

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

**COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DE COMPACTAÇÃO DE SOLOS POR
IMPACTO E POR AMASSAMENTO**

Danielle Savala Vieira Sobreira

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

Campina Grande – Paraíba

Junho de 2014

COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DE COMPACTAÇÃO DE SOLOS POR IMPACTO E POR AMASSAMENTO

Danielle Savala Vieira Sobreira

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

Prof. D.Sc Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena
Orientador

Profa. D.Sc Lêda Christiane de Figueiredo Lopes Lucena
Co - Orientadora

Campina Grande – Paraíba

Junho de 2014

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCC

S677c Sobreira, Danielle Savala Vieira.
Comparação entre os métodos de compactação de solos por impacto e por amassamento / Danielle Savala Vieira Sobreira. – Campina Grande, 2014.
99 f. : il. Color.

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

"Orientação: Prof. Dr. Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena, Prof.^a Dr.^a Lêda Christiane de Figueiredo Lopes Lucena".

Referências.

1. Geotécnica. 2. Compactação de Solos. 3. Método Proctor. 4. Compactador Giratório Superpave. I. Lucena, Adriano Elísio Figueiredo Lopes. II. Lucena, Lêda Christiane de Figueiredo Lopes. III. Título.

CDU 624.13(043)



FOLHA DE APROVAÇÃO

Autora: Danielle Savala Vieira Sobreira

Título: COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DE COMPACTAÇÃO DE SOLOS POR IMPACTO E POR AMASSAMENTO.

Dissertação defendida e aprovada em: 27 / 06 / 2014

Pela Banca Examinadora

(Assinatura): Adriano Elísio de F. de Lucena

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

(Assinatura): Lêda Christiane de Figueiredo Lopes Lucena

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

(Assinatura): Erinaldo Hilário Cavalcante

Prof. D.Sc. (Examinador Externo) Erinaldo Hilário Cavalcante
Universidade Federal de Sergipe – UFS

(Assinatura): Saul Barbosa Guedes

Prof. D.Sc. (Examinador Externo) Saul Barbosa Guedes
Centro Universitário do Vale do Ipojuca – UNIFAVIP/DeVry

DEDICATÓRIA

A Deus, que até aqui me guiou e prometeu.
“Bem conheço os desígnios que mantenho para convosco,
desígnios de prosperidade e não de calamidade,
de vos garantir um futuro e uma esperança. *Amém.*”

Jeremias 29:11

AGRADECIMENTOS

A Deus, que me deu inteligência e sem ele nada disto poderia ter acontecido, ao qual devo todas as coisas, sem o qual eu nada seria.

Ao meu pai, Sobreira, que despertou em mim o desejo por este curso e por ser o meu mestre em todas as etapas da minha vida, a ele todo meu amor e agradecimento.

A minha mãe, Graça, por todo apoio e orações a mim destinadas, sua Fé me trouxe a este ponto, todo meu amor e agradecimento.

Aos meus irmãos Danilo e Diogo, meus companheiros em todos os momentos da minha vida.

A minha "pequeninha", Ana Flávia, que tanto orgulho tem da titia. Todo meu amor.

Ao meu esposo, Euneres, que me estimulou todos os dias, dando ajuda direta e indireta na realização deste trabalho, todo o meu amor e agradecimento.

Ao meu orientador, Adriano, por toda serenidade, paciência e profissionalismo fornecidos durante todas as etapas deste trabalho, os quais levarei para a minha vida, muito obrigada.

A minha co-orientadora, Lêda, por todos os esforços despendidos na realização deste trabalho, os meus sinceros agradecimentos.

Ao meu ex-orientador, Erinaldo, pela idéia inicial desta pesquisa e por ter acreditado em meu potencial para conduzi-la, muito obrigada.

À minha 'Pivica' Thalita, que chegou quando eu nem esperava, obrigada pela ajuda e disposição, espero ter contribuído de alguma forma na sua formação.

A Dennyelle, por todas as orientações e ajudas dadas a mim desde a chegada ao LEP.

A Josete, por toda ajuda, atenção, orientação e amizade durante toda esta jornada.

Aos técnicos do Laboratório de Engenharia de Pavimentos, 'Netinho', 'Nildinho' e Jadilson pela ajuda na execução de várias etapas deste trabalho.

À turma de 2012, Raliny, Dácio, Alice e Elysson pelo apoio e amizade.

À Universidade Federal de Campina Grande, instituição na qual me graduei e foi responsável por formar boa parte do que sou hoje.

A CAPES pela bolsa concedida para o desenvolvimento deste trabalho.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho, meus mais sinceros agradecimentos.

Muito obrigada!

RESUMO

A compactação Proctor por impacto representa o método de laboratório ainda mais empregado mundialmente para determinar a massa específica seca máxima e umidade ótima dos solos. Procedimentos de compactação de camadas de solo no campo se desenvolveram muito nos últimos anos no que diz respeito à técnicas e tecnologias, e em contrapartida, os ensaios de Proctor permaneceram inalterados. Por conseguinte, um método mais moderno de compactação de solos em laboratório é necessário devido os ensaios Proctor não simularem com precisão métodos de compactação de campo moderno, que dependem de uma combinação de amassamento, vibração e impacto. Uma alternativa que simula estes mecanismos de compactação em amostras no laboratório é com o uso do Compactador Giratório Superpave (CGS). O procedimento de compactação no CGS se compara a de um rolo compressor que, em vez de aplicar golpes de impacto, faz a compactação exercendo uma pressão de amassamento na mistura. Este trabalho propõe comparar o efeito da Compactação Proctor (por impacto) e da Compactação CGS (por amassamento) usando três energias (Normal, Intermediário e Modificado) em três tipos de solos (arenoso, siltoso e argiloso), para avaliar os efeitos desses processos de compactação no comportamento geotécnico destes solos. Foram realizados os ensaios tais como: compactação, Índice de Suporte Califórnia (ISC ou CBR), resistência à tração por compressão diametral e resistência à compressão simples. Pode-se destacar que os valores de massa específica aparente seca ($MEAS_{Max}$) dos ensaios de compactação obtidos pelo método Proctor terem sido, em sua maioria, ligeiramente superiores aos obtidos no CGS. 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, enquanto que para o CBR, observou-se uma tendência de melhor desempenho dos CPs moldados no Proctor. De um modo geral, esta pesquisa mostrou que a compactação giratória no CGS é um método viável de compactação de solo em laboratório, entretanto, para que o CGS seja usado rotineiramente na compactação de solos em laboratório algumas dificuldades necessitam ser superadas, como por exemplo, o alto custo do equipamento quando comparado ao custo de um equipamento de moldagem Proctor convencional.

Palavras Chave: Compactação de solos; método Proctor; compactador giratório Superpave.

ABSTRACT

The Proctor compaction by impact is the most used laboratory method in the world to determine the maximum dry density and optimum moisture content of soil. Procedures of compaction of soil layers in the field have been evolving in recent years with regard to techniques and technologies, and in turn, Proctor tests have remained unchanged. Therefore, a more modern method of compacting soil in laboratory is necessary because the Proctor tests do not accurately simulate compression methods of the modern field, which rely on a combination of kneading, vibration and impact. An alternative that simulates these mechanisms for compacting samples in the laboratory is the Superpave Gyrotory Compactor (SGC). The procedure of compaction in SGC is comparable to a steamroller that instead of delivering blows of impact it compresses by exerting pressure on and kneading the mixture. This work proposes to compare the effect of Proctor compaction (by impact) and SGC Compaction (by kneading) by using three energies (Standard, Intermediate and Modified) in three soil types (sandy, silty and silty clay), to assess the effects of these compression processes in the geotechnical behavior of these soils. Tests such as compaction, California Bearing Ratio (CBR), tensile strength by diametral compression, and unconfined compression were performed. It may be noted that the values of apparent specific gravity of dry ($MEAS_{m\acute{a}x}$) compaction tests obtained by the method Proctor were mostly slightly higher than those obtained in the CGS. As for mechanical testing, the specimens molded in CGS showed, in general, better results of compressive strength and tensile strength by diametral compression, while for the CBR, there was a trend toward better performance of the molded CPs in Proctor. Overall, this research showed that gyrotory compression in SGC is a viable method of soil compaction in the laboratory; however, for SGC to be used routinely in the compaction of soils in the laboratory, some difficulties need to be overcome, such as the high cost of equipment when compared to the cost of conventional Proctor mold equipment.

Key Words: Soil compaction; Proctor method; Superpave Gyrotory Compactor.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1.....	17
1.0 INTRODUÇÃO.....	17
1.1 Objetivos.....	18
1.1.1 Objetivo Geral.....	18
1.1.2 Objetivos Específicos.....	18
1.2 Organização do Trabalho.....	19
CAPÍTULO 2.....	20
2.0 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	20
2.1 Compactação de solo.....	20
2.2 Métodos de compactação em laboratório.....	21
2.2.1 Compactação Dinâmica ou por impacto.....	22
2.2.2 Compactação Estática ou por Pressão.....	27
2.2.3 Compactação por amassamento.....	27
2.2.4 Compactação por vibração.....	37
2.2.5 Compactação por pisoteamento.....	39
2.3 Estudos comparativos da compactação Proctor versus CGS.....	40
2.3.1 Cálculo da energia aplicada pelo CGS.....	50
CAPÍTULO 3.....	53
3.0 MATERIAIS E MÉTODOS.....	53
3.1 Materiais.....	54
3.1.1 Solos.....	54
3.1.1.1 Escolha dos solos.....	54
3.1.1.2 Coleta dos solos.....	54
3.1.1.3 Preparação dos solos.....	55
3.2 Métodos.....	56
3.2.1 Propriedades Físicas dos Solos.....	56
3.2.1.1 Análise Granulométrica.....	56
3.2.1.2 Determinação da massa específica dos grãos.....	57
3.2.1.3 Limites de Atterberg.....	58

3.2.2	Propriedades Mécnicas dos Solos.....	59
3.2.2.1	Ensaio de compactação.....	59
3.2.2.2	Ensaio de CBR (Califórnia Bearing Ratio).....	63
3.2.2.3	Ensaio de resistência à tração por compressão diametral	66
3.2.2.4	Ensaio de resistência à compressão simples.....	68
CAPÍTULO 4.....		70
4.0	RESULTADOS E DISCUSSÕES	70
4.1	Caracterização Física dos Solos	70
4.1.1	Ensaio de Granulometria, Massa Específica e Limites de Atterberg	70
4.1.1.1	Granulometria	70
4.1.1.2	Massa específica dos grãos dos solos	72
4.1.1.3	Limites de Atterberg.....	72
4.1.1.4	Classificações geotécnicas do solo.....	74
4.2	Caracterização Mécânica dos Solos.....	75
4.2.1	Ensaio de compactação.....	75
4.2.1.1	Solo 01	75
4.2.1.2	Solo 02	77
4.2.1.3	Solo 03	78
4.2.2	Ensaio de CBR	80
4.2.3	Ensaio de Resistência à tração por compressão diametral	84
4.2.4	Ensaio de Resistência à compressão simples	86
4.2.5	Potenciais problemas de ensaio do CGS para solos.....	89
CAPÍTULO 5.....		92
5.0	CONCLUSÕES	92
5.1	Sugestões para Futuras Pesquisas	94
REFERÊNCIAS.....		95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de energia do ensaio Proctor (DANTAS, 2013).....	25
Tabela 2 - Evolução do compactador giratório para CBUQ (HARMAN <i>et al.</i> , 2002).....	28
Tabela 3 - Intervalos de variação dos parâmetros do CGS (DANTAS, 2013).....	37
Tabela 4 – Parâmetros de compactação (Browne, 2006).....	43
Tabela 5 – w_o e $MEAS_{máx}$ para ensaio de compactação com tensão normal de 600 kPa e 500 giros (DANTAS, 2013)	47
Tabela 6 – Parâmetros ótimos dos ensaios de compactação com CGS (DANTAS, 2013)	47
Tabela 7 - Valores de energia do ensaio Proctor (DANTAS, 2013).....	52
Tabela 8 – Normas adotadas para caracterização física das amostras dos solos.....	56
Tabela 9 - Normas adotadas para caracterização mecânica das amostras dos solos.....	59
Tabela 10 – Valores de energia do ensaio Proctor (Adaptada da NBR 7182/86)	60
Tabela 11 – Valores de energia do ensaio CGS (DANTAS, 2013).....	62
Tabela 12 – Valores da energia para os pontos ótimos da compactação no CGS	63
Tabela 13 – Número de golpes por energia para moldagem do CPs	66
Tabela 14 – Valores de energia do ensaio Proctor (Adaptada da NBR 7182/86)	69
Tabela 15 – Granulometria dos solos	70
Tabela 16 – Diâmetros efetivos dos solos	71
Tabela 17 – Massa específica dos grãos dos solos.....	72
Tabela 18 – Tabela resumo dos Limites de Atterberg dos solos	74
Tabela 19 – Classificação dos solos segundo os dois sistemas	74
Tabela 20 – Resultados comparativos dos parâmetros ótimos das curvas de compactação (Proctor e CGS) para o solo 01.....	76
Tabela 21 – Porcentagens das variações dos parâmetros ótimos no ensaio Proctor para o solo 01.....	76
Tabela 22 – Resultados comparativos dos parâmetros ótimos das curvas de compactação (Proctor e CGS) para o solo 02	78
Tabela 23 – Porcentagens das variações dos parâmetros ótimos no ensaio Proctor para o solo 02.....	78
Tabela 24 – Resultados comparativos dos parâmetros ótimos das curvas de compactação (Proctor e CGS) para o solo 03.....	79

Tabela 25 – Porcentagens das variações dos parâmetros ótimos no ensaio Proctor para o solo 03.....	79
Tabela 26 – Tabela resumo dos ensaios de compactação variando com as energias	80
Tabela 27 – Resultados dos ensaios de CBR x energias	81
Tabela 28 – Correlação provável entre CBR e classificação HBR (SENÇO, 1997)	82
Tabela 29 – Resultados de RTCD para os solos compactados no processo Proctor e CGS	85
Tabela 30 – Resultados de RCS para os solos compactados no processo Proctor e CGS.....	87

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – (a) Esquema do soquete e molde (b) Compactador Proctor por impacto de um solo	22
Figura 2 – Curva de compactação Proctor de um solo qualquer (DANTAS, 2013)	23
Figura 3 – Influência de diferentes níveis de energia de compactação nas curvas de compactação de um mesmo solo	24
Figura 4 – Curvas de compactação Proctor para determinados tipos de solo (Adaptada PINTO, 2000).....	25
Figura 5 – Vários tipos de curvas de compactação encontrados para diferentes tipos de solos .	26
Figura 6 – Prensa giratória do Texas (HARMAN et al., 2002)	29
Figura 7 – Compactador giratório por amassamento do USACE (HARMAN et al., 2002)	30
Figura 8 – Esquema do compactador giratório SUPERPAVE (LUCENA, 2009).....	32
Figura 9 – Configurações do Compactador Giratório SUPERPAVE (LUCENA, 2009)	33
Figura 10 – Equipamento para compactação por amassamento SUPERPAVE	35
Figura 11 – Janela ‘Windows’ do software Servopac (PING, 2003b).....	36
Figura 12 – Moldes cilindricos para compactação no Servopac	36
Figura 13 – Equipamento de compactação vibratória ASTM D4253 (PING, 2003b)	38
Figura 14 – Soquete utilizado na compactação por pisoteamento (WERK, 2000).....	40
Figura 15 (a) – Resultados comparativos dos testes de compactação de campo e laboratório da Estrada Thomasville. Fonte: (PING et. al., 2003)	41
Figura 15 (b) – Resultados comparativos dos testes de compactação de campo e laboratório da Costa do Sol Parkway. Fonte: (PING et. al., 2003).....	42
Figura 16 (a) – Densidade úmida em função do número de giros para várias pressões verticais para o tipo de solo SM	45
Figura 16 (b) – Densidade úmida em função do número de giros para várias pressões verticais para o tipo de solo SW.....	45
Figura 17 (a) – Densidade úmida em função do número de giros para várias pressões verticais e diâmetros de amostra para o tipo de solo SM.....	46
Figura 17 (b) – Densidade úmida em função do número de giros para várias pressões verticais e diâmetros de amostra para o tipo de solo SW	46
Figura 18 – MEAS versus número de giros para CPs de 1000g e tensão normal de 600 kPa. Fonte: Dantas (2013).....	49

Figura 19 – MEAS versus número de giros para CPs de 1800g e tensão normal de 600 kPa. Fonte: Dantas (2013).....	49
Figura 20 – $RCS_{m\acute{e}dia}$ para CPs moldados estaticamente e no CGS (DANTAS, 2013).....	50
Figura 21 – $RTCD_{m\acute{e}dia}$ para CPs moldados estaticamente e no CGS (DANTAS, 2013)	50
Figura 22 – Caracterização dos materiais	53
Figura 23 – Amostra dos solos (a) 01, (b) 02 (c) 03.....	54
Figura 24 – Indicação da localização da coleta do solo 03.....	55
Figura 25 – (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.....	57
Figura 26 – Material utilizado para determinação da massa específica.....	57
Figura 27 – Picnômetros com amostras submersas em água	58
Figura 28 – Aparelho de Casagrande com amostra de solo argiloso	59
Figura 29 – Molde, soquete e disco espaçador do ensaio de compactação Proctor	60
Figura 30 – Corpos de prova moldados no cilindro de 100 mm de diâmetro após o ensaio de compactação no CGS para o (a) solo 01 (b) solo 02 (c) solo 03	61
Figura 31 – Corpo de prova desmoldado após compactação no CGS	62
Figura 32 – (a) Prensa manual do ensaio de CBR, (b) Extensômetro e molde – equipamentos utilizados para realização dos ensaios de expansão e (c) Corpos de prova imersos no tanque .	64
Figura 33 – CP desmolado após a compactação no CGS para utilização no ensaio CBR.....	65
Figura 34 – (a) Corpo de prova moldado no CGS e apresentando uma folga para o cilindro, (b) Água entrando no corpo de prova pela parte inferior do cilindro	65
Figura 35 – Posicionamento do corpo de prova para ensaio de Resistência à Tração	66
Figura 36 – (a) Prensa utilizada para moldagem dos corpos de prova (b) Prensa de rompimento dos CPs para o ensaio de Resistência à Tração por compressão Diametral	67
Figura 37 – Ruptura do corpo de prova RTCD	68
Figura 38 – (a) Molde e soquete padrão, (b) Corpos de prova e (c) Prensa de rompimento dos CPs para realização do ensaio de Resistência à Compressão simples	69
Figura 39 – Curvas granulométricas dos solos.....	71
Figura 40 – Gráfico do limite de liquidez do solo 02	73
Figura 41 – Gráfico do limite de liquidez do solo 03	73
Figura 42 – Curvas de compactação do solo 01 (a) Proctor e (b) CGS.....	75
Figura 43 – Curvas de compactação do solo 02 (a) Proctor e (b) CGS	77
Figura 44 – Curvas de compactação do solo 03 (a) Proctor e (b) CGS.....	79
Figura 45 – Efeito das energias nos valores de CBR dos solos	81

Figura 46 – Penetração visual sofrida pelos CPs para o ensaio de CBR para os solos (a) 01, (b) 02 (c) 03 para a moldagem Proctor	83
Figura 47 – Penetração visual sofrida pelos CPs para o ensaio de CBR para os solos (a) 01, (b) 02 (c) 03 para a moldagem CGS	83
Figura 48 – Resultados de RTCD para os solos compactados no processo Proctor e CGS	84
Figura 49 – Ruptura sofrida nos CPs para o (a) solo 02, (b) solo 03 durante o ensaio de RTCD	86
Figura 50 – Resultados de RCS para os solos compactados no processo Proctor e CGS	86
Figura 51 – Diferença de altura dos CPs moldados no CGS para o ensaio de Resistência à Compressão simples	87
Figura 52 – Ruptura sofrida nos CPs moldados no Proctor durante o ensaio de Resistência à compressão simples para o (a) solo 01, (b) solo 02 e (c) solo 03.....	89
Figura 53 – Ruptura sofrida nos CPs moldados no CGS durante o ensaio de Resistência à compressão simples para o (a) solo 01, (b) solo 02 e (c) solo 03.....	89
Figura 54 – Água acumulada no interior do CGS	90
Figura 55 – Água acumulada no corpo de prova do solo 01 moldado no CGS	90
Figura 56 – Água acumulada no papel filtro depois da compactação no CGS	91

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ASTM	<i>American Society for Testing Materials</i>
NBR	<i>Norma Brasileira Registrada</i>
ABNT	<i>Associação Brasileira de Normas Técnicas</i>
ME	<i>Método de Ensaio</i>
DNIT	<i>Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes</i>
DNER	<i>Departamento Nacional de Estradas de Rodagem</i>
SHRP	<i>Strategic Highway Research Program</i>
USACE	<i>United States Army Corps of Engineers</i>
GTM	<i>Gyratory Test Machine</i>
PCG	<i>Prensa de Cisalhamento Giratório</i>
SUPERPAVE	<i>Superior Performance Asphalt Pavements</i>
CGS	<i>Compactador Giratório Superpave</i>
SGC	<i>Superpave Gyratory Compactor</i>
CBR	<i>Califórnia Bearing Ratio</i>
ISC	<i>Índice de Suporte California</i>
HRB	<i>Highway Research Board</i>
LCPC	<i>Laboratoire Central des Ponts ET Chaussées</i>
SUCS	<i>Sistema Unificado de Classificação de Solos</i>
RTCD	<i>Resistência à Tração por Compressão Diametral</i>
RCS	<i>Resistência à Compressão Simples</i>
EUA	<i>Estados Unidos da America</i>
UFMG	<i>Universidade Federal de Campina Grande</i>
LEP	<i>Laboratório de Engenharia de Pavimentos</i>
PC	<i>Computador pessoal</i>
PIVIC	<i>Programa Institucional de Voluntários de Iniciação Científica</i>
%	<i>Porcentagem</i>
MPa	<i>Megapascal</i>
kPa	<i>Quilopascal</i>

$\gamma_{sm\acute{a}x}$

Peso específico seco máximo

$h_{\acute{o}t}$

Umidade ótima

pcf

Pounds per cubic feet

CAPÍTULO 1

1.0 INTRODUÇÃO

O processo de compactação dos solos tem sido usado em várias obras de engenharia tais como, aterros, diques, estradas e barragens de terra, por engenheiros e construtores durante séculos como um método de construção destas estruturas. Na sua grande maioria, o solo que é o principal material de engenharia para estas construções, apresenta propriedades geotécnicas em condições não recomendadas ou desejáveis para sua execução. Desta forma é necessária a compactação do solo como forma de melhoramento destas propriedades.

Os benefícios ou melhorias das propriedades do solo que ocorrem como resultado da compactação de solo 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, expansão e retração.

Para determinar e/ou quantificar as propriedades de solo necessárias para a compactação de campo é necessária a comparação entre a compactação de campo à compactação do solo de laboratório (BROWNE, 2006).

