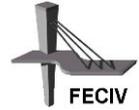




UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA - UFU
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL - FECIV
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ENERGIAS PARA COMPACTAÇÃO DE SOLOS DESTINADOS A
ESTRUTURAS DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS**

Autor: Felipe Maraschine de Almeida

Uberlândia, julho de 2017.

FELIPE MARASCHINE DE ALMEIDA

ENERGIAS PARA COMPACTAÇÃO DE SOLOS DESTINADOS A
ESTRUTURAS DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Engenharia Civil da Universidade
Federal de Uberlândia como requisito para
obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Civil.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Giovana Bizão
Georgetti

Uberlândia, julho de 2017.

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA
FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Almeida, Felipe Maraschine de
Energias para compactação de solos destinados a estruturas de
pavimentos asfálticos / Felipe Maraschine de Almeida; orientadora Giovana
Bizão Georgetti. Uberlândia, jul. de 2017.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Graduação em
Engenharia Civil – Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de
Uberlândia, 2017.

1. Compactação de solos. 2. Energias alternativas. 3. Proctor
Internormal. 4. Proctor Intermodificado. 5. CBR. 6. Mecânica dos Solos. 7.
Pavimentação. 8. DNER. I. Título

Folha de Julgamento

Candidato: **Felipe Maraschine de Almeida**

Título do Trabalho de Conclusão de Curso: “Energias para compactação de solos destinados às estruturas de pavimentos asfálticos”.

Data da defesa: 31/07/2017

Comissão Julgadora

Resultado:

Prof.^a Dr.^a **Giovana Bizão Georgetti (Orientadora)**

(Faculdade de Engenharia Civil – FECIV)

Prof. Dr. **Joaquim Mário Caleiro Acerbi**

(Faculdade de Engenharia Civil – FECIV)

Prof. Dr. **Rodrigo Pires Leandro**

(Faculdade de Engenharia Civil – FECIV)

Coordenadora do Curso de Engenharia Civil

Prof.^a Dr.^a **Vanessa Cristina de Castilho**

Presidente da Comissão de Graduação

Prof.^a Dr.^a **Giovana Bizão Georgetti**

*“Feliz aquele que
transfere o que sabe e
aprende o que ensina”
Cora Coralina.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus amigos Guilherme Moraes, Murilo Morales, Mariana Borges e à minha namorada Izadora Lemes pela ajuda nos ensaios em laboratório, pela companhia e dos momentos de alívio das tensões; pelo apoio, incentivo, carinho e compreensão.

Agradeço, também, por todos os ensinamentos da orientadora Giovana Bizão e pelo suporte dos professores Joaquim Acerbi e Rodrigo Pires.

Agradeço aos meus pais Sandro Ricardo e Maria Inês, por toda a educação, oportunidade de estudos e lazer que me proporcionaram.

Agradeço ao engenheiro Luiz Fernando Violatti pela oportunidade de estágio na empresa DRESTE Construtora, onde adquiri o enorme gosto pela prática da pavimentação e mecânica dos solos.

RESUMO

ALMEIDA, F. M. (2017). Energias para compactação de solos destinados a estruturas de pavimentos asfálticos, Uberlândia, 104p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil), Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia.

Atualmente, o método de dimensionamento de pavimentos mais usado no país é o proposto pelo DNIT, que tem como base o índice de suporte Califórnia (CBR). O método estabelece valores mínimos para este índice de acordo com a camada do pavimento, bem como estabelece padrões de energia de compactação, granulometria e limites de consistência para materiais geotécnicos constituintes do pavimento. No entanto, há alternativas de energias de compactação – Proctor Internormal e Proctor Intermodificado – que representam mais opções para atender aos limites técnicos de dimensionamento com menores custos. Neste estudo, as energias alternativas foram testadas e os resultados comparados com energias de compactação padronizadas. Para isso utilizaram-se dois tipos de solo com comportamento laterítico (IGNATIUS, 1991): amostra do Campus Glória com 90% de finos, limite de liquidez igual a 73%, classificada pelo TRB como A-7-5; e a segunda amostra da Fazenda Experimental Água Limpa, sendo um solo arenoso com 30% de finos, limite de liquidez igual a 31%, classificado como A-2-4 pelo TRB. Quando estruturas hipotéticas de pavimentos foram dimensionadas usando estes solos e as energias alternativas de compactação, constaram-se possibilidades de redução de custos. Em uma das propostas, obteve-se economia de R\$ 13.575,00 por quilômetro de via para o caso de subleito com o solo Água Limpa compactado na energia do Proctor Internormal (CBR = 23%), ao invés do Proctor Normal (CBR = 12%). Em uma outra proposta, uma camada de sub-base com o solo Água Limpa compactado na energia do Proctor Internormal (CBR = 23%), gerou economia aproximada de R\$ 336,00 por quilômetro de via construída em comparação à compactação no Proctor Intermediário (CBR = 50%).

Palavras-chave: compactação de solos, energias alternativas, Proctor Internormal, Proctor Intermodificado, CBR, Mecânica dos Solos, Pavimentação, DNIT.

ABSTRACT

ALMEIDA, F. M. (2017) **Compactive efforts for soils in pavement structures**, Uberlândia, 104p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil), Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia.

Currently, the most used pavement design method in the country was proposed by DNIT, which is based on the California bearing ratio (CBR). The method establishes minimum values for CBR according to the pavement layer, and also establishes standards for compactive efforts, granulometry and consistency limits of geotechnical materials in pavements. However, there are alternative compactive efforts – named Interstandard Proctor and Intermodified Proctor – which represent more options to meet the technical design specifications with lower costs. In this study, the alternative compactive efforts were tested and results were compared with standard ones. Two soil types were used for this matter, both are lateritic soils (IGNATIUS, 1991): ‘Campus Glória’ sample was classified as A-7-5 by the TRB, with 90% of fines and liquidity limit = 73%; and ‘Água Limpa’ Experimental Farm sample, which is a sandy soil with 30% of fines, liquidity limit = 31% and classified as A-2-4. When hypothetical pavement structures were designed with these soils and the alternative compactive efforts, potential cost reduction were verified. One of the options suggests cost reduction of R\$ 13,575.00/km if the subgrade composed by ‘Água Limpa’ soil is compacted at Interstandard Proctor effort (CBR = 23%) instead of Standard Proctor (CBR = 12%). Another option, with the ‘Água Limpa’ soil as subbase layer, would lead to an approximate saving of R\$ 336.00 per kilometer of road if Interstandard Proctor compactive effort (CBR = 23%) were used instead of Intermediate Proctor (CBR = 50%).

Keywords: soil compaction, alternative efforts, Interstandard Proctor, Intermodified Proctor, CBR, Soil Mechanics, Paving, DNIT.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Correlação entre compactação e limites de Atterberg.....	26
Figura 2.2 – Curva de compactação de um solo.....	27
Figura 2.3 – Curvas de compactação de um solo com diferentes energias.	29
Figura 2.4 – Equipamentos de compactação: (a) rolo pé-de-carneiro; (b) rolo chapa ou rolo liso; (c) rolo pneumático.....	31
Figura 2.5 – Curvas de CBR e compactação.....	36
Figura 2.6 – Curva pressão <i>versus</i> penetração.	37
Figura 2.7 – Execução do ensaio DCP.....	38
Figura 2.8 – Resultado típico do ensaio DCP.....	38
Figura 2.9 – Valores de CBR estimados pelo parâmetro DCP.....	39
Figura 2.10 – Variação da resistência dos solos compactados.....	40
Figura 4.1 – Coleta da amostra 1 no Campus Glória.....	45
Figura 4.2 – (a) Dispensador de solos e (b) Retirada do ar da amostra por vácuo.	46
Figura 4.3 – Solução defloculante preparada por agitador magnético.	48
Figura 4.4 – Ensaio de sedimentação.....	49
Figura 4.5 – Granulometria das amostras Campus Glória e Água Limpa.....	52
Figura 4.6 – Aparelho de Casagrande com amostra de solo e ranhura.	54
Figura 4.7 – Limites de liquidez para amostras 1 e 2.....	55
Figura 4.8 – Ensaio de limite de plasticidade.....	55
Figura 4.9 – Carta de plasticidade.....	58
Figura 4.10 – Esquema para classificação pelo Sistema Unificado.....	59
Figura 4.11 – (a) Execução de compactação com cilindro pequeno e soquete grande, e extração de amostra (b) do Campus Glória e (c) de Água Limpa.....	62
Figura 4.12 – Curvas de compactação.....	62
Figura 4.13 – Curvas de compactação da amostra 1.....	63
Figura 4.14 – Curvas de compactação da amostra 2.....	63
Figura 4.15 – Ensaio de expansão.....	66
Figura 4.16 – Ensaio CBR.....	67
Figura 4.17 – Curvas dos ensaios CBR com as amostras 1 e 2.....	68
Figura 4.18 – Variação da massa específica seca máxima com as energias de compactação..	70
Figura 4.19 – Variação do teor de umidade ótimo com as energias de compactação.....	70

Figura 4.20 – Variação do CBR para as energias de compactação.....	71
Figura 5.1 – Determinação de espessura de pavimento.	74
Figura 5.2 – Dimensionamento do pavimento.	74
Figura A 1 - Local de coleta da amostra 1 no Campus Glória.....	88
Figura A 2 -. Local de coleta da amostra 2 na Fazenda Experimental Água Limpa.	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Energias de compactação normatizadas.	30
Tabela 2.2 – Correlações entre DCP e CBR.....	39
Tabela 4.1 – Limite de plasticidade da amostra 1.	56
Tabela 4.2 - Limite de plasticidade da amostra 2.	56
Tabela 4.3 – Limites de Atterberg e alguns solos brasileiros típicos.	57
Tabela 4.4 – Índice de grupo das amostras 1 e 2.....	59
Tabela 4.5 – Esquema para classificação TRB.....	60
Tabela 4.6 – Possíveis combinações de equipamento para ensaio de compactação.	61
Tabela 4.7 – Coordenadas dos pontos ótimos.	65
Tabela 4.8 – Expansão nos ensaios CBR.	66
Tabela 4.9 – Valores de CBR.	69
Tabela 5.1 – Possibilidades para a construção de uma rodovia.....	72
Tabela 5.2 – Espessura mínima de revestimento betuminoso.	75
Tabela 5.3 – Coeficientes de equivalência estrutural.	76
Tabela 5.4 – Dimensionamento de possíveis pavimentos com a amostra do Campus Glória.	76
Tabela 5.5 – Dimensionamento de possíveis pavimentos com a amostra de Água Limpa.	78
Tabela 5.6 – Referencial de custos de compactação.	80
Tabela 5.7 – Custos de execução.....	81
Tabela B 1 – Sedimentação Amostra 1 – Campus Glória.	90
Tabela B 2 – Sedimentação Amostra 2 – Fazenda Experimental Água Limpa.	90
Tabela B 3 – Peneiramento fino – Amostra 1 Campus Glória	91
Tabela B 4 – Peneiramento fino – Amostra 2 Fazenda Experimental Água Limpa	91
Tabela C 1 – Compactação Proctor normal da amostra 1.	92
Tabela C 2 – Compactação Proctor internormal da amostra 1.	93
Tabela C 3 – Compactação Proctor intermediário da amostra 1.	94
Tabela C 4 – Compactação Proctor intermodificado da amostra 1.	95
Tabela C 5 – Compactação Proctor normal da amostra 2.	96
Tabela C 6 – Compactação Proctor internormal da amostra 2.	97
Tabela C 7 – Compactação Proctor intermediário da amostra 2.	98

Tabela C 8– Compactação Proctor intermodificado da amostra 2.....	99
Tabela D 1 – CBR da amostra 1 no ponto ótimo da energia Proctor normal.	100
Tabela D 2 – CBR da amostra 1 no ponto ótimo da energia Proctor internormal.	100
Tabela D 3 – CBR da amostra 1 no ponto ótimo da energia Proctor intermediário.	100
Tabela D 4 – CBR da amostra 1 no ponto ótimo da energia Proctor intermodificado.	100
Tabela D 5 – CBR da amostra 2 no ponto ótimo da energia Proctor normal.	101
Tabela D 6 – CBR da amostra 2 no ponto ótimo da energia Proctor internormal.	101
Tabela D 7 – CBR da amostra 2 no ponto ótimo da energia Proctor intermediário.	101
Tabela D 8 – CBR da amostra 2 no ponto ótimo da energia Proctor intermodificado.	101

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
	2.1 O solo e a pavimentação	23
	2.2 Compactação de solos.....	24
	2.2.1 Ensaio de compactação em laboratório	25
	2.2.2 Compactação no campo	30
	2.2.3 Controle de compactação no campo.....	32
	2.3 Índice de suporte Califórnia.....	34
	2.3.1 Ensaio de CBR em laboratório.....	35
	2.3.2 Ensaio de CBR no campo	37
	2.4 Relação entre características de compactação e CBR.....	39
	2.5 Classificação de solos tropicais	41
	2.6 Energias alternativas	42
3	MÉTODO.....	43
4	ENSAIOS EM LABORATÓRIO	44
	4.1 Coleta dos materiais.....	44
	4.2 Massa específica dos grãos	45
	4.3 Granulometria	47
	4.3.1 Sedimentação	48
	4.3.2 Peneiramento fino	51
	4.3.3 Peneiramento grosso	51
	4.4 Limites de consistência.....	52
	4.4.1 Limite de liquidez.....	54
	4.4.2 Limite de plasticidade	55
	4.5 Classificação das amostras.....	57
	4.5.1 Classificação Unificada.....	57

4.5.3 Sistema de classificação TRB.....	58
4.6 Compactação	60
4.6.1 Índice de Laterização (L).....	64
4.7 Índice de suporte Califórnia - CBR.....	65
5 APLICAÇÃO EM PAVIMENTAÇÃO	71
5.1 Dimensionamento de pavimentos	73
5.1.1 Dimensionamento para a amostra do Campus Glória	75
5.1.2 Dimensionamento para a amostra de Água Limpa.....	77
5.2 Viabilidade econômica	79
5.2.1 Compactação do subleito – Campus Glória.....	81
5.2.2 Compactação do subleito – Fazenda Água Limpa	81
5.2.3 Compactação da sub-base – Fazenda Água Limpa	82
6 CONCLUSÃO	82
7 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	83
REFERÊNCIAS.....	85
APÊNDICE A – Pontos de coleta de amostras.....	88
APÊNDICE B – Dados de ensaios de caracterização.....	90
APÊNDICE C – Dados dos ensaios de compactação.....	92
APÊNDICE D – Dados dos ensaios de CBR.....	100

1 INTRODUÇÃO

As estruturas de pavimentos asfálticos são as mais comumente empregadas nas rodovias do país. De acordo com Medina e Motta (2015), estas estruturas têm sido dimensionadas pelo método do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), com base no ensaio *California Bearing Ratio* (CBR), curvas de dimensionamento do Corpo de Engenheiros Militares dos EUA (USACE) e dados obtidos da pista experimental da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), do fim da década de 1950, adaptados pelo Engenheiro Murillo Lopes de Souza.

O dimensionamento de obras rodoviárias leva em consideração o CBR, ou do português, Índice de Suporte Califórnia (ISC), por ser um indicador da capacidade de suporte de um dado solo compactado. O ensaio, normatizado pela DNIT-ME 172/2016, consiste na penetração de um pistão em corpo de prova moldado conforme o ensaio de compactação. A capacidade de suporte é avaliada comparando-se a carga de penetração no solo com a carga de penetração em uma mistura padrão de brita estabilizada granulometricamente de alta qualidade tomada como padrão.

O valor de CBR de um solo é influenciado, entre outros fatores, pelas características de compactação: energia, massa específica seca e teor de umidade. Crispim (2010 apud SANTOS, 2015) confirma que o processo de compactação interfere diretamente nas propriedades hidráulicas e mecânicas do solo, sendo a resistência ao cisalhamento e a deformabilidade de solos finos, funções do processo de compactação e do teor de umidade. Além disso, conhecer a massa específica de um solo é imprescindível à engenharia para a previsão de seu comportamento.

O início da técnica de compactação é creditada ao engenheiro norte-americano Proctor que, em 1933, publicou suas observações sobre a compactação de aterros, mostrando que, ao aplicar-se uma certa energia de compactação (um certo número de passadas de um determinado equipamento no campo ou um certo número de golpes de um soquete sobre o solo contido num molde), a massa específica resultante é função da umidade que o solo estiver (PINTO, 2006).

A relação entre umidade e massa específica seca de um solo pode ser determinada em laboratório por meio do ensaio de compactação. Este é normatizado pela DNIT-ME 164/2013 e consiste em moldar corpos de prova com diferentes teores de umidade a uma energia de compactação constante em molde cilíndrico com auxílio de soquete.

No que se refere à energia de compactação, atualmente são normatizados três níveis: Proctor Normal, Intermediário e Modificado. A energia é função da massa e altura de queda do soquete, do número de golpes do soquete por camada, do número de camadas compactadas e do volume de solo compactado. Quando as demais variáveis são mantidas constantes, as três energias normatizadas diferem no número de golpes do soquete por camada, sendo 12 golpes no Proctor Normal, 26 golpes no Proctor Intermediário e 55 golpes no Proctor Modificado. Atualmente, duas energias alternativas têm sido usadas para fins de pavimentação, que também diferem na quantidade de golpes do soquete por camada: (i) Proctor Internormal (com 18 golpes por camada) e (ii) Proctor Intermodificado (com 40 golpes por camada) (GOMES, 2012).

Considerando os efeitos da compactação dos solos, Caputo (2006) destaca que este procedimento visa melhorar suas características, não só quanto à resistência, mas, também, nos aspectos de permeabilidade, compressibilidade e absorção d'água. Com isso, é de se esperar que o aumento da energia de compactação – do Proctor Normal para o Proctor Internormal e do Proctor Intermediário para o Proctor Intermodificado – seja acompanhado por um aumento da resistência medida pelo ensaio de CBR e diminuição da permeabilidade representada pelo coeficiente de condutividade hidráulica de Darcy.

Analisando a relação custo-benefício, as energias alternativas são intermediárias às energias padronizadas e, portanto, tendem a apresentar melhorias também intermediárias. Estas alternativas tornam-se opções quando a energia menor for insuficiente em termos de qualidade final do solo compactado, e o uso de uma energia maior apresentar custos elevados. Além disso, uma outra vantagem financeira no emprego destas energias alternativas está na redução da intervenção ambiental em jazidas de solo, já que em obras de pavimentação e aterros em geral, durante a fase de projeto, devem ser analisados fatores econômicos como custo da exploração dos materiais em jazidas e distância média de transporte do material.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O solo e a pavimentação

Para aplicação na engenharia civil, o solo pode ser considerado qualquer acumulação formada por partículas minerais e vazios preenchidos por água ou ar, cuja organização depende dos processos envolvidos durante a sua formação e está diretamente associada ao intemperismo da rocha (SANTOS, 2015). Assim, o processo de origem do solo depende do clima, relevo, tempo e o tipo de rocha de origem. Estes fatores definem as principais características do solo, como a mineralogia, cor, textura, plasticidade e estrutura das partículas, e determinam sua relevância para as diversas aplicações, seja na engenharia civil ou na agricultura.

Todas as obras de engenharia civil assentam-se sobre o terreno e inevitavelmente requerem que o comportamento do solo seja devidamente considerado (PINTO, 2006). Quando o solo de um determinado local não atende os requisitos necessários para a obra, pode-se lançar mão de técnicas de melhoria dos solos, dentre as quais está a compactação. A compactação tem intuito de conferir ao solo características que o torne, por exemplo, mais resistente, menos compressível e menos erodível, entre outros aspectos. Além de, ser uma técnica de melhoria de solos, é a compactação que viabiliza o uso do solo como material de construção, como ocorre na pavimentação.

O pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança (BERNUCCI, et al. 2006). Em obras de pavimentação, a terraplenagem é uma etapa prévia que consiste em compactar diversas camadas com material granular, camadas essas que correspondem ao corpo de aterro e subleito. Posteriormente são executadas as camadas do pavimento, que são compactadas: reforço do subleito, sub-base e base, também com material granular e, por fim, a camada de rodagem, que pode ser de concreto com Cimento Portland (rígida) ou asfáltica com Cimento Asfáltico de Petróleo – CAP (flexível). As propriedades mecânicas de cada camada compactada são consideradas no dimensionamento de uma estrutura de pavimento.

No Brasil, o método empírico de dimensionamento de pavimentos do DNER – método do CBR, proposto pelo Eng. Murillo Lopes de Souza em 1966, e hoje em sua segunda edição (DNER, 1996), ainda é de ampla difusão no meio rodoviário, principalmente por sua concepção simples. O método fornece a espessura de material granular necessária para evitar a deformação plástica do subleito, ou mesmo, sua ruptura por cisalhamento durante a vida útil do pavimento (LELIS, 2004).

2.2 Compactação de solos

A importância do estudo de compactação em obras de terra é descrita por Vargas (1977, p. 47):

A construção de aterros é, das obras de terra, a que mais exige estudo da compactação. Isto é, o processo pelo qual se comunica ao solo não só a densidade e resistência como também, e principalmente, estabilidade. Entenda-se como estabilidade a existência de uma resistência que, embora possa não ser a mais alta que o solo possa oferecer, mantenha-se permanente, independente das estações do ano e das condições climáticas. Por outro lado, a compactação comunica, ao aterro, condições de resistência e compressibilidade capazes de tornar possível o seu uso imediato.

De acordo com Craig (2013) a compactação é o processo de aumentar a densidade de um solo com a redução do volume de ar sem mudanças significativas no volume de água do solo. Segundo este autor, a massa específica seca de um solo durante a compactação varia conforme o seu teor de umidade e da energia fornecida pelo equipamento de compactação. Somado a isso, Vargas (1977) afirma que a umidade e a massa específica obtidas num ensaio de compactação dependem também da natureza do solo. Ao se compactar um solo, o esforço de compactação será mais ou menos efetivo conforme a sua granulometria e plasticidade.

