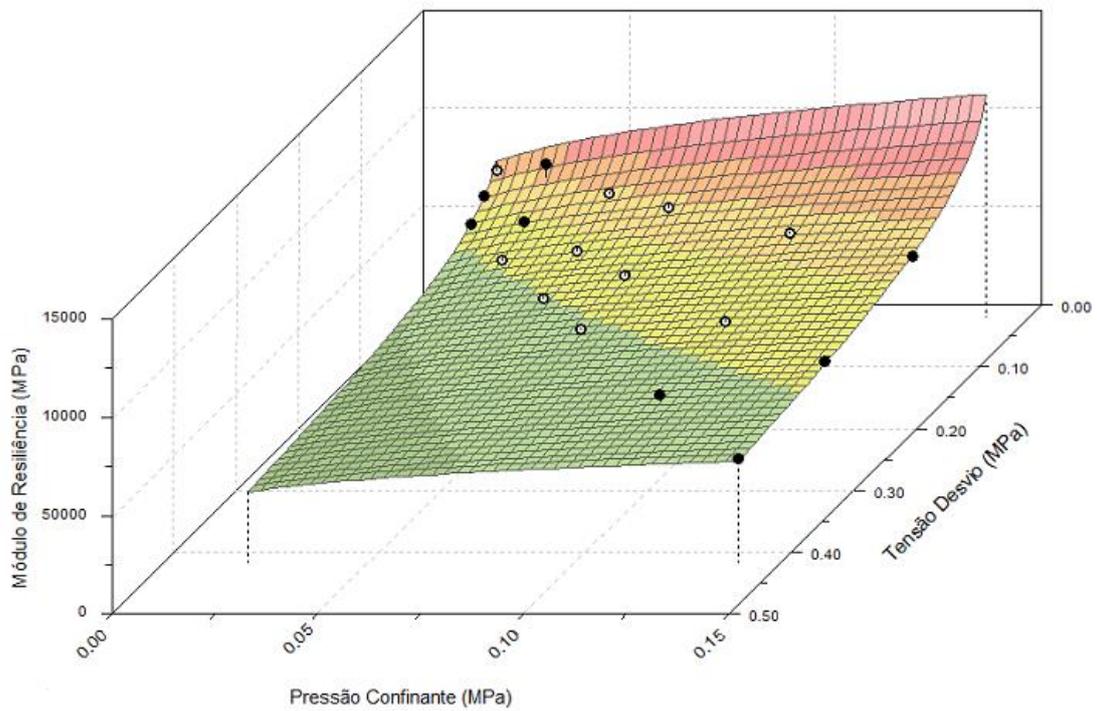
(c)

Figura 16 – Módulo de Resiliência da Compactação Manual sem Reuso 24h - Hót – 2% em função dos Modelos Clássicos (a) MR X Tensão de Confinamento (b) MR X Tensão de Desvio e em função do Modelo Composto (c) MR X Tensão de Confinamento X Tensão de Desvio.



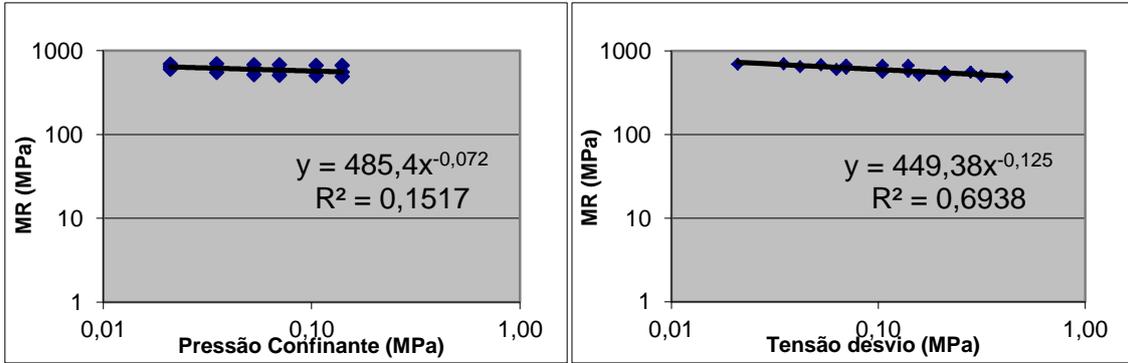
(a)

(b)



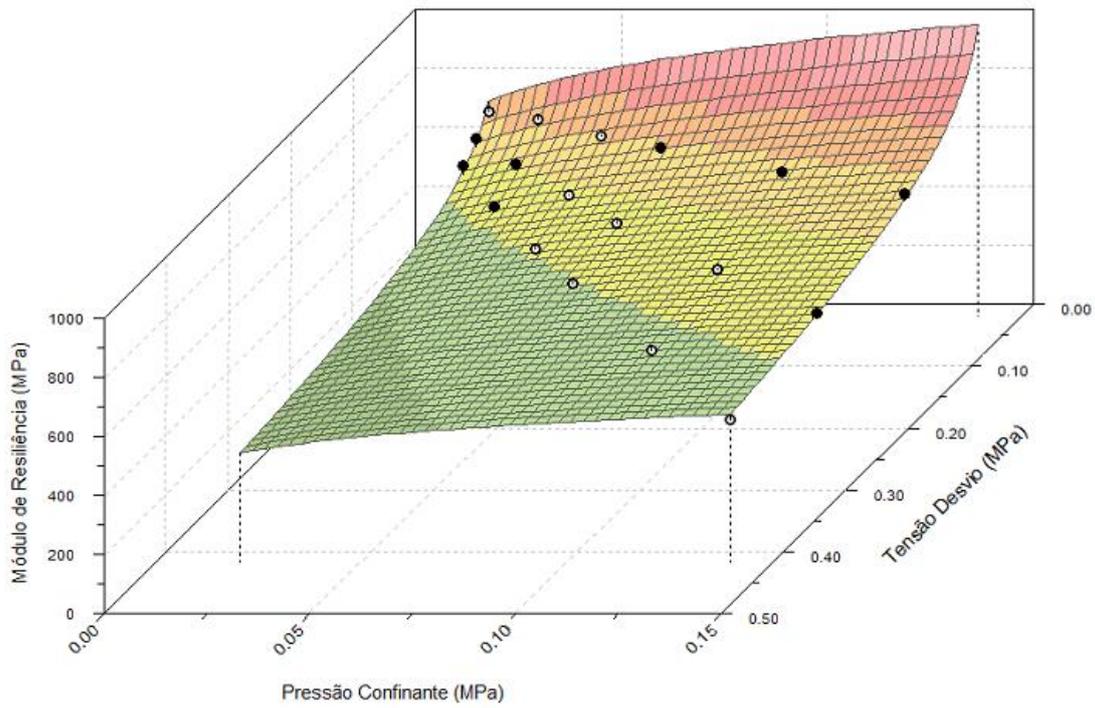
(c)