O ensaio de compactação de laboratório mais difundido foi apresentado em 1933 pelo engenheiro americano chamado Ralph R. Proctor, o qual estabeleceu que a compactação é uma função do peso específico do solo, teor de umidade, energia de compactação e do tipo de solo. No ensaio Proctor, a amostra de solo é submetida a um processo de compactação dinâmica ou por impacto, no qual a amostra de solo é confinada em um molde e submetida a uma série de golpes por um soquete. Na compactação do solo de campo o procedimento consiste em espalhar o material, uniformemente, em camadas, e a compactação é feita, empregando: amassamento e vibração.

Os equipamentos de compactação de campo, assim como as técnicas e a tecnologia empregadas, desenvolveram-se muito nos últimos anos e, em contrapartida, o principal método de compactação de laboratório, o ensaio Proctor, não evoluiu muito desde a sua concepção. Desta forma, pesquisas sobre métodos de compactação de solos em laboratório vêm sendo retomadas com o intuito de buscar um mecanismo de ação que simule de forma mais semelhante a compactação de campo, se comparado ao ensaio Proctor, e para isso o uso dos compactadores giratórios tem sido uma solução.

Segundo Marques (2004) o desenvolvimento do conceito da compactação giratória é atribuído aos engenheiros *Philippi, Raines e Love*, do Departamento de Rodovias do Texas, na década de 1930.

É baseado em especificações estabelecidas para os agregados e nas proporções volumétricas da mistura asfáltica. Por sua vez, as misturas são “projetadas” com o auxílio de parâmetros relacionados com as propriedades físicas, químicas e mecânicas dos agregados, bem como pela relação volume de vazios, volume de CAP e volume de agregado.

Os compactadores giratórios são equipamentos capazes de aplicar simultaneamente uma carga vertical e uma tensão cisalhante, por meio do giro do molde de compactação sob um ângulo de inclinação (PING, 2003a).

Hoje, mais de 2.000 SGCs estão em uso nos Estados Unidos para a gestão de projeto de campo de misturas asfálticas, na sua maioria esses modelos fornecem um meio de ajustar e calibrar os quatro parâmetros primários que afetam o grau de compactação de amostras de laboratório HMA: i) ângulo de inclinação, ii) pressão confinante, iii) a taxa de rotação e iv) número de giros (MOKWA; CUELHO; BROWNE, 2008).

Usar o CGS para compactar o solo é muito interessante, devido o processo de compactação giratória simular a compactação de campo mais estreitamente do que nos ensaios de compactação de impacto tradicional. Além disto, o compactador giratório ter um histórico bem estabelecido de sucesso com compactação de misturas asfálticas. Diante do exposto, esta pesquisa tem por objetivo comparar o processo de compactação do solo de laboratório (Proctor) com um método de compactação novo que utiliza o compactador giratório Superpave (CGS) para compactar amostras de solo.

1.1 Objetivos

1.1.1.1 Objetivo Geral

Comparar os efeitos das compactações por impacto (Proctor normal, intermediária e modificada) e por amassamento (giratória) em três tipos de solos.

1.1.1.2 Objetivos Específicos

- Realizar a caracterização geotécnica das amostras de solo;
- Submeter as amostras de solo à compactação dinâmica (método Proctor) e à compactação por amassamento (método CGS) nas três energias: Normal, Intermediária e Modificada;

- Realizar os ensaios de CBR, Tração Indireta por Compressão Diametral e Resistência à Compressão Simples com amostras moldadas por ambos os métodos;
- Avaliar os efeitos destes dois processos de compactação no comportamento geotécnico do solo.

1.2 Organização do Trabalho

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: métodos de compactação no laboratório e campo.

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.

No final do trabalho estão inseridas as referências bibliográficas.

CAPÍTULO 2

2.0 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são tratados os assuntos relevantes para o desenvolvimento desta pesquisa. Primeiramente, faz-se uma abordagem sobre os fundamentos da compactação de solo em laboratório. Em seguida, sobre os compactadores giratórios, a partir do seu desenvolvimento, seus usos históricos, bem como as aplicações modernas do CGS além das pesquisas anteriores que usaram o compactador giratório na compactação de solos.

2.1 Compactação de solo

A compactação de solos é realizada com o intuito de se evitar problemas diversos, como recalques excessivos em rodovias e aterros, ruptura de taludes e de barragens, dentre outros. No caso da 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 seca, etc; outras recomendações podem também serem feitas com base em propriedades mecânicas, como módulo de resiliência, resistência a compressão diametral, deformação permanente, entre outras (DANTAS, 2013).

Segundo Holtz & Kovacs (1981) a compactação do solo é definida, em termos simples, como a densificação dos solos através da aplicação de energia mecânica. Em outros termos, compactar um solo significa aumentar a sua resistência, diminuir a permeabilidade e a absorção de água, ou seja, o solo compactado apresenta melhores propriedades de engenharia, tais como: aumento da estabilidade, maior impermeabilidade.

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. O autor mostrou que ao se aplicar uma determinada energia de compactação, representada por um certo número de passadas de um determinado equipamento no campo ou por um 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, para uma determinada energia de compactação utilizada.

Os princípios que governam o processo de compactação dos solos no campo são essencialmente os mesmos discutidos anteriormente para os ensaios em laboratórios. Assim, os valores de peso específico seco máximo obtidos são fundamentalmente função do tipo do solo, da quantidade de água utilizada e da energia específica aplicada pelo equipamento que será utilizado, a qual depende do tipo e peso do equipamento e do número de passadas sucessivas aplicadas.

A energia de compactação no campo pode ser aplicada, como em laboratório, de três maneiras diferentes: por meios de esforços de pressão, impacto, vibração ou por uma combinação destes. Os processos de compactação de campo geralmente combinam a vibração com a pressão, já que a vibração utilizada isoladamente se mostra pouco eficiente, sendo a pressão necessária para diminuir, com maior eficácia, o volume de vazios interpartículas do solo.

No campo após espalhar o material, uniformemente, em camadas mais ou menos horizontais, a compactação é feita empregando-se equipamentos de compactação divididos em três categorias: os soquetes mecânicos, os rolos estáticos e os rolos vibratórios.

Segundo Das (2007) a maior parte dos processos de compactação no campo é executada por rolos compactadores. Os quatro tipos mais comuns são: rolo compactador liso; rolo compactador de pneus de borracha; rolo compactador pé-de-carneiro; e rolo compactador vibratório.

Desta forma, pesquisas sobre métodos de compactação de solos em laboratório vêm sendo retomadas, dentre elas a compactação por amassamento com aplicação do compactador giratório. Atualmente, os compactadores giratórios são equipamentos capazes de aplicar simultaneamente uma carga vertical e uma tensão cisalhante, por meio do giro do molde de compactação sob um ângulo de inclinação. Esse mecanismo de ação do compactador giratório simula de forma mais semelhante a compactação de campo, se comparado ao Ensaio Proctor. Além disso, o compactador giratório tem apresentado um histórico positivo na compactação de misturas asfálticas (Mokwa; Cuelho; Browne; 2008; Ping et al., 2003a).

2.2 Métodos de compactação em laboratório

Os métodos de compactação do solo em laboratório podem ser categorizados da seguinte forma: compactação dinâmica ou por impacto, compactação estática ou por pressão, compactação por amassamento, compactação por vibração e compactação por pisoteamento. A seguir, serão apresentados todos estes métodos, dando ênfase à compactação por impacto e por amassamento com uso do compactador giratório, materiais de estudo desta pesquisa.

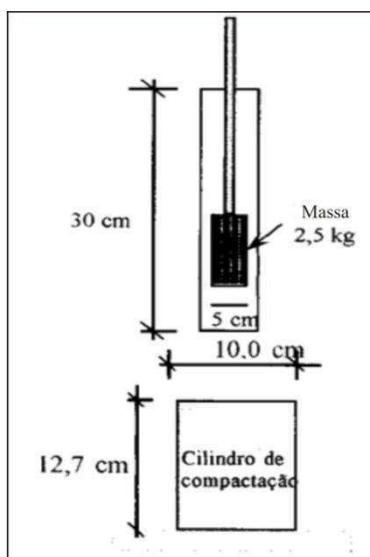
2.2.1 Compactação dinâmica ou por impacto

A compactação de solos dinâmica ou por impacto ainda é a forma mais empregada mundialmente para realização do ensaio de compactação. O início da técnica de compactação é creditada ao engenheiro Ralph Proctor, que, em 1933, publicou suas observações sobre a compactação de aterros, mostrando ser a compactação função de quatro variáveis: a) Peso específico seco; b) Umidade; c) Energia de compactação e d) Tipo de solo. A compactação dos solos tem uma grande importância para as obras geotécnicas, já que através do processo de compactação consegue-se promover no solo um aumento de sua resistência e uma diminuição de sua compressibilidade e permeabilidade.

O ensaio de compactação Proctor Normal foi normatizado no Brasil pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (NBR 7182/86) sob o nome *Solo – ensaio de compactação*, e pelo DNIT (DNER - ME 129/94), sob o nome de *Solos – compactação utilizando amostras não trabalhadas*; sendo possível nas duas normas, o ensaio ser realizado nos três níveis de energia: normal, intermediário e modificado.

A compactação dinâmica, ou por impacto, consiste basicamente em deixar cair sobre uma camada de solo, com espessura determinada, colocada em um cilindro padrão, um certo peso (que é o do soquete) de uma certa altura, um número determinado de vezes (NBR 7182/86) (Figura 1). Todas estas variáveis dependem do tipo de energia de compactação que se deseja aplicar. Quando se varia um destes fatores (altura, peso, número de golpes, ou número de camada) varia-se também a energia de compactação e, com isso, o resultado que se pretende obter.

Figura 1 – (a) Esquema do soquete e molde (b) Compactação Proctor por impacto de um solo.



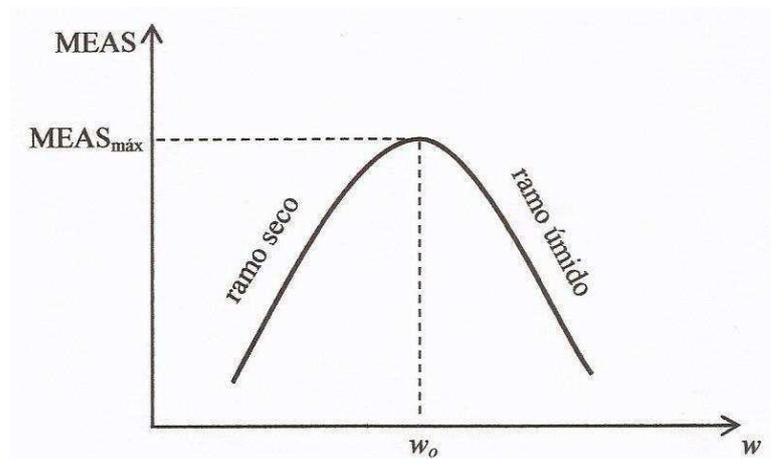
(a)



(b)

Ralph R. Proctor, em 1933, publicou uma série de artigos divulgando o seu método de controle de compactação. Este era baseado no método de projeto e construção de barragens de terra compactadas que estava sendo empregada na Califórnia, onde a densidade com que um solo é compactado, sob uma determinada energia de compactação, depende do teor de umidade no momento da compactação. Nesses artigos, Proctor propôs também uma maneira gráfica da relação existente entre teor de umidade (w) e massa específica aparente seca (MEAS) que ficou conhecida como a curva de compactação Proctor. Este apresenta na maioria das vezes, um formato similar ao de uma parábola com concavidade voltada para baixo. O trecho ascendente é denominado de ramo seco e o descendente de ramo úmido (Figura 2).

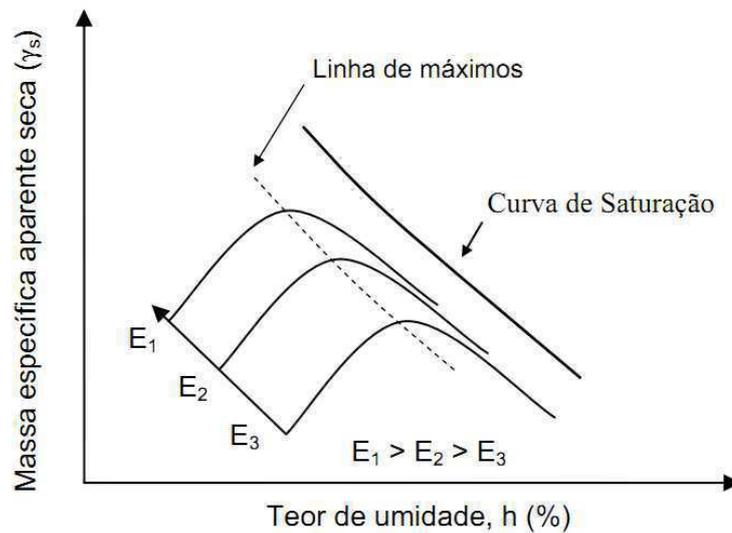
Figura 2 – Curva de compactação Proctor de um solo qualquer (DANTAS, 2013).



Os ensaios de compactação por impacto mais comuns são os ensaios Proctor Modificado e Normal, AASHTO T99 e T180 - 11, respectivamente. Desenvolvido na década de 1930 e 1940, estes testes foram os primeiros a serem padronizados e por consequência uma ampla base de dados existe para comparação.

O ponto de máximo desta curva determina a umidade ótima (w_0) e a massa específica seca máxima ($MEAS_{máx}$) para o solo em um determinado nível de energia aplicado, e este par ordenado (w_0 , $MEAS_{máx}$) vai variar dependendo do tipo de solo e da energia transmitida ao solo durante a compactação. À medida que se aumenta a energia de compactação, há uma redução do teor de umidade ótimo e uma elevação do valor do peso específico seco máximo. A Figura 3 mostra a influência da energia de compactação no teor de umidade ótimo (w_{ot}) e no peso específico seco máximo ($\gamma_{smáx}$).

Figura 3 – Influência de diferentes níveis de energia de compactação nas curvas de compactação de um mesmo solo (Adap. do DNIT, 2006).



A energia empregada no ensaio Proctor é calculada segundo a Equação 1.

$$E_C = \frac{P \times h \times N \times n}{V} \quad (1)$$

Onde:

E_C : energia de compactação por unidade de volume, em J/cm³;

P : peso do soquete, em N;

h : altura de queda do soquete, em m;

N : número de golpes por camada

n : número de camadas

V : volume do molde cilíndrico, em cm³.

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.

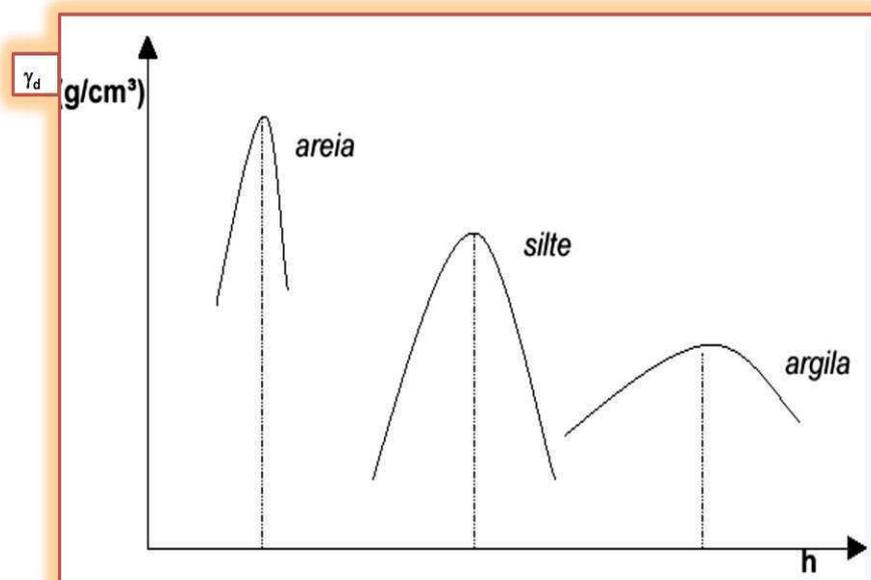
Tabela 1 – Valores de energia do ensaio Proctor (DANTAS, 2013)

PROCTOR	ENERGIA (J/cm ³)
Normal	0,59
Intermediário	1,30
Modificado	2,78

A estrutura de um solo compactado depende da relação umidade – energia de compactação aplicada por ocasião da compactação. Para uma mesma energia, solos de granulometria diferente apresentam valores de teor de umidade ótimos e massa específica seca máxima e resultam em curvas de compactação conforme a Figura 4.

Desta forma, solos de naturezas diferentes, quando compactados com a mesma energia, apresentam curvas de compactação características a cada tipo de material. As areias possuem maior densidade máxima e menor umidade ótima do que as argilas, e estas apresentam uma curva de compactação com um máximo bem mais definido. Já os siltes se comportam de forma intermediária.

Figura 4 – Curvas de compactação Proctor para determinados tipos de solo (Adap. PINTO,2000).

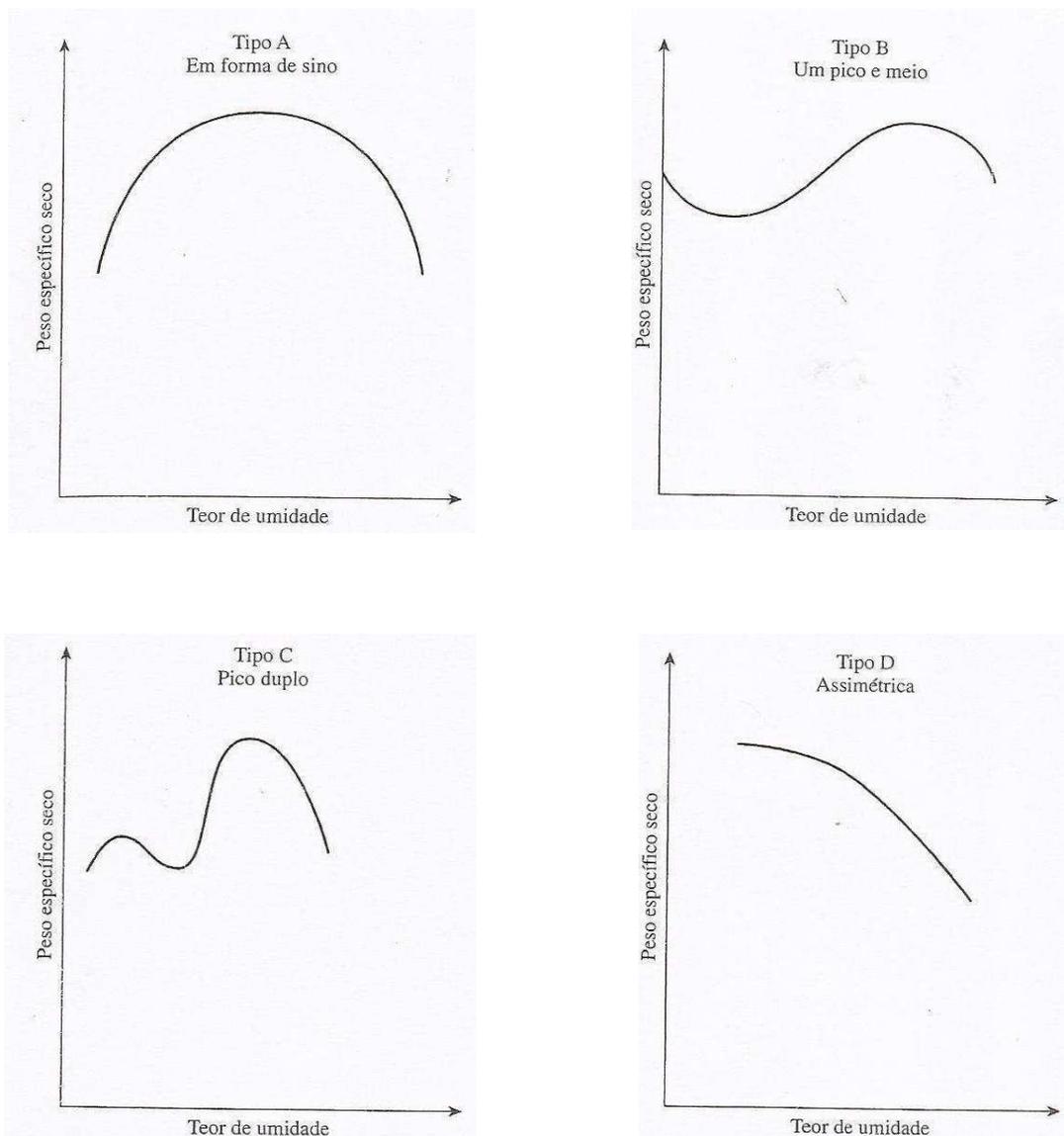


De uma maneira geral, solos granulares atingem maiores valores de peso específico aparente seco e menores valores de umidade ótima quando comparados a solos argilosos, que apresentam peso específico aparente seco baixo e umidades ótimas elevadas, ou seja, os solos argilosos

apresentam densidades secas baixas e umidades ótimas elevadas, com valores que variam de 25 a 30% correspondendo a umidades ótimas e densidades secas máximas de 1,5 a 1,4 Kg/dm³. Já os solos siltosos apresentam também valores baixos de densidade, frequentemente com curvas de laboratório bem abatidas. Densidades secas máximas elevadas, da ordem de 2,0 a 2,1 kg/dm³, e umidades ótimas baixas, da ordem de 9 a 10%, são representativas de areias com pedregulhos, bem graduadas e pouco argilosas (PINTO, 2000).

Segundo Das (2007) caso o esforço de compactação por unidade de volume de solo apresente uma alteração, a curva de umidade *versus* peso específico também muda e pode apresentar vários tipos de formas e isso pode ser demonstrado com a ajuda da Figura 5, que mostra quatro curvas de compactação de uma argila arenosa.

Figura 5 – Vários tipos de curvas de compactação encontrados para diferentes tipos de solos.



2.2.2 Compactação estática ou por pressão

A compactação estática ou por pressão é um método de compactação que se baseia em aplicar uma pressão sobre o solo de forma uniformemente distribuída. Esta é mais empregada para reproduzir em laboratório as características dos solos granulares compactados em campo, em particular com uso do rolo liso.

Este método consiste em confinar uma amostra de solo em um molde e pressioná-la gradualmente por meio de uma carga estática, através de um pistão, geralmente hidráulico. 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).

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 de uma) 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.

2.2.3 Compactação por amassamento

Segundo Harman et al. (2002), apud Marques (2004), o desenvolvimento do conceito da compactação giratória é atribuído aos engenheiros Philippi, Raines e Love, do Departamento de Rodovias do Estado do Texas, EUA, na década de 1930. O primeiro compactador giratório Texas era manual e foi 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: i) no primeiro, o método deveria ser adaptável tanto ao controle de campo das misturas quanto ao projeto; ii) no segundo, o método deveria produzir essencialmente a mesma densidade, ou razão de vazios, que aquela obtida no pavimento acabado. 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 2 apresenta uma linha do tempo do progresso do compactador giratório e as principais agências responsáveis pelo desenvolvimento (DANTAS, 2013).