Se a massa específica aparente do solo for ρ e seu teor de umidade for w , então, a massa específica aparente seca ρ_d será dada pela equação 2.1 a seguir:

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + w} \quad (Eq. 2.1)$$

Para esta relação, existe um ponto em que se correlaciona a massa específica seca máxima com um teor de umidade ótimo, que é de extrema importância para a engenharia geotécnica,

pois é indicador de maior resistência e estabilidade de um solo compactado a dada energia de compactação.

Vargas (1977) apresenta uma correlação entre a compactação e os Limites de Atterberg para diferentes tipos de solos (Figura 2.1). É perceptível que o teor de umidade ótimo é bastante próximo ao teor de umidade do limite de plasticidade e, quanto menor a diferença entre os limites de liquidez e plasticidade, maior será a massa específica aparente seca máxima e menor será o teor de umidade ótimo. Os diferentes tipos de solos ainda mostram que quanto menor a granulometria do solo menor será a massa específica seca máxima e maior teor de umidade ótimo.

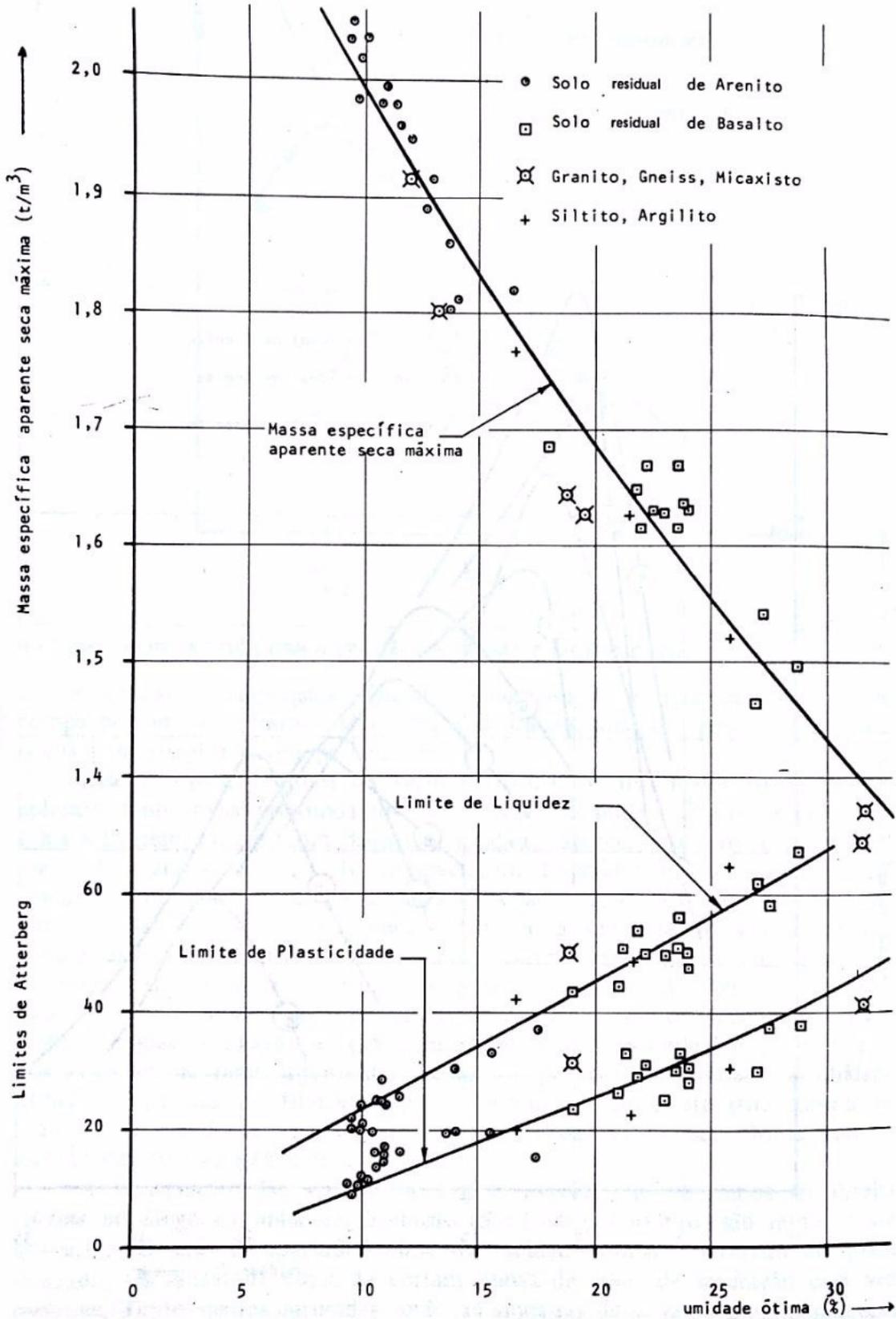
2.2.1 Ensaio de compactação em laboratório

A compactação de um solo em laboratório tem como finalidade determinar a curva de variação da massa específica seca em função do teor de umidade, para uma dada energia de compactação (STANCATI; NOGUEIRA; VILAR, 1981). Para ajustar a curva aos dados experimentais, geralmente associam-se duas retas (ascendente no ramo seco e descendente no ramo úmido) unidas por uma curva parabólica com concavidade para baixo. Assim, o vértice da parábola correlaciona a densidade seca máxima ($\rho_{dmáx}$) à umidade ótima (h_{ot}) conforme a Figura 2.1.

Apesar de o objetivo de uma compactação ser a redução do índice de vazios pela expulsão de ar, não é possível expulsar todo o ar aprisionado no solo, por isso, um solo compactado sempre estará próximo à saturação, mas nunca atingirá este estado. As curvas “S” representadas na Figura 2.2 correspondem a curvas de igual grau de saturação, de onde se nota que no ramo úmido o grau de saturação do solo praticamente não varia, e o ponto ótimo fica entre $S = 0,8$ e $0,9$.

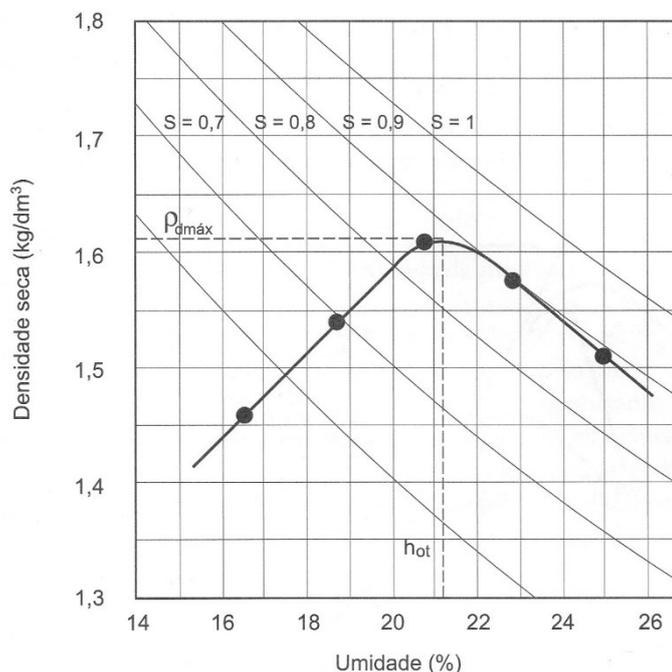
Ainda nesta figura, percebe-se, com o aumento do teor de umidade, o gradativo aumento da massa específica seca no ramo seco e sua diminuição no ramo úmido. Com o advento da microscopia eletrônica por varredura, diversos autores se dispuseram a estudar o formato da curva de compactação, dos quais destacam-se:

Figura 2.1 – Correlação entre compactação e limites de Atterberg.



Fonte: Vargas (1977).

Figura 2.2 – Curva de compactação de um solo.



Fonte: PINTO 2006.

(a) Proctor¹ (1933 apud SANTOS, 2015) analisou a curva diferenciando o processo de compactação de acordo com os ramos. No ramo seco elevadas forças de atrito resistem aos esforços de compactação obtendo maiores índices de vazios. Ainda assim, o aumento da umidade no solo ocasiona uma lubrificação das partículas diminuindo o atrito entre elas. Consequentemente, a adição de água no solo implica em sucessivas reduções do índice de vazios até se atinja a massa específica seca máxima para um teor de umidade ótimo. Já no ramo úmido a massa específica seca diminui, justificada pelo afastamento entre as partículas.

(b) Hogentogler² (1936 apud SANTOS, 2015) justificou a forma da curva de compactação por meio de quatro estágios de umidade – hidratação, lubrificação, inchamento e saturação. No estágio de hidratação ocorre adsorção de água pelas partículas, formando um filme de água altamente viscoso. Com adição de água esse filme favorece o rearranjo das partículas até o estágio de lubrificação limite. Em seguida,

¹ PROCTOR, R. R. **The design and construction of rolled Earth dams**. Engineering News-Record, III, August 31, September 7, 21 and 28. 1933.

² HOGENTOGLER, C. A. **Essentials of soil compaction**. Proceedings of the Highway Research Board, National RESEARCH Council, Washington, D.C., pp. 309-316. 1936.

maiores adições de água provocam inchamento da massa de solo facilitando o deslocamento entre partículas sem alteração na quantidade de ar existente na lubrificação limite. No último estágio, o autor considera que o sucessivo inchamento leva o solo a completa saturação.

- (c) Lambe³ (1960 apud SANTOS, 2015) observou a curva de compactação sobre as características da interação físico-química das partículas. Em solos com baixa umidade ocorrem elevadas concentrações eletrolíticas, que reduzem as forças de repulsão osmótica entre as partículas, concedendo uma estrutura do tipo floculada. Elevando-se o teor de umidade, e conseqüente diminuindo a concentração eletrolítica, forma-se uma dupla camada difusa. Esta situação ocasiona estruturas mais dispersas, diminuindo a concentração de sólidos, que gera estruturas menos densas e cada vez mais orientadas permitindo, assim, que as partículas deslizem umas sobre as outras.

Por uma visão crítica das teorias expostas, Hilf⁴ (1991 apud SANTOS, 2015) analisa que as teorias que consideram a determinação da curva de compactação um processo dependente das tensões efetivas, seja ela função da pressão capilar ou da formação de agregações, apresentam-se mais prováveis que o processo de lubrificação das partículas. Entretanto, Hilf não descartou nenhuma das hipóteses e, sugere que novas pesquisas sejam realizadas sobre o tema, a fim de compreender como a relação solo-água-ar interfere na forma da curva de compactação.

Outra característica da curva de compactação é seu deslocamento para cima e para a esquerda com o aumento da energia de compactação, como mostrado na Figura 2.3. Isso demonstra que a massa específica seca máxima e a umidade ótima do solo não são índices físicos, e dependem da energia aplicada durante o processo de compactação. Os pontos de máxima densidade seca e umidade ótima para várias energias de compactação, com o mesmo solo, se dispõem ao longo de uma curva que tem um aspecto semelhante ao de uma curva de igual grau de saturação (PINTO, 2006).

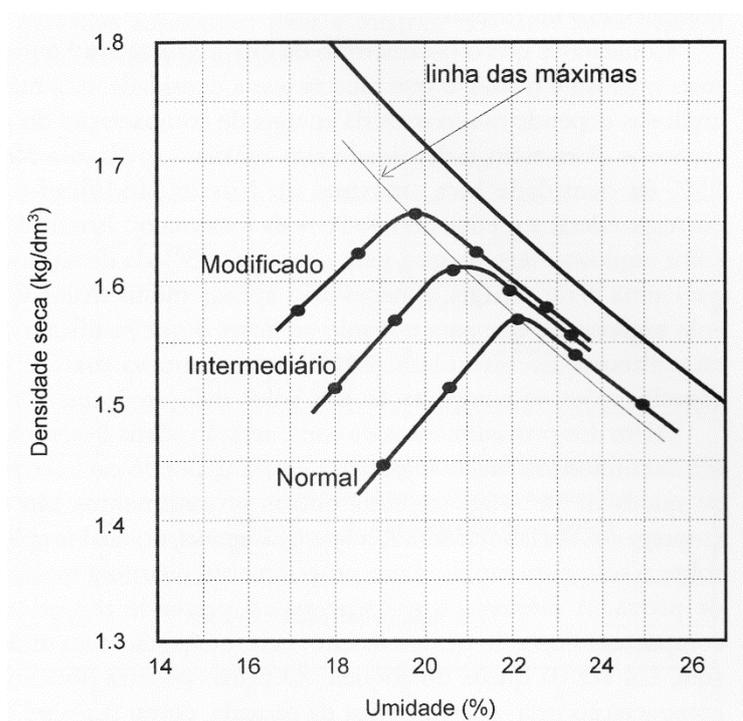
Pinto (2006) também discute o efeito de um aumento da energia de compactação no solo para uma dada umidade: quando o solo se encontra com umidade abaixo da ótima, a aplicação de maior energia de compactação provoca um aumento da massa específica seca, mas quando a

³ LAMBE, T. W. **Structure of compacted clay**. Transactions ASCE, 125, pp. 682-705. 1960.

⁴ HILF, J. W. **Compacted fill**. FANG, H. (Ed.). Foundation engineering handbook. 2nded. New York: Chapman & Hall, 1991. Cap. 8.

umidade está a cima do teor ótimo, maior esforço de compactação pouco ou nada provoca de aumento de densidade, pois não consegue expelir o ar dos vazios. O autor ainda faz uma analogia ao que ocorre no campo, onde uma insistência da passagem de equipamentos compactadores em solo com teor de umidade no ramo úmido faz com que ocorra o fenômeno chamado borrachudo, no qual o solo se comprime na passagem do equipamento para, logo a seguir, se dilatar, como se fosse uma borracha. O que se comprime são as bolhas de ar ocluso.

Figura 2.3 – Curvas de compactação de um solo com diferentes energias.



Fonte: PINTO 2006.

Segundo Lelis (2004), Proctor em 1933 deu início aos estudos de compactação de solos, ele denominou como Proctor Normal a energia padrão ($5,95 \text{ kg/cm}^2$) de compactação para obras de pavimentação, essa energia correspondia com os equipamentos de compactação disponíveis na época. Na década de 40, com o início da Segunda Guerra Mundial, houve a necessidade de se aprimorar os pavimentos aeroportuários, Proctor, então, aumentou a energia de compactação para o Proctor Modificado ($27,35 \text{ kg/cm}^2$). Posteriormente as empresas de pavimentação passaram a utilizar uma energia intermediária ($12,93 \text{ kg/cm}^2$) denominada Proctor Intermediário, com finalidade de atingir resistências também intermediárias, porém, mais econômicas que o Proctor Modificado.

A energia de compactação é calculada por:

$$E_c = \frac{M \cdot H \cdot N_g \cdot N_c}{V} \quad (\text{Eq. 2.2})$$

sendo:

E_c = energia de compactação (kgf/cm²);

M = massa do soquete (kgf);

H = altura de queda do soquete (cm);

N_g = número de golpes por camada;

N_c = número de camadas; e

V = Volume do cilindro (cm³).

Existem diferentes cilindros e soquetes padronizados para o ensaio de compactação, no entanto, segundo Stancati, Nogueira e Vilar (1981), o cilindro ($V = 1000 \text{ cm}^3$) e soquete ($M = 2,5 \text{ kg}$ e $H = 30,5 \text{ cm}$) pequenos, geralmente são utilizados para energia do Proctor Normal. Enquanto, o cilindro ($V = 2085 \text{ cm}^3$) e soquete ($M = 4,5 \text{ kg}$ e $H = 45,7 \text{ cm}$) grandes são mais utilizados para compactar material grosso e para o ensaio CBR. Na Tabela 2.1 são indicadas as possíveis combinações de equipamentos e energias.

Tabela 2.1 – Energias de compactação normatizadas.

Cilindro	Características inerentes a cada energia de compactação	Energia		
		Normal	Intermediária	Modificada
Pequeno	Soquete	Pequeno	Grande	Grande
	Número de Camadas	3	3	5
	Número de golpes por camada	26	21	27
Grande	Soquete	Grande	Grande	Grande
	Número de Camadas	5	5	5
	Número de golpes por camada	12	26	55
	Altura do disco espaçador (mm)	63,5	63,5	63,5

Fonte: ABNT NBR 7182:1986.

2.2.2 Compactação no campo

No campo, os equipamentos que realizam a compactação são denominados de rolos compactadores. Tais equipamentos se diferenciam pelo tipo de cilindro que aplica o esforço de compactação no solo, como ilustrado pela Figura 2.4. Os fatores que influenciam a compactação no campo são: o teor de umidade, a espessura da camada compactada, o número

de passadas do cilindro, sua velocidade durante a compactação e as características do próprio equipamento, como pressão, área de contato e vibração.

Figura 2.4 – Equipamentos de compactação: (a) rolo pé-de-carneiro; (b) rolo chapa ou rolo liso; (c) rolo pneumático.



(a)

(b)



(c)

Fonte: autor (2016).

Segundo Pinto (2006), os equipamentos de compactação devem ser escolhidos de acordo com o tipo de solo. Rolos pé-de-carneiro são adequados para solos argilosos, por penetrar na camada nas primeiras passadas, atingindo a parte inferior da camada e evitando que uma placa superficial se forme e reduza a ação do equipamento em profundidade. Rolos lisos e pneumáticos são eficientes para uma grande variedade de solos, devendo ter o seu peso e a pressão dos pneus adaptada em cada caso. Rolos vibratórios são especialmente aplicados para solos granulares por permitir uma acomodação melhor entre os grãos de solo que não tem coesão.

Na execução da compactação, os equipamentos realizam um certo número de passadas até que se atinja a massa específica desejada na umidade de projeto. Não há métodos empíricos para determinar o número de passadas exato de cada equipamento para se atingir a compactação desejada no campo. Algumas referências podem ser encontradas na literatura, a exemplo de Vargas (1977), que relata que o esforço de compactação corresponde a um rolo compressor do tipo pé de carneiro normal de 3 a 5 toneladas de peso total, passando cerca de 10 a 15 vezes sobre a camada de solo com cerca de 20 cm de espessura, corresponde à energia Proctor Normal. Na prática, faz-se um levantamento com diferentes números de passadas com os equipamentos disponíveis na obra e então verifica-se o resultado de compactação até que se determina um número suficiente de passadas com dado equipamento. Esta verificação de resultado se dá pelo controle de compactação.

2.2.3 Controle de compactação no campo

Dos métodos usuais de se conferir a compactação no campo, destaca-se o método do frasco de areia (DNER ME 092/94) e método do cilindro biselado (ABNT NBR 9813:2016): o método do frasco de areia é bastante simples de ser realizado. O procedimento do ensaio é: abrir um furo de 30 cm de profundidade e 12 cm de diâmetro no solo utilizando uma talhadeira de aço e um prato com um furo no centro; com um frasco – de 3,50 litros de capacidade e com 6.000 g de areia padrão – dotado de um funil com válvula, deixa-se a areia escoar livremente até preencher o furo. A partir da diferença entre a massa do frasco cheio e depois de preencher o furo obtém-se a massa de areia do furo mais funil, corrige-se a massa subtraindo a massa de areia dentro do funil, cujo valor é conhecido, que resulta na massa de areia do furo; e, conhecida a sua massa específica, tem-se o volume de areia equivalente ao volume do furo. Pesando-se a massa de solo retirada do furo dividindo-se pelo volume resulta na massa específica aparente do solo úmido. A partir do solo retirado do furo realiza-se o ensaio de teor de umidade pelo método da frigideira, aquecendo a amostra com um fogareiro até a constância de massa, através da equação 2.3, tem-se o teor de umidade do furo. Multiplica-se a massa específica aparente do solo pelo fator $\frac{100}{100+h}$, onde, h é o teor de umidade do solo removido, resulta, finalmente, na massa específica aparente seca obtida *in situ*.

$$w = \frac{M - M_s}{M_s} \times 100\% \quad (\text{Eq. 2.3})$$

sendo:

w = Teor de umidade (%);

M = Massa de solo úmida (g); e

M_s = Massa de solo seca (g).

Já o método do cilindro biselado consiste em cravar um cilindro padrão pela queda livre de um soquete de cravação até que a borda superior do cilindro penetre em até 1 cm da superfície do terreno. Retira-se o equipamento com auxílio de picareta escavando o terreno circunvizinho ao cilindro e abaixo dele a uma profundidade de no mínimo 5 cm. Após retirado deve-se rasar ambas as faces do corpo de prova com auxílio de espátula. O solo dentro do cilindro deve estar intacto e representativo (ou seja, não fissurado; sem a presença de pedregulhos, raízes ou corpos estranhos; e/ou parcialmente vazio), caso contrário deve-se repetir o ensaio. Logo em seguida, para que não haja perda de umidade, mensura-se a massa do cilindro com corpo de prova e depois a sua umidade. O valor da massa específica é calculado pela razão entre a massa de solo úmida pelo volume do cilindro, a massa específica seca *in situ* é obtida multiplicando esse valor pelo fator $\frac{100}{100+h}$, onde, h é o teor de umidade do corpo de prova.

Além do método da frigideira para cálculo do teor de umidade há, também, o método *speedy*. Este método consiste em misturar o solo úmido com carbureto de cálcio dentro de um frasco confinado, desse modo, o contato entre o carbureto de cálcio e a água presente no solo formam o gás acetileno que expande aumentando a pressão interna do frasco. A pressão é obtida pela leitura de um manômetro e sua calibração fornece o teor de umidade do solo.

Os métodos apresentados têm por finalidade a obtenção dos valores do teor de umidade e massa específica seca após a compactação no campo. Com estes dados, é possível compará-los com os ensaios de compactação realizados em laboratório e, então, conferir se a compactação *in situ* está de acordo ou não com o esperado.