Figura 17 – Módulo de Resiliência da Compactação Manual sem Reuso 24h - Hót +1% em função dos Modelos Clássicos (a) MR X Tensão de Confinamento (b) MR X Tensão de Desvio e em função do Modelo Composto (c) MR X Tensão de Confinamento X Tensão de Desvio.



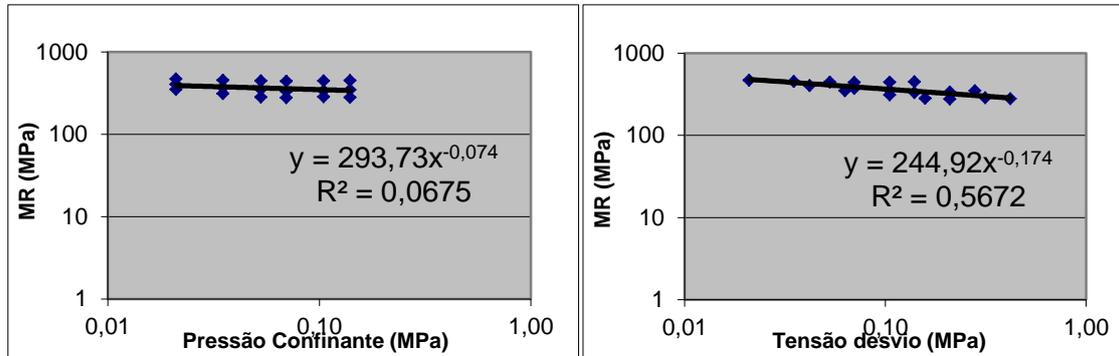
(a)

(b)



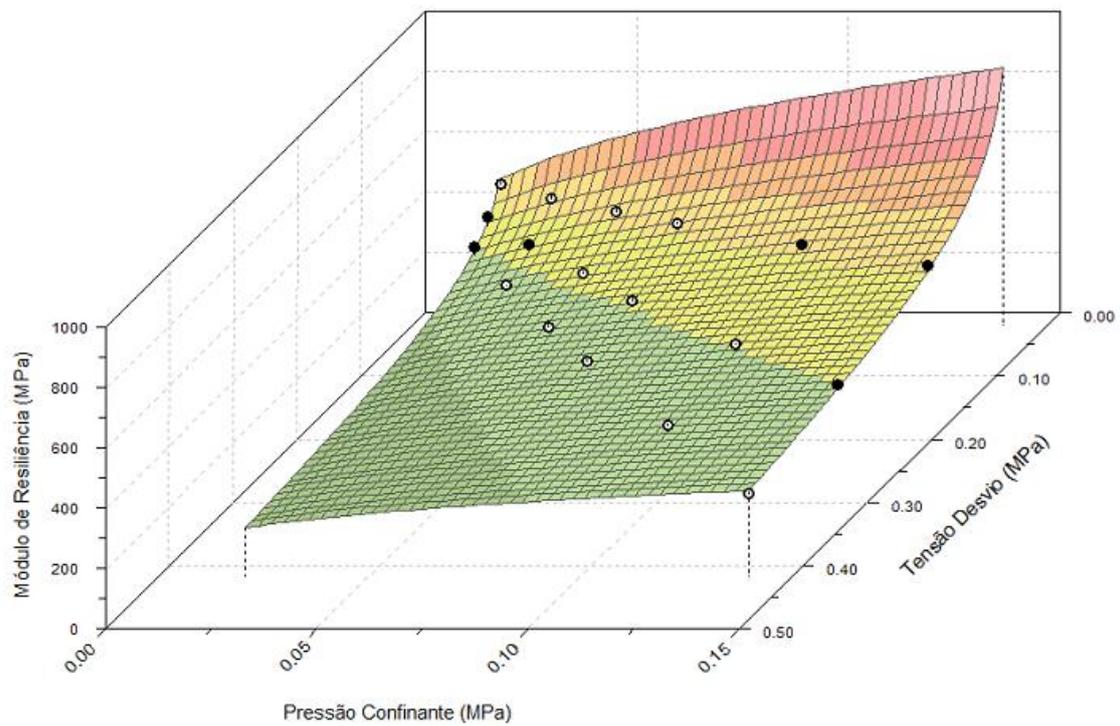
(c)

Figura 18 – Módulo de Resiliência da Compactação Manual sem Reuso 24h - Hót +2% em função dos Modelos Clássicos (a) MR X Tensão de Confinamento (b) MR X Tensão de Desvio e em função do Modelo Composto (c) MR X Tensão de Confinamento X Tensão de Desvio.



(a)

(b)



(c)