Tabela 2 - Evolução do compactador giratório para CBUQ (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's	Primeiro protótipo do compactador Texano no LCPC, França	D: Desconhecido H: Desconhecida	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 rpm a 30 rpm
1991	Equipamento de ensaio de cisalhamento giratório modificado/ FHWA	D: 152,4 H: 95,3	P: 600 kPa A: Fixado de 0,5 a 3° F: 30 rpm
1991	Departamento de Transportes do Texas, SHRP	D: 152,4 H: 95,3	P: 600 kPa F: Variável
1993	SHRP/ Compactador Giratório Superpave, EUA	D: 150 H: 115	P: 600 kPa A: Fixado em 1,25° F: 30 rpm
1996	PCG ₃ / LCPC, França	D: 150 H: Fixada de 100 a 160	P: Fixada de 500 a 800 rpm A: Fixada de 0,5 a 2° F: Fixado de 6 a 30 rpm

Onde:

D: Diâmetro
H: Altura
P: Tensão normal

A: Ângulo de giro
F: Frequência de giros

No ano de 1939, o Departamento de Transportes do Texas iniciou o desenvolvimento de uma prensa giratória manual para ensaios experimentais com solos e materiais a base de betume, referindo-se a este dispositivo como prensa giratória de solos, cuja ideia é atribuída à Philippi, Raines e Love (Ping *et al.*, 2003a). O compactador giratório do Texas 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. (Mokwa; Cuelho; Browne; 2008). 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.

O processo de compactação na prensa giratória do Texas (Figura 6) consistia em colocar o material em um molde de aço de 1016 mm de diâmetro interno, que era colocado entre placas paralelas, sob um ângulo de 6°(graus). O próximo passo era a aplicação de uma pressão de aproximadamente 345 kPa, por meio de um macaco hidráulico. A seguir, o molde era girado três vezes manualmente com o auxílio de alavancas/barras. Após os três giros, a pressão, que era de 345 kPa, apresentava a tendência em diminuir e um ciclo de carregamento era realizado, ou seja, é removido o ângulo e a pressão é reajustada para 345 kPa. O procedimento de três giros se repetia até que a pressão de 1034 kPa fosse atingida após um 34 curso completo do macaco hidráulico; depois disso, uma carga adicional de aproximadamente 17 MPa era aplicada para finalizar a compactação (HUBBER, 1996).

Figura 6 – Prensa giratória do Texas (HARMAN et. al., 2002).



Nos anos 50, John L. McRae, pertencente ao Corpo de Engenheiros do Exército Americano, baseando-se nos princípios do Departamento de Transportes do Texas, da década de 30, desenvolveu um compactador por amassamento giratório, o GTM – Gyratory Testing Machine (Figura 7), uma vez que as pesquisas daquela época indicavam que a compactação por impacto Marshall não simulava apropriadamente as densidades das misturas nas trilhas das rodas sob tráfego pesado. Ele acreditava que as propriedades mecânicas das amostras produzidas pelo impacto do soquete Marshall não simulavam as propriedades das amostras extraídas dos pavimentos (HARMAN et al., 2002).

Figura 7 – Compactador giratório por amassamento do USACE (HARMAN et. al., 2002).



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. O ângulo flutuante é medido durante a compactação e incorporado ao procedimento de projeto ao qual ele está associado. Além disso, o dispositivo captura a pressão no sistema de dois pontos e a altura da amostra (HARMAN et al., 2002).

Segundo Ping et al. (2003a) apud Dantas (2013) Mc Rae apresentou como resultados aos seus estudos que o número de giros por minuto tinham pouca ou nenhuma influência sobre a densidade. Ao contrário, da pressão vertical que quando aumentada resultavam em incrementos significativos no peso específico, enquanto que o ângulo de giro ficava variando entre um ou dois graus.

Outro importante compactador foi desenvolvido nas décadas de 60 e 70, pelo *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC) na França, a partir dos conceitos do compactador giratório do Texas. A Prensa de Cisalhamento Giratório (PCG), como ficou conhecida, 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).

Segundo Marques *et al.* (2004) apud Santos (2012) o Programa Estratégico de Pesquisa Rodoviária – SHRP (*Strategic Highway Research Program*) foi iniciado em 1987 para desenvolvimento de um novo sistema de especificações de materiais asfálticos. O SUPERPAVE (*SUperior PERformance asphalt PAVements* – Pavimentos Asfálticos de Desempenho Superior) foi um dos produtos finais do programa SHRP e concebido para auxiliar na seleção de materiais e projeto de misturas. Este sistema especifica materiais, projeta e analisa misturas asfálticas e prevê desempenho de pavimentos. Inclui equipamentos de ensaios, métodos e critérios.

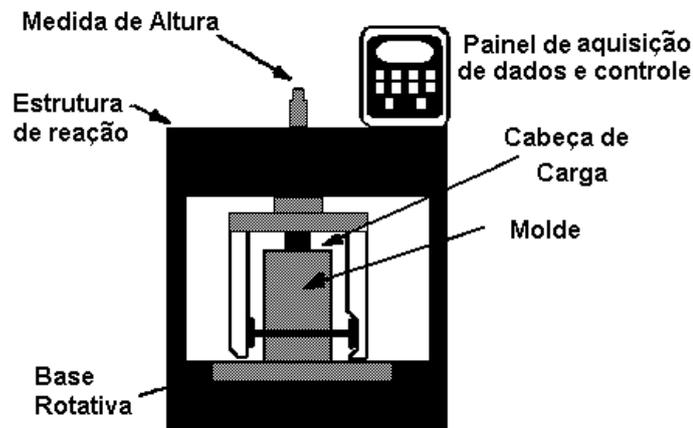
O objetivo dos pesquisadores do programa SHRP era criar um dispositivo que compactasse a amostra de mistura betuminosa a quente (HMA – Hot Mix Asphalt) mais próxima da compactação em campo, de forma que as densidades finais fossem aquelas obtidas no pavimento através de condições reais de clima e carregamento. Com isso, desenvolveu-se o compactador giratório SUPERPAVE (MEDEIROS *et al.*, 2009).

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. Já 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). A Figura 8 apresenta um esquema simplificado do Compactador Giratório Superpave.

Figura 8 - Esquema do Compactador Giratório SUPERPAVE (LUCENA, 2009).

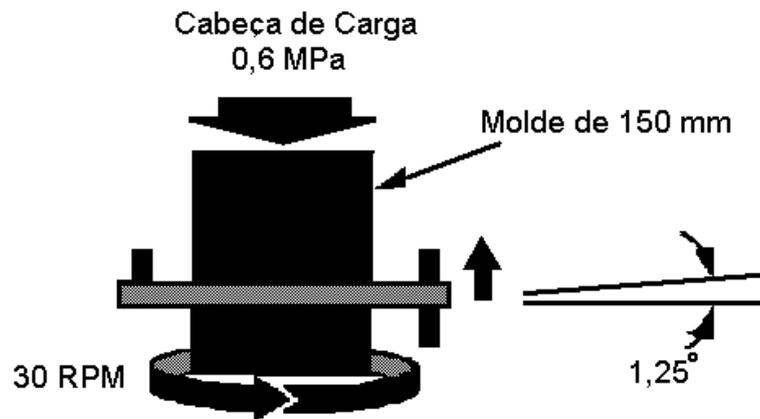


Segundo Marques (2004) a estrutura de reação do CGS é constituída por um pórtico não deformável. A base do CGS é afixada nesta estrutura suportando o molde e permitindo seu giro. Durante a compactação o topo do dispositivo de carregamento é que faz a compressão do corpo de prova e o seu diâmetro corresponde nominalmente ao diâmetro interno do molde (100 ou 150 mm). Para que o molde seja posicionado no ângulo de giro são usados mancais. O ângulo de compactação do CGS foi definido em $1,25^\circ$. A velocidade constante de giro foi definida em 30 rpm sendo acionada por um motor elétrico que atua sobre a base rotativa.

A pressão de compactação no corpo de prova é de 600 kPa e é fornecida por um sistema hidráulico ou mecânico que aplica a carga no topo do dispositivo de carregamento. A pressão é medida na cabeça da carga durante a compactação quando o corpo de prova vai reduzindo de volume. O sistema de carregamento é acionado para ajustar a posição da cabeça de carga para que a pressão de compactação seja mantida constante durante todo o processo.

A variação vertical da posição da cabeça de carga é igual a altura do corpo de prova. Esta altura é processada, por meio de uma conexão serial conectada a um micro-computador e impressora. A Figura 9 mostra as configurações finais do molde CGS e dos parâmetros de compactação adotados pelo programa SHRP.

Figura 9 - Configurações do Compactador Giratório SUPERPAVE (LUCENA, 2009).



Segundo Cominsky (1998) apud Lucena *et al.* (2009) no Programa SHRP foram realizados estudos com quatro dispositivos de compactação (compactador giratório Texas, rolagem Exxon, soquete Marshall e o compactador por amassamento linear Elf) para determinar o que simularia mais adequadamente a compactação que ocorre no campo. As conclusões extraídas desta fase dos estudos foram descritas abaixo:

- análises estatísticas indicaram que o método giratório produz amostras similares às do revestimento do pavimento. Os compactadores *Exxon* e *Elf* apresentaram a mesma probabilidade de produzir amostras similares às amostras de pavimentos e o compactador Marshall de base rotativa apresentou a menor probabilidade;
- o compactador Marshall quebra os agregados mais frequentemente durante a compactação que os outros três compactadores;
- quando comparado ao compactador por rolagem *Exxon*, o compactador giratório Texas parece ser a melhor escolha para preparar amostras de laboratório para ensaios de rotina de projeto de misturas de concreto asfáltico. Deve-se chamar a atenção que, baseado em outros estudos, a distribuição de vazios de ar das amostras compactadas pelo giratório é menos similar às de campo que as amostras compactadas pelo compactador por rolagem. Esta diferença, entretanto, não afeta desfavoravelmente as propriedades das misturas medidas.

Estudos realizados por Marques (2004) relatam que o compactador giratório pode ser usado como uma ferramenta efetiva para o controle em laboratório da compactação de misturas asfálticas

realizadas em campo. Entretanto, em todos os casos, foi observado que no procedimento de compactação Marshall são obtidos corpos de prova com condições volumétricas diferentes aos obtidos com o CGS. O autor infere que “a compactação Marshall não deve ser usada para o controle da qualidade de misturas asfálticas em campo quando projetadas pelo sistema SUPERPAVE.”

A redução da porcentagem de vazios do compactador giratório relativo ao compactador Marshall já havia sido observado por D'Angelo et al. (1995) apud Marques (2004). Eles estudaram cinco misturas diferentes, produzidas por cinco usinas, que foram comparadas usando os procedimentos de compactação Marshall e de SUPERPAVE. Os resultados indicaram que as amostras compactadas por amassamento (SGC) apresentaram variabilidade nos vazios de ar menor que as amostras compactadas por impacto (Marshall). Segundo o autor, baseado somente no índice de vazios, ambas apresentaram bom desempenho para aplicações de controle de qualidade de misturas asfálticas (LUCENA, 2009).

De acordo com Cavalcanti (2010) 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. Na Figura 10 está apresentando o *Servopac Giratory Compactor*, (compactador utilizado na presente pesquisa).

O Servopac é um compactador giratório totalmente automatizado originalmente concebido para compactar misturas de asfalto por meio da técnica de compactação giratório. A compactação é alcançada por uma ação simultânea de compressão estática e a ação de corte resultante do molde sendo girado através de um ângulo em torno do seu eixo longitudinal. O Servopac foi concebido para compensar automaticamente e manter o ângulo giratório constante durante a compactação, e para proporcionar um meio simples e rapidamente ajustar os parâmetros críticos. O controle do sistema Servopac permite fornecer resultados mais precisos e consistentes, fornecendo assim uma ferramenta poderosa para avaliar configurações de parâmetros ideais.

Figura 10 – Equipamento para compactação por amassamento SUPERPAVE.

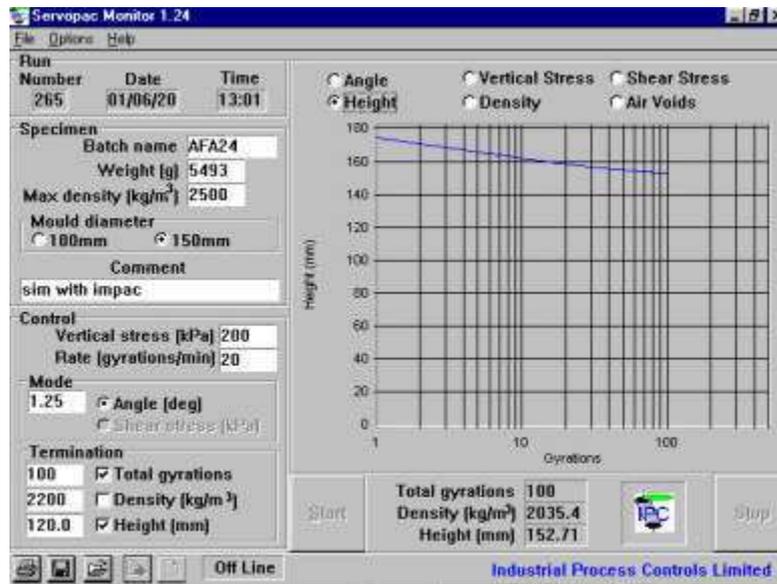


Segundo Ping (2003b) o mecanismo de atuação do SERVOPAC se dar por três atuadores que situam-se 120° (graus) entre si em torno do diâmetro externo do anel de suporte de molde. Para cada um destes atuadores, o sistema de controle eletrônico envia uma onda sinusoidal por meio de uma servo-válvula. As três ondas sinusoidais estão fora de fase uma da outra por 120° (graus) e a amplitude da onda senoidal controla o ângulo de frequência da onda senoidal que controla a taxa de rotação. O sinal de retorno vem do transdutor de deslocamento que tem diretamente sobre o suporte que liga a vareta de acionamento para o molde. O SERVOPAC usa servoválvulas tanto para ângulo giratório e como para a carga vertical, o tempo de resposta é geralmente mais rápido que os sistemas que utilizam unidades eletromecânicas. A operação da máquina de controle de servo permite que a tensão

vertical, ângulo giratório, e a taxa de rotação possam ser rapidamente modificados a partir de um controle remoto ou computador pessoal (PC).

A utilização de um computador com software Servopac de interface 'Windows' (Figura 11) fornece uma tela para inserção dos dados de teste e exibição de gráfico de variações de altura, densidade, ou o ângulo de giro em tempo real. Os dados de teste podem ser armazenados e recuperados ou transferidos para outras fontes de análises (PING, 2003b).

Figura 11 – Janela 'Windows' do software Servopac (PING, 2003b).



Os moldes cilíndricos de aço para a compactação de misturas alfálticas e solos são os moldes com 100 e 150 mm de diâmetro e 270 mm de altura (Figura 12).

Figura 12 – Moldes cilíndricos para compactação no Servopac.



O Servopac foi desenvolvido em conformidade com os requisitos do Programa SHRP Superpave para projeto de mistura asfáltica. A máquina giratória tem quatro variáveis que são os principais fatores que afetam as características de compactação. As variáveis são: o ângulo de giro, a frequência de giros, a pressão vertical ou tensão normal, e o número de giros. A Tabela 3, apresenta os valores máximos e mínimos destas variáveis.

Tabela 3 – Intervalos de variação dos parâmetros do CGS (DANTAS, 2013)

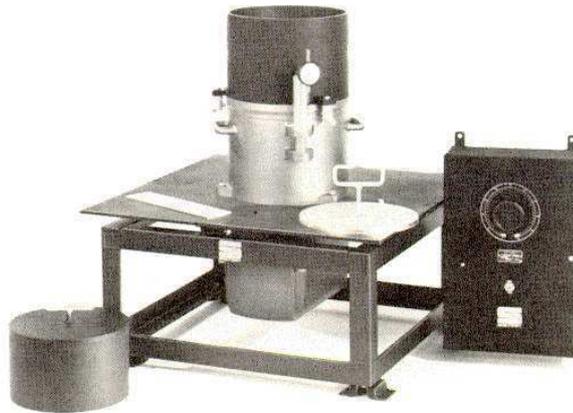
PARAMÊTROS	LIMITES	
	MÍNIMO	MÁXIMO
Tensão normal (kPa)	0	600
Número de giros	0	999
Ângulo de giro (°)	0	3
Frequência de giros (rpm)	3	60
Altura final do CP (mm)	50	170

2.2.4 Compactação por vibração

É um método de compactação que surgiu para apresentar resultados mais consistentes do que a compactação por impacto para solos granulares. 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.

O ensaio de laboratório mais comum que utiliza a compactação vibratória é o ASTM D 4253 (Figura 13). 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. E o índice de densidade máxima que tem seu mecanismo é baseado na vibração do conjunto molde-solo.

Figura 13 – Equipamento de compactação vibratória ASTM D4253 (PING, 2003b).



Segundo Ping (2003b) durante o ensaio de vibração, duas desvantagens surgiram:

- o tempo para realizar do ensaio é demorado. Primeiramente é necessário pelo menos seis minutos depois de encher o molde com o solo uniformemente distribuído, e um período adicional de oito minutos para realizar o ensaio. O molde e sobretaxa criada era bastante complicado. O ensaio completo, levou pelo menos 30 minutos, entretanto, se compararmos apenas com o ensaio de compactação realizado nesta pesquisa que também levou em média 30 minutos, para cada energia não o considero demorado.
- devido à parte inferior do molde ser fixa, foi encontrada dificuldade na remoção da amostra a partir do molde. Ao contrário, dos métodos de compactação por impacto e giratórias que utilizam alguma ferramenta ou de pressão de ar para remover as amostras de solo facilmente.

O teste de vibração não tem sido amplamente usado recentemente devido às desvantagens citadas anteriormente, e por não ser uma técnica adequada para o desenvolvimento adicional.

Desde o desenvolvimento do ensaio ASTM D 4253, vários outros métodos têm sido apresentados, mas nenhum recebeu aceitação generalizada. Uma dessas alternativas é um procedimento de compactação vibratória desenvolvido pela Concrete e Laboratório de Solos da AB Vibro-Verken, Solna, Suécia na década de 1960. Este método de compactação utiliza uma vibração dos solos compactos. Os desenvolvedores deste processo alegaram que os resultados obtidos durante a compactação de solos granulares foram semelhantes aos obtidos pelo teste da compactação por impacto Proctor Modificado. Nenhum outro método proposto de compactação vibratória provou ser o mais adequado, como o procedimento de ensaio ASTM D 4253 (PING, 2003b).

2.2.5 Compactação por pisoteamento

Este método de compactação baseia-se na sucessiva aplicação de altas pressões sobre áreas pequenas da amostra, através de um sistema composto por uma haste em barra de metal pelo qual uma peça cilíndrica, contendo uma mola no seu interior, é pressionada verticalmente no sentido da amostra, realizando a compactação, com pressões que variam com o tempo, crescendo e decrescendo, ciclicamente (Figura 14). Desta forma desmancham-se os agregados das partículas do solo. Por isso mesmo, esta forma de compactação é especialmente indicada para solos coesivos e não indicada para solos granulares. A energia de compactação é função da pressão aplicada, das características do sistema de pressão, do tamanho do molde e do número de aplicações.

Figura 14 – Soquete utilizado na compactação por pisoteamento (WERK, 2000)



Este tipo de compactação, segundo Werk (2000), é o que introduz maiores tensões de cisalhamento e o que melhor representa, portanto, as condições de campo quando a compactação é realizada com rolo do tipo pé-de-carneiro. A compactação realizada pelos equipamentos do tipo rolo pé-de-carneiro é especialmente indicado para solos muito coesivos, pois o efeito de amassamento aliado a grandes pressões estáticas são capazes de produzir esforços internos maiores do que a resistência imposta pelas forças coesivas. Em compactações deste tipo, também se exige uma uniformização e destruição total da estrutura original do solo. Já no campo é mais provável que as ligações entre os grãos, devido a agentes cimentícios originados da decomposição de certos materiais, não sejam totalmente destruídos e que, portanto, o solo resultante apresente características diferentes da compactação em laboratório.

2.3 Estudos comparativos da compactação Proctor versus CGS

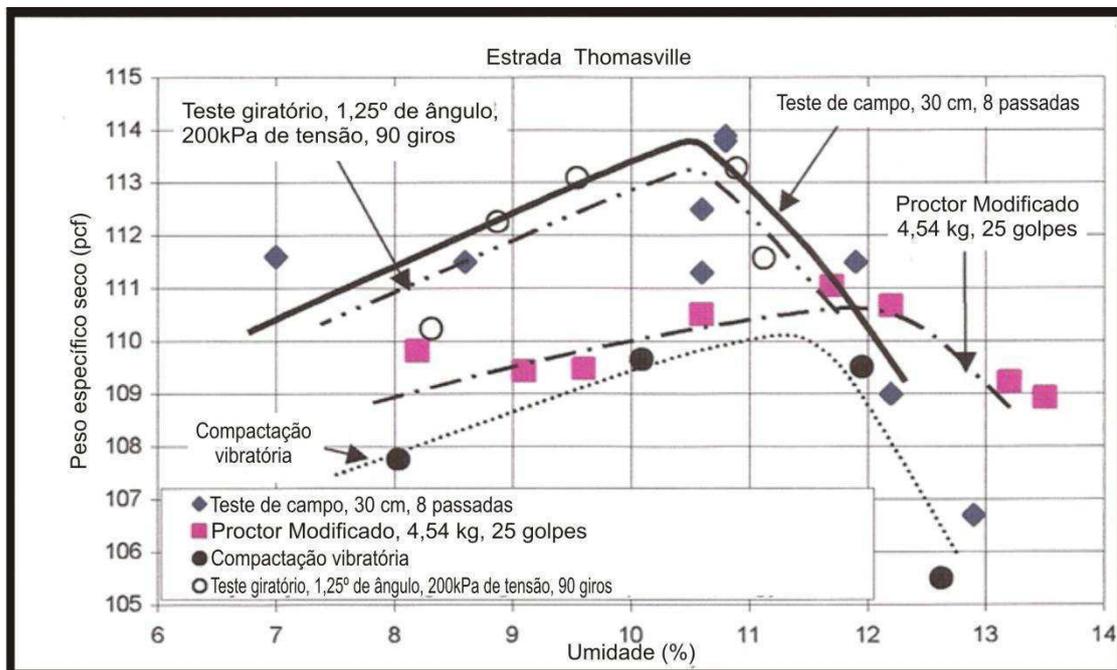
Poucos são os estudos acerca do processo de compactação de solos com uso do compactador giratório. Em âmbito internacional, as pesquisas que merecem ser destacadas sobre o uso do compactador giratório para compactar solos foram realizadas nos Estados Unidos por: Ping, Leonard e Yang (2003a e 2003b), Browne (2006) e Lee, Prezzi, e Kim (2007). No âmbito nacional, as pesquisas sobre uso do compactador giratório para misturas asfálticas são relativamente recentes, mas no que diz respeito ao uso do compactador giratório para compactação de solos existe apenas a pesquisa de Dantas (2013) relatos na literatura sobre uso do giratório na compactação de solos.