Desse modo, os ensaios em campo são realizados sempre após o término da compactação de cada camada. E, então, calcula-se o Grau de Compactação (GC) e Desvio de umidade (Δw) conforme as equações 2.4 e 2.5.

$$GC = \frac{\rho_d \text{ in situ}}{\rho_{dm\acute{a}x} \text{ laborat\acute{o}rio}} \times 100\% \quad (\text{Eq. 2.4})$$

$$\Delta w = w - w_{\acute{o}t} \quad (\text{Eq. 2.5})$$

No campo, o GC deve ser sempre igual a 100%, ou seja, $\rho_d \text{ in situ}$ (massa específica seca calculada no campo) deve ser sempre igual a $\rho_{dm\acute{a}x} \text{ laborat\acute{o}rio}$ (massa específica seca máxima calculada em laboratório). Enquanto que, a umidade calculada em campo (w) e a umidade ótima encontrada em laboratório ($w_{\acute{o}t}$) não podem variar em mais de 2%, ou seja, $\Delta w = \pm 2\%$.

2.3 Índice de suporte Califórnia

A compactação é realizada com fins de melhoria do solo, incluindo a resistência. Um dos métodos de quantificação da resistência é a medida da capacidade de suporte do solo à penetração. Este método tem sido aprimorado ao longo do tempo e atualmente consiste na determinação do índice de suporte Califórnia, o CBR.

Antes do desenvolvimento do processo de CBR, Vargas (1977), reporta a utilização da Agulha de Proctor para medir a resistência de um solo compactado. O processo consiste em aplicar um esforço pelas mãos sobre uma haste provida de dinamômetro, o qual pinçava uma agulha no solo compactado e o dinamômetro fornecia o valor de um índice de resistência do solo. O autor mostra que o ensaio Agulha de Proctor entrou em desuso, pois a pequena ponta da agulha mede resistência em área muito restrita e essas medidas poderiam ser influenciadas por torrões duros ou pedras próximos da superfície do aterro.

O Índice de Suporte Califórnia também consiste em um ensaio de penetração, no qual um pistão com aproximadamente 5 cm de diâmetro penetra em um corpo de prova de solo compactado. Isto é feito por um macaco hidráulico reagindo contra o cilindro metálico de compactação, enquanto, um manômetro informa a pressão aplicada e um deflectômetro mede as deformações. O índice é obtido através do gráfico pressão *versus* deformação.

Baptista (1980) menciona que o ensaio CBR é um método empírico, porém fundamentado em inúmeras experiências, tanto no campo como em laboratório, que comprovam sua eficiência.

Com isso, o uso do método encontra-se bastante difundido na engenharia de pavimentação em todo o mundo. No entanto, o CBR é um índice de resistência à penetração que não condiz com os esforços reais atuantes nas estruturas de pavimentos. Tais estruturas são solicitadas por cargas cíclicas oriundas do tráfego e de esforços variáveis advindas do clima. Portanto, o método teórico é mais representativo para o dimensionamento da estrutura de pavimentos, baseando-se no Módulo de Resiliência (MR). O MR é obtido com a aplicação de solicitações cíclicas em um corpo de prova, medindo-se as deformações recuperáveis (ou resilientes) e as deformações permanentes. Deste modo, é possível prever os efeitos de trincas de fadigas e estimar melhor a vida útil das camadas dos pavimentos.

Além da falta de embasamento teórico, o CBR foi desenvolvido em região de clima temperado, e como descrito por Mello (2005), solos tropicais possuem características bem diferentes dos solos de regiões de clima temperado. Estas características se diferenciam nos aspectos físico-químicos devido a diferença de temperatura e pluviosidade dos diferentes climas. Por exemplo, solos tropicais são mais sensíveis aos processos de laterização e lixiviação em compactação com os solos de climas temperados.

2.3.1 Ensaio de CBR em laboratório

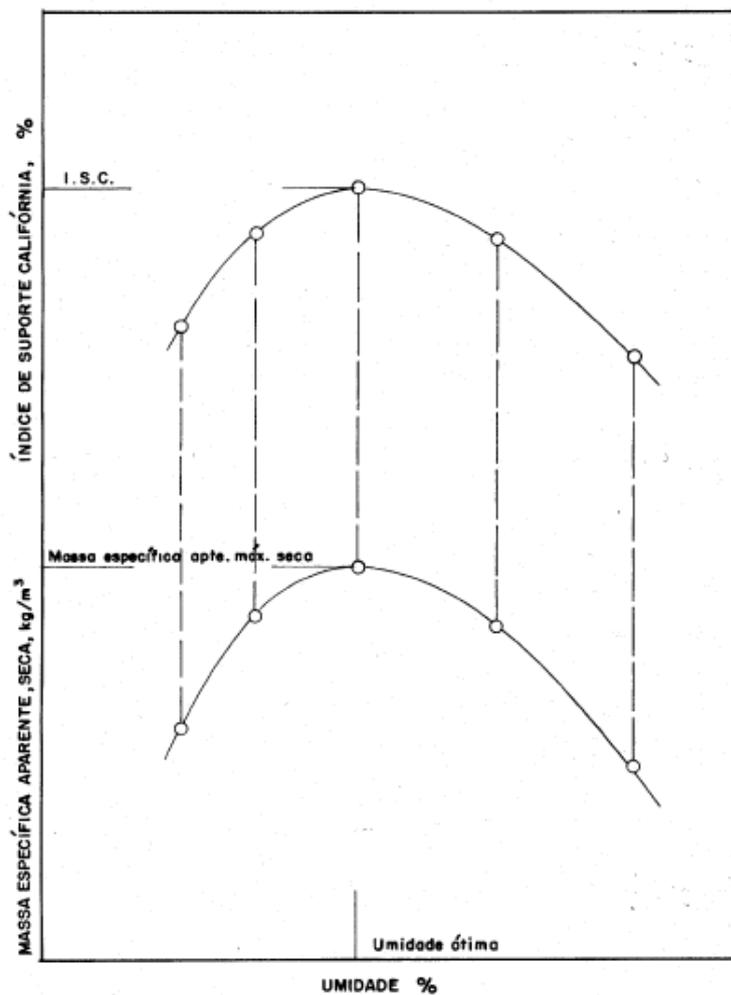
Para obras rodoviárias, logo após o ensaio de compactação, realiza-se o ensaio do CBR. A finalidade do ensaio é a de fornecer subsídios para o projeto de pavimentos, determinando as características de suporte para os materiais de subleito e também das demais camadas do pavimento até a base (STANCATI; NOGUEIRA; VILAR, 1981). Existem duas maneiras de se obter o valor de CBR para a condição ótima da compactação:

- (a) Obtida a curva de compactação e, conseqüentemente, os valores de massa específica seca máxima e umidade ótima, molda-se um novo corpo de prova com teor de umidade pré-fixado (em torno do teor de umidade ótimo do solo).
- (b) Realiza-se a penetração do ensaio CBR para cada corpo de prova moldado no ensaio de compactação, neste caso, obtém-se valores de CBR e compactação simultaneamente e obtém-se o CBR de cada corpo de prova. O valor do CBR final é dado através da extrapolação gráfica, ou seja, com o valor da umidade ótima da

curva de compactação, levanta-se uma ordenada até encontrar a curva CBR, como se observa na Figura 2.5.

Na execução do ensaio, antes de se realizar a penetração do pistão de CBR nos corpos de prova, os mesmos são imersos em tanque d'água por quatro dias. Esse processo garante que o solo esteja saturado e o índice de CBR representará a pior condição física do pavimento, passivo de sofrer adensamento (expulsão de água dos vazios) e com baixa resistência. Constitui rotina realizar a imersão dos corpos de prova e anotar as medidas de expansão que se verificam, com o intuito de simular a ação de chuvas intensas sobre as diversas camadas constituintes do pavimento (STANCATI; NOGUEIRA; VILAR, 1981).

Figura 2.5 – Curvas de CBR e compactação.



Fonte: DNER-ME 049/94

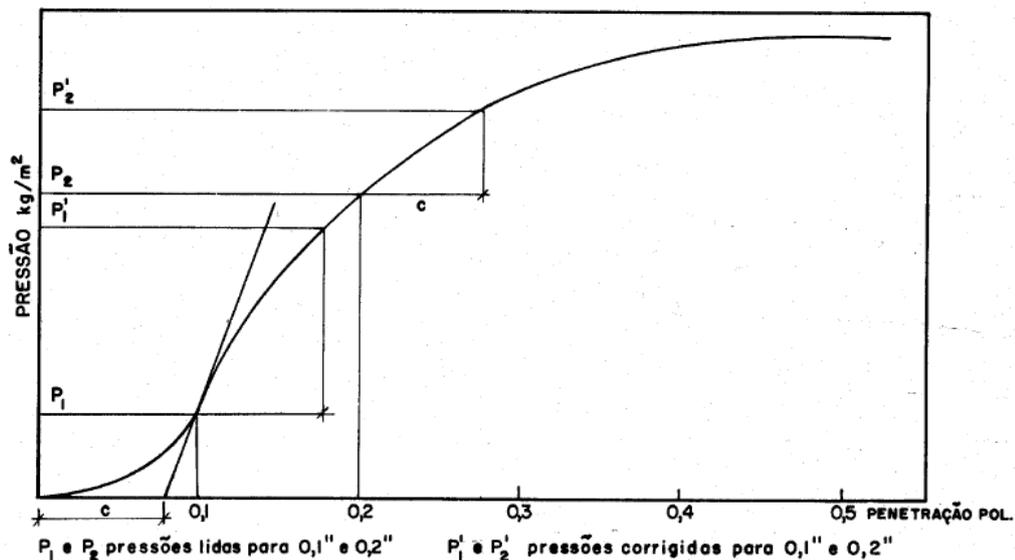
Na etapa de penetração do pistão, traça-se a curva pressão *versus* deformação com os dados obtidos, conforme a Figura 2.6, e o índice CBR é calculado para as pressões P'_1 e P'_2 em relação a pressões padrões obtidos para as penetrações de 0,1" e 0,2".

O procedimento de ensaio e de cálculo será descrito com mais detalhes na seção destinada à metodologia deste trabalho.

2.3.2 Ensaio de CBR no campo

O ensaio de CBR possui muitas complicações para sua aplicação no campo, seja pelo equipamento de alto custo e sensível calibragem, seja pelo tempo de quatro dias em imersão após a compactação do corpo de prova. No entanto, há muitos estudos de parâmetros como, por exemplo, o *Dynamic Cone Penetrometer* (DCP) de fácil aplicação *in situ* e possível de se correlacionar com o parâmetro CBR.

Figura 2.6 – Curva pressão *versus* penetração.



Fonte: DNER-ME 049/94.

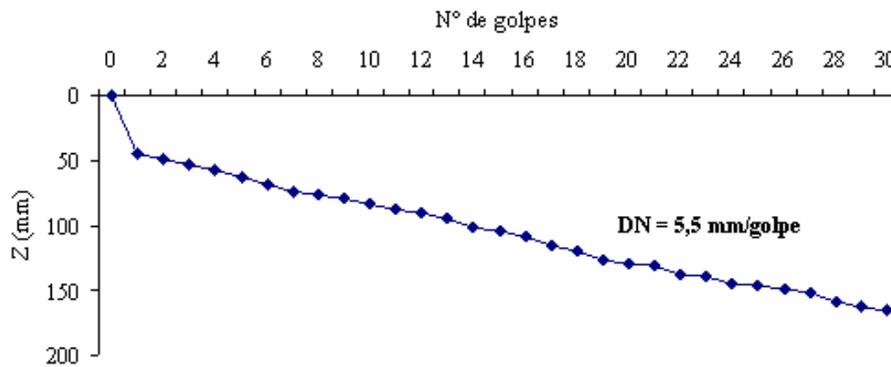
O ensaio DCP, cuja execução é mostrada na Figura 2.7, se dá pela aplicação de sucessivos golpes em uma haste. Com auxílio de uma régua, a posição da haste é anotada para cada novo golpe, resultando na elaboração do gráfico posição da haste *versus* número de golpes, que se observa na Figura 2.8. O resultado do ensaio é obtido pela inclinação do trecho reto pelo valor DN expresso em mm/golpe.

Figura 2.7 – Execução do ensaio DCP.



Fonte: PRON'GILA (2017).

Figura 2.8 – Resultado típico do ensaio DCP.



Fonte: Sachet e Gonçalves (2008).

Segundo Sachet e Gonçalves (2008), as correlações entre DCP e CBR têm a seguinte forma:

$$\log(CBR) = a + b \times \log(DCP) \quad (Eq. 2.6)$$

sendo:

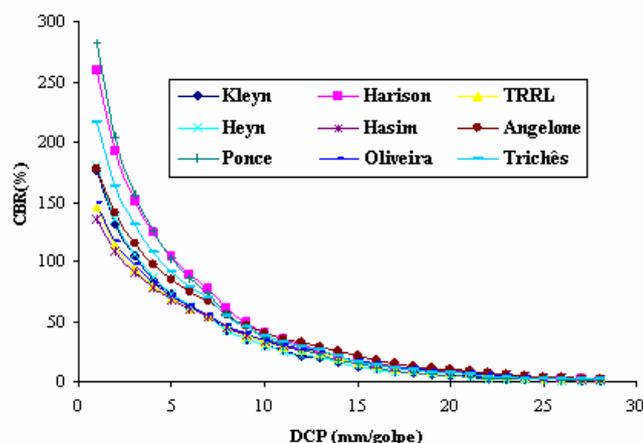
DCP = resistência à penetração (mm/golpe);

a = constante com valores entre 2,44 e 2,60; e

b = constante com valores entre -1,07 e -1,16.

Valores de CBR obtidos através da aplicação de DCP em mm/golpe foram correlacionados por diversos autores e estão representados na Figura 2.9 e na Tabela 2.2.

Figura 2.9 – Valores de CBR estimados pelo parâmetro DCP.



Fonte: Sachet e Gonçalves (2008).

Tabela 2.2 – Correlações entre DCP e CBR.

Autor	País	Equação (Log CBR =)
Kelyn	África do Sul	$2,631 - 1,280 \times \log DCP$
Harison	Austrália	$2,810 - 1,320 \times \log DCP$
TRRL	Inglaterra	$2,480 - 1,060 \times \log DCP$
Heyn	Brasil	$2,647 - 1,300 \times \log DCP$
Hasin	Malásia	$2,430 - 0,990 \times \log DCP$
Angelone	Argentina	$2,563 - 1,050 \times \log DCP$
Ponce	Chile	$2,890 - 1,460 \times \log DCP$
Oliveira	Brasil	$2,490 - 1,057 \times \log DCP$
Trichês	Brasil	$2,710 - 1,250 \times \log DCP$

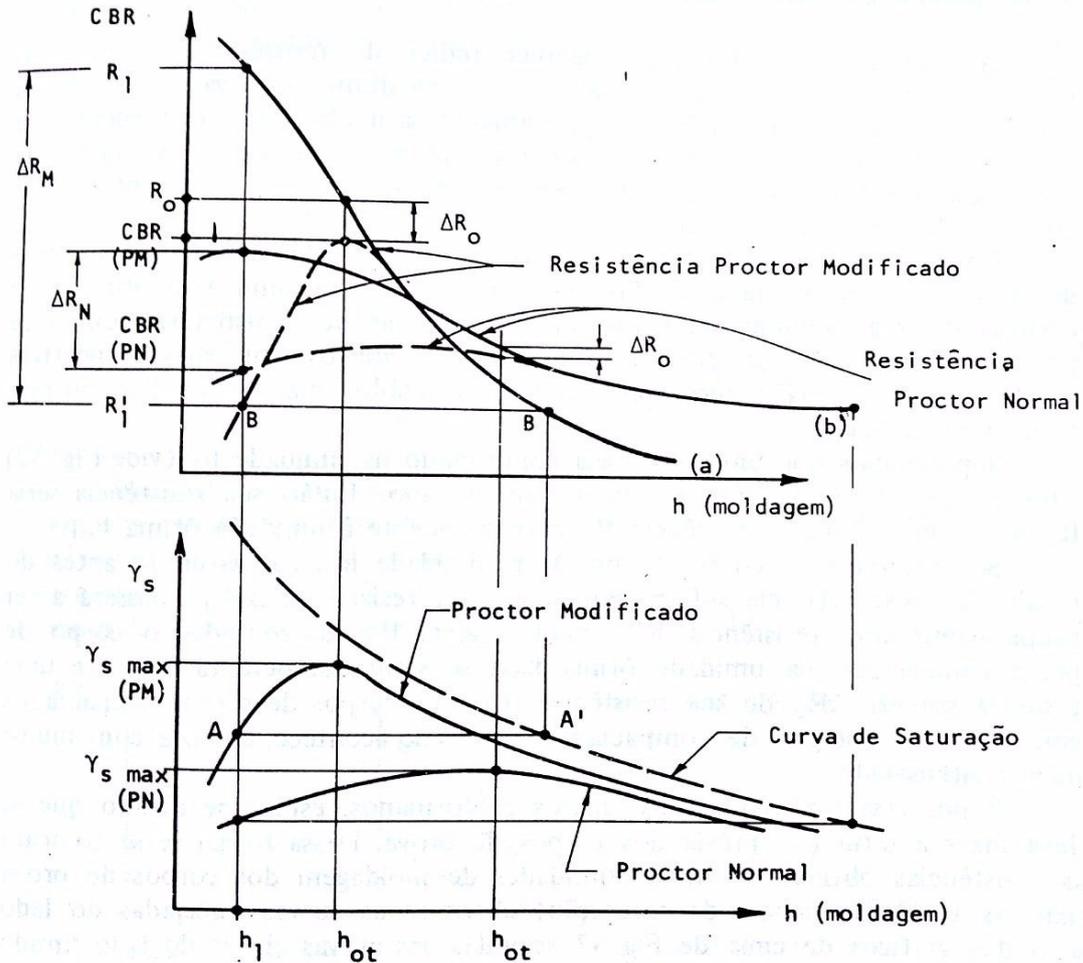
Fonte: Lima⁵ (2000 apud Sachet e Gonçalves, 2008).

2.4 Relação entre características de compactação e CBR

Vargas (1977) afirma que é possível comprovar experimentalmente que qualquer índice de resistência de um dado solo decresce com o gradativo aumento de umidade, desde que o solo não esteja previamente saturado. Esta relação entre resistência e umidade é tipicamente ilustrada na Figura 2.10, na qual também se observa que quanto maior a energia de compactação maiores são os valores de resistência de um solo.

⁵ LIMA, L.C. **Ensaio DCP Aplicado no Controle de qualidade de Compactação de Obras Viárias Executadas com Solos Lateríticos de Textura Fina**. Dissertação de mestrado, 164 p. – Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos – SP, 2000.

Figura 2.10 – Variação da resistência dos solos compactados.



Fonte: Vargas (1977).

Além disso, as umidades ótimas não correspondem a nenhum valor máximo ou singular das resistências, embora, sempre se adote tais umidades para compactação de aterros. Em vista disso, com o auxílio da Figura 2.10, Vargas (1977, p. 70) explica:

Suponhamos que um aterro seja compactado na umidade h_1 com energia correspondente ao Proctor modificado. Então sua resistência seria R_1 muito maior que a resistência R_0 correspondente à umidade ótima h_{ot} .

Se, entretanto, o corpo de prova na umidade h_1 , for saturado antes do ensaio de resistência, ele sofrerá uma queda de resistência ΔR_M e passará a ter simplesmente uma resistência R'_1 , muito baixa. Por outro lado, o corpo de prova compactado na umidade ótima h_{ot} , se saturado, perderá somente a pequena parcela ΔR_0 de sua resistência. Para os corpos de prova compactados com pequenas energias de compactação, o mesmo acontece, embora com muito menos intensidade.

Tem-se com isso que o solo compactado na umidade ótima não possui a resistência máxima, mas uma resistência que seja elevada e considerada estável, isto é, que não varia muito em face à saturação. E é para se avaliar a máxima resistência estável que a penetração do ensaio CBR é realizado após quatro dias de imersão em água dos corpos de prova compactados, garantindo-se assim, que os corpos de prova estejam saturados.

Essa teoria nos remete à compactação no campo e à ilusão de um terreno bem compactado e resistente durante toda a vida útil da obra quando compactado no ramo seco. Se pensarmos em um solo com baixa umidade sendo compactado por um equipamento muito pesado, a massa específica aparente seca obtida pode ser alta como uma compactação no Proctor Modificado. Contudo, enquanto o solo permanecer com baixa umidade sua resistência será alta, no entanto, assim que o aterro se saturar sua resistência será bastante comprometida.

Pode-se concluir que, no campo, não se basta apenas estar atento à massa específica seca ou ao grau de saturação do solo e, tão somente medir a resistência alcançada após a compactação. Para um bom resultado a longo prazo, é necessário especificar o grau de compactação, a umidade do solo a ser compactado e o equipamento a ser utilizado (energia de compactação), de modo que a resistência seja estável e independente das estações climáticas.

2.5 Classificação de solos tropicais

Dentre os vários sistemas de classificação de solos pode-se destacar a classificação tradicional para fins rodoviários *Transportation Research Board* (TRB), que leva em consideração a granulometria e os limites de consistência. Contudo, este sistema foi desenvolvido com base em solos de climas temperados e, para solos tropicais, apresenta limitações quanto a previsão de suas propriedades, uma vez que o comportamento em campo não corresponde ao pressuposto pelos mesmos. Essas limitações ocorrem, principalmente, devido às diferenças existentes entre a natureza da fração argila e de areia de solos de regiões temperadas e de regiões tropicais (NOGAMI; VILLIBOR, 1995⁶ apud REZENDE; LEANDRO, 2010).

⁶ NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos**. São Paulo: Editora Villibor. 213p. 1995.

Desta forma, Nogami e Villibor propuseram o método Miniatura, Compactado, Tropical (MCT) na década de 70. Essa metodologia foi desenvolvida especialmente para o estudo de solos tropicais e baseada em propriedades mecânicas e hídricas obtidas de corpos de prova compactados de dimensões reduzidas. Essa classificação não utiliza a granulometria, o limite de liquidez e o índice de plasticidade, como acontece no caso das classificações geotécnicas tradicionais, e separa os solos tropicais em duas grandes classes: lateríticos e não lateríticos (saprolíticos).

Ignatius (1991) propôs um método mais prático para a classificação dos solos quanto ao comportamento laterítico e não laterítico, com base na inclinação da reta do ramo seco das curvas de compactação das amostras definida pelo Índice de Laterização (L). Definindo os intervalos do parâmetro como: $L < 20$ para solos não tropicais; $20 \leq L < 30$ para solos não lateríticos, ou solos saprolíticos; e $L \geq 30$ para solos de comportamento laterítico.

2.6 Energias alternativas

Tendo em vista a crescente escassez de ocorrências de materiais para execução das camadas de pavimentos rodoviários, torna-se bastante oportuno a elaboração de novos estudos que busquem alternativas que venham suprir de forma eficiente e, ao mesmo tempo, econômica e ambientalmente viável (ZICA, 2010).

Segundo Souza Junior⁷ (2005 apud ZICA, 2010), desde 1991 é aplicada nas obras rodoviárias do Ceará uma energia de compactação diferente das energias estabelecidas pelas do DNER, denominada de Proctor Intermodificado. Essa energia é obtida através da aplicação de 39 golpes por camada, compactadas no cilindro grande. Essa prática é aplicada em camadas de base de pavimentos, em razão da dificuldade de se conseguir materiais que satisfaçam as condições geotécnicas exigidas pelo DNER, quando compactadas na energia intermediária, bem como pelo fator econômico associado à execução das obras. Ainda segundo Zica (2010), em 1994 o Departamento de Edificações, Rodovias e Transportes do estado do Ceará (DERT-CE) regulamentou a energia Proctor Intermodificado nas suas especificações gerais para serviços e obras rodoviárias.

⁷ SOUZA JUNIOR, J.D. **O Efeito da Energia de Compactação em Propriedades dos Solos Utilizados na Pavimentação do Estado do Ceará**. Tese de mestrado. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE, 2005. 211p.

O DEER-MG sempre adotou para a compactação do subleito, sub-base e base, as energias preconizadas pelo DNIT. Em 2006, o DEER-MG lançou a recomendação técnica RT – 01.46 que recomenda estudos alternativos de energias de compactação (1,5 vezes a energia do Proctor Normal) para solos de pavimentos rodoviários. Isso com o objetivo de proporcionar maior suporte CBR para solos que não atendem as recomendações técnicas do DNER quando compactados com as energias convencionais. Mendes⁸ (1973, *apud* ZICA, 2010) apresentou no primeiro simpósio sobre pesquisas rodoviárias, promovido pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias, trechos estudados que utilizaram a energia do Proctor Internormal para alguns solos mineiros. Constatou-se que, os trechos de pavimentação, executados com esta energia, apresentaram um dimensionamento econômico, sem nenhum problema executivo. Cita, ainda, o exemplo do trecho de Lima Duarte, em Juiz de Fora, que apresentou um dimensionamento de pavimento para a energia do Proctor Normal onde obteve a espessura média de pavimento de 40 cm e para a energia Internormal, a espessura média encontrada foi de 34 cm. Houve, portanto, a redução de 15% na espessura média do pavimento.

3 MÉTODO

O estudo de energias de compactação alternativas para solos em estruturas de pavimentos, se deu a partir da comparação de resultados de ensaios de compactação em laboratório usando energias padronizadas e alternativas. A fim obter dados representativos para distintas classes de solos, optou-se por investigar duas amostras de material, sendo uma com maior porcentagem de finos e outra de granulometria mais grossa. Isso porque, como visto anteriormente, a variação da textura, coesão, mineralogia e plasticidade dos diversos tipos de solos influenciam no processo de compactação. Os ensaios realizados em laboratório com cada amostra foram:

- (a) Massa específica dos sólidos;
- (b) Análise granulométrica conjunta;
- (c) Limites de consistência (ou limites de Atterberg);

⁸ MENDES, J. B. C. **Estudo da Influência da Energia de Compactação nos Solos**. Publicação Técnica 8. Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de Minas Gerais - DER/MG, 1973. 83p.

- (d) Compactação do solo nas energias do Proctor Normal, Internormal, Intermediário e Intermodificado; e
- (e) Índice de suporte Califórnia para todas as energias do ensaio anterior.

Os três primeiros ensaios são a base para a caracterização e classificação dos solos, cujo objetivo é permitir estimativas do comportamento destes, ou, pelo menos, orientar o programa de investigação necessário para permitir a adequada análise de um problema (PINTO, 2006). Para a classificação, optou-se pelos sistemas: Classificação Unificada, por ser bastante empregada em obras de terra; a TRB, por ser o mais empregado na engenharia rodoviária; e o método do índice de laterização (IGNATIUS, 1991).

Após a identificação dos tipos de solos, pelos sistemas tradicionais de classificação, iniciaram-se os processos de compactação. Obtida as curvas de compactação calculou-se o índice de laterização das amostras e, então, realizou-se os ensaios de CBR. Os ensaios de compactação e CBR foram feitos conforme o método '(a)' apresentado no item 2.3.1, de modo que, para a compactação foi utilizado cilindro de compactação pequeno, e apenas uma determinação do CBR para o solo na condição de umidade ótima e massa específica aparente seca máxima, no cilindro de compactação grande.

Obtidos os valores de CBR das duas amostras, foi possível realizar alguns dimensionamentos rodoviários para baixo, médio e alto volume de tráfego, ao adotar, o número N igual a 1×10^6 , 1×10^7 e 1×10^8 , respectivamente. Os custos e benefícios das energias de compactação alternativas em análise foram então analisados.

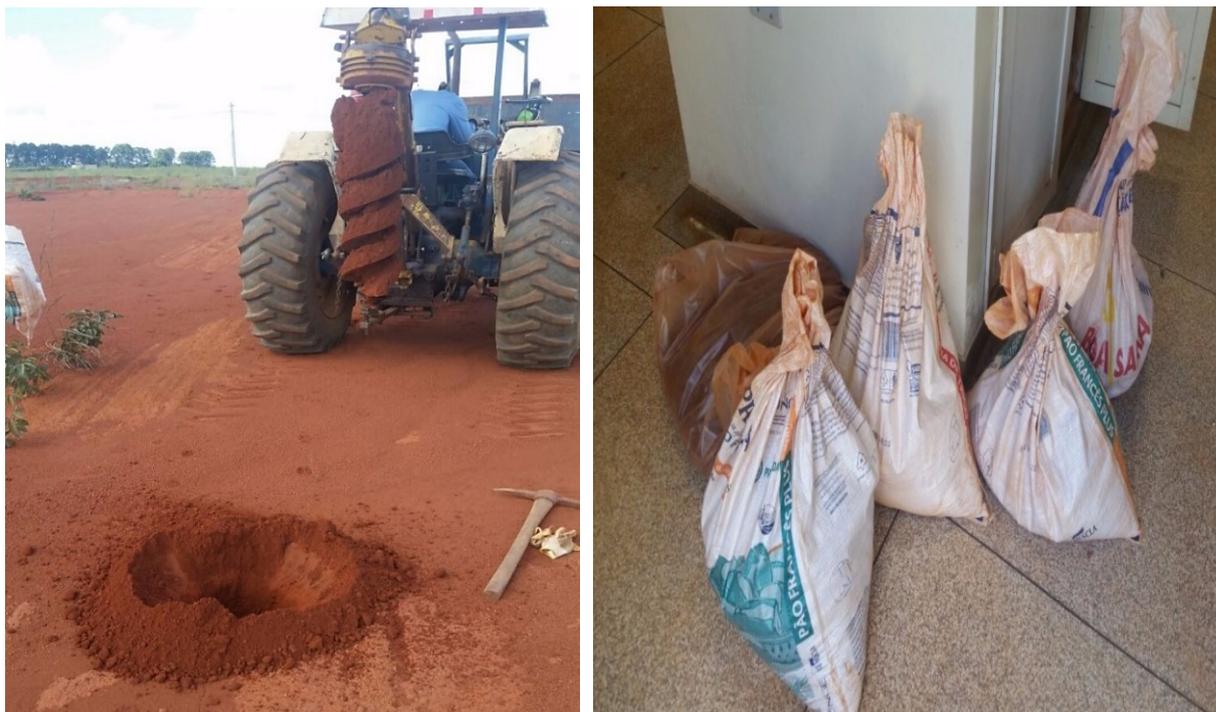
4 ENSAIOS EM LABORATÓRIO

4.1 Coleta dos materiais

As amostras foram coletadas no Campus Glória e na Fazenda Experimental Água Limpa da Universidade Federal de Uberlândia. Mapas com a localização dos pontos de coletas encontram-se no Apêndice A.

A amostra 1 (Campus Glória) foi coletada com auxílio de um trator agrícola, munido de um trado tipo rosca sem fim de 250 mm de diâmetro com capacidade de perfuração de até 1,50 m de profundidade (Figura 4.1). Foram coletados cerca de 100 kg de material argiloso deformado com umidade média de 32%. O solo apresentava-se bastante compacto e resistente durante extração pelo trator.

Figura 4.1 – Coleta da amostra 1 no Campus Glória.



Fonte: autor (2017).

A amostra 2 (Fazenda Exp. Água Limpa) foi coletada de 2,0 m de profundidade a partir da escavação de um poço artesiano de 4,0 metros de profundidade. Também foram coletados em torno de 100 kg de material com umidade média de 12,8%.

No laboratório, as amostras foram parcialmente secas ao ar e na sombra antes dos ensaios de caracterização, atingindo umidade de 11,34% e 6,77% (amostras 1 e 2, respectivamente). A preparação das amostras seguiu as orientações técnicas da ABNT NBR 6457:2016.

4.2 Massa específica dos grãos

Normatizado pela ABNT NBR 6508:1984, o ensaio consiste em determinar a massa específica dos sólidos passantes na peneira de abertura 4,8 mm através de pelo menos 2 ensaios.

Previamente foram tomados cerca de 100 g de solo argiloso e 120 g de solo arenoso para a utilização de picnômetro com capacidade de 1000 cm³, que foram imersas em água por um período mínimo de 12 horas. Após este período, o solo foi transferido para o copo de dispersão (Figura 4.2 a) e mantido em agitação por 15 minutos. Então, em um picnômetro previamente calibrado, aplica-se vácuo à uma pressão de, no mínimo, 660 mmHg durante 30 minutos conforme mostrado na Figura 4.2 (b).

Figura 4.2 – (a) Dispensor de solos e (b) Retirada do ar da amostra por vácuo.



Fonte: autor (2017).

Por fim, pesou-se o conjunto picnômetro-solo-água (M_2) e sua temperatura T foi verificada. A massa específica dos grãos foi calculada por:

$$\delta = \frac{M_1 \cdot 100 / (100 + h)}{[M_1 \cdot 100 / (100 + h)] + M_3 - M_2} \cdot \delta_T \quad (Eq. 4.1)$$

sendo

δ = Massa específica dos grãos do solo (g/cm³);

M_1 = Massa do solo úmido (g);

M_2 = Massa do conjunto picnômetro-solo-água, na temperatura T de ensaio (g);

M_3 = Massa do conjunto picnômetro-água, na temperatura T de ensaio (g);

h = umidade inicial da amostra (%); e

δ_T = Massa específica da água, na temperatura T de ensaio (g/cm³).

Os dados obtidos para ambas as amostras foram:

- Amostra 1 – $\delta = 2,385 \text{ g/cm}^3$; e
- Amostra 2 – $\delta = 2,450 \text{ g/cm}^3$.

Como relatado por Pinto (2006), o valor da massa específica dos grãos é um índice físico que não diz muito a respeito das características do solo, no entanto, é um valor importante para os cálculos de outros índices como a granulometria por sedimentação realizada neste estudo. Os valores situam-se em torno de $2,7 \text{ g/cm}^3$, valor geralmente adotado quando não se dispõe do valor específico para o solo em estudo. Grãos de quartzo (areia) costumam apresentar pesos específicos de $2,65 \text{ g/cm}^3$ e argilas lateríticas, em virtude da deposição de sais de ferro, valores até $3,0 \text{ g/cm}^3$

Com isso, nota-se que os valores encontrados para δ encontram-se um pouco abaixo do esperado. Uma explicação para isso pode ser a incapacidade das bombas usadas em atingir a pressão normatizada de vácuo, de 660 mmHg. Valores inferiores a essa pressão não retiraram todo o ar incorporado na amostra, provocando uma diminuição da massa específica dos grãos obtida.

Considerando então a necessidade de usar valores condizentes de δ para cálculos de ensaios subsequentes, adotou-se um valor de $2,700 \text{ g/cm}^3$ para ambas as amostras de solo.

4.3 Granulometria

A ABNT NBR 7181:1984, prescreve a análise granulométrica conjunta, ou seja, por peneiramento e sedimentação. O primeiro é dividido em peneiramento grosso e fino, separados apenas pelas aberturas das peneiras (50 mm a 2,0 mm para o grosso e 1,2 mm a 0,075 mm para o fino). Enquanto que, a segunda análise determina a granulometria do solo para diâmetros menores que 0,075 mm.

O peneiramento grosso não foi aplicável para ambos os solos estudados, pois todo o material foi passante na peneira com abertura de 2,0 mm.

No que diz respeito à pavimentação, a granulometria por sedimentação não é de suma importância, uma vez que, as recomendações técnicas para análises dos solos que compõe as

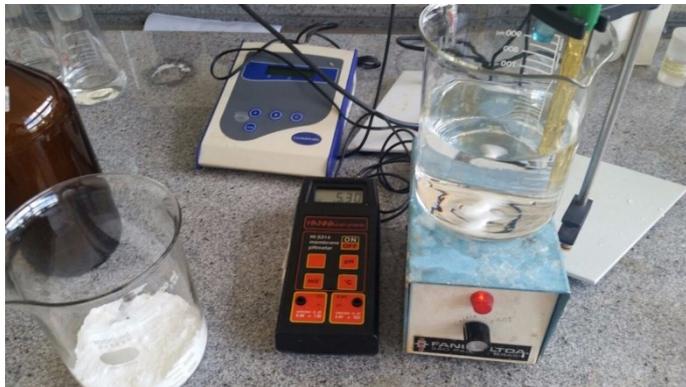
camadas do corpo de aterro e pavimento não levam em consideração o tipo de solo fino (argila ou silte), apenas a sua existência e seu percentual. No entanto, em vista de realizar um estudo mais detalhado, foi realizado o experimento devido à importância da influência da granulometria e plasticidade na compactação de solos.

4.3.1 Sedimentação

Para os ensaios de sedimentação e peneiramento fino, foram tomados 70 g e 120 g de material passante na peneira de 2,0 mm das amostras 1 e 2, respectivamente.

As amostras ficaram, no mínimo, 12 horas imersas em 125 ml de solução defloculante e então, foram agitadas por 15 minutos no dispersor de solos. A solução defloculante usada foi de hexametáfosfato de sódio, com concentração de 45,7 g/l a um pH entre 8 e 9, preparada conforme mostrado na Figura 4.3.

Figura 4.3 – Solução defloculante preparada por agitador magnético.



Fonte: autor (2017).

O solo então, foi transferido para uma proveta completada até 1000 cm³ com água destilada, e agitado para que as partículas ficassem em suspensão para o início do ensaio de sedimentação (Figura 4.4). Imediatamente após a agitação, tomou-se as leituras do densímetro calibrado aos 0,5, 1, 2 e 4 minutos. A partir de então, fez-se as leituras do densímetro juntamente com a temperatura da solução aos 8, 15 e 30 minutos, 1, 2, 4, 8 e 24 horas.

Figura 4.4 – Ensaio de sedimentação.



Fonte: autor (2017).

Os ensaios de sedimentação foram realizados de modo que o densímetro e o termômetro não permanecessem na suspensão além do tempo necessário para realização das leituras, assim evitando que as partículas de solo se depositassem sobre os medidores e afetassem as leituras com seus pesos.

Depois dos ensaios, foram calculados diâmetros equivalentes das partículas sedimentadas em cada tempo usando a Lei de Stokes, que determina a velocidade na qual partículas esféricas se depositam em uma suspensão:

$$D_i = \left[\frac{18\mu}{(\rho_s - \rho_w)g} \cdot \frac{z}{t} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Eq. 4.2})$$

sendo:

D_i = Diâmetro equivalente da partícula (m);

ρ_s = Massa específica das partículas menores que 2,0 mm (kg/m^3);

ρ_w = Massa específica da água para a temperatura registrada no tempo t (kg/m^3);

g = Aceleração da gravidade (m/s^2);

z = Distância entre o centro de volume do bulbo do densímetro e a superfície da suspensão (m); e

μ = Viscosidade dinâmica da água em função da temperatura T (Pa.s).

Por sua vez, a viscosidade dinâmica é dada por:

$$\mu = \frac{17,756 \times 10^{-4}}{1 + 0,0337T + 0,000221T^2} \quad (Eq. 4.3)$$

Para a construção da curva granulométrica, a porcentagem de partículas com diâmetro igual ou menor a D_i é dada pela equação 4.4:

$$P(\leq D_i) = \frac{1000}{M_S} \cdot \frac{\rho_S}{\rho_S - 1} \cdot (l - l_{sol}) \cdot 100\% \quad (Eq. 4.4)$$

sendo:

M_S = Massa de sólidos na suspensão (g);

ρ_S = Massa específica dos grãos (g/cm^3);

l = leitura de densidade da suspensão (g/cm^3); e

l_{sol} = leitura de densidade na água com defloculante à mesma temperatura T da suspensão (g/cm^3).

Os valores de z e l_{sol} são obtidos da calibração do densímetro. Para o ensaio das amostras 1 e 2, foi utilizado um densímetro cujas curvas de calibração correspondem as equações 4.5 e 4.6 a seguir:

$$z = -0,1983 \cdot l + 18,7492 \quad (Eq. 4.5)$$

$$l_{sol} = -2 \cdot 10^{-3}T^3 + 7,9 \cdot 10^{-3}T^2 - 0,1039T - 4,6746 \quad (Eq. 4.6)$$

A limitação do uso da Lei de Stokes se deve ao pressuposto de que as partículas de solo são perfeitamente esféricas, além disso, a lei não se aplica a grãos com diâmetros menores do que 0,0002 mm, pois sua deposição é influenciada pelo movimento browniano (movimento aleatório de partículas num fluido como consequência da colisão entre as moléculas ou átomos presentes no fluido).

As medidas e os resultados coletados nos ensaios de sedimentação para as amostras 1 e 2 encontram-se no Apêndice B.

4.3.2 Peneiramento fino

Após o término do ensaio de sedimentação, para cada proveta, o material foi vertido na peneira n° 200 (abertura de 0,075 mm) e lavado com água corrente a uma pequena vazão, até que todos os finos passassem na peneira. Com o material retido na peneira de abertura 0,075 mm, após seco em estufa com temperatura de 105°C a 110°C, realizou-se o peneiramento fino. Da amostra 1 restaram 62,84 g e da amostra 2, 112,40g.

O ensaio utilizou um conjunto de 6 peneiras dispostas umas sobre as outras com abertura decrescente de cima para baixo (1,2, 0,6, 0,42, 0,25, 0,15, 0,075 mm), agitadas por um agitador mecânico por 15 minutos. O material retido acumulado de cada peneira foi pesado e calculou-se a porcentagem retida e a porcentagem que passa:

$$P_r(\#_i) = \frac{M_S(\#_i)}{M_S} \cdot 100\% \quad (\text{Eq. 4.7})$$

$$P_p(\#_i) = 100\% - P_r(\#_i) \quad (\text{Eq. 4.8})$$

sendo:

$P_r(\#_i)$ = Porcentagem retida na peneira i (%);

$P_p(\#_i)$ = Porcentagem que passa na peneira i (%);

$M_S(\#_i)$ = Massa de sólidos retidos na peneira i (g); e

M_S = Massa de sólidos da amostra (g).

As medidas e os resultados coletados nos ensaios de peneiramento fino para as amostras 1 e 2 estão no Apêndice B.

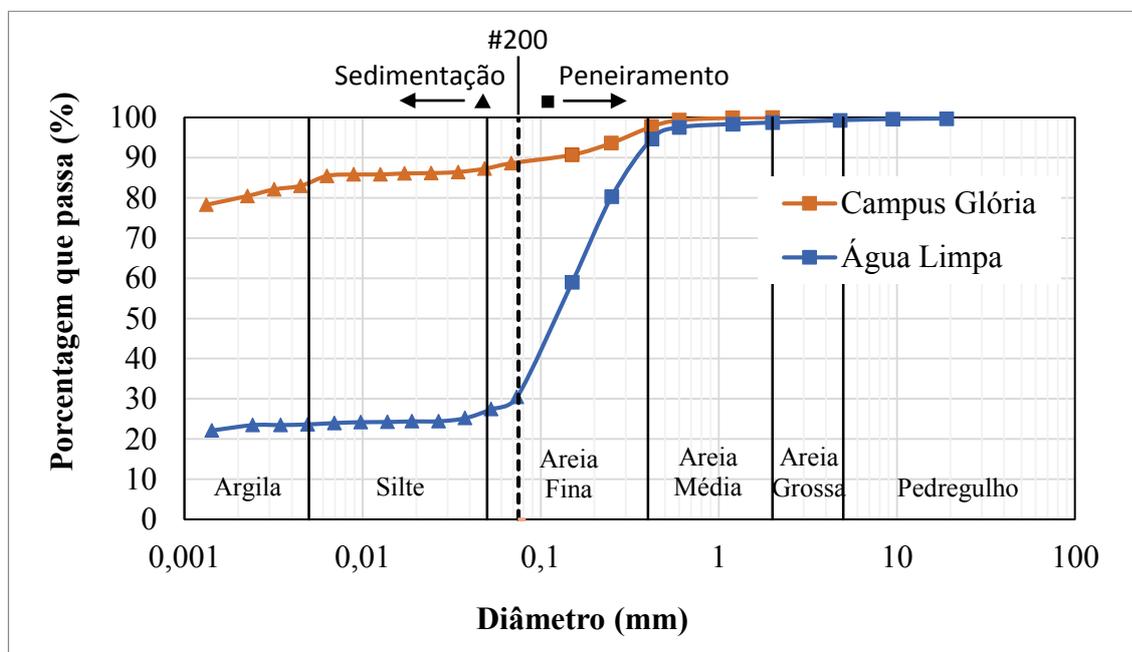
4.3.3 Peneiramento grosso

O peneiramento grosso é realizado para solos com algum material granular retido na peneira de abertura de 2 mm. Sendo assim, o ensaio foi necessário apenas para a amostra da Fazenda Experimental Água Limpa.