No ano de 2003, no Departamento de Transportes do Estado da Florida, EUA, Ping *et al.* (2003a, 2003b) publicaram um relatório no qual foram feitas comparações entre os pesos específicos secos encontradas no campo no período pós-tráfego, com os pesos específicos secos obtidos do Proctor Modificado e do compactador giratório Superpave para solos com características granulares (DANTAS, 2013).

Na comparação campo – Proctor Modificado, Ping *et al.* (2003b) encontraram resultados que mostraram grande disparidade entre os pesos específicos secos. Entretanto, na comparação campo – compactador giratório houve uma boa correlação entre os pesos específicos secos de campo com os obtidos no compactador giratório.

Os resultados dos testes de compactação de campo e de laboratório da Estrada Thomasville apresentados na Figura 15 (a), indicam que no campo o peso específico seco máximo obtido após oito passagens do compactador são mais elevados do que os encontrados usando o procedimento laboratorial Proctor (113,8 pcf – 1,810 g/cm³ versus 110,6 pcf – 1,762 g/cm³) estes valores superiores de peso específico também foram obtidos a um teor de umidade de aproximadamente 1 ½ ponto percentual menor do que a umidade ótima do Proctor.

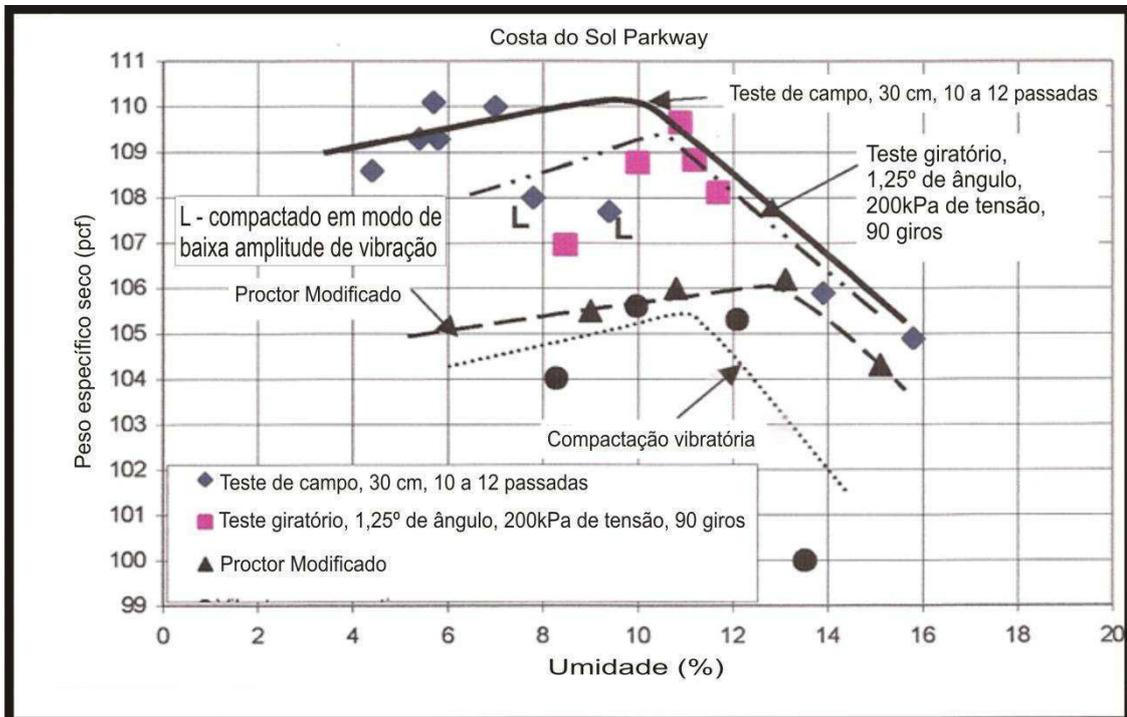
Figura 15 (a) – Resultados comparativos dos testes de compactação de campo e laboratório da Estrada Thomasville.



Fonte: Ping et al. (2003)

Os testes de compactação de campo e de laboratório do solo da Costa do Sol Parkway estão resumidos e apresentados na Figura 15 (b). Conforme pode ser observado nas figuras, o peso específico seco máximo obtidos a partir do ensaio de compactação de laboratório Proctor foi de aproximadamente 106 pcf (1,698 g/cm³) a uma umidade ótima de 13%. Este peso específico seco é muito semelhante aos pesos específicos obtidos no campo após quatro a seis passagens do compactador, mas o peso específico de campo foi obtido com uma umidade muito menor do que o peso específico seco máximo do Proctor modificado cerca de 5% da energia modificada a umidade ótima. Para o teste de campo, o peso específico máximo após 10 a 12 passagens do compactador foi de 110 pcf (1,762 g/cm³), estes resultados mostraram que as especificações de construção atuais subestimam drasticamente a densidade máxima campo viável para solos arenosos.

Figura 15 (b) – Resultados comparativos dos testes de compactação de campo e laboratório da Costa do Sol Parkway.



Fonte: Dantas (2013)

As curvas de compactação de campo foram então comparadas com as curvas de compactação giratorias de laboratório, para finalmente se determinar se a compactação giratória é um método viável para compactação de solos granulares. Como pode ser visto nas Figuras 15 (a) e (b) acima, as curvas de compactação giratória possuem resultados semelhante as curvas de teste de campo em termos tanto de peso específico máximo quanto em termos de teor de umidade ótima. O procedimento do teste giratório aconteceu com 200 kPa de pressão vertical, 1,25°(graus) de rotação, ângulo a 90 giros e frequência de 20 giros por minuto. O que se pode concluir é que a compactação giratória é uma promessa considerável quando se tratar de replicar características de compactação de campo.

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 (A-1-a, A-3, A-4, A-7-6) com teores de umidade variados (Tabela 4). Os tipos de solo utilizados neste estudo foram selecionados para representar uma ampla variedade de solos.

Tabela 4 - Parâmetros de compactação (BROWNE, 2006)

Pressão de confinamento (kPa)	200, 300, 400, 500 e 600
Número de giros	0 – 500
Tipo de solo	A-1-a, A-3, A-4 e A-7-6
Teor de umidade	Seco e Úmido

Para avaliar o grau de compactação do solo conseguida pelo compactador giratório, o resultados dos testes foram comparados com os resultados do Proctor. A hipótese inicial era de que a compactação giratória ultrapassaria os pesos específicos secos máximos obtidos quando utilizado o Proctor.

Browne 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. Na compactação giratória os solos A-1-a, A-3 e A-7-6 foram compactados a 103,2 %, 114,2 %, e 101,2% do Proctor (Energia Modificada). Já a compactação giratória do solo A-4 só atingiu 96,9 % do peso específico seco máximo do Proctor, e segundo o autor, para explicar o resultado dos testes com o solo A-4 seria necessário uma investigação continuada para desenvolver um protocolo padronizado para compactação giratória de solos, bem como uma compreensão mais profunda do solo drenado. De maneira geral, a conclusão deste estudo apontou um futuro promissor para a compactação dos solos utilizando a compactação giratória.

O intuito do estudo de Lee, Prezzi, e Kim (2007) é avaliar as propriedades da estrutura de solos do subleito compactado utilizando o compactador giratório feito por Servopac para simular as condições de compactação de campo, para isto, um programa de teste foi realizado para avaliar a aplicação de quatro métodos de compactação de laboratório diferentes (Proctor A - compactação Proctor padrão, Proctor D - compactação de Proctor modificado, GTM - Máquina de Teste Giratório, compactação no campo) para a avaliação de dois solos do subleito.

As amostras de solo deformadas foram coletadas para a preparação de amostras em laboratório, utilizando a compactação Proctor e métodos de compactação giratórios. Dados de compactação de campo foram coletados a partir de um local de construção de estradas em Pusan, na Coreia. Após a conclusão da compactação do solo de fundação no campo usando um rolo vibratório, foram coletadas amostras de blocos de material de subleito.

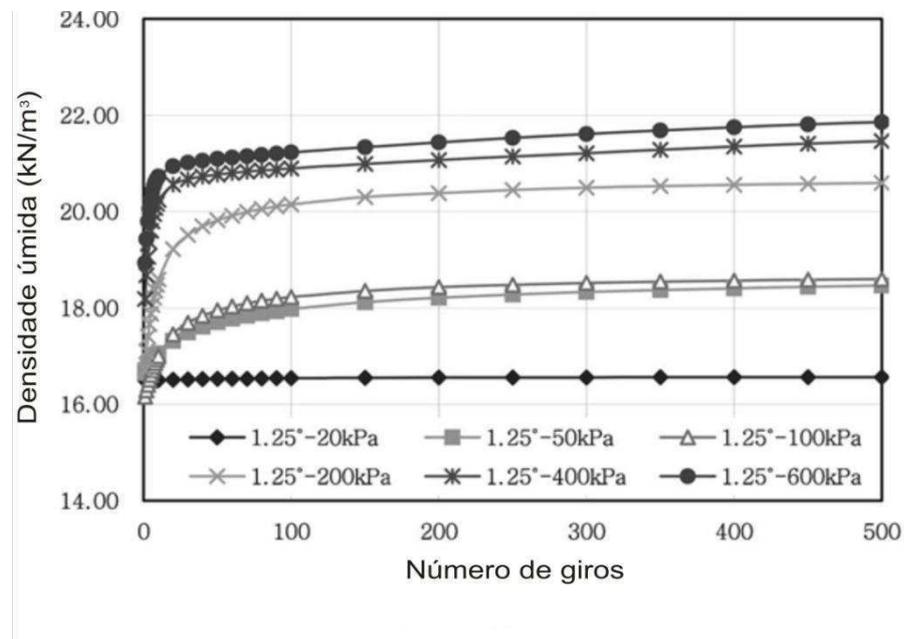
O solo do subleito utilizado nesta pesquisa foi classificada como SM e SW, e da gravidade específica foi de 2,7 para o solo SM e 2,65 para o solo SW. O limite de liquidez, limite de plástico, e do índice de plasticidade para o solo SM foram 28,7, 23,9, e 4,80%, respectivamente. O solo SW foi considerado como não plástico.

Para determinar a energia de compactação necessária para melhor simular as características dos campos, vários ensaios de compactação de laboratório foram realizados por várias combinações de pressão vertical e o número de giros. O ângulo de rotação foi fixado em 1,25°, que é o ângulo tipicamente utilizado para a mistura de asfalto quente; os ângulos de rotação de 1,0° e 1,5° foram utilizados a fim de comparar o efeito da compactação. O diâmetro da amostra foi igual a 100 mm. Foram utilizadas as seguintes pressões verticais: 50, 100, 200, 400, e 600 kPa. O número de giros vão variar até um máximo de 500 giros. Todas as amostras foram preparados no teor de umidade ideal para cada tipo de solo, conforme determinado pelos ensaios de compactação Proctor Padrão e Modificado. As Figuras 16 (a) e (b) mostram a densidade úmida compactada obtida para várias pressões verticais como uma função do número de giros. Para um número de giros entre 10 e 15, a densidade do solo foi observada por alterar drasticamente. O grau de mudança de densidade depende da pressão vertical, como pode ser visto na Figura 16. A densidade úmida do tipo de solo - SM é mais elevada do que a do solo de tipo - SW ao mesmo ângulo de rotação e pressão de compactação. A densidade do solo convergido para um valor específico igual ou superior a 100 giros.

A pressão vertical e o número de ciclos da rotação são claramente fatores muito importantes que influenciam a determinação da densidade do solo. Os valores para os dois solos devem ser de tal modo que o ensaio de compactação giratório laboratório simula estreitamente o processo de compactação no campo. Desta forma, de preferência, a mesma densidade será obtida em laboratório e no campo para a mesma energia de compactação.

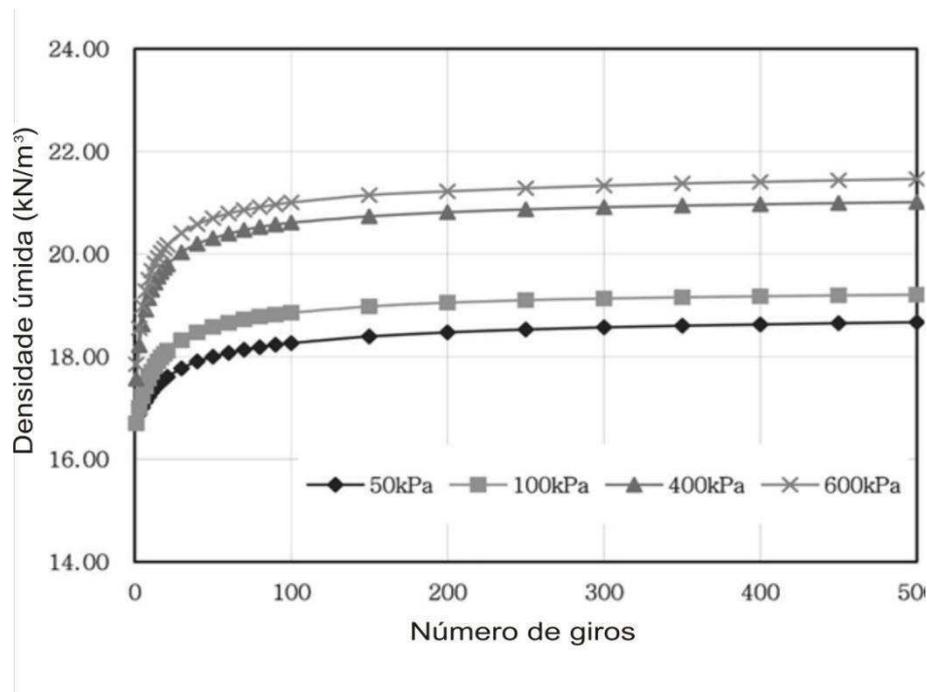
Para simular a densidade do solo subleito no campo, a adequada pressão vertical e o número de giros para ser usado na compactação giratória Superpave pode ser visto nas Figuras 16 (a) e (b).

Figura 16 (a) – Densidade úmida em função do número de giros para várias pressões verticais para o tipo de solo SM.



Fonte: Lee (2007)

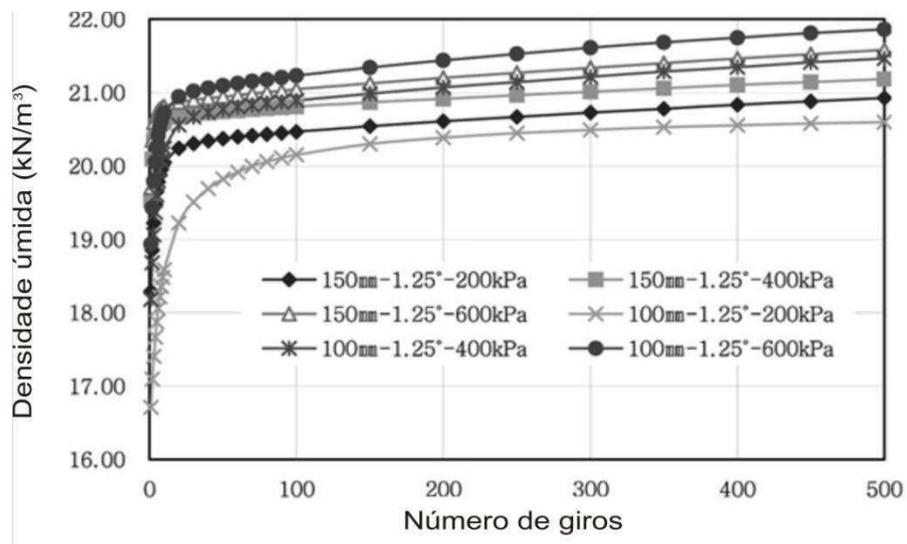
Figura 16 (b) – Densidade úmida em função do número de giros para várias pressões verticais para o tipo de solo SW.



Fonte: Lee (2007)

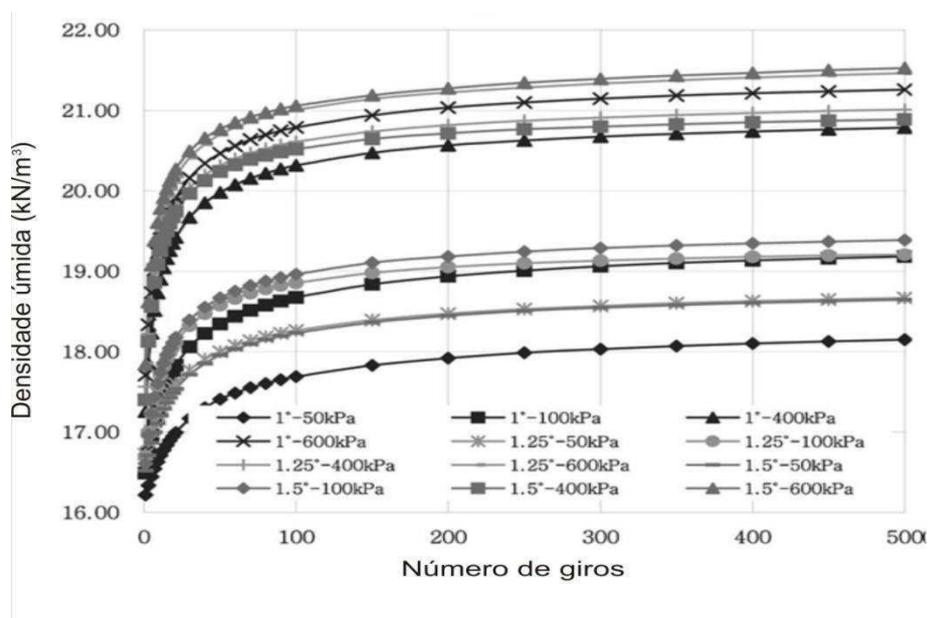
As Figuras 17 (a) e (b) apresentam os efeitos de diferentes diâmetros de amostra (100 e 150 milímetros) no solo compactado densidade úmida. Para a mesma pressão de compactação e do ângulo de rotação, quando o diâmetro das amostras aumenta, a densidade úmida do solo compactado diminui.

Figura 17 (a) – Densidade úmida em função do número de giros para várias pressões verticais e diâmetros de amostra para o tipo de solo SM.



Fonte: Lee (2007)

Figura 17 (b) – Densidade úmida em função do número de giros para várias pressões verticais e diâmetros de amostra para o tipo de solo SW.



Fonte: Lee (2007)

Na pesquisa de Dantas (2013), foram analisadas 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.

Os ensaios de compactação no CGS foram executados para três valores de tensões normais (200, 400 e 600 kPa) e para cada uma destas tensões, a massa úmida foi de 1000 e 1800g. A massa úmida por CP mostrou-se um parâmetro de pouca influência nos valores de MEAS, devido os CPs de 1000g terem apresentado valores de MEAS_{máx} um pouco maiores, quando comparados aos ensaios com CPs de 1800g, como mostra a Tabela 5.

Tabela 5 – w_o e MEAS_{máx} para ensaio de compactação com tensão normal de 600kPa e 500 giros (DANTAS, 2013)

Massa por CP	w_o (%)	MEAS _{máx} (g/cm ³)
1000g	22,6	1,587
1800g	23,0	1,597

A tensão normal aplicada durante a compactação no CGS compõe uma parcela muito importante da energia aplicada no ensaio. A Tabela 6 apresenta a importância da tensão normal nos valores de MEAS_{máx}.

Tabela 6 – Parâmetros ótimos dos ensaios de compactação com CGS (DANTAS, 2013)

Massa por CP	Tensões normais	w_o (%)	MEAS _{máx} (g/cm ³)
1000g	200 kPa	26,0	1,506
	400 kPa	22,9	1,588
	600 kPa	22,6	1,587
1800g	200 kPa	26,7	1,473
	400 kPa	24,0	1,563
	600 kPa	23,0	1,597

Nos ensaios com tensão normal de 600kPa, apesar da $MEAS_{m\acute{a}x}$ com CPs de 1800g ter sido maior que aquela apresentada com CPs de 1000g, a diferença foi muito discreta, 0,6%.

Os resultados encontrados nos ensaios de compactação no CGS realizados com CPs de 1000g e 1800g mostraram que a massa úmida por CP apesar de ter apresentado pouca interferência no valor de $MEAS_{m\acute{a}x}$, os ensaios realizados com 1000g por CP tiveram valores de $MEAS_{m\acute{a}x}$ maiores que aqueles apresentados pelos ensaios com 1800g. A exceção se fez para os ensaios com 600kPa, que apesar de ter acontecido o inverso, a diferença na $MEAS_{m\acute{a}x}$ entre o ensaio com 1000g e 1800g foi muito pequena.

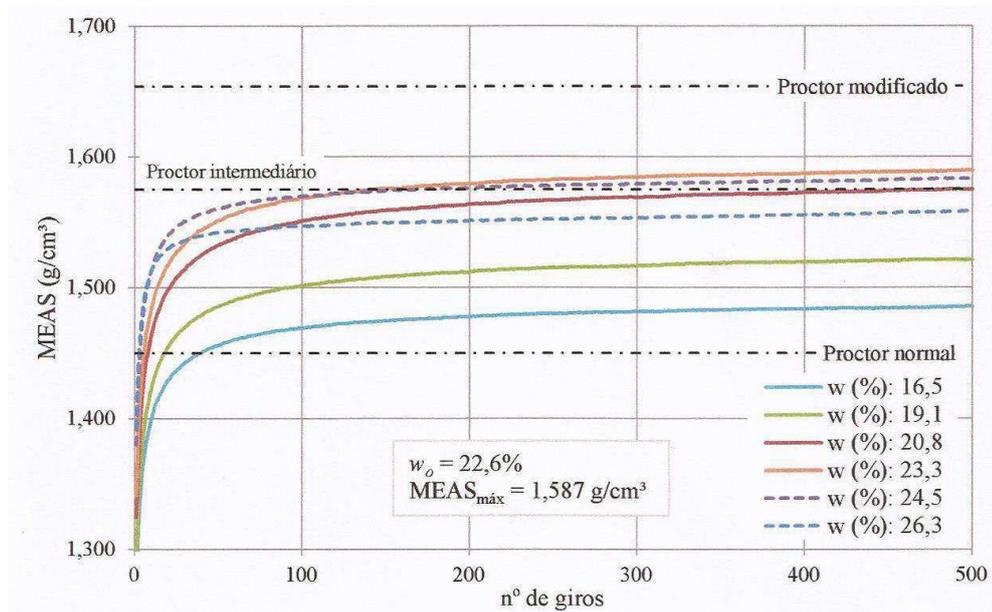
Possivelmente, a causa para valores mais elevados de $MEAS_{m\acute{a}x}$ nos ensaios executados com CPs de 1000g em comparação aos ensaios com CPs de 1800g é a própria quantidade de massa por CP. Essa afirmação pode ser justificada olhando-se os dados da Figura 18, onde se observa que justamente na tensão mais baixa, 200kPa, houve a maior diferença entre os ensaios com massas diferentes e no ensaio com 600kPa, a menor diferença, mostrando que a massa úmida por CP prejudicou a ação do CGS.