Conforme a ABNT NBR 6457:2016, foi tomada uma amostra de 4,0 kg para o ensaio. A amostra foi passada na peneira de 2 mm, lavada com água corrente de baixa vazão e seca em estufa. O material retido foi peneirado mecanicamente nas aberturas: 50, 38, 25, 19, 9,5, 4,8 e 2 mm. O ensaio é análogo ao peneiramento fino e os cálculos foram feitos também pelas Equações 4.7 e 4.8.

A granulometria de amostras de solo foi representada graficamente através de curvas de diâmetro das partículas versus a porcentagem que passa em cada peneira. Os gráficos são representados na Figura 4.5.

Figura 4.5 – Granulometria das amostras Campus Glória e Água Limpa.



Fonte: autor (2017).

4.4 Limites de consistência

Segundo Pinto (2006), as partículas de minerais argila diferem acentuadamente pela estrutura mineralógica, bem como pelos cátions adsorvidos. Desta forma, para a mesma porcentagem de fração argila, o solo pode ter comportamento muito diferente, dependendo das características dos minerais presentes. Vargas (1977) diz que, é possível encontrar siltes, argilas e solos argilosos de mesma curva granulométrica cujos comportamentos não sejam

semelhantes. Esse comportamento dos solos finos deve-se, além do tamanho, da própria forma de suas partículas e, portanto, da espécie de argilomineral.

Pedregulhos e areias possuem grãos arredondados e anguloso, mas sempre de formato esférico. Enquanto que, nas argilas as partículas apresentam uma estrutura cristalina complexa, possuem forma lamelar, escamosa, filiforme, entre outras.

Enquanto isso, quando envoltos por água, as partículas de argila permanecerão ligados entre si e à água por forças capilares, o que confere uma resistência típica denominada de coesão, e sua variação dependerá do teor de umidade do solo. Por outro lado, grãos de forma lamelares tendem a deslizar uns sobre os outros ao receberem um estímulo externo, o que se define a plasticidade de um solo como a propriedade do solo de sofrer deformação irreversível sem se romper ou se esfarelar.

O estudo dos minerais argila é muito complexo, o que levou a Engenharia a substituir esse estudo por uma análise indireta, baseada no comportamento do solo na presença de água. Generalizou-se o emprego de ensaios e índices propostos pelo engenheiro químico Atterberg, adaptados e padronizados pelo professor de Mecânica dos Solos, Arthur Casagrande (PINTO, 2006).

Os limites baseiam-se nos diferentes aspectos de um solo argiloso conforme a variação do seu teor de umidade. Quando muito úmido, ele se comporta como um líquido; ao perder parte de sua água, o solo fica plástico; e quando mais seco, torna-se quebradiço. O Índice de Plasticidade (IP) do solo é definido, assim, como a faixa de valores de umidade em que o solo se encontra plástico. Essa faixa é enquadrada entre os Limite de Plasticidade (LP) e Limite de Liquidez (LL), conforme equação 4.9.

$$IP = LL - LP \quad (Eq. 4.9)$$

Os limites de consistência expressam informações importantes relativos ao comportamento e permitem a classificação dos solos, por exemplo: sabe-se que quanto maior o LL de um solo, mais compressível ele é.

4.4.1 Limite de liquidez

O ensaio é normatizado pela ABNT NBR 6459:2016, e compreende em unir duas partes de solo divididas por uma ranhura central (feita por um cinzel) através de golpes na concha do aparelho Casagrande, como mostrado na Figura 4.6.

Figura 4.6 – Aparelho de Casagrande com amostra de solo e ranhura.

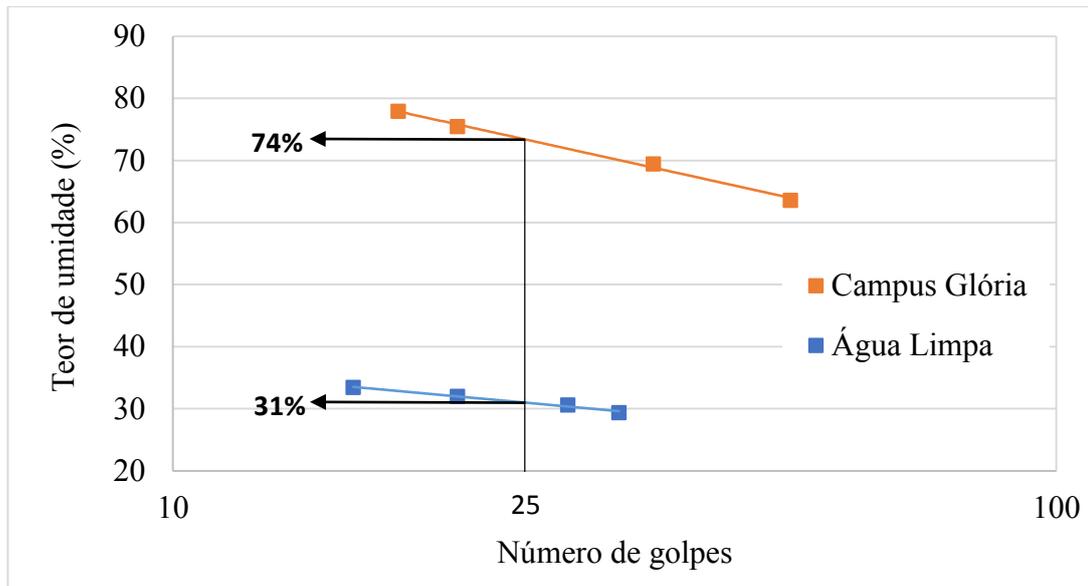


Fonte: autor (2017).

O solo foi homogeneizado em diferentes teores de umidade e anotaram-se a umidade e o número de golpes necessários para unir a ranhura ao longo de 1,3 cm. O critério de norma para o ensaio ser considerado satisfatório é a obtenção de no mínimo três determinações que se enquadram na faixa de número de golpes igual a 25 ± 10 , ou seja, entre 15 e 35 golpes.

Com os valores encontrados no experimento, construiu-se a curva do limite de liquidez dada por teor de umidade versus número de golpes. O limite de liquidez foi determinado como o teor de umidade correspondente a 25 golpes, como se vê na Figura 4.7.

Figura 4.7 – Limites de liquidez para amostras 1 e 2.



Fonte: autor (2017).

4.4.2 Limite de plasticidade

Normalizado pela ABNT NBR 7180:2016, o ensaio consiste em moldar um cilindro com 3 mm de diâmetro e 10 cm de comprimento (Figura 4.8). Durante o ensaio, o cilindro satisfatório é aquele que fissurar assim que o diâmetro atinja 3 mm. Caso as fissuras não ocorram, ou ocorram antes de atingir 3 mm de diâmetro, o material deve ser amassado novamente, a umidade corrigida (adicionando água ou solo seco) e, então, molda-se um novo cilindro.

Figura 4.8 – Ensaio de limite de plasticidade.



Fonte: autor (2017).

Para moldar o cilindro, formou-se uma pequena esfera (cerca de 10 g) de solo com certa umidade, que foram roladadas sobre uma placa de vidro com a pressão da palma da mão. Após

moldado, cada cilindro de 3 mm de diâmetro foi imediatamente transferido para uma cápsula e levado para estufa a 105-110°C para determinar sua umidade. O procedimento foi repetido três vezes e o limite de plasticidade foi calculado como a média entre os valores.

Os valores para limite de plasticidade estão representados nas Tabelas 4.1 e 4.2, respectivamente para as amostras 1 e 2.

Tabela 4.1 – Limite de plasticidade da amostra 1.

Limite de plasticidade						
Cápsula (n°)	173	194	206	118	276	197
Amostra + Tara + Água (g)	15,48	15,44	15,61	16,91	16,3	16,52
Amostra + Tara (g)	15,2	15,18	15,37	16,64	16,05	16,22
Água (g)	0,28	0,26	0,24	0,27	0,25	0,3
Tara (g)	14,5	14,56	14,78	16	15,47	15,55
Amostra seca (g)	0,7	0,62	0,59	0,64	0,58	0,67
Umidade (%)	40,0	41,9	40,7	42,2	43,1	44,8
Umidade média (%)	41		41		44	
Limite de plasticidade (%)	42					

Fonte: autor (2017).

Tabela 4.2 - Limite de plasticidade da amostra 2.

Cápsula (n°)	103	222	162	206	130	276
Amostra + Tara + Água (g)	11,52	16,59	14,61	15,57	16,2	16,27
Amostra + Tara (g)	11,4	16,48	14,45	15,42	16,06	16,13
Água (g)	0,12	0,11	0,16	0,15	0,14	0,14
Tara (g)	10,75	15,94	13,77	14,79	15,41	15,47
Amostra seca (g)	0,65	0,54	0,68	0,63	0,65	0,66
Umidade (%)	18,5	20,4	23,5	23,8	21,5	21,2
Umidade média (%)	19		24		21	
Limite de plasticidade (%)	21					

Fonte: autor (2017).

A padronização dos ensaios tem a importância de comparação entre os diversos solos existentes, e os valores encontrados foram próximos de alguns resultados típicos de solos brasileiros como os solos residuais de basalto e arenito conforme Tabela 4.3:

Tabela 4.3 – Limites de Atterberg e alguns solos brasileiros típicos.

Amostra	LL (%)	IP (%)
Argila do Campus Glória	74	32
Solo residual de basalto	45-70	20-30
Argilas orgânicas de várzeas quaternárias	70	30
Areia argilosa da Fazenda Água Limpa	31	10
Solo residual de arenito	29-44	11-20
Areias argilosas variegadas de São Paulo	20-40	5-15

Fonte: adaptado de PINTO (2006).

4.5 Classificação das amostras

As classificações de solos são importantes para agruparem solos com características ou comportamentos semelhantes. PINTO (2006) relata que o objetivo da classificação dos solos, sob o ponto de vista de engenharia, é poder estimar o provável comportamento do solo ou, pelo menos, orientar o programa de investigação necessário para permitir a adequada análise de um problema.

4.5.1 Classificação Unificada

Este sistema de classificação foi elaborado originalmente pelo Prof. Casagrande para obras de aeroportos, e seu emprego foi generalizado. Atualmente, é utilizado principalmente pelos geotécnicos que trabalham em barragens de terra (PINTO, 2006).

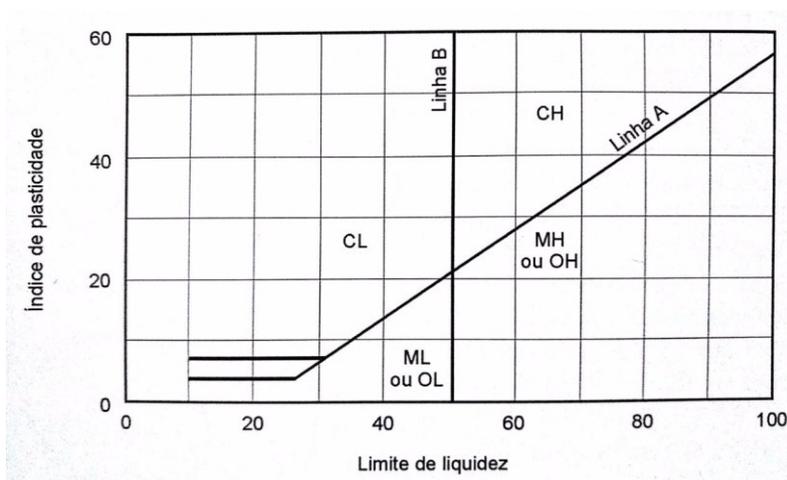
A classificação do Sistema Unificado leva em consideração duas letras. A primeira para uma característica principal e a segunda para uma característica secundária. Para a primeira letra tem-se: **G** (*gravel*, ou pedregulho); **S** (*sand*, ou areia); **M** (do sueco *Mo*, ou silte); **C** (*clay*, ou argila) e **O** (*organic*, ou orgânico). Enquanto que, para a segunda característica tem-se: **W** (*well graded*, ou bem graduado); **P** (*poor graded*, ou mal graduado); **H** (*high compressibility*, ou alta compressibilidade) **L** (*low compressibility*, ou baixa compressibilidade) e **Pt** (*peat*, ou turfa).

O que separa as letras **G** e **S** das letras **M**, **C** e **O** é a porcentagem que passa na peneira de abertura 0,075 mm – separa a granulometria grosseira da fina. E para a classificação unificada porcentagens maiores que 50% definirão a primeira característica. Quanto a segunda letra, **W** e **P** são utilizados para solos onde a quantidade de finos são menores que 12%. Sua

determinação se dá através do gráfico granulométrico pelos coeficientes de não uniformidade e de curvatura, definidos por expressões matemáticas.

Quando a porcentagem de finos é maior que 12% a graduação da curva granulométrica deixa de ser a característica secundária principal e passa a ser a compressibilidade dos finos, pelas letras **H** e **L** (para solos finos); **M**, **C** e **O** (para solos grossos). A compressibilidade é obtida pela carta de plasticidade (Figura 4.9) que leva em consideração o limite de liquidez e índice de plasticidade do solo.

Figura 4.9 – Carta de plasticidade.



Fonte: Pinto (2006).

A classificação unificada dos solos em estudo foi feita com auxílio do esquema da Figura 4.10, e resultou em:

- Amostra 1 – **MH**; e
- Amostra 2 – **SC**.

4.5.3 Sistema de classificação TRB

Adotada pela AASHTO, o sistema de classificação TRB fundamenta-se na granulometria, limites de Atterberg e o parâmetro Índice de Grupo (IG). O IG se refere à capacidade de suporte do subleito de um pavimento, sendo $IG = 0$ para solos excelentes e $IG = 20$ para solos péssimos. O índice é calculado conforme a equação 4.10:

$$IG = 0,2. a + 0,005. a. c + 0,01. b. d \quad (Eq. 4.10)$$

Sendo

$$a = Pp_{200} - 35\% \quad (Eq. 4.10')$$

$$b = Pp_{200} - 15\% \quad (Eq. 4.10'')$$

$$c = LL - 40\% \quad (Eq. 4.10''')$$

$$d = IP - 10\% \quad (Eq. 4.10''')$$

IG = Número inteiro entre 0 e 20;

a = Número inteiro entre 0 e 40;

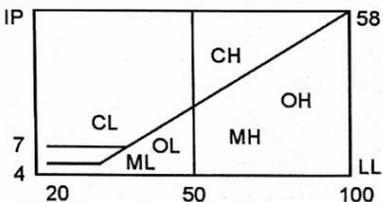
b = Número inteiro entre 0 e 40;

c = Número inteiro entre 0 e 20;

d = Número inteiro entre 0 e 20.

Os IGs calculados para os solos estudados encontram-se na Tabela 4.4.

Figura 4.10 – Esquema para classificação pelo Sistema Unificado.

% P #200 < 50	G > S : G	% P #200 < 5	GW CNU > 4 e 1 < CC < 3	
			GP CNU < 4 ou 1 > CC > 3	
		% P #200 > 12	GC 	
			GM	
			5 < #200 < 12	GW-GC, GP-GM, etc.
	S > G : S	% P #200 < 5	SW CNU > 6 e 1 < CC < 3	
			SP CNU < 6 ou 1 > CC > 3	
		% P #200 > 12	SC 	
		SM		
		5 < #200 < 12	SW-SC, SP-SC, etc.	
% P #200 > 50	C	CL		
		CH		
	M	ML		
		MH		
	O	OL		
		OH		

Fonte: Pinto (2006).

Tabela 4.4 – Índice de grupo das amostras 1 e 2.

Amostra	P_{p200} (%)	LL (%)	IP (%)	a	b	C	D	IG
Glória	88	74	32	40	40	20	20	20
Água Limpa	30	31	10	0	15	0	0	0

Fonte: autor (2017).

A classificação TRB foi feita com auxílio da Tabela 4.5, sendo obtido:

- Amostra 1 – A-7-5.
Solo argiloso fraco ou pobre para subleito.
- Amostra 2 – A-2-4.
Solo arenoso, areia siltosa ou argilosa com comportamento excelente a bom para subleito.

Tabela 4.5 – Esquema para classificação TRB.

CLASSIFICAÇÃO GERAL	MATERIAIS GRANULARES 35% (ou menos) passando na peneira Nº 200							MATERIAIS SILTO - ARGILOSOS			
	A - 1		A - 3	A - 2				A - 4	A - 5	A - 6	A - 7 A - 7 - 5 A - 7 - 6
	A - 1 - A	A - 1 - B		A - 2 - 4	A - 2 - 5	A - 2 - 6	A - 2 - 7				
Granulometria - % passando na peneira											
Nº 10	50 máx.										
Nº 40	30 máx.	30 máx.	51 min.								
Nº 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 min.	36 min.	36 min.	36 min.
Características da fração passando na peneira Nº 40:											
Limite de Liquidez				40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.
Índice de Plasticidade	6 máx.	6 máx.	NP	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.*
Índice de Grupo	0	0	0	0	0	4 máx.	4 máx.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais constituintes	Fragmentos de pedras, pedregulho fino e areia			Pedregulho ou areias siltosas ou argilosos				Solos siltosos		Solos argilosos	
Comportamento como subleito	Excelente a bom							Sofrível a mau			

* O IP do grupo A - 7 - 5 é igual ou menor do que o LL menos 30.

Fonte: DNIT (2006).

4.6 Compactação

A pesquisa foi realizada para quatro energias de compactação diferentes – Proctor Normal, Internormal, Intermediário e Intermodificado –, para isso, quantificou-se as energias normatizadas e obteve-se as possíveis combinações de cilindros, soquetes, números de golpes e camadas de compactação das energias alternativas, como indicado na Tabela 4.6. É definido a compactação nas energias Proctor Internormal e Proctor Intermodificado com,

respectivamente, 18 e 40 golpes em 5 camadas utilizando o cilindro e soquete grandes (GOMES, 2012).

Na obtenção das curvas de compactação utilizou-se sempre o cilindro pequeno (1000 cm³), dessa forma, reduzindo a quantidade de solo necessária nos ensaios e possibilitando a execução de compactação sem reuso. O cilindro grande foi utilizado apenas para o ensaio de CBR moldado nas respectivas umidades ótimas de cada energia de compactação.

Tabela 4.6 – Possíveis combinações de equipamento para ensaio de compactação.

Cilindro	Proctor	Soquete	Camadas (nº)	Golpes (nº)	Energia (kgf/cm ²)
Pequeno*	Normal	Pequeno	3	26	6,0
	Internormal	Pequeno	3	39	9,0
		Grande	3	14	9,0
	Intermediário	Pequeno	3	57	12,9
		Grande	3	21	12,9
	Intermodificado	Pequeno	5	52	19,8
Grande		5	19	19,8	
Modificado	Grande	5	27	27,9	
Grande	Normal	Grande	5	12	6,0
	Internormal	Grande	5	18	9,0
	Intermediário	Grande	5	26	12,9
	Intermodificado	Grande	5	40	19,8
	Modificado	Grande	5	56	27,9

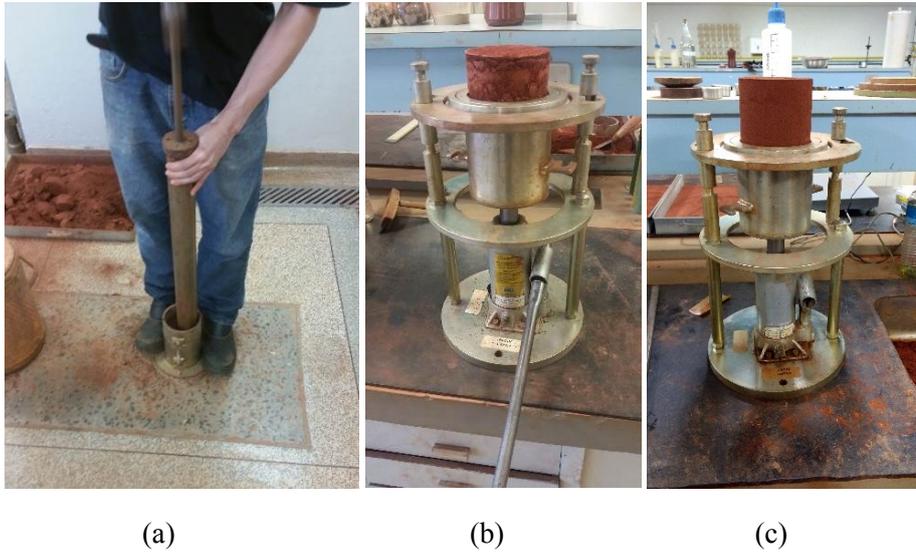
* As combinações utilizadas neste trabalho estão marcadas em negrito.

Fonte: autor (2017).

Os ensaios foram realizados sem reuso do material, uma vez que, desse modo representa-se melhor o que ocorre na compactação do campo. Por isso, cada ponto do gráfico teor de umidade versus massa específica seca requer uma nova amostra de 3,0 kg passante na peneira de abertura 4,8 mm.

Após a compactação, extraiu-se os corpos de prova do cilindro com auxílio de um extrator de amostras. Depois, retiraram-se três porções de solo de cada corpo de prova para se determinar as umidades, sendo uma retirada do solo remanescente da bandeja e duas da parte central do corpo de prova. A Figura 4.11 ilustra algumas das etapas do processo do ensaio de compactação.