Portanto, quanto à tensão normal ficou constatado na Tabela 6 que a tensão de 600 kPa mostrou-se a melhor por ter conduzido a resultados menores de w_o e maiores para a $MEAS_{m\acute{a}x}$.

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 MEAS versus número de giros de todos os ensaios apresentaram comportamento assintótico após 75 giros, indicando incrementos muito discretos na MEAS, como mostram as Figuras 18 e 19.

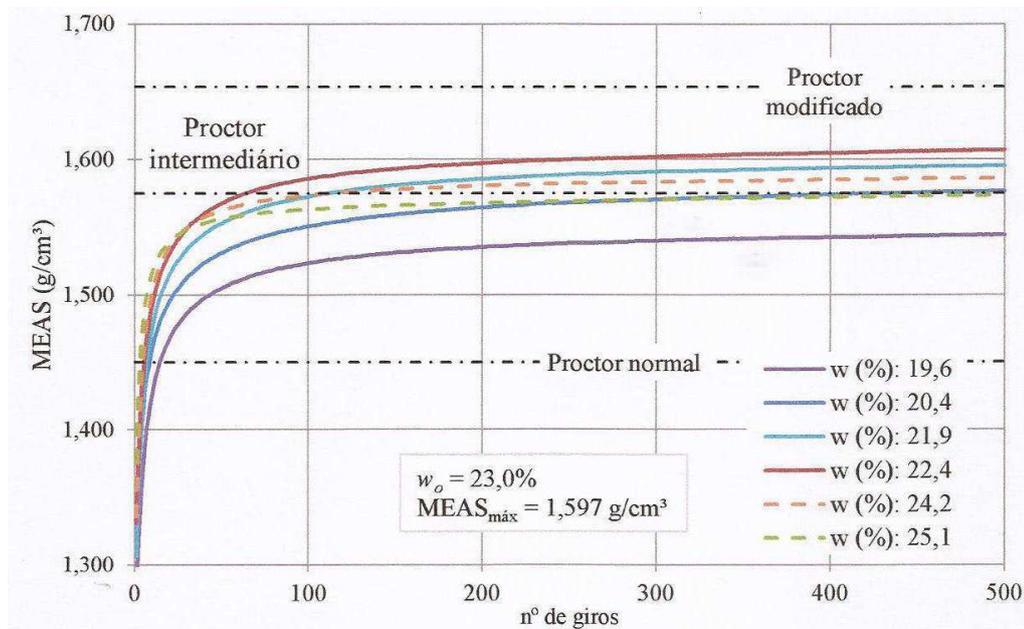
Quanto aos ensaios mecânicos, os corpos de prova moldados no CGS apresentaram, de maneira geral, melhores resultados (como pode ser visto nas Figuras 20 e 21) de resistência à compressão simples e resistência a tração por compressão diametral que os CPs moldados estaticamente. Os CPs moldados no CGS tiveram, em média, valores de Resistência a Compressão Simples (RCS) 17% maiores do que os CPs moldados estaticamente. Já no ensaio de Resistência a Tração por Compressão Diametral (RTCD), os valores são em média 33% maiores nos CPs moldados no CGS quando comparados aos moldados estaticamente.

Figura 18 – MEAS versus número de giros para CPs de 1000g e tensão normal de 600 kPa.



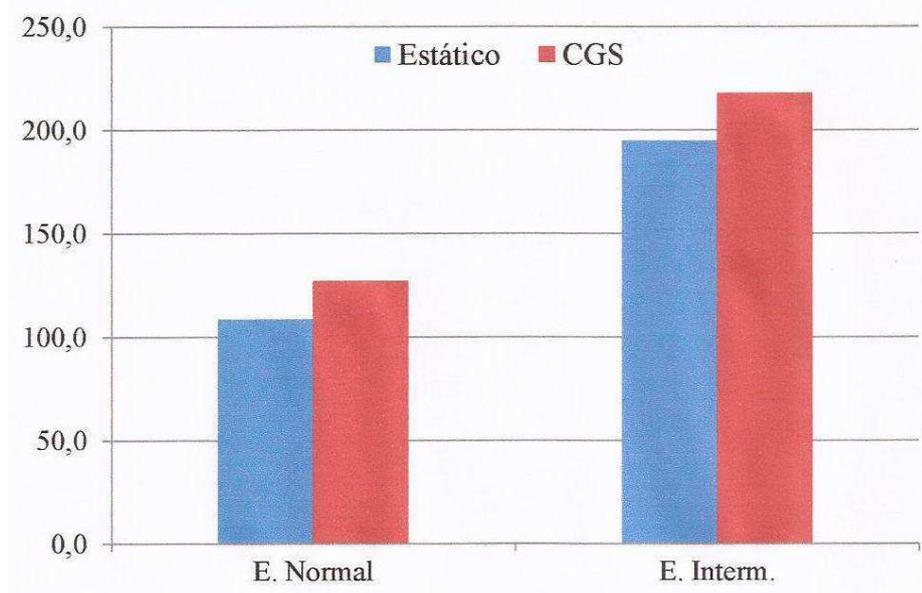
Fonte: Dantas (2013)

Figura 19 – MEAS versus número de giros para CPs de 1800g e tensão normal de 600 kPa.



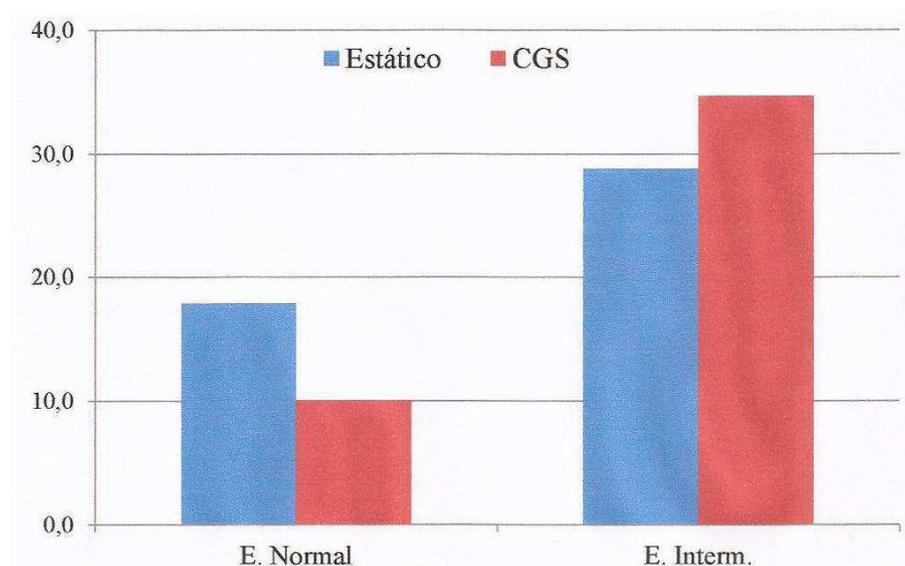
Fonte: Dantas (2013)

Figura 20 – $RCS_{média}$ para CPs moldados estaticamente e no CGS.



Fonte: Dantas (2013)

Figura 21 – $RTCD_{média}$ para CPs moldados estaticamente e no CGS



Fonte: Dantas (2013)

2.3.1 Cálculo da energia aplicada pelo CGS

Durante a compactação giratória, dois tipos de forças de trabalho são aplicadas a amostra de solo, com base nos estudos apresentados por Ping *et al.* (2003b). Uma das forças é causada pela pressão vertical, que é constante durante o ensaio e parâmetro de entrada do teste. A outra força é a

de cisalhamento que muda com o decorrer do ensaio, esta tensão de cisalhamento é calculada a partir dos transdutores de pressão.

Ping (2003b) apud Dantas *et. al.* (2013) afirmam que a parcela da energia composta pela tensão normal é o trabalho exercido pela força vertical do pistão de compactação, que é constante durante todo o ensaio, e foi obtida segundo a Equação 2.

$$E\sigma_N = P \times A \times \Delta H \quad (2)$$

Onde:

$E\sigma_N$: energia aplicada pela tensão normal, em J;

P: tensão normal, em Pa;

A: área da seção transversal do corpo de prova (m²);

ΔH : a diferença entre a altura final e inicial do corpo de prova, em m.

Já a parcela da energia decorrida da tensão cisalhante foi obtida segundo a Equação 3.

$$E\tau = 4 \times H \times \theta \times \tau \times A \quad (3)$$

Onde:

$E\tau$: energia aplicada pela tensão cisalhante, em J;

H: altura do CP, em m;

θ : ângulo de giro, em rad;

τ : tensão cisalhante aplicada, em Pa;

A: área da seção transversal do corpo de prova, em m².

O cálculo da energia foi feito de forma sequencial, isto é, em cada giro efetuado foi avaliada a parcela de energia aplicada pela tensão normal e a parcela da tensão cisalhante. Por conseguinte, foi possível considerar a energia empregada pelo CGS durante todo o ensaio de compactação, ou seja, para todos os 500 giros. Desta forma, para se entender o nível de energia que o CGS alcançou na compactação dos CPs de solo, calculou-se a energia total empregada no ensaio com CGS por unidade de volume e por unidade de massa.

A energia do ensaio Proctor é usualmente calculada por unidade de volume, visto que o volume dos corpos de prova no ensaio ser constante; contudo, os ensaios de compactação realizados no CGS foram feitos com massa constante e, por isso, a energia empregada no CGS também foi calculada por unidade de massa. A energia empregada nesta pesquisa foi a de unidade por massa, pois o equipamento utilizado nesta pesquisa era o mesmo da pesquisa de Dantas (2013).

A Tabela 7 apresenta as energias empregadas nos ensaios Proctor por unidade de volume e por unidade de massa, sendo que esta última é uma média do que foi apresentado nos ensaios de compactação.

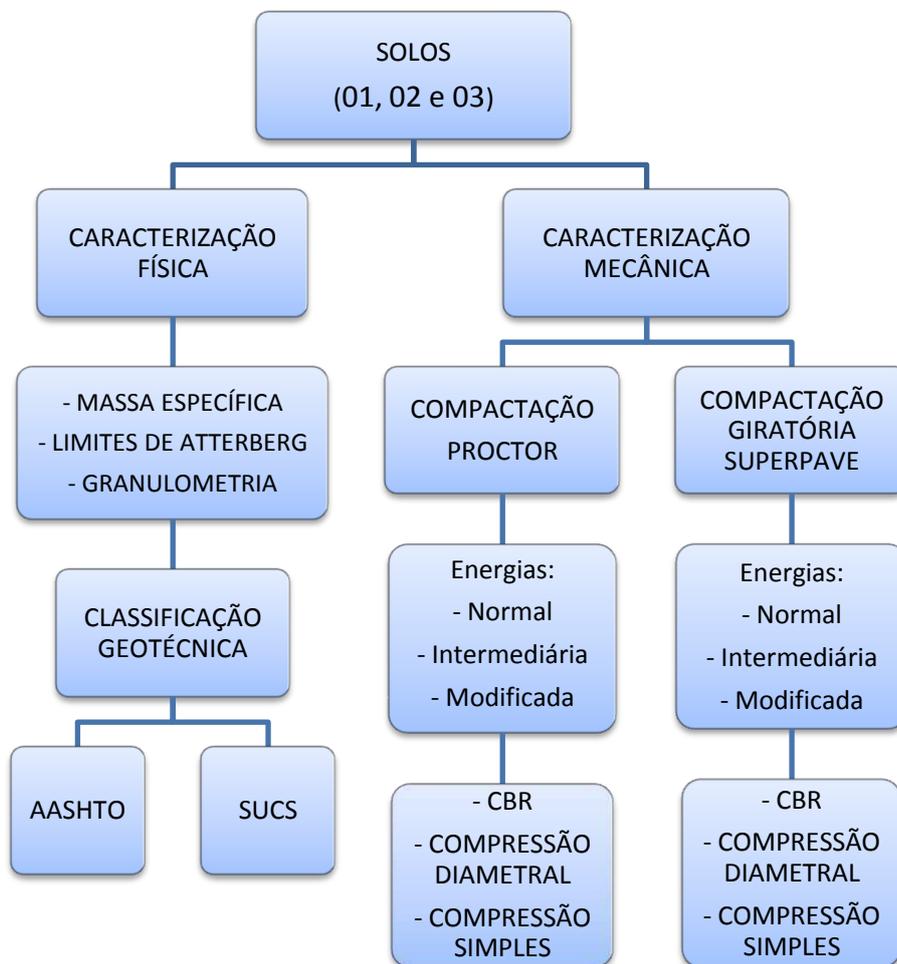
Tabela 7 – Valores de energia do ensaio Proctor (DANTAS, 2013)

Energia	Energia por volume (J/cm³)	Energia por massa (J/g)
Normal	0,59	0,33
Intermediário	1,30	0,68
Modificado	2,78	1,39

3.0 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos os procedimentos utilizados durante a fase experimental da pesquisa, os solos utilizados e as especificações para a obtenção das propriedades físicas e do comportamento mecânico dos solos. A metodologia foi seguida conforme o fluxograma mostrado na Figura 22.

Figura 22 – Caracterização dos materiais



O programa experimental dessa pesquisa foi dividido em etapas. A primeira etapa da pesquisa teve o intuito de obter, preparar e classificar os solos. Esta fase é importante para a realização da caracterização mecânica, em que os ensaios serão detalhados posteriormente.

Os métodos de ensaios utilizados foram baseados em normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e da *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)*.

3.1 Materiais

3.1.1 Solos

3.1.1.1 Escolha dos solos

Para realização desta pesquisa, foram escolhidos três tipos de solos, um solo com características arenosas, e outros dois com características siltsas. Cada um dos solos selecionados para este estudo apresenta características próprias no tamanho da partícula, textura, composição mineral e classificação. A opção por esses materiais deu-se pelo fato primeiramente de existirem poucas pesquisas a respeito desse assunto e também pelo fato de que as pesquisas anteriores sobre o uso do CGS na compactação dos solos, tais como, Browne (2006) e Ping, Leonard & Yang (2003a e 2003b) utilizarem solos de características predominantemente arenosas e Dantas (2013) que fez a escolha por um solo com características predominantemente argilosas.

3.1.1.2 Coleta dos solos

Os solos 01 e 02 foram provenientes da Jazida 01 da obra Barragem Cupissura, nas cidades de Pitimbu e Caaporã, no estado da Paraíba. As amostras dos solos foram coletadas à profundidades diferentes. O solo 01 foi obtido em profundidades que variaram entre 0,10m e 1,10m, e para o solo 02 as profundidades variaram de 0,20m a 3,30m (Figura 23).

Figura 23 – Amostras dos solos 01, 02 e 03



(a)

(b)

(c)

A opção pelo solo 03 deu-se pelo fato deste mesmo solo também ser utilizado pelo aluno Jonny Dantas Patricio em sua pesquisa de mestrado em andamento e em estágio inicial, por isso, ainda sem título, no Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). O solo foi coletado em um talude na BR232 (Km 14), entrada para Jaboatão Velho, na cidade de Recife, no estado de Pernambuco. As amostras de solo foram coletadas na margem direita, sob as coordenadas ($8^{\circ} 5' 45''$ Latitude) e ($35^{\circ} 1' 71''$ Longitude). (Figura 24).

Figura 24 – Indicação da localização da coleta do solo 03



3.1.1.3 Preparação dos solos

O material coletado à medida que chegava ao Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) era acondicionado nas baias nos sacos plásticos que vinham do local da coleta. 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 quarteamento dos solos com o auxílio de pás para a devida homogeneização; por fim, os solos eram destorroados e passados na peneira de número 4 (# 4,75mm) e armazenados em sacos plásticos de 10 kg, devidamente identificados.

3.2 Métodos

3.2.1 Propriedades Físicas dos Solos

Todos os ensaios de caracterização física foram realizados no Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Os ensaios para a caracterização física dos solos foram: granulometria, massa específica dos grãos e limites de consistência dos solos.

Nesta etapa, a preparação das amostras de solo foi realizada de acordo a NBR 6457 (ABNT, 1986) – Amostras de solo – *Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*. Na tabela 8 estão inseridas as normas adotadas para cada ensaio de caracterização física das amostras dos solos.

Tabela 8 - Normas adotadas para caracterização física das amostras dos solos

Ensaio	Método
Análise granulométrica – Solo	ABNT- NBR 7181/84
Determinação da massa específica	ABNT- NBR 6508/84
Determinação do limite de liquidez	ABNT- NBR 6459/84
Determinação do limite de plasticidade	ABNT- NBR 7180/84

3.2.1.1 Análise Granulométrica

A distribuição granulométrica dos solos foi determinada por meio do ensaio de granulometria por peneiramento e sedimentação, normatizado pela norma NBR 7181 (1988) – *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 a seqüência definida nesta mesma norma (Figura 25).

Figura 25 – (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.



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

3.2.1.2 Determinação da massa específica dos grãos

A massa específica do solo foi determinada pela norma NBR 6508 (1984) – *Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica* (Figura 26).

Figura 26 – Material utilizado para determinação da massa específica.



Foram utilizadas amostras de 50g para o solo 02 e 03 de 60g para o solo 01, passantes na peneira de 4,8mm. O objetivo deste ensaio é determinar a massa específica dos grãos dos solos, e para isso, as amostras passam pelo aparelho dispersor e são transferidas para os picnômetros para aplicação do vácuo de, no mínimo, 88 kPa (66 cm de Hg a 0°C) por 15 minutos. Em seguida, acrescenta-se água destilada até cerca de 1 cm abaixo da base do gargalo e aplicada a pressão de vácuo já referida, durante o mesmo intervalo de tempo. Em seguida, o picnômetro é deixado em repouso até que a temperatura do mesmo se equilibre com a do ambiente (Figura 27). Após esse processo, é realizada a determinação da massa específica dos solos em estudo pesando os picnômetros na forma da norma.

Figura 27 – Picnômetro com amostra submersa em água.



3.2.1.3 Limites de Atterberg

O limite de liquidez, plasticidade e o índice de plasticidade foram determinados para as amostras de solo de acordo com as normas NBR 6459 (1984) – *Solo - Determinação do limite de liquidez*, e NBR 7180 (1988) – *Solo - Determinação do limite de plasticidade*.

Primeiramente as amostras de solos para estes ensaios deve ser passada na peneira de 0,42mm. O objetivo destes ensaios é determinar o limite de liquidez e plasticidade dos solos, e para isso, as amostras são colocadas numa cápsula de porcelana, adiciona água destilada em pequenos incrementos, amassando e revolvendo, vigorosa e continuamente com auxílio da espátula, de forma a obter uma pasta homogênea. Em seguida a massa de solo é dividida em duas partes, passando o cinzel através da mesma, de maneira a abrir uma ranhura em sua parte central, normalmente, à articulação da concha, como indicado na Figura 28. Esta massa de solo fica com consistência tal que são necessários ao final do ensaio cerca de 25 golpes para fechar a ranhura.

Figura 28 – Aparelho de Casagrande com amostra de solo 03.



3.2.2 Propriedades Mecânicas dos Solos

Os ensaios realizados 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). Os ensaios realizados para a caracterização mecânica dos solos foram: compactação, CBR, resistência à tração por compressão diametral e resistência à compressão simples. Na tabela 9 estão inseridas as normas adotadas para cada ensaio de caracterização mecânica das amostras dos solos.

Tabela 9 - Normas adotadas para caracterização mecânica das amostras dos solos

Ensaio	Método
Ensaio de compactação – Solo	DNIT – ME 162/1994
Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas	DNIT – ME 049/1994
Determinação da resistência à tração por compressão diametral	DNIT – ME 136/2010
Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos – Solo – cimento	DNIT – MB – 3361/1990

3.2.2.1 Ensaio de compactação

Os ensaios de compactação foram realizados segundo o Método de Ensaio (ME 162/94) normatizado pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT).

Para se alcançar o objetivo principal desta pesquisa foram realizados dois tipos de ensaios de compactação, um manual de acordo com a metodologia Proctor e a outra mecânica com o uso do compactador giratório. Os ensaios de compactação Proctor foram executados seguindo as recomendações da norma DNIT – ME 162/1994 nas energias Normal, Intermediária e Modificada, com reuso de material e compactação manual. No entanto, como para os ensaios de compactação no CGS não existem normas que o regulamentem fez-se uso dos estudos existentes sobre este tema.

O ensaio de compactação Proctor consiste na compactação de camadas de uma amostra de solo confinado em um molde, na qual se aplicam golpes com um soquete (Figura 29). 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 10.

Figura 29 – Molde, soquete e disco espaçador do ensaio de compactação Proctor.



Tabela 10 – Valores de energia do ensaio Proctor (Adaptada da NBR 7182/86)

CILINDRO (g)	Características inerentes a cada energia	ENERGIA DE COMPACTAÇÃO		
		NORMAL	INTERMEDIÁRIA	MODIFICADA
	Soquete (g)	4.536	4.536	4.536
4349	Número de camadas	5	5	5
	Número de golpes por camada	12	26	55

A compactação de um solo em laboratório teve a finalidade de determinar a curva de variação da densidade do solo em função da umidade, para uma dada energia de compactação. Para a

metodologia Proctor, as curvas de compactação apresentam os parâmetros ótimos, teor de umidade (w) e massa específica aparente seca (MEAS).

Na compactação utilizando o compactador giratório os procedimentos foram realizados pela aplicação, de maneira simultânea, de uma tensão normal que advém de um pistão, e de uma força de cisalhamento decorrente do giro do molde cilíndrico em torno do seu próprio eixo sob um determinado ângulo de inclinação do próprio molde.

Os moldes cilíndricos utilizados nesta pesquisa foram os moldes com 100 mm de diâmetro e 270 mm de altura, para os ensaios de compactação (Figura 30), compressão diametral e compressão simples e o outro com 150 mm de diâmetro e 270 mm de altura utilizado para a moldagem dos corpos de prova do ensaio de CBR.

Figura 30 – Corpos de prova moldados no cilindro de 100 mm de diâmetro após o ensaio de compactação no CGS para o (a) solo 01 (b) solo 02 (c) solo 03.



(a)

(b)

(c)

Os procedimentos adotados para a realização do ensaio de compactação no CGS, de uma maneira geral, foram semelhantes aos utilizados no ensaio de compactação Proctor. Os corpos de prova foram moldados com uma massa úmida de 1000g em uma única camada, onde os dados iniciais de ensaio foram escolhidos com base nos ensaios de compactação Proctor. Também foram utilizados os três níveis de energias na tentativa de se fazer uma análise mais abrangente entre os dois métodos de compactação (Figura 31).

Figura 31 – Corpo de prova desmoldado após a compactação no CGS.



Os parâmetros de configuração do compactador giratório para esta pesquisa, tais como: tensão normal, ângulo de giro, frequência, números de giros foram escolhidos com base nas considerações apresentadas no trabalho de Dantas *et al.* (2013). Neste foi feita uma correlação entre o número de giros e a energia empregada nos ensaios do CGS que podem ser checados na Tabela 11.