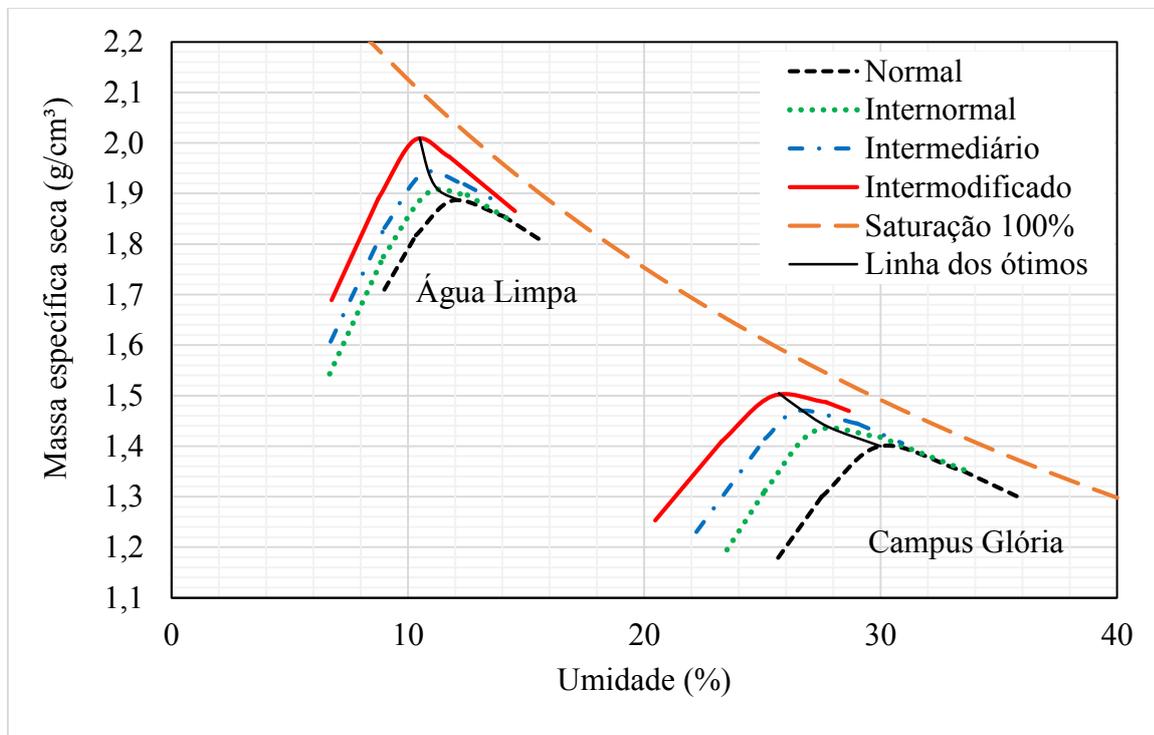
Figura 4.11 – (a) Execução de compactação com cilindro pequeno e soquete grande, e extração de amostra (b) do Campus Glória e (c) de Água Limpa.



Fonte: autor (2017).

Os dados experimentais dos ensaios de compactação com ambas as amostras se encontram no Apêndice C, e as curvas de compactação resultantes estão na Figura 4.12.

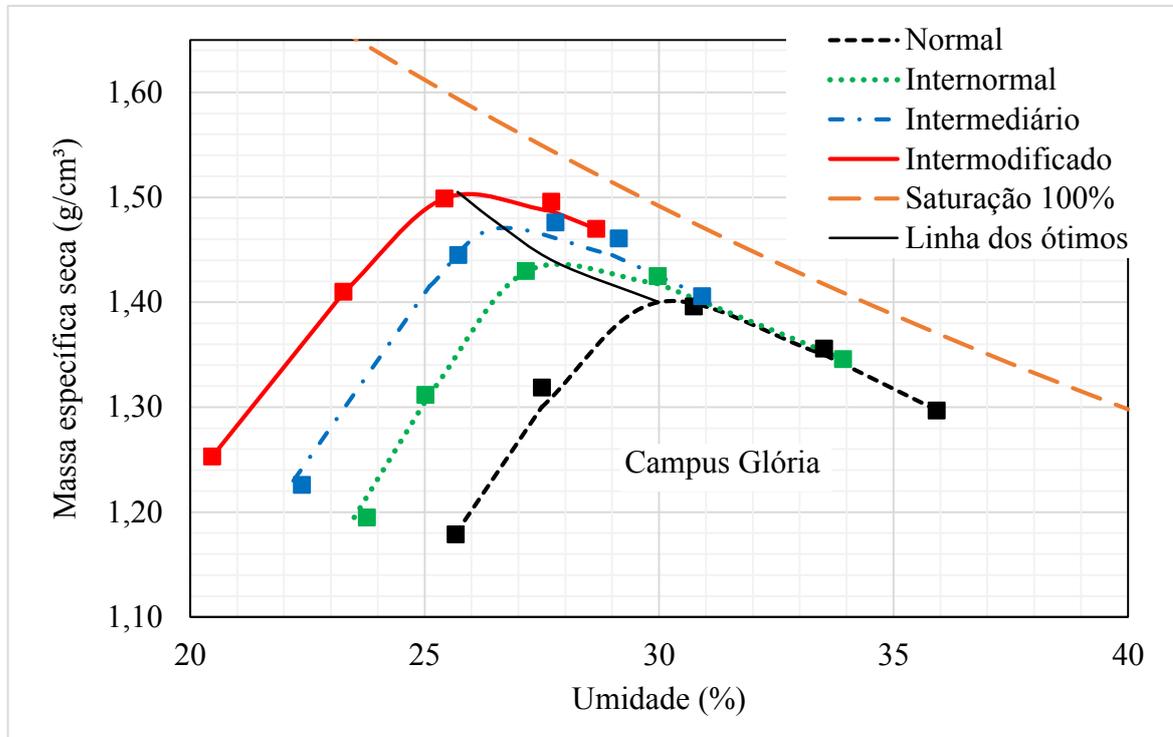
Figura 4.12 – Curvas de compactação.



Fonte: autor (2017)

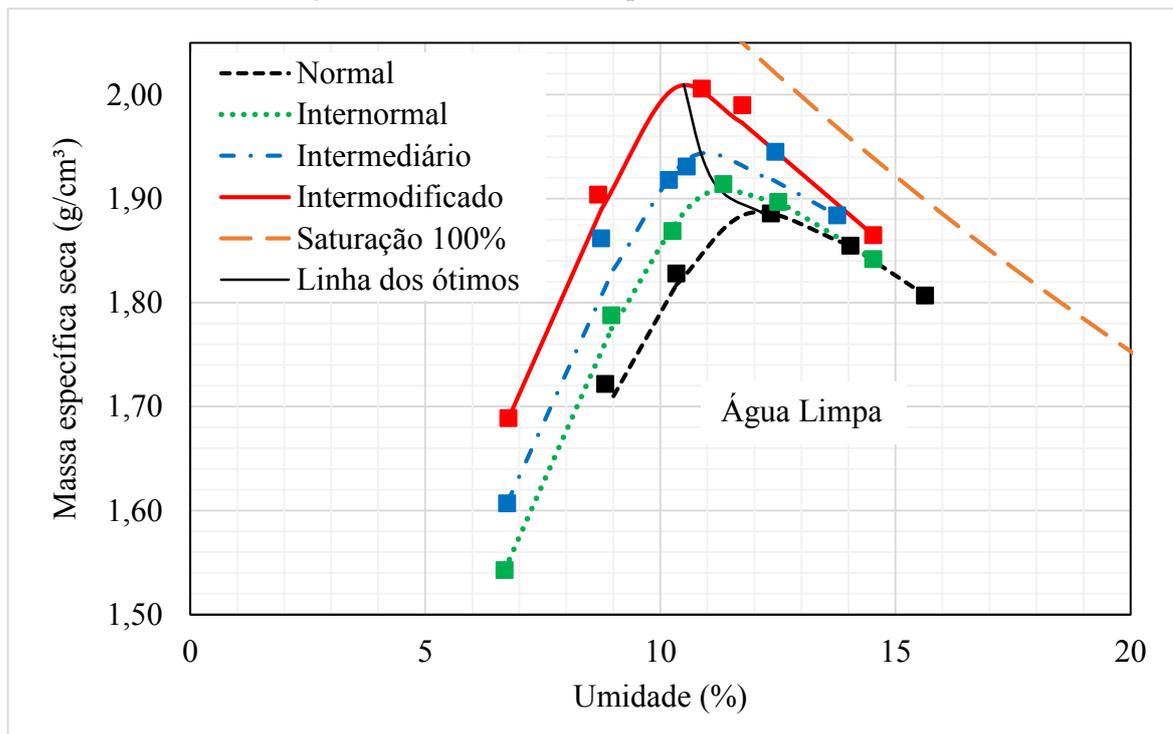
As Figuras 4.13 e 4.14 mostram a dispersão dos pontos obtidos em laboratório para a construção das curvas de compactação, respectivamente, das amostras 1 e 2.

Figura 4.13 – Curvas de compactação da amostra 1.



Fonte: autor (2017).

Figura 4.14 – Curvas de compactação da amostra 2.



Fonte: autor (2017).

Na Figura 4.12, analisando o comportamento de ambas as amostras de solo – Campus Glória (argiloso) e Água Limpa (arenoso) – pode-se notar:

- (a) De fato, a compactação de solos argilosos ocorre com teores de umidade mais elevados e resultam em massas específicas menores em comparação com solos arenosos;
- (b) Com o aumento da energia de compactação o solo argiloso apresentou variações, entre os teores de umidade de seus pontos ótimos, mais sensíveis que o solo arenoso;
- (c) A linha de pontos ótimos do solo argiloso apresentou um formato semelhante à da curva de saturação, como esperado. O mesmo não ocorreu para o solo arenoso. Neste último, atribui-se a diferença ao valor de massa específica dos sólidos adotada – conforme item 4.2 –, que afeta a inclinação da curva de saturação e teve o mesmo valor adotado para ambas as amostras (2,7 g/cm³). Uma massa específica dos sólidos diferentes resultaria em outra curva de saturação que poderia se assemelhar à linha dos ótimos da amostra Água Limpa;

4.6.1 Índice de Laterização (L)

Proposto por Ignatius (1991), o índice L é calculado pela Equação 4.11:

$$L = \left(\frac{\Delta\rho_s}{\rho_{sm\acute{a}x}} \right) / \left(\frac{\Delta w}{w_{\acute{o}t}} \right) \quad (Eq. 4.11)$$

Sendo:

$\Delta\rho_s$ = Maior valor da massa específica seca – Menor valor da massa específica seca, ambos no ramo seco (g/cm³);

Δw = Maior valor do teor de umidade – Menor valor do teor de umidade, ambos no ramo seco (%);

$\rho_{sm\acute{a}x}$ = Massa específica seca máxima (g/cm³); e

$w_{\acute{o}t}$ = Teor de umidade ótimo (%).

Dessa forma, com as curvas de compactação definidas na Figura 4.12 é possível calcular o índice de laterização para os dois tipos de solos. A Figura 4.12 apresenta 8 diferentes curvas de compactação, no entanto, apenas a variação da energia de compactação em uma mesma amostra de solo não foi suficiente para alterar significativamente a inclinação do ramo seco.

De fato, as curvas de compactação com diferentes energias tendem a ter o mesmo formato. Portanto, espera-se ter apenas um valor L para cada tipo de solo, já o aumento da energia de compactação também não é suficiente para alterar o comportamento laterítico ou saprolítico de um solo.

Assim, a amostra 1 apresentou $L = 1,20$, enquanto, a amostra 2 apresentou $L = 0,55$. Portanto, as duas amostras são classificadas como lateríticas, sendo o solo do Campus Glória mais afetada pelo processo de laterização.

Solos tropicais lateríticos apresentam um comportamento excelente para a aplicação em pavimentação. Estes tipos de solos apresentam suporte satisfatório e, quando saturados, não sofrem elevada perda de resistência como os solos de climas temperados – que foram a base de estudos para o desenvolvimento da classificação TRB e ensaio de CBR.

4.7 Índice de suporte Califórnia - CBR

Os teores de umidade ótimos e massa específicas secas máximas utilizadas para o ensaio de CBR são apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Coordenadas dos pontos ótimos.

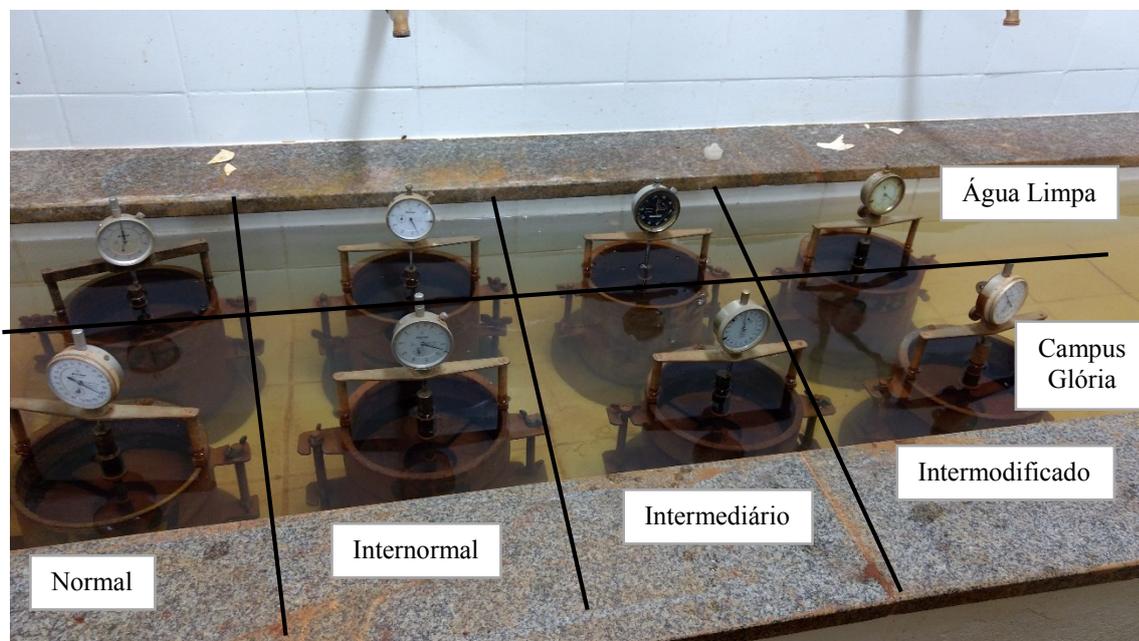
Ponto ótimo		Normal	Internormal	Intermediário	Intermodificado
Campus Glória	$w_{ót}$ (%)	30,2	27,8	26,7	25,9
	$\rho_{dmáx}$ (g/cm ³)	1,402	1,435	1,471	1,504
Água Limpa	$w_{ót}$ (%)	12,2	11,2	10,9	10,5
	$\rho_{dmáx}$ (g/cm ³)	1,885	1,915	1,942	2,008

Fonte: autor (2017).

Após a moldagem, os corpos de prova foram imergidos em água por um período de 72 horas, realizando o ensaio de expansão. Durante esse período de imersão, os corpos de prova ficam sob efeito de uma sobrecarga de 4540 g em discos anelares que servem para simular o confinamento e o peso sobre o pavimento. Por fim, os resultados da expansão são medidos em períodos de 24 em 24 horas por meio de um extensômetro que fica ligado à haste de expansão do prato perfurado, conforme a Figura 4.15. O resultado da expansão é expresso em

porcentagem ao dividir a leitura final do extensômetro pela altura inicial do corpo de prova (altura do cilindro menos a altura do disco espaçador).

Figura 4.15 – Ensaio de expansão.



Fonte: autor (2017).

Os resultados mostraram baixos valores de expansão para ambos os solos, independente da energia de compactação, sendo o máximo de 0,32%, como se observa na Tabela 4.8. Estes valores são aceitáveis para solos usados em pavimentação, de acordo com o Manual de Pavimentação do Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (DNIT).

Tabela 4.8 – Expansão nos ensaios CBR.

Expansão (%)				
Amostra/Proctor	Normal	Internormal	Intermediário	Intermodificado
Campus Glória	0,23	0,13	0,17	0,12
Água Limpa	0,07	0,07	0,32	0,17

Fonte: autor (2017).

Decorridas as 72 horas de expansão, os corpos de prova foram removidos do tanque e deixados 15 minutos para escoar a água antes de serem levados para a prensa do CBR. A prensa do CBR é mostrada na Figura 4.16 e consiste basicamente em: um prato suporte para o molde que

sobreleva através de uma prensa hidráulica; e um pistão de penetração fixo a um anel dinamométrico de aço com capacidade de 5 tf com sensibilidade de 2,5 kgf.

Figura 4.16 – Ensaio CBR.

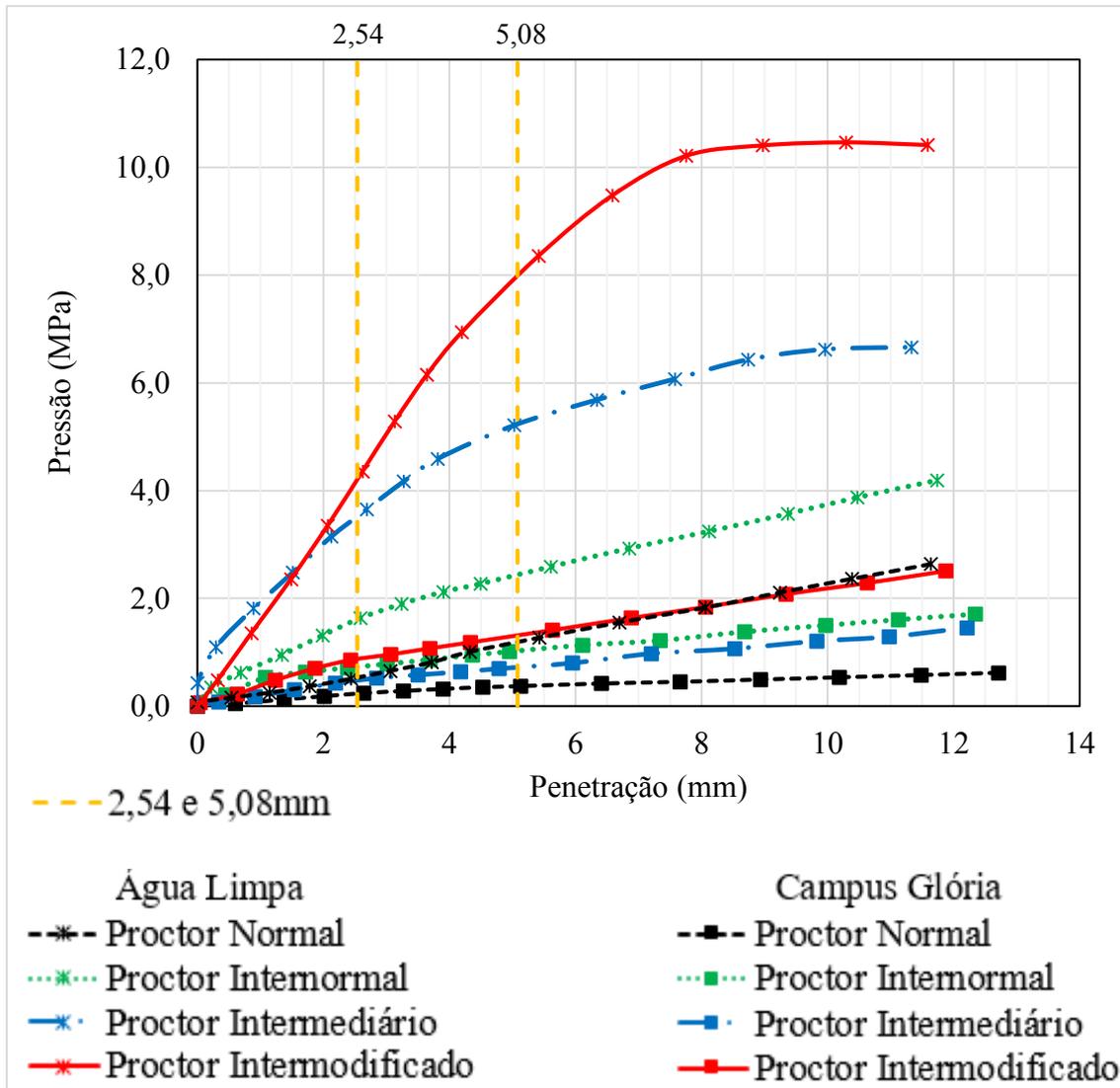


Fonte: autor (2017).

O ensaio foi executado de forma que, ao elevar o prato com o molde, o corpo de prova foi penetrado pelo pistão e, pela resistência à penetração, este deformou o anel dinamométrico. Durante o ensaio foram tomadas leituras de dois extensômetros: o primeiro, apoiado no cilindro, acompanhou a penetração do pistão no solo com precisão de 0,01 mm; e o segundo, ligado ao anel dinamométrico, mediu o deslocamento radial do mesmo com precisão de 0,001 mm. A partir da leitura no anel dinamométrico foi possível calcular a força (kgf), exercida durante a penetração do pistão, multiplicando o valor da leitura pela constante 1558,7 fornecida pela calibração do equipamento. Por fim, fez-se o cálculo da pressão pela divisão da carga (kgf) pela área (cm²) do pistão de penetração, e a conversão de unidades – de kgf/cm² para MPa se deu pelo fator 0,098067.

O memorial de cálculo dos ensaios pode ser visto no Apêndice D, e as curvas pressão versus penetração são mostradas na Figura 4.17.

Figura 4.17 – Curvas dos ensaios CBR com as amostras 1 e 2.



Fonte: autor (2017).