Tabela 11 – Valores de energia do ensaio CGS (DANTAS, 2013)

Energia	Tensão Normal (KPa)	Número de giros	Ângulo de giro (graus)	Frequência de giros (rpm)
Normal	600	15	1,25	30
Intermediário	600	31	1,25	30
Modificado	600	65	1,25	30

As curvas de compactação dos ensaios no CGS, assim como na compactação Proctor, foram definidas por meio dos valores de massa específica aparente seca e teor de umidade.

Com os dados extraídos do CGS após a compactação de cada corpo de prova também foi possível efetuar o cálculo da energia aplicada pelo CGS na compactação para os parâmetros ótimos (massa específica aparente seca máxima e teor de umidade ótima), de acordo com as formulas apresentadas no item 2.3.1 deste estudo. Na Tabela 12 são apresentados estes dados.

Tabela 12 – Valores da energia para os pontos ótimos da compactação no CGS

SOLO	ENERGIA DE COMPACTAÇÃO (J/g)		
	NORMAL	INTERMEDIÁRIA	MODIFICADA
ARENOSO	0,29	0,62	1,26
SILTOSO	0,29	0,74	1,43
ARGILOSO	0,34	0,69	1,34

Os valores mostrados na Tabela 12 serão utilizados para efeito de comparação dos resultados de compactação Proctor e CGS, pois é necessário que sejam aplicadas as mesmas energias nos dois procedimentos de compactação. Portanto, foram calculadas as energias de acordo com os parâmetros de compactação utilizados na Tabela 11, tais como: número de giros, tensão normal, dentre outros. Após comparação dos resultados da Tabela 7 do item 2.3.1 e da Tabela 12, pode ser observado que as energias normal, intermediária e modificada para os três tipos de solo são semelhantes para os dois processos de compactação (Proctor e CGS).

3.2.2.2 Ensaios CBR (Califórnia Bearing Ratio)

Os ensaios de CBR ou Índice de Suporte Califórnia (ISC) foram realizados segundo o Método de Ensaio (ME 049/94) normatizado pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Apesar de ter um caráter empírico, o ensaio de CBR é mundialmente difundido e serve de base para o dimensionamento de pavimentos flexíveis.

O CBR 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, exigindo a pressão de 1.000 psi (6,89 MPa) para a penetração de 0,1" (0,25 cm) ou 1.500 psi (10,34 MPa) para penetração de 2" (5,1 cm).

Foram moldados, no mínimo, três corpos de prova por condição de ensaio (tipo de solo x energia de compactação). Os corpos de prova (CP) foram colocados em imersão por quatro dias e neste período foram acompanhados para análise do comportamento do nível de expansão ou colapso de todas as amostras ensaiadas. Com a retirada destes corpos de prova desta imersão é 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 32).

Anotam-se, ou registram-se no caso de equipamento automatizado, as pressões do pistão e os deslocamentos correspondentes, de forma a possibilitar a plotagem de uma curva pressão-penetração.

Figura 32 – (a) Prensa manual do ensaio de CBR, (b) Extensômetro e molde – equipamentos utilizados para realização dos ensaios de expansão e (c) Corpos de prova imersos no tanque.



(a)



(b)



(c)

Os procedimentos adotados para a realização do ensaio de CBR no CGS foram semelhantes aos utilizados no ensaio de compactação no Proctor. A diferença estava nos corpos de prova que foram moldados no cilindro de 150 mm de diâmetro e 270 mm de altura, com uma massa úmida de 5000g em uma única camada (Figura 33). Os dados iniciais de ensaio (massa específica aparente seca máxima e teor de umidade ótima) foram escolhidos com base nos ensaios de compactação CGS, nos três níveis de energias.

Figura 33 – CP desmoldado após a compactação no CGS para utilização no ensaio CBR.



Na realização do ensaio de CBR com os corpos de prova moldados no CGS foi observada uma dificuldade no procedimento. Após a retirada do CP do molde de compactação giratório, o mesmo deveria ser transferido para o molde do CBR e então submetido ao período de imersão em água. Durante esta etapa os corpos de prova ficaram com um espaço vazio em relação ao cilindro (Figura 34a). Como tentativa de minimizar o problema foi adotada a solução de preencher o espaço vazio com grãos de solo fino. Entretanto, a solução não foi satisfatória pois pôde-se observar que após a imersão do CP na água, iniciou-se um processo de percolação da água pela parte inferior do cilindro, o que pode ter prejudicado nos resultados do ensaio de CBR no CGS (Figura 34b).

Figura 34 – (a) Corpo de prova moldado no CGS e apresentando uma folga para o cilindro (b) Água entrando no corpo de prova pela parte inferior do cilindro.



(a)

(b)

3.2.2.3 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

O ensaio 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 através 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 35).

Figura 35 - Posicionamento do corpo de prova para ensaio de Resistência à Tração.



Para a realização do ensaio de resistência à tração por compressão diametral foram moldados três corpos de prova para cada solo e cada energia, todos com aproximadamente 100 mm de diâmetro e altura final média, de aproximadamente 60 mm, medidas em três pontos distantes entre si por 120°(graus). O teor de umidade ótima utilizado na moldagem dos corpos de prova foi determinada a partir dos resultados dos parâmetros ótimos do ensaio de compactação, e o número de golpes utilizado foi calculado através da equação (1) do item 2.2.1, e apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 – Número de golpes por energia para moldagem dos CPs.

Energia	Normal	Intermediária	Modificada
Número de golpes	50	100	200

A cura dos corpos de prova foi realizada após 48 horas, pois observou-se que com 24 horas não se conseguiria realizar o ensaio por não haver resistência devido o corpo de prova ainda está muito úmido. A moldagem e o rompimento dos corpos de prova foi realizada com os equipamentos mostrados na Figura 36.

Figura 36 – (a) Prensa utilizada para moldagem dos corpos de prova (b) Prensa de rompimento dos CPs para o ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral



(a)



(b)

A determinação da resistência à tração por compressão diametral (RTCD) dos corpos de prova foi realizado segundo o Método de Ensaio (ME 136/2010) normatizado pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). A resistência à tração por compressão diametral tanto pode ser expressa em kgf/cm² como em MPa e foi calculada individualmente para cada corpo de prova, segundo a Equação 4.

$$RTCD = \frac{2 \times F}{\pi \times D \times H} \quad (4)$$

Onde:

RTCD: 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 moldagem dos corpos de prova para o ensaio de RTCD no compactador giratório foi realizado segundo a norma ME 136/2010 do DNIT. Para realização destes ensaios foram moldados três corpos-de-prova, no mínimo, com uma massa úmida de 1000g em única camada, e 100 mm de

diâmetro por aproximadamente 60 mm de altura. A prensa utilizada para a ruptura dos corpos de prova foi a mesma tanto para o ensaio no Proctor como para o CGS. E a forma de ruptura se deu na vertical como mostra a Figura 37 para o solo 03.

Figura 37 - Ruptura do corpo de prova RTCD



3.2.2.4 Ensaio de resistência à compressão simples

Os ensaios de resistência à compressão simples foram realizados segundo Método de Ensaio (MB – 3361/90) normatizado pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes do DNIT. Os ensaios de resistência à compressão simples foram realizados com as amostras dos três tipos de solo.

Para a realização do ensaio de resistência à compressão simples foram moldados três corpos de prova para cada solo e cada energia, todos com aproximadamente 100 mm de diâmetro e altura final média, de aproximadamente 130 mm, medida em três pontos distantes entre si por 120°. O teor de umidade utilizado na moldagem dos corpos de prova foi determinado a partir dos resultados dos parâmetros ótimos do ensaio de compactação. A cura dos corpos-de-prova foi realizada após 24hs. A moldagem dos corpos de prova foi realizada segundo a NBR 7182/86 (Figura 37 e Tabela 14).

Para realização destes ensaios foram moldados três corpos-de-prova, no mínimo, com uma massa úmida de 1500g em única camada, e 100 mm de diâmetro por aproximadamente 90 mm de altura. A prensa utilizada para a ruptura dos corpos de prova foi a mesma tanto para o ensaio no Proctor como para o CGS (Figura 38c).

Figura 38 – (a) Molde e soquete padrão, (b) Corpos de prova e (c) Prensa de rompimento dos CPs para realização do ensaio de Resistência à Compressão Simples.



(a)



(b)



(c)

Tabela 14 – Valores de energia do ensaio Proctor (Adaptada da NBR 7182/86)

CILINDRO (g)	Características inerentes a cada energia	ENERGIA DE COMPACTAÇÃO		
		NORMAL	INTERMEDIÁRIA	MODIFICADA
	Soquete (g)	2.500	4.536	4.536
2.175	Número de camadas	3	3	5
	Número de golpes por camada	26	21	27

A resistência à compressão simples, expressa em MPa, foi calculada individualmente para cada corpo de prova, segundo a Equação 5.

$$RCS = \frac{C}{A} \times 0,1 \text{ (MPa)} \quad (5)$$

Onde:

RCS: Resistência à compressão simples, em MPa;

C: Carga de ruptura, em kN;

A: Área da seção transversal do corpo de prova (78,54 cm²).

CAPÍTULO 4

4.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos na fase experimental desta pesquisa. Serão apresentados os resultados da caracterização física dos solos, além dos resultados da caracterização mecânica dos solos após a realização da compactação Proctor e CGS.

4.1 Caracterização Física dos Solos

4.1.1 Ensaio de Granulometria, Massa Específica e Limites de Atterberg.

4.1.1.1 Granulometria

A distribuição dos tamanhos dos grãos dos solos foi obtida através do ensaio de granulometria por peneiramento, segundo a norma NBR 7181/84, com amostras de solos separadas e submetidas ao peneiramento manual da série-padrão de peneiras. O resultado deste ensaio é apresentado através da Tabela 15 e da curva granulométrica da Figura 38.

Tabela 15 - Granulometria dos solos

Quantidade passante da amostra total (%)				
Peneira	Peneira (mm)	Solo 01	Solo 02	Solo 03
1 1/2"	38,1	100,00	100,00	100,00
1"	25,4	100,00	100,00	100,00
3/4"	19,1	100,00	100,00	100,00
1/2"	12,7	100,00	100,00	100,00
3/8"	9,5	100,00	100,00	100,00
N° 4	4,8	99,62	99,29	100,00
N° 10	2,0	97,82	94,64	100,00
N° 40	0,42	67,26	68,23	98,30
N° 80	0,18	20,83	40,57	85,74
N° 200	0,075	4,73	25,37	68,81

Figura 39 – Curvas granulométricas dos solos.



Tabela 16 – Diâmetros efetivos dos solos

Diâmetro efetivo	Solo 01	Solo 02	Solo 03
D ₁₀	0,07	0,02	0,013
D ₃₀	0,15	0,065	0,02
D ₆₀	0,33	0,27	0,04

De acordo com os valores obtidos da distribuição da granulometria do solo 01 (Tabela 16), observa-se que a curva granulométrica apresentou um coeficiente de uniformidade (C_U) de 4,7 e um coeficiente de curvatura (C_C) de 2,1, caracterizando o solo como muito uniforme e bem graduado.

De acordo com os valores obtidos da distribuição da granulometria do solo 02 (Tabela 16), observa-se que a curva granulométrica apresentou um coeficiente de uniformidade (C_U) de 13,5 e um coeficiente de curvatura (C_C) de 3,25, caracterizando o solo com uniformidade média e mal graduado.

De acordo com os valores obtidos da distribuição da granulometria do solo 03 (Tabela 16), observa-se que a curva granulométrica apresentou um coeficiente de uniformidade (C_U) de 3,1 e um coeficiente de curvatura (C_C) de 1,5, caracterizando o solo como muito uniforme e bem graduado.

4.1.1.2 Massa específica dos grãos dos solos

Na tabela 17 estão inseridos os resultados obtidos nos ensaios de massa específica dos grãos para os solos utilizados nesta pesquisa: solo 01, solo 02 e solo 03.

Tabela 17 – Massa específica dos grãos dos solos

Solos	01	02	03
Massa específica (g/cm^3)	2,295	2,687	2,589

De acordo com a Tabela 16 observa-se que os resultados da massa específica dos grãos do solo após duas repetições foram satisfatórios, pois os solos estudados nesta pesquisa estão dentro da faixa de variação entre 2,3 a 2,9 g/cm^3 , faixa esta para solos com características arenosas e siltosas. Os principais constituintes dos grãos destes solos que tem em média 2,65 g/cm^3 são: quartzo, feldspatos e silicatos.

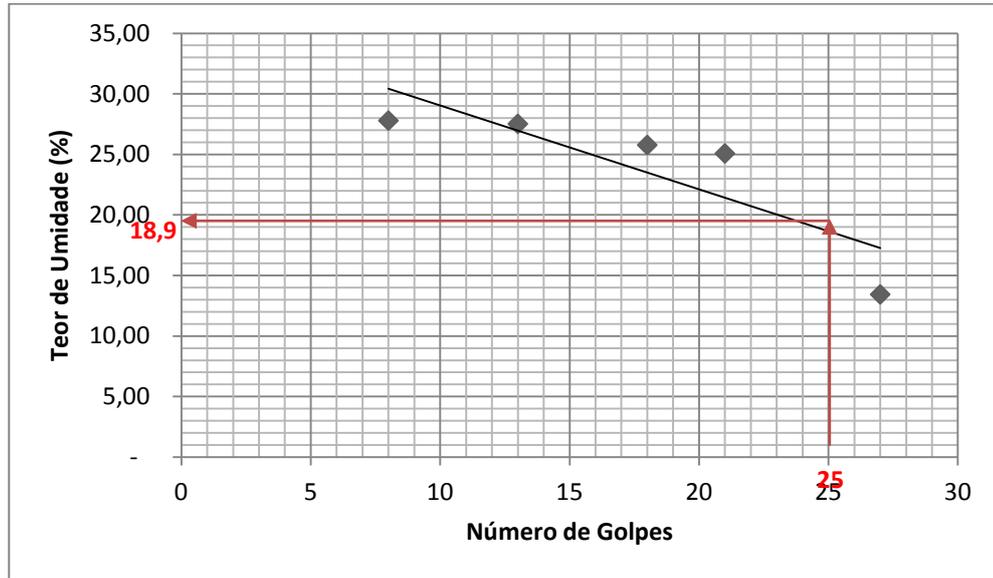
4.1.1.3 Limites de Atterberg

Os ensaios foram realizados segundo preconizam as normas da ABNT NBR 6459/84 para limite de liquidez e NBR 7180/84 para limite de plasticidade.

O solo 01 apresenta como resultados obtidos nos ensaios de limite de liquidez como sendo não líquido (NL), para os ensaios do limite de plasticidade foram todos considerados como não plástico (NP), e por conseqüência não apresenta Índice de Plasticidade.

Para o solo 02 observa-se no gráfico da Figura 40 que para 25 golpes, o limite de liquidez é de 18,9%. O limite de plasticidade foi de 16,2% e o índice de plasticidade encontrado foi 2,7%.

Figura 40 – Gráfico do limite de liquidez do solo 02



Para o solo 03 observa-se no gráfico da Figura 41 que para 25 golpes, o limite de liquidez é de 39% e o limite de plasticidade do solo foi considerado como não plástico (NP). Como o índice de plasticidade trata da diferença entre o limite de limite de liquidez e o limite de plasticidade, o valor encontrado foi de 39%.

Os resultados obtidos nos ensaios de limite de liquidez, limite de plasticidade e o cálculo do Índice de Plasticidade para os três solos estão descritos na Tabela 18.

Figura 41 – Gráfico do limite de liquidez do solo 03.

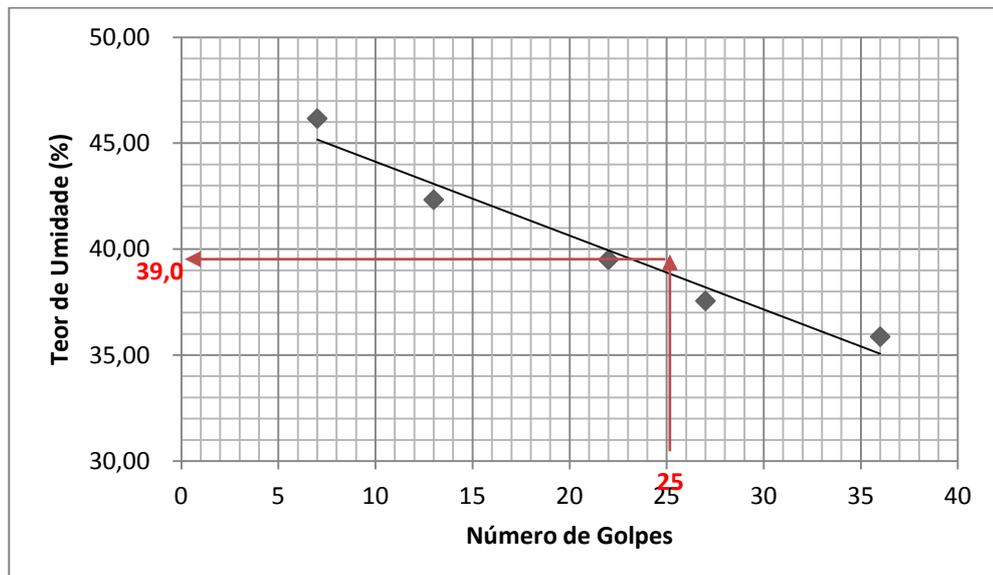


Tabela 18 – Tabela Resumo dos Limites de Atterberg dos solos

LIMITES DE ATTERBERG DOS SOLOS			
SOLO	Limite de Liquidez (%)	Limite de Plasticidade (%)	Índice de Plasticidade (%)
01	NL	NP	-
02	18,90	16,20	2,7
03	39,0	NP	39,0

De acordo com a literatura, a compressibilidade de um solo está diretamente ligada com o Limite de Liquidez do mesmo. Deve se atentar que valores inferiores a 50% leva a uma classificação de baixa compressibilidade, o que efetivamente ocorre com os solos 02 e 03. Em relação ao solo 01, não foi possível obter os limites de plasticidade e liquidez, o que caracteriza o solo como não plástico.

4.1.1.4 Classificações geotécnicas do solo

Com os resultados da distribuição granulométrica das partículas, a massa específica e os limites de Atterberg, os solos foram classificados segundo a metodologia HRB (*Highway Research Board*), utilizou-se a norma AASHTO M-145-91, respectivamente para o solo 01, 02 e 03, como A – 3, A-2-4 e A-6; para a SUCS (Sistema Unificado de Classificação de Solos), a norma empregada foi a ASTM D2487-11, e a classificação foi SW para o solo 01, SM para o solo 02 e ML para o solo 03. A Tabela 19 expõe as classificações do solo segundo as duas referências.

Tabela 19 – Classificação dos solos segundo os dois sistemas

CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS			
SISTEMA	SOLO 01	SOLO 02	SOLO 03
AASHTO	A – 3	A - 2 – 4	A – 4
SUCS	SW	SM	ML

Portanto, pela classificação da AASHTO, o solo 01 se refere a uma areia fina, e segundo o SUCS se trata de uma areia bem graduada, o que significa a existência de grãos de diversos diâmetros, o que por ventura cria um maior entrosamento entre as partículas, resultando numa menor compressibilidade e maior resistência.

Em relação ao solo 02, segundo a AASHTO o mesmo é tido como uma areia siltosa, e em relação à classificação do SUCS se refere à um silte mal graduado. Por fim, para o solo 3, de acordo

AASHTO o material corresponde a um solo siltoso, e segundo o SUCS trata-se de um silte argiloso orgânico de baixa compressibilidade.

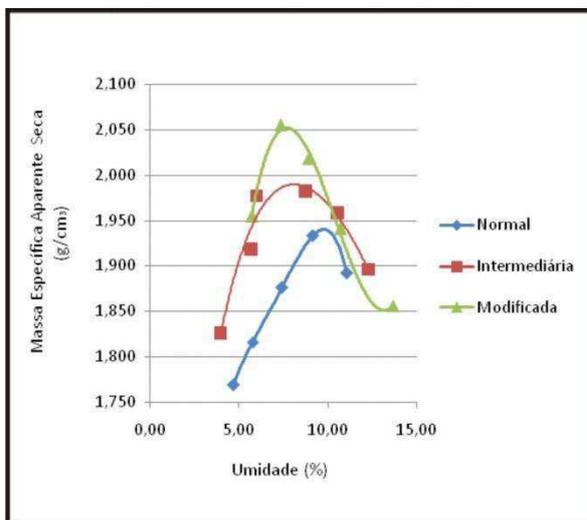
4.2 Caracterização Mecânica dos Solos

4.2.1 Ensaio de compactação

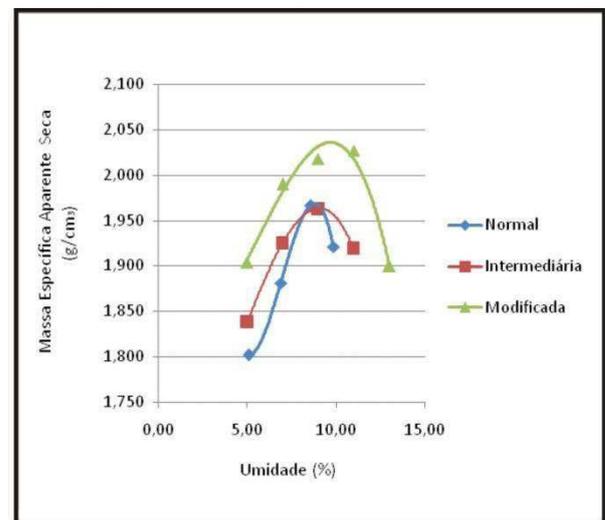
4.2.1.1 Solo 01

A Figura 42 apresenta as curvas de compactação para o solo 01 nas três energias: Normal, Intermediária e Modificada sendo (a) compactação Proctor e (b) compactação CGS. Na Tabela 20 são apresentados os resultados obtidos com a realização do ensaio de compactação para as amostras de solo. Para todos os ensaios de compactação para os três tipos de solos foram feitas em média 3 repetições para cada energia.

Figura 42 – Curvas de compactação do solo 01 (a) Proctor e (b) CGS.



(a)



(b)

Tabela 20 – Resultados comparativos dos parâmetros ótimos das curvas de compactação (Proctor e CGS) para o solo 01

SOLO	ENERGIA	PROCTOR		CGS	
		$MEAS_{m\acute{a}x}(g/cm^3)$	$w_0(\%)$	$MEAS_{m\acute{a}x}(g/cm^3)$	$w_0(\%)$
01	Normal	1,925	9,20	1,963	8,57
	Intermediária	1,982	8,78	1,966	9,00
	Modificada	2,055	7,34	2,027	11,00

Com base na Figura 41 e na Tabela 20, observou-se na compactação Proctor que quanto ao efeito da energia de compactação, verifica-se que as massas específicas secas máximas aumentaram e as umidades ótimas diminuíram com o acréscimo de energia, o que confirma a tendência esperada. No entanto, foi observado que as massas específicas tiveram uma variação muito pequena em função do aumento da energia (Tabela 21), e isso é de grande influência no comportamento mecânico dos solos, pois este pequeno aumento influencia significativamente na resistência, rigidez e deformação do solo. Essa observação foi relatada por CERNICA (1995) apud SOUZA JUNIOR (2005) que verificou que os acréscimos de densidade raramente excedem 10%, quando se compara os resultados da energia modificada com a energia normal.