Por definição o valor do CBR é o maior valor, em porcentagem, entre a relação das pressões do ensaio e da amostra de brita padrão – 6,90 e 10,35 MPa para as respectivas penetrações de 2,54 e 5,08 mm –, como na equação 4.11:

$$CBR = \text{Maior} (CBR_{2,54}; CBR_{5,08}) \quad (\text{Eq. 4.11})$$

$$CBR_{2,54} = \frac{\text{Pressão calculada ou corrigida}}{6,90} \times 100\% \quad (\text{Eq. 4.11}')$$

$$CBR_{5,08} = \frac{\text{Pressão calculada ou corrigida}}{10,35} \times 100\% \quad (\text{Eq. 4.11}'')$$

sendo:

$CBR_{2,54}$ = Valor do CBR para a penetração de 2,54 mm (%);

$CBR_{5,08}$ = Valor do CBR para a penetração de 5,08 mm (%);

CBR = Maior valor entre $CBR_{2,54}$ e $CBR_{5,08}$ (%);

Pressão calculada = Pressão obtida pela curva do CBR (MPa);

Pressão corrigida = caso haja inflexão no gráfico corrigir o valor da pressão ao somar 'c' à penetração de 2,54 ou 5,08mm (MPa);

c = Valor encontrado no eixo das abcissas do gráfico ao traçar uma tangente no ponto de inflexão da curva do CBR (mm).

Os valores finais dos CBRs encontrados estão dispostos na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Valores de CBR.

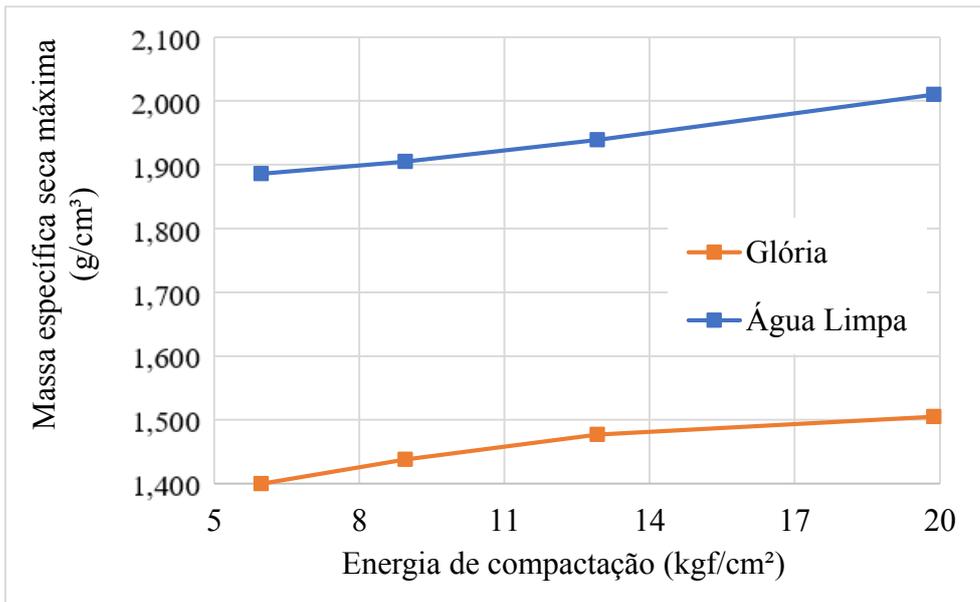
CBR (%)				
Amostra / Proctor	Normal	Internormal	Intermediário	Intermodificado
Campus Glória	4,0	11	7	13
Água Limpa	12	23	50	77

Fonte: autor (2017).

Nas Figuras 4.16 a 4.18 pode-se comparar os valores da massa específica seca máxima, umidade ótima e CBR com o gradativo aumento da energia de compactação. Percebe-se que valores de massa específica seca variam sutilmente – em média os valores se diferenciam em 2,5%. Da mesma forma, os teores de umidade ótimo tiveram variação de 5% de seus valores. O índice de suporte apresentou pouca variação após o Proctor Internormal para o Campus Glória, enquanto que, para o solo arenoso apresentou valores sempre crescentes com variação em torno de 90% com o acréscimo de energia. As taxas de variação verificadas nos três índices analisados podem ser tomadas como constantes com o aumento de energia quando se considera a dispersão geralmente observada em ensaios de laboratório.

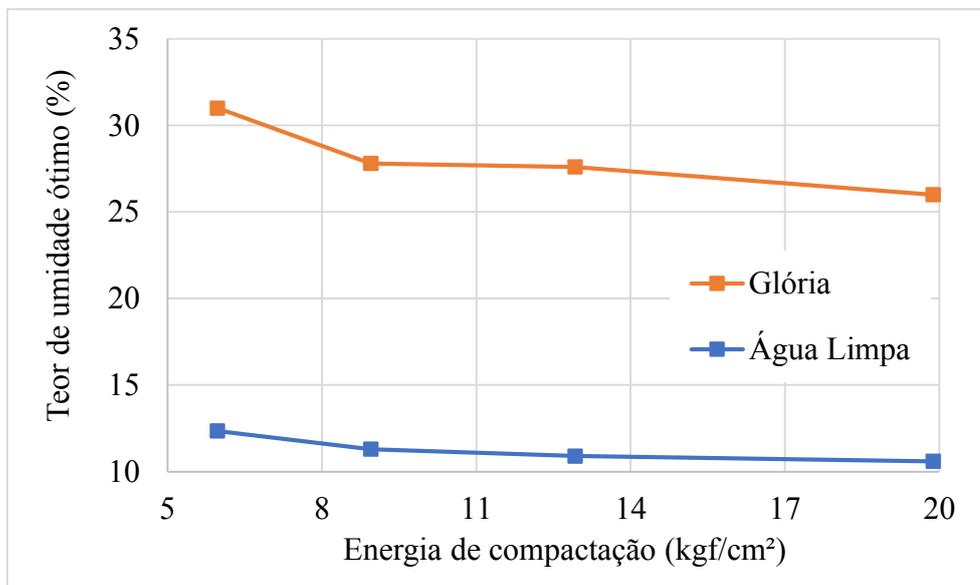
Com base na literatura, é de se esperar um acréscimo no valor do CBR à medida que se aumenta a energia de compactação, o que de fato ocorreu para o solo arenoso da Fazenda Água Limpa (Figura 4.20). No entanto, o mesmo não foi observado para o solo argiloso do Campus Glória, este fato deve-se a um erro padrão de ensaios de laboratório ou a dificuldade na construção da curva de compactação na energia do Proctor Intermediário da amostra coletada.

Figura 4.18 – Variação da massa específica seca máxima com as energias de compactação.



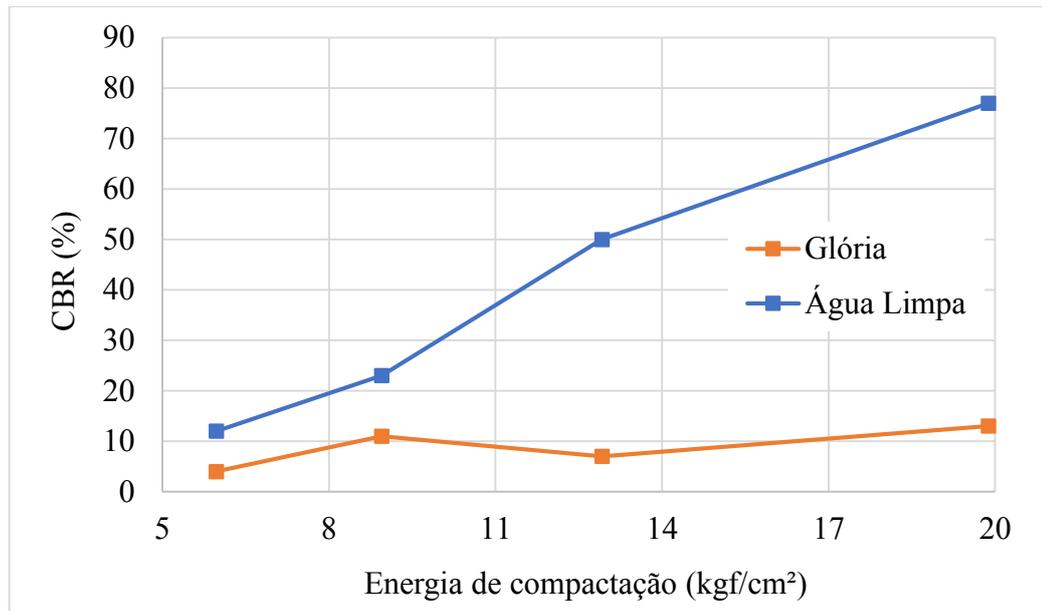
Fonte: autor (2017).

Figura 4.19 – Variação do teor de umidade ótimo com as energias de compactação.



Fonte: autor (2017).

Figura 4.20 – Variação do CBR para as energias de compactação.



Fonte: autor (2017).

5 APLICAÇÃO EM PAVIMENTAÇÃO

No Brasil os pavimentos são dimensionados para atender a recomendações técnicas do DNER, determinando a espessura de cada camada do pavimento com base no índice CBR. As normas vigentes trazem os seguintes valores mínimos para o índice de suporte do pavimento:

(a) DNIT ES 108/2010 – Terraplenagem – Aterro:

- Corpo de aterro: $CBR \geq 2\%$;
- Subleito: $CBR \geq 6\%$.

(b) DNIT ES 139/2010 – Pavimentação – Sub-base:

- $CBR \geq 20\%$.

(c) DNIT ES 141/2010 – Pavimentação – Base:

- $CBR \geq 60\%$ para Número $N \leq 5 \times 10^6$;
- $CBR \geq 80\%$ para Número $N > 5 \times 10^6$.

Ainda, conforme a recomendação técnica do DNIT - ES - 139/2010, a camada de sub-base deve ser compactada com uma energia igual ou maior ao Proctor Intermediário, da mesma

forma, a norma DNIT - ES – 141/2010 estabelece que a camada de base deve ser compactada com a energia do Proctor Modificado, além de possuir $LL \leq 25\%$ e $LP \leq 6\%$.

Contudo, neste estudo não levou em consideração o limite das energias a serem aplicadas, ou seus Limites de Atterberg, e sim a capacidade de suporte para cada camada. Desta forma é possível constatar se há benefício econômico na variação das energias de compactação das padronizadas para as alternativas. Neste sentido, a Tabela 5.1 a seguir indica as possibilidades de se construir um pavimento com os dois solos em estudo para as energias do Proctor Normal ao Intermodificado.

Tabela 5.1 – Possibilidades para a construção de uma rodovia.

Amostra	Camada	Normal	Internormal	Intermediário	Intermodificado
Campus Glória	C. aterro $\geq 2\%$	X	X	X	X
	Subleito $\geq 6\%$		X	X	X
	Sub-base $\geq 20\%$				
	Base	$\geq 60\%$			
$\geq 80\%$					
Fazenda Exp. Água Limpa	C. aterro $\geq 2\%$	X	X	X	X
	Subleito $\geq 6\%$	X	X	X	X
	Sub-base $\geq 20\%$		X	X	X
	Base	$\geq 60\%$			
$\geq 80\%$					

Fonte: autor (2017).

Assim, é possível pensar em economias em obras de pavimentação. Ao se construir um pavimento, utilizando o solo da Fazenda Experimental Água Limpa, facilmente compactamos o corpo de aterro e o subleito na energia do Proctor Normal. No entanto, ao pensar na camada de sub-base nos deparamos com as opções de buscar um novo solo mais resistente ou compactar o solo da região na energia do Proctor Intermediário (conforme DNIT - ES – 139/2010). Ainda, restaria uma terceira opção que seria a compactação do solo da Água Limpa na energia do Proctor Internormal.

Neste sentido, a princípio, utilizar a energia de compactação alternativa – Proctor Internormal – resultaria em uma economia em relação a compactação na energia do Proctor Intermediário,

pois diminuiriam alguns gastos com o número de passadas dos equipamentos de compactação, mão de obra, óleo diesel, manutenção do equipamento, entre outros. Por outro lado, a diminuição da energia de compactação também pode acarretar maiores gastos nas obras, quando se considera que a redução do índice de suporte da camada compactada resulta em camadas do pavimento com maiores espessuras. Portanto, a economia na substituição de uma energia normatizada por uma alternativa de energia menor só poderá ser definida por cálculos orçamentários com base nos dimensionamentos dos pavimentos.

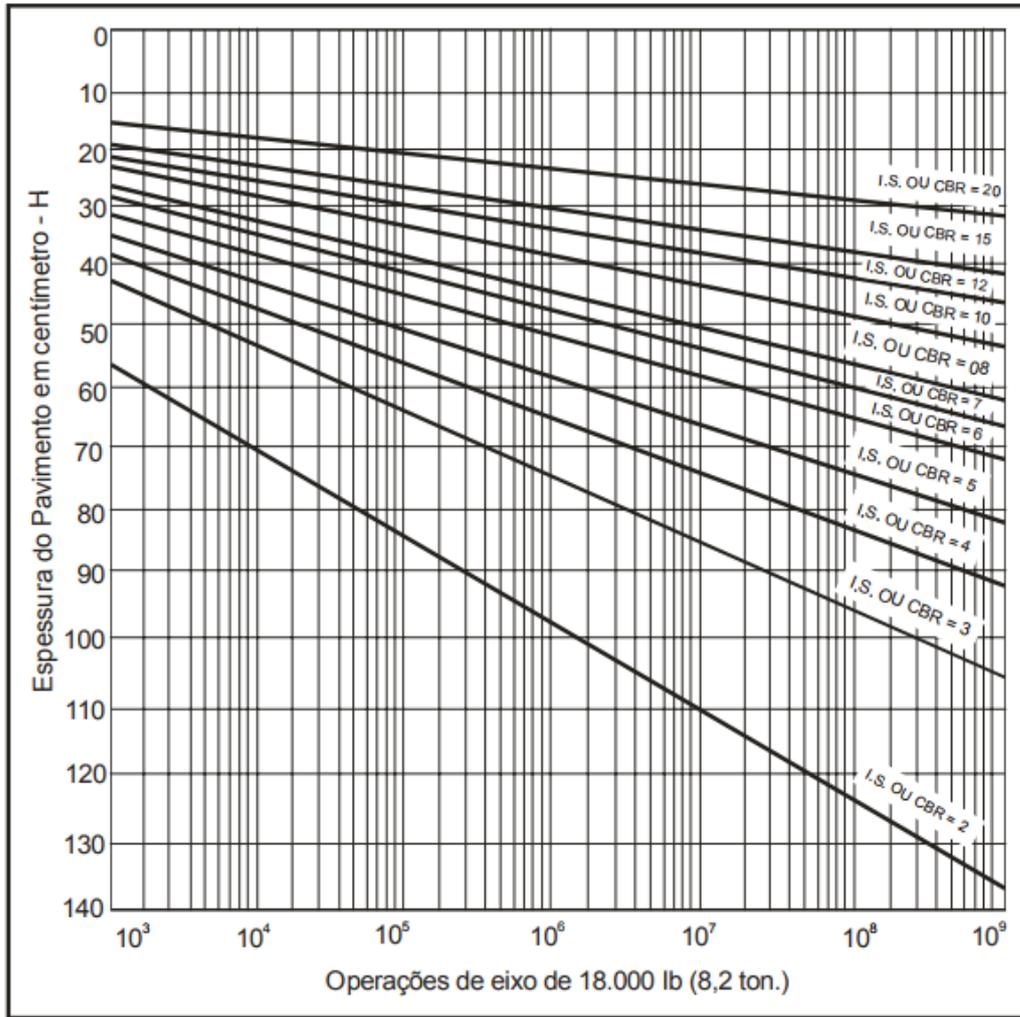
5.1 Dimensionamento de pavimentos

Para efeito de análise econômica, foram adotados três valores para o número N – número equivalente de operações de um eixo tomado como padrão, durante o período de projeto escolhido –, simulando, respectivamente, um baixo, um médio e um alto volume de tráfego. São eles: 1.10^6 , 1.10^7 e 1.10^8 .

As espessuras das camadas do pavimento foram determinadas pelas Figuras 5.1 e 5.2, e Tabela 5.2 segundo o procedimento:

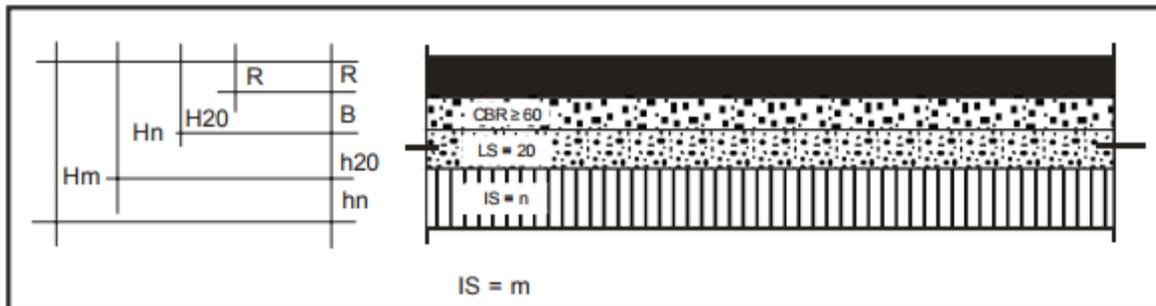
- (a) Pela Figura 5.1, com o valor do número N obtém-se a espessura do pavimento em centímetros. Sendo, 15 centímetros, a mínima espessura construtiva para as camadas de um pavimento.
- (b) Na Figura 5.2, H_m designa a espessura total de pavimento necessário para proteger um material com $\text{CBR} = m$; h_n é a espessura da camada do pavimento com CBR igual a n . Ainda que o CBR da sub-base seja maior que 20, a espessura do pavimento necessário para protegê-la é determinada como se esse valor fosse 20, por isso, utiliza-se os símbolos H_{20} e h_{20} para designar, respectivamente, a espessura de pavimento sobre a sub-base e a espessura da sub-base. Enquanto os símbolos B e R indicam as espessuras da base e do revestimento, respectivamente.
- (c) A espessura R do revestimento betuminoso é determinada pela Tabela 5.2 em função de N .

Figura 5.1 – Determinação de espessura de pavimento.



Fonte: DNIT (2006).

Figura 5.2 – Dimensionamento do pavimento.



Fonte: DNIT (2006).

Tabela 5.2 – Espessura mínima de revestimento betuminoso.

N	Espessura Mínima de Revestimento Betuminoso
$N \leq 10^6$	Tratamentos superficiais betuminosos
$10^6 < N \leq 5 \times 10^6$	Revestimentos betuminosos com 5,0 cm de espessura
$5 \times 10^6 < N \leq 10^7$	Concreto betuminoso com 7,5 cm de espessura
$10^7 < N \leq 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 10,0 cm de espessura
$N > 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 12,5 cm de espessura

Fonte: DNIT (2006).

Após determinar as espessuras H_m , H_n , H_{20} e R , obtiveram-se as espessuras B , h_{20} e h_n para base, sub-base e reforço do subleito pelas equações 5.1:

$$RK_R + BK_B \geq H_{20} \quad (\text{Eq. 5.1})$$

$$RK_R + BK_B + h_{20}K_S \geq H_n \quad (\text{Eq. 5.1}')$$

$$RK_R + BK_B + h_{20}K_S + h_nK_{Ref} \geq H_m \quad (\text{Eq. 5.1}'')$$

sendo:

K_R , K_B , K_S e K_{Ref} = coeficientes de equivalência estrutural do revestimento, base, sub-base e reforço, respectivamente, determinados conforme o tipo de material constitutivos do pavimento. Os valores são obtidos pela Tabela 5.3.

5.1.1 Dimensionamento para a amostra do Campus Glória

O solo argiloso do Campus Glória foi classificado como A-7-5 (20) na classificação TRB, ou seja, péssimo para uso em pavimentação. Seu único uso foi então para o corpo de aterro e subleito. Desse modo, de acordo com a Norma DNIT (2006), a compactação do subleito seria no Proctor Intermediário com CBR = 12% (valor corrigido para média entre Internormal e Intermodificado), enquanto que, para o estudo em questão, a compactação do subleito poderia ser realizada no Proctor Internormal com CBR = 11%. Os cálculos estão presentes na Tabela 5.4.

Tabela 5.3 – Coeficientes de equivalência estrutural.

Componentes do pavimento	Coefficiente K
Base ou revestimento de concreto betuminoso	2,00
Base ou revestimento pré-misturado a quente, de graduação densa	1,70
Base ou revestimento pré-misturado a frio, de graduação densa	1,40
Base ou revestimento betuminoso por penetração	1,20
Camadas granulares	1,00
Solo cimento com resistência à compressão a 7 dias, superior a 45 kg/cm	1,70
Idem, com resistência à compressão a 7 dias, entre 45 kg/cm e 28 kg/cm	1,40
Idem, com resistência à compressão a 7 dias, entre 28 kg/cm e 21 kg/cm	1,20

Fonte: DNIT (2006).

Tabela 5.4 – Dimensionamento de possíveis pavimentos com a amostra do Campus Glória.

Camada	N	Espessuras - Fig. 5.1 e Tab. 5.3 (cm)	Eq. 5.1	Espessuras das camadas dimensionadas (cm)
Subleito Proctor Internormal CBR = 11%	1×10^6	$H_{11} = 36$ $H_{20} = 23$ $R = 0$	$B \geq 23$ $23 + h_{20} \geq 36$	Base = 23 Sub-base = 15
	1×10^7	$H_{11} = 41$ $H_{20} = 26$ $R = 7,5$	$14 + B \geq 26$ $14 + 15 + h_{20} \geq 41$	Base = 15 Sub-base = 15
	1×10^8	$H_{11} = 46$ $H_{20} = 29$ $R = 12,5$	$25 + B \geq 29$ $25 + 15 + h_{20} \geq 46$	Base = 15 Sub-base = 15
Subleito Proctor Intermediário CBR = 12%	1×10^6	$H_{12} = 34$ $H_{20} = 23$ $R = 0$	$B \geq 23$ $23 + h_{20} \geq 34$	Base = 23 Sub-base = 15
	1×10^7	$H_{12} = 38$ $H_{20} = 26$ $R = 7,5$	$14 + B \geq 26$ $14 + 15 + h_{20} \geq 38$	Base = 15 Sub-base = 15
	1×10^8	$H_{12} = 42$ $H_{20} = 29$ $R = 12,5$	$25 + B \geq 29$ $25 + 15 + h_{20} \geq 42$	Base = 15 Sub-base = 15

Fonte: autor (2017).