Tabela 21 – Porcentagens das variações dos parâmetros ótimos no ensaio Proctor para o solo 01

MUDANÇAS DE ENERGIA	VARIACIONES	
	w_0	$MEAS_{m\acute{a}x}$
Normal → Intermediária	- 5%	+ 3%
Intermediária → Modificada	- 16%	+ 4%

A Tabela 21 permite observar um aumento de energia normal para intermediária conduz a um incremento de 3% na $MEAS_{m\acute{a}x}$ e na mudança de energia intermediária para modificada de 4%. Essa constatação é relevante, pois, como visto no Capítulo 2, item 2.2.1, a energia aplicada no ensaio Proctor aumenta pouco mais de 100% de um tipo de ensaio para o outro. Entretanto, o ganho na $MEAS_{m\acute{a}x}$ entre o Proctor Normal e o Intermediário foi muito próximo ao observado entre o Intermediário e o Modificado.

Para a compactação no CGS, observou-se que as massas específicas secas máximas e as umidades ótimas aumentaram com o acréscimo de energia. O aumento do teor de umidade x aumento de energia não era esperado. Isso pode ter acontecido devido a compactação no ensaio Proctor ser realizada em 5 camadas, o que torna as camadas menores e por consequência a absorção de água é menor por camada, já no CGS a compactação ocorre em camada única, o que faz com que toda a água seja adicionada no início do ensaio. Outra peculiaridade refere-se a perda de umidade pela face inferior do molde durante o procedimento de compactação no CGS quando utilizado o solo arenoso, este fato influencia diretamente na determinação do teor de umidade após a compactação do corpo de prova (ver item 4.2.5), compreende-se que se existe esta perda de umidade ela ocorreu de forma menor para o Proctor. De maneira geral observa-se resultados semelhantes de $MEAS_{máx}$ para a compactação Proctor e CGS.

4.2.1.2 Solo siltoso

A Figura 43 apresenta as curvas de compactação para o solo 02 nas três energias: Normal, Intermediária e Modificada, sendo (a) compactação Proctor e (b) compactação CGS. A Tabela 22 apresenta os resultados obtidos com a realização do ensaio de compactação para as amostras de solo.

Figura 43 – Curvas de compactação do solo 02 (a) Proctor e (b) CGS.

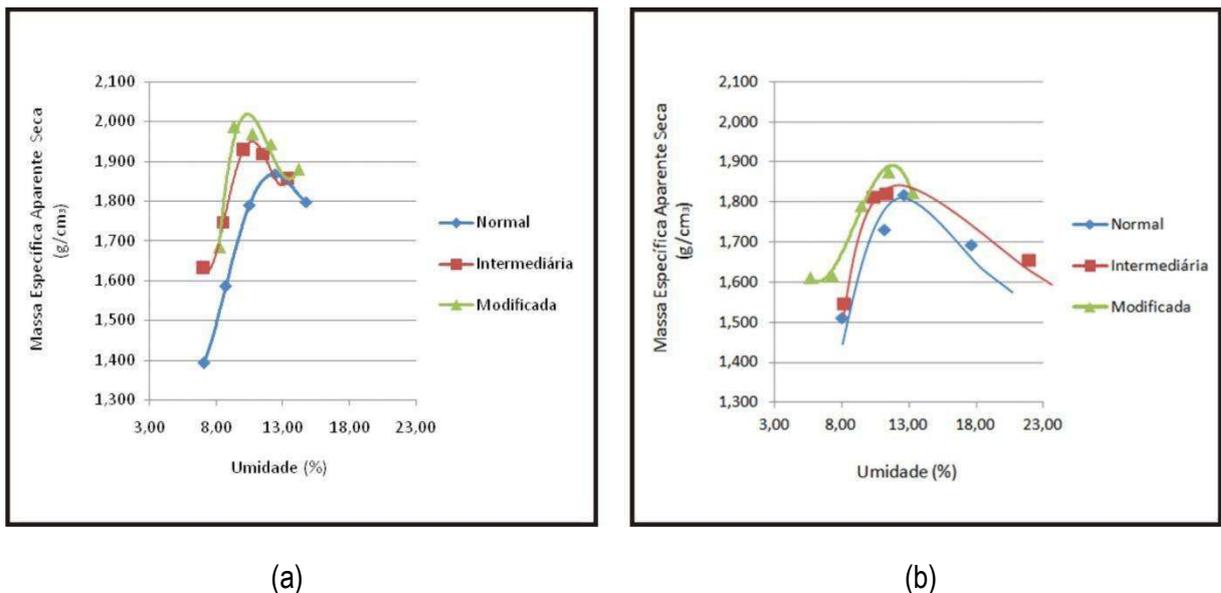


Tabela 22 – Resultados comparativos dos parâmetros ótimos das curvas de compactação (Proctor e CGS) para o solo 02

SOLO	ENERGIA	PROCTOR		CGS	
		$MEAS_{m\acute{a}x}(g/cm^3)$	$w_0(\%)$	$MEAS_{m\acute{a}x}(g/cm^3)$	$w_0(\%)$
02	Normal	1,910	11,60	1,821	12,59
	Intermediária	1,929	10,50	1,824	11,45
	Modificada	1,987	9,34	1,880	11,39

Tanto na compactação Proctor quanto na compactação CGS ocorreu uma tendência de aumento das massas específicas secas máximas e diminuição dos teores de umidade ótimos com o acréscimo de energia, o que confirma a tendência esperada.

Semelhante ao ocorrido para o solo 01 foi observado que as massas específicas tiveram uma variação muito pequena em função do aumento da energia, ver Tabela 23.

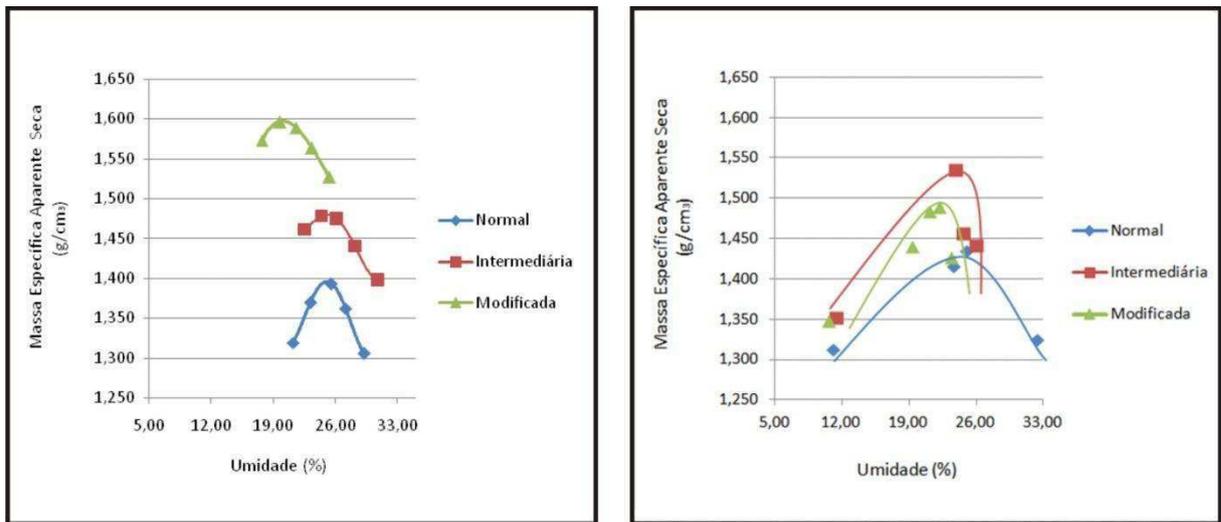
Tabela 23 – Porcentagens das variações dos parâmetros ótimos no ensaio Proctor para o solo 02

MUDANÇAS DE ENERGIA	VARIÇÕES	
	w_0	$MEAS_{m\acute{a}x}$
Normal → Intermediária	-10,5%	+ 2%
Intermediária → Modificada	- 12,4%	-0,5%

4.2.1.3 Solo 03

A Figura 44 apresenta as curvas de compactação para o solo 03 nas três energias: Normal, Intermediária e Modificada, sendo (a) compactação Proctor e (b) compactação CGS. A Tabela 24 apresenta os resultados obtidos com a realização do ensaio de compactação para as amostras de solo. E semelhante ao ocorrido para os solos 01 e 02 foi observado que as massas específicas tiveram uma variação muito pequena em função do aumento da energia.

Figura 44 – Curvas de compactação do solo 03 (a) Proctor e (b) CGS.



(a)

(b)

Tanto na compactação Proctor quanto na compactação CGS ocorreu uma tendência de aumento das massas específicas secas máximas e diminuição dos teores de umidade ótimos com o aumento da energia, o que confirma a tendência esperada, como se pode notar na Tabela 25.

Tabela 24 – Resultados comparativos dos parâmetros ótimos das curvas de compactação (Proctor e CGS) para o solo 03

SOLO	ENERGIA	PROCTOR		CGS	
		$MEAS_{máx}$ (g/cm ³)	w_0 (%)	$MEAS_{máx}$ (g/cm ³)	w_0 (%)
03	Normal	1,395	25,16	1,436	24,96
	Intermediária	1,479	25,20	1,536	23,85
	Modificada	1,600	20,00	1,491	22,16

Tabela 25 – Porcentagens das variações dos parâmetros ótimos no ensaio Proctor para o solo 03

MUDANÇAS DE ENERGIA	VARIÇÕES	
	w_0	$MEAS_{máx}$
Normal → Intermediária	0%	+ 6%
Intermediária → Modificada	- 21%	+ 8%

A Tabela 26 apresenta o resumo dos resultados de $MEAS_{m\acute{a}x}$ e W_o (%) obtidos a partir da compactação Proctor e CGS para os três tipos de solo estudados. Estes resultados podem ser comparados com o comportamento esperado para os parâmetros ótimos da compactação quando utilizam-se solos com granulometrias distintas (Figura 4, item 2.2.1). Pode-se notar que os resultados são satisfatórios, pois maiores valores de $MEAS_{m\acute{a}x}$ e menores valores de W_o (%) são obtidos com solos mais grossos, ou seja, $MEAS_{01} > MEAS_{02} > MEAS_{03}$ e $W_{03} > W_{02} > W_{01}$.

Tabela 26 – Tabela resumo dos ensaios de compactação variando com as energias

SOLO	ENERGIA	PROCTOR		CGS	
		w_o (%)	$MEAS_{m\acute{a}x}$ (g/cm ³)	w_o (%)	$MEAS_{m\acute{a}x}$ (g/cm ³)
01	Normal	9,20	1,925	8,57	1,966
	Intermediária	8,78	1,982	9,00	1,963
	Modificada	7,34	2,055	11,00	2,027
02	Normal	11,60	1,910	12,59	1,821
	Intermediária	10,50	1,940	11,31	1,823
	Modificada	9,34	1,930	11,49	1,879
03	Normal	25,16	1,395	24,96	1,436
	Intermediária	25,20	1,479	23,85	1,536
	Modificada	20,00	1,600	22,16	1,491

4.2.2 Ensaio de CBR

Os resultados obtidos com os ensaios de CBR estão apresentados na Figura 45 e Tabela 27, na forma de valores médios obtidos da umidade de moldagem (%), do CBR (%) e da expansão (mm).

Figura 45 - Efeito das energias nos valores de CBR dos solos.

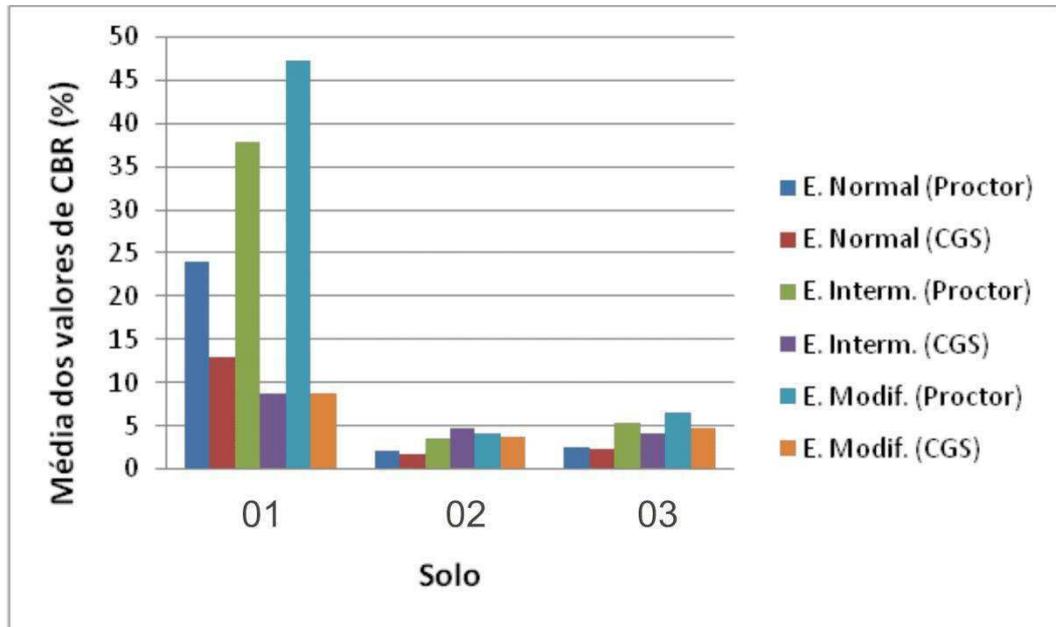


Tabela 27 – Resultados dos ensaios de CBR x energias

SOLO	ENERGIA	PROCTOR			CGS		
		w_{mol} (%)	CBR (%)	Expansão (%)	w_{mol} (%)	CBR (%)	Expansão (%)
01	Normal	9,06	24,17	0,06	8,88	13,15	2,68
	Intermediária	12,95	37,86	0,07	8,96	8,80	1,46
	Modificada	8,09	47,36	0,02	11,02	8,93	-
02	Normal	14,16	2,19	0,08	12,54	1,74	0,06
	Intermediária	11,75	3,59	0,18	10,79	4,78	2,33
	Modificada	12,73	4,19	0,06	11,67	3,82	0,03
03	Normal	26,05	2,61	4,12	24,01	2,32	2,98
	Intermediária	25,36	5,42	3,16	23,27	4,20	2,75
	Modificada	19,97	6,67	3,61	21,67	4,78	2,33

Pode-se notar que ocorre um aumento no valor do CBR (%) em função do aumento da energia de compactação no processo de compactação Proctor. Em relação ao CGS, este mesmo comportamento ocorre no solo 03, entretanto, não ocorre para o solo 01 e 02. Também pode ser observado, em geral, resultados de CBR melhores após o processo de compactação Proctor quando

comparados ao CGS. Tais fatos podem ser explicados 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. Este problema já foi relatado no item 3.2.2.2.

Senço (1997) apresentou uma tabela que correlaciona os valores prováveis de CBR em função das classes do sistema de classificação HRB (Tabela 28). O intuito da tabela é poder estimar a partir da classificação HRB, os resultados de CBR dos solos aplicados em várias pesquisas.

Tabela 28 – Correlação provável entre CBR e Classificação HBR (SENÇO, 1997)

Solo (Classificação HRB)	CBR provável (%)
A-1-a	40 a 80 (ou mais)
A-1-b	20 a 80 (ou mais)
A-2-4 e A-2-5	25 a 80 (ou mais)
A-2-6 e A-2-7	12 a 30
A-3	15 a 40
A-4	4 a 25
A-5	2 (ou menos) a 10
A-6 e A-7	2 (ou menos) a 5

Nesta pesquisa o solo 01 (A-3) apresentou valores de CBR que variaram entre 20 e 50%, aproximadamente, no processo de compactação Proctor, para as três energias consideradas nos ensaios, este tipo de solo apresenta CBRs prováveis na faixa de 15 a 40% de acordo com a Tabela 28. A maior parte dos corpos de prova enquadrados no solo 02 (A-2-4), forneceu resultados de CBR inferiores a 5%, aproximadamente, também para as três energias. Já para o solo 03 (A-6), os CBRs ficaram entre 2 e 7%, este tipo de solo apresenta CBRs prováveis na faixa de 2 (ou menos) a 5%.

Diante do exposto acima, pode-se verificar que a classificação baseada na HRB proposta por Souza Junior *et. al.* (2005), para os solos estudados, tem se mostrado apta a prever o comportamento dos solos 01 e 03 no que se refere aos resultados de CBR, por estarem aproximadamente, dentro de suas faixas. O solo 02 foi o único que não se enquadrou dentro da faixa prevista.

Quanto aos resultados da expansão para os corpos de prova moldados no Proctor para os solos 01 e 02 apresentaram valores de pequena magnitude, todos abaixo de 0,5%, que é o limite máximo especificado nas normas do DNIT para solos granulares, com vistas à aplicação em bases de pavimentos rodoviários. Além disso, os corpos de prova do solo 02 e 03 apresentaram expansão em

virtude da baixa plasticidade dos CPs, o que limita bastante qualquer conclusão que se possa tirar acerca desses resultados. Mesmo assim, com todas essas limitações, notou-se uma leve tendência da expansão aumentar com a energia de compactação, principalmente quando se compara a energia normal com a intermediária, já que a modificada apresentou os mais baixos valores. Em contraste, os solos finos, como o solo 03, com alto teor de argila, são bastante afetados pelas pressões devido ao fenômeno da expansão.

Quando se trata de analisar os resultados da expansão para os corpos de prova moldados no CGS o mesmo não ocorre. Os resultados da expansão apresentaram valores altos, quase todos acima de 1%, que é o limite máximo especificado nas normas do DNIT para solos granulares, com vistas à aplicação em sub-bases de pavimentos rodoviários. E isto ocorreu para os três tipos de solos, independente da energia aplicada.

A Figura 46 apresenta a penetração visual sofrida pelos corpos de prova dos três tipos de solos para a moldagem Proctor. E a Figura 47 apresenta a penetração visual para o tipo de moldagem CGS.

Figura 46 – Penetração visual sofrida pelos CPs para o ensaio de CBR para os solos (a) 01, (b) 02 e (c) 03 para a moldagem Proctor.

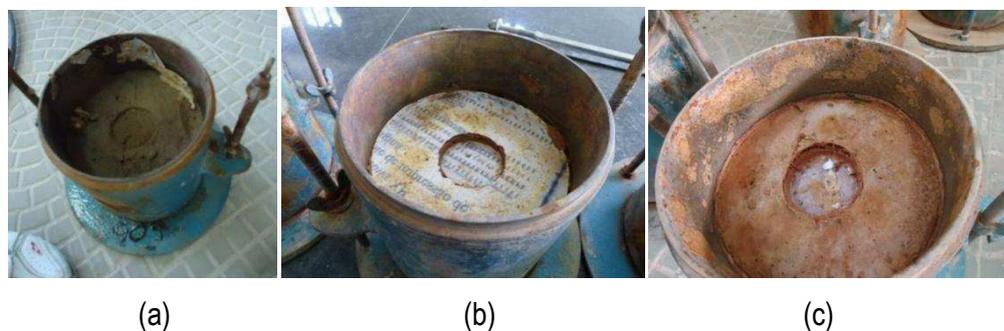


Figura 47 – Penetração visual sofrida pelos CPs para o ensaio de CBR para os solos (a) 01, (b) 02 e (c) 03 para a moldagem CGS.

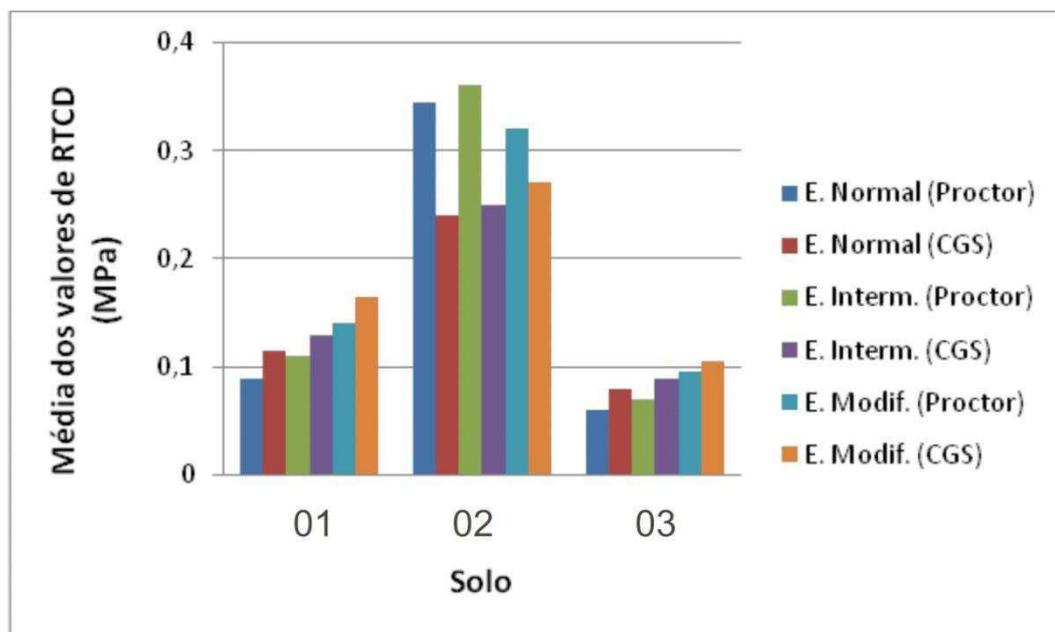


Como se pode notar nas Figuras 46 e 47 acima as penetrações visuais sofridas pelos corpos de prova dos três tipos de solos para os dois tipos de moldagem Proctor e CGS apresentaram penetrações semelhantes, não podendo então por este critério avaliar qual método teve maior influência na penetração.

4.2.3 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

A Figura 48 apresenta o gráfico comparativo para os três tipos de solos nas três energias: Normal, Intermediária e Modificada. Na Tabela 29 estão inseridos os resultados encontrados nos ensaios de RTCD.

Figura 48 - Resultados de RTCD para os solos compactados no processo Proctor e CGS.



Conforme pode ser observado na Tabela 29 ocorreu um aumento no valor do RTCD para os solos 01 e 03 quando realizado o processo de compactação CGS em relação ao processo de compactação Proctor, entretanto, tal fato não ocorreu para o solo 02. No caso do solo 02 existe uma perda de RTCD de cerca de 20 a 30% quando realizada a compactação CGS.

Tabela 29 – Resultados de RTCD para os solos compactados no processo Proctor e CGS

SOLO	ENERGIA	PROCTOR	CGS
		RTCD (MPa)	RTCD (MPa)
01	Normal	0,090	0,115
	Intermediária	0,110	0,130
	Modificada	0,140	0,165
02	Normal	0,345	0,240
	Intermediária	0,360	0,250
	Modificada	0,320	0,270
03	Normal	0,060	0,080
	Intermediária	0,070	0,090
	Modificada	0,095	0,105

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 Proctor quando comparado com o CGS. Quanto maior esta perda, maior será a influência da sucção e conseqüentemente maior a resistência, principalmente em solos com granulometria mais fina. Fumií (2004) explica que este aumento de resistência, devido a sucção, deve-se a tensão negativa 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.

Menezes (2010) ao analisar a influência da sucção em solos com três granulometrias diferentes concluiu que as relações sucção /umidade estão diretamente relacionadas à distribuição granulométrica dos solos, o índice de vazios, a percentagem de finos e a mineralogia. A autora observou que solos finos, menos permeável, com partículas mais coesas e quantidade maior de microporos admitiu sucções maiores para os mesmos teores de umidade dos solos arenosos. Este estudo corroborou o observado nesta pesquisa, quanto mais fino o solo, maior a relação entre perda de umidade de moldagem e aumento da Resistência.

A Figura 49 apresenta a ruptura sofrida nos corpos de prova durante o ensaio de resistência à tração por compressão diametral para os solos 02 e 03. A ruptura, como esperado, aconteceu por separação das duas metades do corpo de prova segundo o plano diametral de carga. Para o solo 01 não foi possível a visualização da ruptura.

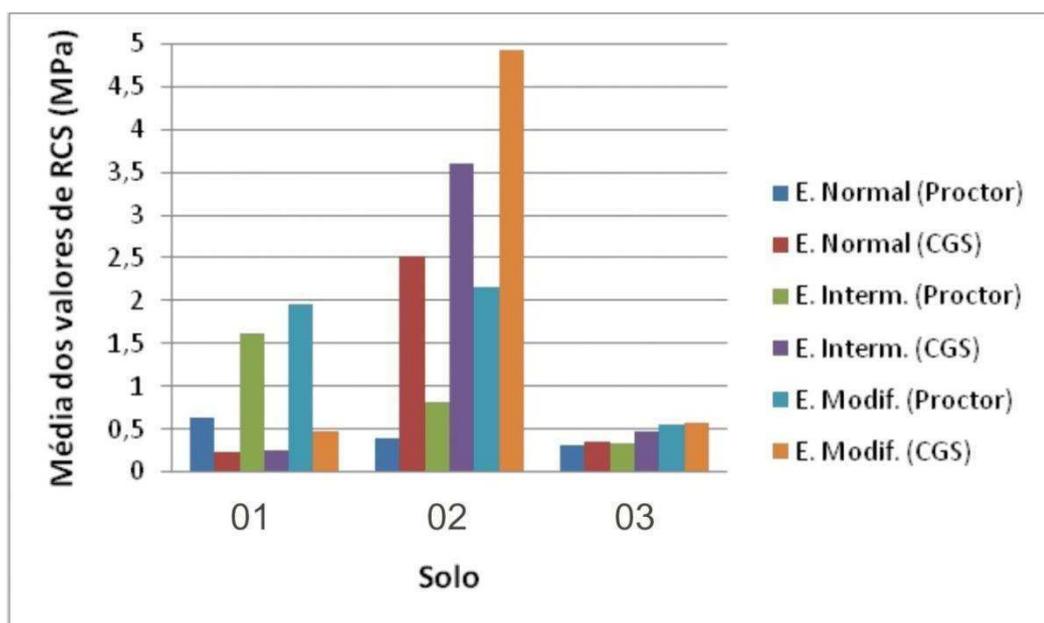
Figura 49 – Ruptura sofrida nos CPs para o (a) solo 02 e (b) solo 03 durante o ensaio de RTCD.



4.2.4 Ensaio de resistência à compressão simples

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 dois diferentes tipos de moldagem. A Figura 50 apresenta o gráfico comparativo para os três tipos de solos nas três energias: Normal, Intermediária e Modificada. Na Tabela 30 estão inseridos os resultados encontrados nos ensaios de RCS e a perda de umidade de moldagem ocorrida nos corpos de prova após 24 horas do término do ensaio para os dois tipos de moldagem: Proctor e CGS.

Figura 50 - Resultados de RCS para os solos compactados no processo Proctor e CGS.



Conforme pode ser observado na Tabela 30 abaixo ocorreu um aumento no valor do RCS para os solos 02 e 03 quando realizado o processo de compactação CGS em relação ao processo de compactação Proctor, entretanto, tal fato não ocorreu para o solo 01. Dois pontos são importantes para tentar explicar os resultados obtidos para o ensaio de RCS no solo 02. O primeiro é 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 - e o segundo é a diferença de altura dos corpos de prova moldados no CGS (Figura 51).

Tabela 30 – Resultados de RCS para os solos compactados no processo Proctor e CGS

SOLO	ENERGIA	PROCTOR		CGS	
		<i>W</i> perda da umidade de moldagem (%)	RCS (MPa)	<i>W</i> perda da umidade de moldagem (%)	RCS (MPa)
01	Normal	1,79	0,64	2,13	0,24
	Intermediária	0,63	1,62	2,22	0,25
	Modificada	0,73	1,96	2,93	0,47
02	Normal	3,54	0,40	1,50	2,53
	Intermediária	2,00	0,82	1,73	3,60
	Modificada	2,62	2,16	2,42	4,93
03	Normal	2,61	0,32	4,59	0,36
	Intermediária	2,36	0,34	4,37	0,48
	Modificada	0,88	0,55	4,79	0,57

Figura 51 – Diferença de altura dos CPs moldados no CGS para o ensaio de RCS.



Os CPs moldados no CGS apresentaram uma menor altura do que as moldadas no Proctor, e consequentemente menor volume e maior massa específica. Portanto, infere-se que os corpos de prova sejam mais densos, uma vez que apresentam menores índices de vazios, do que os moldados no Proctor, justificando o aumento da resistência à compressão simples.

A segunda hipótese seria pelo fato do solo 02 apresentar uma menor perda de umidade de moldagem para o CGS do que no Proctor. Devido a isto, o esperado seria ocorrer uma maior ação da sucção devido à diminuição de umidade no Proctor e com isso um aumento da resistência no solo 02 moldados nas condições supracitadas. Entretanto, isto não foi verificado uma vez que as amostras com menor perda de umidade apresentaram maior RCS, evidenciando, novamente, a eficácia da compactação CGS.

Os corpos de prova do solo 03 apresentaram proporcionalidade entre a RCS e a perda de umidade. Observou-se que para o solo 03 a perda de umidade de moldagem foi maior para o CGS em relação ao Proctor, e com isso a diferença dos resultados da RCS pode ser explicado por uma maior ação da sucção no CGS. Esta influência da sucção na RCS era esperada em virtude deste ser um solo com granulometria fina, e portanto mais susceptível a este comportamento.

As Figuras 52 e 53 apresentam o modo de ruptura dos corpos de prova para os dois tipos de moldagem: Proctor e CGS. Para os corpos de prova moldados pelo método Proctor, observou-se que a ruptura para o solo arenoso ocorreu de forma vertical, enquanto que para os solos 02 e 03 ocorreu uma angulação de, aproximadamente, 45° (graus). Para os corpos de prova moldados no CGS, observou-se que a ruptura ocorreu de forma inversa ao ensaio Proctor. Para o solo 01 a ruptura ocorreu formando um ângulo de, aproximadamente, 45° (graus), enquanto que para os solos 02 e 03 ocorreu uma dilatação nos corpos de prova e a ruptura quando aconteceu foi de forma vertical. O que se pode notar com estes comportamentos, tanto na moldagem Proctor com CGS, e que também pode ser observado na Tabela 30 acima, é que as maiores resistências à compressão simples ocorreram nos corpos de prova com a ruptura na forma vertical.

No solo 01 a perda de umidade não apresenta-se relevante para o estudo da RCS, pois como trata-se de um solo com granulometria mais grossa a sucção é insignificante.

Figura 52 – Ruptura sofrida nos corpos de prova moldados no Proctor durante o ensaio de Resistência à Compressão Simples para o (a) solo 01, (b) solo 02 e (c) solo 03.

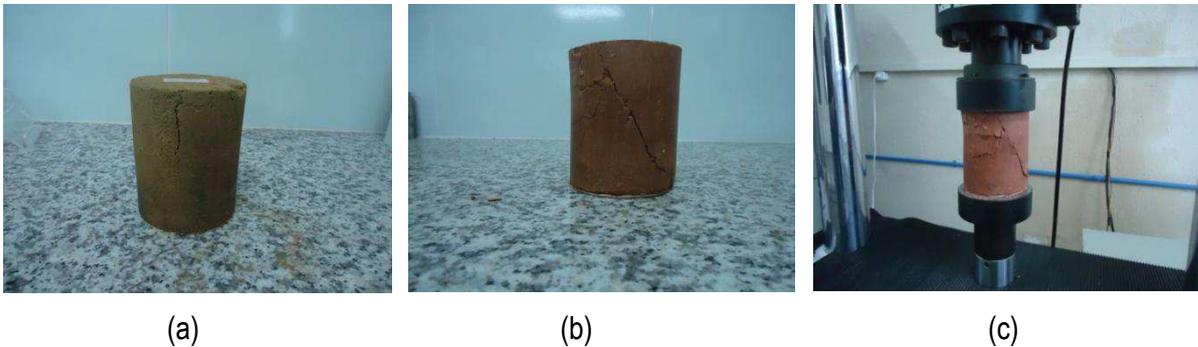
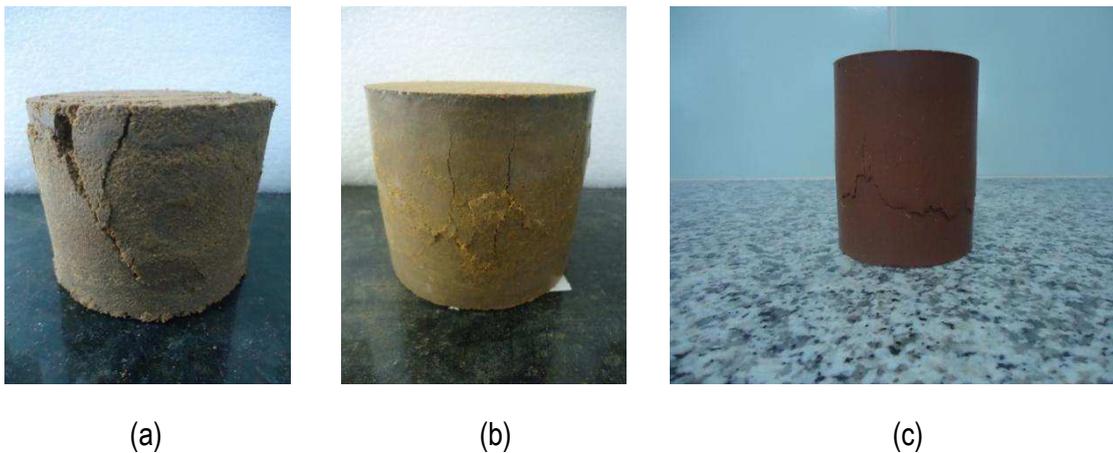


Figura 53 – Ruptura sofrida nos CPs moldados no CGS durante o ensaio de Resistência à Compressão Simples para o (a) solo 01, (b) solo 02 e (c) solo 03.



4.2.5 Potenciais problemas de ensaio do CGS para solos

A máquina do CGS foi projetada inicialmente para compactação de misturas asfálticas, mas com o uso da máquina para compactar amostras de solo um problema visível é a perda de água durante a compactação de solos úmidos.

O esqueleto do solo é comprimido e a água e o ar são forçados a sair do espaço vazio. Dependendo do teor de umidade e da permeabilidade do solo, a água pode percolar pela face inferior do molde, modificando assim a umidade após a compactação (Figura 54).

Figura 54 – Água acumulada no interior do CGS.



Tal fato é mais problemático para os solos mais grossos. A água expulsa dos vazios e pequenas quantidades de partículas de solo finas se reúnem na base de compactação. Estes depósitos de solo e água podem se acumular ao longo do tempo e causar o mau funcionamento do CGS. Além disso, a perda de partículas do solo podem criar erros nos valores de densidade seca computadas (Figura 55).

Figura 55 – Água acumulada no corpo de prova do solo 01 moldado no CGS.



Os solos 02 e 03 tiveram pouca perda de água durante a compactação giratória e molharam apenas o papel filtro que neles continham, um exemplo pode ser visto na Figura 56 de um corpo de prova do solo 03.

Figura 56 – Água acumulada no papel filtro depois da compactação no CGS.



Duas foram as tentativas para se controlar a exsudação desta água durante a compactação giratória dos solos, para o molde cilíndrico de 100 mm de diâmetro foi utilizada uma pedra porosa e um papel filtro de mesmo diâmetro, e como se pode notar na Figura 54 para o solo 02 e 03 tivemos êxito. Para o molde cilíndrico de 150 mm de diâmetro apenas foi usado papel filtro em várias quantidades, e mesmo assim para o solo 01 estes ainda tiveram seu papel filtro bem úmido ao final da compactação.

CAPÍTULO 5

5.0 CONCLUSÕES

Essa pesquisa apresenta um estudo de viabilidade do uso do compactador CGS na execução de ensaios de compactação de três tipos de solos (01, 02 e 03) em três níveis de energia (normal, intermediária e modificada).

De um modo geral, esta pesquisa mostrou que a compactação giratória no CGS é um método viável de compactação de solo em laboratório, entretanto, para que o CGS seja usado rotineiramente na compactação de solos em laboratório algumas dificuldades necessitam ser superadas, como por exemplo, o alto custo do equipamento quando comparado ao custo de um equipamento de moldagem Proctor convencional. Outra dificuldade que merece ser destacada é a necessidade da implementação de medidas que tenham como objetivo diminuir a percolação de água nas amostras de solos mais permeáveis durante o procedimento de compactação. As análises dos dados obtidos permitiram extrair ainda as seguintes conclusões específicas.

Ensaio de Compactação

Pode-se destacar que os valores de $MEAS_{máx}$ dos ensaios de compactação obtidos pelo método Proctor terem sido, em sua maioria, ligeiramente superiores aos obtidos no CGS.

Esta diferença pode ser 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 MEAS.

Destaca-se também o comportamento esperado de aumento da MEAS em função do aumento da energia de compactação utilizada, tanto para o Proctor como para o CGS.

Ensaio de CBR

Em relação ao ensaio de CBR, os CPs moldados no Proctor e CGS apresentaram melhores resultados para o solo 01 em comparação aos solos finos (02 e 03). Este comportamento era previsto. Entretanto, os resultados gerais de CBR foram melhores para o Proctor, este fato pode ser justificado

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.

Quanto aos resultados da expansão para os corpos de prova moldados no Proctor para os solos 01 e 02 apresentaram valores de pequena magnitude, todos abaixo de 0,5%, que é o limite máximo especificado nas normas do DNIT para solos estabilizados ou melhorados, com vistas à aplicação em bases (ES-142/10) de pavimentos rodoviários. Em contraste, os solos finos, como o solo 03, com alto teor de argila, são bastante afetados pelas pressões devido ao fenômeno da expansão.

Quando se trata dos resultados da expansão para os corpos de provas moldados no CGS o mesmo não ocorre. Os resultados da expansão apresentaram valores altos, quase todos acima de 1%, que é o limite máximo especificado nas normas do DNIT (ES-140/10) para solos estabilizados ou melhorados, com vistas à aplicação em sub-bases de pavimentos rodoviários. E isto ocorreu para os três tipos de solos, independente da energia aplicada.

Ensaio de Resistência a tração por compressão diametral

De modo geral ocorreu um aumento no valor do RTCD 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 02. Isto pode ser 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.

Ensaio de Resistência a compressão simples

Em relação ao ensaio de RCS, os CPs moldados no CGS para os solos 02 e 03 apresentaram maiores valores de RCS em relação ao processo de compactação Proctor, entretanto, tal fato não ocorreu para o solo 01.

O solo 02 moldado no CGS apresentou CPs com menores alturas em comparação com o Proctor, conseqüentemente os CPs estavam mais densos e com maior RCS. Observou-se que para o solo 03 a perda de umidade de moldagem foi maior para o CGS em relação ao Proctor, e com isso a diferença dos resultados da RCS pode ser explicado por uma maior ação da sucção no CGS.

5.1 Sugestões para Futuras Pesquisas

Com a finalidade de ampliar os conhecimentos a respeito do uso do CGS na compactação de solos e auxiliar numa futura normatização do procedimento, sugere-se:

- avaliar o ensaio de compactação no CGS, moldando os corpos de prova em 5 camadas;
- realizar um estudo comparativo de módulos de resiliência em corpos de prova moldados no CGS e Proctor;
- construir um trecho experimental com os parâmetros ótimos de compactação obtidos a partir do CGS e comparar a $MEAS_{máx}$ com a $MEAS_{insitu}$;
- realizar ensaio de CBR em corpos de prova moldados no CGS utilizando molde ou procedimento de compactação/desmodagem que não permita a existência de espaços vazios no contato CP/molde;
- analisar o coeficiente de permeabilidade a partir da moldagem de CPs no CGS; e
- propor um sistema de drenagem para a exsudação da água dos CPs.

REFERÊNCIAS

- AASHTO - AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO M-145-91. *Standard Specification for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purpose*. Washington, EUA, 2004.
- AASHTO - AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO T99 and 180-11. *Moisture – density relations of soils*. Washington, EUA, 2011.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. (2011). ASTM D2487 – 11. *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. Pensilvânia, EUA.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. (2011). ASTM D4253 – 2006. *Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit of Soils Using a Vibratory Table*. Pensilvânia, EUA.
- ABNT NBR 6459 (1984) *Solo – Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro.
- ABNT NBR 6508 (1984) *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.
- ABNT NBR 7180 (1984) *Solo - Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro.
- ABNT NBR 7181 (1984) *Solo – Análise granulométrica*. Rio de Janeiro.
- ABNT NBR 7182 (1986) *Solo - Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro.
- ABNT NBR 12025 – MB 3361 (1990) *Solo - cimento – Ensaio de Compressão Simples de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro.
- BROWNE, M. (2006). *Feasibility of Using a Gyratory Compactor to Determine Compaction Characteristics of Soil*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Estado de Montana, Bozeman, Montana.
- BUTCHER, M. (1998). *Determining Gyratory Compaction Characteristics Using Servopac Gyratory Compactor*. Transportation research record 1630, nº 98-0114.
- CAVALCANTI, L. S. (2010). *Efeito de Alguns Modificadores de Ligantes na Vida de Fadiga e Deformação Permanente de Misturas Asfálticas*. Dissertação (mestrado) – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE.

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

COMINSKY, R., R. B. Leahy, and E.T. Harrigan, 1994. "Level One Mix Design: Materials Selection, Compaction, and Conditioning", SHRP - A - 408 Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D. C.

DAS, B. M. Fundamentos de Engenharia Geotécnica. São Paulo: Thomson Learning, 2007.

DANTAS, G. H. S. Estudo do emprego do compactador giratório Superpave na compactação de um solo argiloso. Dissertação de Mestrado apresentada a Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2013.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTE. ME 129/94. *Solos – Compactação em equipamento miniatura*. Rio de Janeiro, 1994.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTE. ME 162/94. *Solos – ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas*. Rio de Janeiro, 1994.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTE. ME 049/94. *Solos – determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas*. Rio de Janeiro, 1994.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTE. ME 136/2010. *Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio*. Rio de Janeiro, 2010.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTE. *Manual de Pavimentação*. Diretoria de Planejamento e Pesquisa, Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, IPR – Publicação 719. Rio de Janeiro, 2006, 274p.

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.

GAMA, D. A. Avaliação do potencial do uso do Etileno Acetato de Vinila (EVA) descartado pela Indústria Calçadista em Misturas Asfáltica. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental – Universidade Federal de Campina Grande, 2013.

HARMAN, T., Bukowski, J. R., Moutier, F., Huber, G. e MCG Sennis, R. (2002). *History and Future Challenges of Gyratory Compaction - 1939 to 2001*. Transportation Research Record, 1789.

Holtz, R.D. and Kovacs, W.D. "An introduction to Geotechnical Engineering," Prentice-Hall Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, 1981. pp. 34.

HUBER, G. *Development of the Superpave Gyratory Compactor*. Heritage Research. Indianapolis, Indiana, 1996.

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

MARQUES, G. L.O., 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, 2004.

MEDEIROS, D. F. de. Influência da Granulometria nas Características Mecânicas de Misturas Asfálticas para Aeródromos. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental – Universidade Federal de Campina Grande, 2009.

MENEZES, M. B. Melo de. Análise da Influência do Teor de Umidade na Absorção D'Água e Sucção dos Solos em Estudos de Erodibilidade. Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

MILBERGER, L. L., and Dunlap, W. A. (1966). A gyratory Compactor for Molding Large Diameter Triaxial Specimens of Granular materials. Instituto de Transportes do Texas, Universidade A&M, Texas.

MOKWA, R., Cuelho, E. e Browne, M. (2008). *Laboratory Testing of Soil Using the Superpave Gyratory Compactor*. Transportation Research Board, Washington D.C., Janeiro 14-17.

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

PING, W. V., Leonard, M., e 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.
- PING, W., Yang, Z., Leonard, M. e Putcha, S. (2002). *Laboratory Simulation of Field Compaction Characteristics on Sandy Soils*. Transportation Research Board, Washington D.C., Janeiro 13-17.
- PINTO, C. de S. Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas/ Carlos de Sousa Pinto. – São Paulo: Oficina de Textos, 2000-02-15.
- QUEIROZ, F. de A. Utilização de material Fresado para Aplicação em Camadas Estabilizadas de Base e Sub-Bases de Pavimentos Rodoviários. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental – Universidade Federal de Campina Grande, 2011.
- SANTOS, K. P. dos. 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, 2012.
- SANTOS, W. J. Avaliação do Uso de Emulsão Asfáltica na Estabilização Química de Três Solos de Sergipe. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental – Universidade Federal de Campina Grande, 2009.
- SENÇO, W. (1997). Manual de técnicas de pavimentação. Editora Pini Ltda. São Paulo, SP. 746p.
- SOUZA JUNIOR, J. D. (2005). Efeito da Energia de Compactação em Propriedades dos Solos utilizados na Pavimentação do Estado do Ceará, Fortaleza, CE, 211 fl.
- SOUZA, L. J. S. de. 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, 2012.
- TAKEDA, M. C. (2006). *A influência da variação da umidade pós-compactação no comportamento mecânico de solos de rodovias do interior paulista*. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.
- VENKATARAMA REDDY, B. V. e JAGADAISH, K. S. (1993). *The static compaction of soils*. Géotechnique 43, nº2, 337-341.

VAVRIK, W. R.; CARPENTER, S. H. (1998). *Calculating Air Voids at Specified Numbers of Gyration in Superpave Gyration Compactor*. In: Transportation Research Record 1630: Asphalt Mixtures: Stiffness Characterization, Variables, and Performance, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., EUA.

WERK, S. M. S. de. 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, 2000.