Observa-se na Tabela 5.4 que não houve alteração nas espessuras do pavimento com a variação da energia de compactação do subleito, já que a diferença entre os valores de CBR foi de apenas 1%.

5.1.2 Dimensionamento para a amostra de Água Limpa

O solo arenoso da Fazenda Experimental Água Limpa foi classificado com A-2-4 (0) pela TRB, que indica que o solo é excelente para uso em pavimentação. Seu uso seria apropriado em qualquer camada do pavimento e com isso, há três casos a serem analisados:

- (a) O solo como subleito, compactado na energia Proctor Normal (CBR = 12%) ou Proctor Internormal (CBR = 23%);
- (b) O solo como camada de sub-base, sendo que para a norma vigente do DNIT (2006), a compactação seria no Proctor Intermediário com CBR = 50%, enquanto que, para o estudo em questão, a compactação da sub-base poderia ser realizada no Proctor Internormal com CBR = 23%;
- (c) O solo como base que, conforme a norma, seria compactada no Proctor Modificado, enquanto que, para este estudo, a base poderia ser compactada no Proctor Intermodificado com CBR = 77%.

O dimensionamento foi realizado apenas para os dois primeiros casos descritos, pois não foi realizado o estudo para a obtenção do CBR na energia do Proctor Modificado, que seria necessário para seu uso como camada de base. Os resultados dos dimensionamentos para os casos (a) e (b) estão na Tabela 5.5.

Assim como, para o Campus Glória, os dimensionamentos com a amostra de Água Limpa não apresentaram diferença nas espessuras com a variação da energia de compactação. Exceto para o caso da compactação do subleito com a energia do Proctor Internormal, pois a sub-base é dispensada para subleitos com $CBR > 20\%$.

Para a situação específica de subleito compactado na energia Proctor Internormal, seria possível dispensar a construção de uma camada de 15 cm de espessura da sub-base. Portanto, o passo seguinte foi verificar a viabilidade econômica desta solução, considerando o aumento do custo de compactação para a energia Internormal e a economia com a camada de sub-base.

Tabela 5.5 – Dimensionamento de possíveis pavimentos com a amostra de Água Limpa.

Camada	N	Espessuras - Fig. 5.1 e Tab. 5.3 (cm)	Eq. 5.1	Espessuras das camadas dimensionadas (cm)
Subleito Proctor Normal CBR = 12%	1×10^6	$H_{12} = 34$ $H_{20} = 23$ $R = 0$	$B \geq 23$ $23 + h_{20} \geq 34$	Base = 23 Sub-base = 15
	1×10^7	$H_{12} = 38$ $H_{20} = 26$ $R = 7,5$	$14 + B \geq 26$ $14 + 15 + h_{20} \geq 38$	Base = 15 Sub-base = 15
	1×10^8	$H_{12} = 42$ $H_{20} = 29$ $R = 12,5$	$25 + B \geq 29$ $25 + 15 + h_{20} \geq 42$	Base = 15 Sub-base = 15
Subleito Proctor Internormal CBR = 23%	1×10^6	$H_{23} = 23$ $R = 0$	$B \geq 23$	Base = 23
	1×10^7	$H_{23} = 26$ $R = 7,5$	$14 + B \geq 26$	Base = 15
	1×10^8	$H_{23} = 29$ $R = 12,5$	$25 + B \geq 29$	Base = 15
Sub-base* Proctor Internormal CBR = 23%	1×10^6	$H_{12} = 34$ $H_{23} = 23$ $R = 0$	$B \geq 23$ $23 + h_{20} \geq 34$	Base = 23 Sub-base = 15
	1×10^7	$H_{12} = 38$ $H_{23} = 26$ $R = 7,5$	$14 + B \geq 26$ $14 + 15 + h_{20} \geq 38$	Base = 15 Sub-base = 15
	1×10^8	$H_{12} = 42$ $H_{23} = 29$ $R = 12,5$	$25 + B \geq 29$ $25 + 15 + h_{20} \geq 42$	Base = 15 Sub-base = 15
Sub-base* Proctor Intermediário CBR = 50%	1×10^6	$H_{12} = 34$ $H_{50} = 23$ $R = 0$	$B \geq 23$ $23 + h_{20} \geq 34$	Base = 23 Sub-base = 15
	1×10^7	$H_{12} = 38$ $H_{50} = 26$ $R = 7,5$	$14 + B \geq 26$ $14 + 15 + h_{20} \geq 38$	Base = 15 Sub-base = 15
	1×10^8	$H_{12} = 42$ $H_{50} = 29$ $R = 12,5$	$25 + B \geq 29$ $25 + 15 + h_{20} \geq 42$	Base = 15 Sub-base = 15

*Subleito compactado no Proctor Normal – CBR = 12%.

Fonte: autor (2017).

5.2 Viabilidade econômica

Após a realização dos dimensionamentos, verificou-se a viabilidade econômica do uso das energias alternativas de compactação. Neste estudo, levou-se em consideração apenas o custo do serviço de compactação de materiais granulares que é realmente pertinente à variação de energia de compactação.

Pode-se afirmar, porém, que o aumento da energia de compactação também reduzirá o consumo de caminhão pipa, uma vez que, ocorre uma redução do teor ótimo de umidade. No entanto, o controle de umidade no campo é mais afetado por condições climáticas, sendo possível encontrar o solo já na umidade ótima em uma obra com compactação no Proctor Internormal, e em outra obra, encontrar o solo com umidade abaixo da ótima para compactação Proctor Normal, levando a custos mais elevados com caminhão pipa. Portanto, a redução na energia de compactação não apresenta economias com o serviço de tratamento de umidade do material.

Com auxílio da tabela referencial elaborada pelo Departamento de Edificações e Estradas de Rodagem de Minas Gerais (DEER-MG), a Tabela 5.6, foi possível estimar os custos de compactação para cada dimensionamento feito anteriormente.

Como a tabela de preços fornece custos unitários para compactação em metros cúbicos, para efeito de cálculo foi considerado um trecho de 1 km de extensão de pista simples, com 7,0 m de largura e sem acostamento. Assim, obtiveram-se os seguintes volumes de aterro: 1610 m³ para uma camada de 23 cm compactados; 1050 m³ para uma camada de 15 cm compactados. Quanto ao serviço de regularização do subleito, a tabela fornece os custos unitários em metros quadrados, pois a camada sempre será de 20 cm. Dessa forma, para os cálculos do custo de compactação do subleito foram utilizados 7000 m².

Apesar de a tabela conter os dados necessários para cálculo do subleito compactado nas energias Proctor Normal, Internormal e Intermediário, para a compactação da sub-base, esta apresenta apenas custos de compactação nas energias do Proctor Intermediário, Intermodificado e Modificado, estando ausente a compactação na energia do Proctor Internormal. Então, este custo foi estimado.

Tabela 5.6 – Referencial de custos de compactação.

101		Terraplenagem	
<i>Código</i>	<i>Discriminação</i>	<i>Unidade</i>	<i>Preço unitário</i>
40241	Compactação de bota-fora a 80% proctor normal	m3	2,02
40249	Compactação de aterro a 95% proctor normal	m3	2,52
40251	Compactação de aterro a 100% proctor normal	m3	2,87
40253	Compactação de aterro a 100% proctor internormal (150%proctor normal)	m3	2,95
40252	Compactação de aterro a 100% do proctor intermediário	m3	3,04
103		Pavimentação	
<i>Código</i>	<i>Discriminação</i>	<i>Unidade</i>	<i>Preço unitário</i>
42650	Fresagem contínua de pavimento asfáltico (3,0 cm)	m2	3,69
42643	Fresagem descontínua de pavimento asfáltico (3,0 cm)	m2	4,44
41081	Regularização do sub-leito, compactado na energia do proctor normal	m2	0,83
41083	Regularização do sub-leito, compactada na energia do proctor internormal	m2	0,85
41082	Regularização do sub-leito, compactada na energia do proctor intermediário	m2	0,84
41093	Reforço do sub-leito, compactado na energia do proctor intermediário (Execução, incluindo escavação, carga, descarga, homogeneização, umedecimento, espalhamento e compactação do material)	m3	9,75
43112	Sub-base de solo estabilizado granulometricamente sem mistura, compactado na energia do proctor intermediário (Execução, incluindo escavação, carga, descarga, umedecimento, espalhamento e compactação do material; exclui aquisição do material)	m3	13,06
42280	Sub-base de solo estabilizado granulometricamente sem mistura, compactado na energia do proctor intermodificado (Execução, incluindo escavação, carga, descarga, umedecimento, espalhamento e compactação do material; exclui aquisição do material)	m3	13,40
43195	Sub-base de solo estabilizado granulometricamente sem mistura, compactado na energia de proctor modificado (Execução, incluindo escavação, carga, descarga, umedecimento, espalhamento e compactação do material; exclui aquisição do material)	m3	13,77
43113	Base de solo estabilizado granulometricamente sem mistura, compactado na energia do proctor intermediário (Execução, incluindo escavação, carga, descarga, umedecimento, espalhamento e compactação do material; exclui aquisição do material)	m3	13,06
42395	Base de solo estabilizado granulométricamente sem mistura, compactado na energia do proctor intermodificado (Execução, incluindo escavação, carga, descarga, umedecimento, espalhamento e compactação do material; exclui aquisição do material)	m3	13,40
41098	Base de solo estabilizada granulometricamente sem mistura, compactado na energia de proctor modificado (Execução, incluindo escavação, carga, descarga, umedecimento, espalhamento e compactação do material; exclui aquisição do material)	m3	13,77

Fonte: DEER-MG (2017).

Nota-se que há um aumento de 2,60% no preço do serviço quando se varia a energia de compactação para sub-bases e bases na energia do Proctor Intermediário e Intermodificado; e um aumento de 2,76% no preço quando se varia a energia de compactação do Proctor Intermodificado para o Modificado. Com isso, não há uma relação direta com a alteração no valor da energia em kgf/cm² de cada uma das energias, e assim adotou-se uma diferença de 2,50% entre os preços da sub-base entre o Proctor Internormal e Intermediário, definindo-se um custo unitário de 12,74 R\$/m³ para a energia do Proctor Internormal.

Os custos por quilômetro de rodovia construída estão descritos na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Custos de execução.

Amostra	Camada Dimensionada	Energia	Quantidade	Código Referencial	Custo unitário	Custo por km de rodovia concluída
Campus Glória	Subleito	Internormal	7000 m ²	41083	R\$ 0,85	R\$ 5.950,00
		Intermediário	7000 m ²	41082	R\$ 0,84	R\$ 5.880,00
Água Limpa	Subleito	Normal	7000 m ²	41081	R\$ 0,83	R\$ 19.525,00
			1050 m ³	43112	R\$ 13,06	
	Sub-base	Internormal	7000 m ²	41083	R\$ 0,85	R\$ 5.950,00
		Internormal	1050 m ³	s/n	R\$ 12,74	R\$ 13.377,00
		Intermediário	1050 m ³	43112	R\$ 13,06	R\$ 13.713,00

Fonte: autor (2017).

5.2.1 Compactação do subleito – Campus Glória

Como não houve diferença entre as espessuras das camadas de sub-base e base para ambas as energias de compactação – Proctor Internormal e Intermediário, a diferença dos custos se deu apenas pela compactação do subleito. A redução de energia (Intermediária para Internormal) aumentou o custo em R\$ 70,00 por quilômetro. De fato, analisando a Tabela 5.6, o serviço de regularização do subleito é o único item em que a energia alternativa possui um custo unitário maior que uma energia maior.

5.2.2 Compactação do subleito – Fazenda Água Limpa

Neste caso, a diferença nos custos se dá pela compactação do subleito e da camada de sub-base. O aumento de energia (Normal para Internormal) tornou a construção R\$ 13.575,00 mais

econômica em cada quilômetro de extensão. De fato, a ausência da compactação de toda a sub-base é mais influente do que o aumento de 50% na energia de compactação.

5.2.3 Compactação da sub-base – Fazenda Água Limpa

Neste caso, a diferenciação nos custos se dá pela energia de compactação da camada de sub-base. A diminuição de energia (Intermediária para Internormal) gerou uma economia de R\$ 336,00 por quilômetro de rodovia construída.

6 CONCLUSÃO

A priori, o estudo de energias de compactação alternativas para solos em estruturas de pavimentos teria como foco suprir alguma deficiência de suporte para solos considerados impróprios à pavimentação, com um aumento mais econômico da energia de compactação com relação ao que atualmente está padronizado. Isso por considerar que a melhoria de um solo local pudesse ser mais econômica que a exploração de uma jazida. Posteriormente – sem descartar o primeiro objetivo em outros tipos de solos –, com os resultados do índice de suporte das amostras, o foco do estudo foi a economia gerada pela redução da energia de compactação sem comprometer a eficiência do pavimento.

Em análise de dois tipos distintos de solos (o solo argiloso do Campus Glória, com $IG = 20$, e o solo arenoso da Fazenda Experimental Água Limpa, com $IG = 0$), pôde-se ter uma indicação de comportamentos de solos compactados para pavimentação. A amostra argilosa iniciou com um CBR de 4% na energia do Proctor Normal, e sofreu um aumento significativo de 175% (CBR = 11%) na energia de compactação do Proctor Internormal; e, então, ao aumentar a energia houve pouca variação (18%) até a energia de compactação do Proctor Intermodificado (CBR = 13%). Enquanto que, o solo arenoso, atingiu CBR = 12% já na energia de compactação do Proctor Normal, e sofreu um aumento de 92% no Proctor Internormal (CBR = 23%). O índice de suporte continuou com grandes aumentos 117% com CBR = 50% no Proctor Intermediário, e mais 54% com CBR = 77% no Proctor Intermodificado.

É de se esperar uma economia, em uma possível compactação com o solo do Campus Glória, ao compactar o subleito no Proctor Internormal ao invés do Proctor Intermediário. Com a

redução da energia de compactação – traduzida, no campo, por menos passadas de rolo compactador – os gastos seriam menores. Contudo, a tabela referencial de custos para obras rodoviárias do DEER-MG confere um custo maior de regularização do subleito na energia do Proctor Internormal.

Para o solo arenoso da Água Limpa na compactação da sub-base ocorreu o esperado e obteve-se um lucro de R\$ 336,00 por quilômetro construído ao compactar a sub-base na energia do Proctor Internormal ao invés do Proctor Intermediário. Todavia, o Proctor Internormal não é uma opção para compactação de sub-bases conforme as orientações normativas da DNIT - ES – 139/2010. Portanto, vale ressaltar que, os critérios de dimensionamento – como o índice de suporte – são mais influentes ao comportamento do pavimento que meramente a escolha da energia de compactação. Por esse lado, adotar de um valor mínimo de CBR – suficiente para atender aos critérios de dimensionamento – que definirá a energia de compactação, e não o contrário, evita o erro pelo excesso, além de, elevados custos de superdimensionamentos.

Ainda, para o solo arenoso, ao dimensionar o subleito compactado com a energia do Proctor Internormal – neste caso, a favor das normas técnicas – ocorre a supressão de toda a camada de sub-base. Assim, o rendimento se mostrou 13.575,00 reais/km mais econômico do que a compactação na energia do Proctor Normal.

7 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Para novas pesquisas neste tema, pode-se sugerir:

- a) Realizar um estudo de vida útil para obras já concluídas – obtendo dados de estudo e ensaios do DER – com as energias de compactação alternativas (Proctor Internormal e Proctor Intermodificado);
- b) Fazer novos ensaios de compactação – com as cinco energias de compactação –, utilizando diferentes tipos de solos ou provenientes de outros climas brasileiros, como: equatorial, semiárido, subtropical, tropical atlântico e tropical de altitude;
- c) Novos estudos com as energias de compactação alternativas (Proctor Internormal e Proctor Intermodificado) com parâmetros de resistência diferentes do CBR, como o módulo de resiliência, por exemplo;

- d) Realizar estudo *in situ*, em aterros experimentais, observando o comportamento dos solos compactados nas energias alternativas;
- e) Analisar as características de suporte de um solo arenoso de elevado índice de suporte e comportamento não plástico, e sua variação conforme se aumenta o teor de finos (20; 40; 60 e 80%, por exemplo).

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12102. MB 3443: Solo – Controle de compactação pelo método de Hilf**. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 6457: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 6508: Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 7181: Solo – Análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 9813: Solo – Determinação da massa específica aparente *in situ*, com emprego de cilindro de cravação**. Rio de Janeiro, 2016.

BAPTISTA, Cyro de F. Nogueira. **Pavimentação. Tomo I – Ensaios fundamentais para a pavimentação; dimensionamentos dos pavimentos flexíveis**. 4ª ed. Porto Alegre: Globo, 1980.

BERNUCCI Liedi. B., et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. 504 f. Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos – ABEDA. Petróleo Brasileiro S. A. – PETROBRAS. Rio de Janeiro, 2006.

CAPUTO, Homero Pinto; CAPUTO, Armando Negreiros. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. V. 1: fundamentos. 7ª ed. 256 p. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

CRAIG, Robert F. **Mecânica dos solos**. Tradução de: **Craig's soil mechanics**, 7th ed. por Amir Kurban. 7ª ed. 365 p. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE ROGADEM DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **RT-01.46.d – Critérios de projeto para vias de ligação com reduzido volume de tráfego**. Belo Horizonte, janeiro de 2009.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 049: Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas**. 1994.

_____. **ME 092: Determinação da massa específica aparente *in situ*, com emprego do frasco de areia**. 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **ES 108: Terraplenagem – Aterros**. Instituto de Pesquisas Rodoviárias - IPR: Rio de Janeiro, agosto de 2009.

_____. **ES 139: Pavimentação – Sub-base estabilizada granulometricamente**. Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR: Rio de Janeiro, novembro de 2010.

_____. **ES 141: Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente.** Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR: Rio de Janeiro, novembro de 2010.

_____. **Manual de pavimentação.** 3.ed. 274p. Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR Publ., 719: Rio de Janeiro, 2006.

_____. **ME 164: Compactação utilizando amostras não trabalhadas.** Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR: Rio de Janeiro, janeiro de 2013.

_____. **ME 172: Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas.** Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR: Brasília, março de 2016.

GOMES, Luiz Henrique Costa. **Equivalência operacional entre equipamentos defletométricos – estudo de caso em rodovia localizada em Ouro Branco - MG.** Dissertação de mestrado profissional. Núcleo de Geotecnia – NUGEO. 174 p. Orientador: José Leomar Fernandes Júnior. Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP. Ouro Preto, outubro de 2012.

IGNATIUS, S. G. Solos tropicais: proposta de índice classificatório. **Solos e Rochas**, São Paulo, v. 14, p. 89-93. 1991.

LELIS, Thatiana A. **Influência da energia de compactação nas relações entre o módulo resiliente, CBR e resistência à compressão não confinada de solos da Zona da Mata norte de Minas Gerais.** Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. 123 p. Orientador: Cláudio Henrique de Carvalho Silva. Universidade Federal de Viçosa – UFV. Viçosa, abril de 2004.

MEDINA, Jacques de; MOTTA, Laura Maria Goretti da. **Mecânica dos pavimentos.** 3ª ed. 638 p. Rio de Janeiro: Interciência, 2015.

MELLO, Gabriela Sá Leitão de. **Avaliação da viabilidade da utilização do teste respirométrico de Bartha para determinar a biodegradação de hidrocarbonetos aromáticos polinucleares em solo tropical: caso do fenantreno.** Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Poli-USP. 177 p. Orientador: Dione Mari Morita. São Paulo, agosto de 2005.

PINTO, Carlos de Souza. **Curso básico de mecânica dos solos.** Em 16 aulas. 3ª ed. 367 p. São Paulo: Oficina de textos, 2006.

PRON’GILA. **Penetrômetro dinâmico DCP.** República da Angola. Disponível em: <<http://prongila.com/servicos-ensaios.php>>. Acesso em: abril de 2017.

REZENDE, Maria Elisa Borges; LEANDRO, Rodrigo Pires. **Propriedades Geotécnicas de Solos Superficiais de Uberlândia.** Faculdade de Engenharia Civil – FECIV. Universidade Federal de Uberlândia - UFU. 8 p. Uberlândia, 2010.

SACHET, T.; GONÇALVES, F. P. **Reciclagem *in situ* de bases granulares de pavimentos asfálticos.** Universidade de Passo Fundo – UPF. Teoria e Prática a Engenharia Civil, n.11, p. 31-42. Passo Fundo – RS, abril de 2008.

SANTOS, Roberto A. dos. **Comportamento anisotrópico de um solo lateríticos compactado**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Geotecnia. 147 p. Orientador: Edmundo Rogério Esquivel. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo – USP. São Carlos, dezembro de 2015.

STANCATI, G.; NOGUEIRA, J. B.; VILAR, O. M. **Ensaaios de laboratório em Mecânica dos Solos**. 208 p. Escola de Engenharia de São Carlos. Departamento de Geotecnia. São Carlos, 1981.

VARGAS, Milton. **Introdução à mecânica dos solos**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, Ed da Universidade de São Paulo, 1977.

ZICA, Elizeu da Silva. **Estudo comparativo entre energias de compactação do subleito para subsidiar projetos de pavimentação**. Dissertação de mestrado. 168 f. Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica. Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas. Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP. Geotecnia de Pavimentos. Orientador: Flávio Renato de Góes Padula. Ouro Preto, março de 2010.

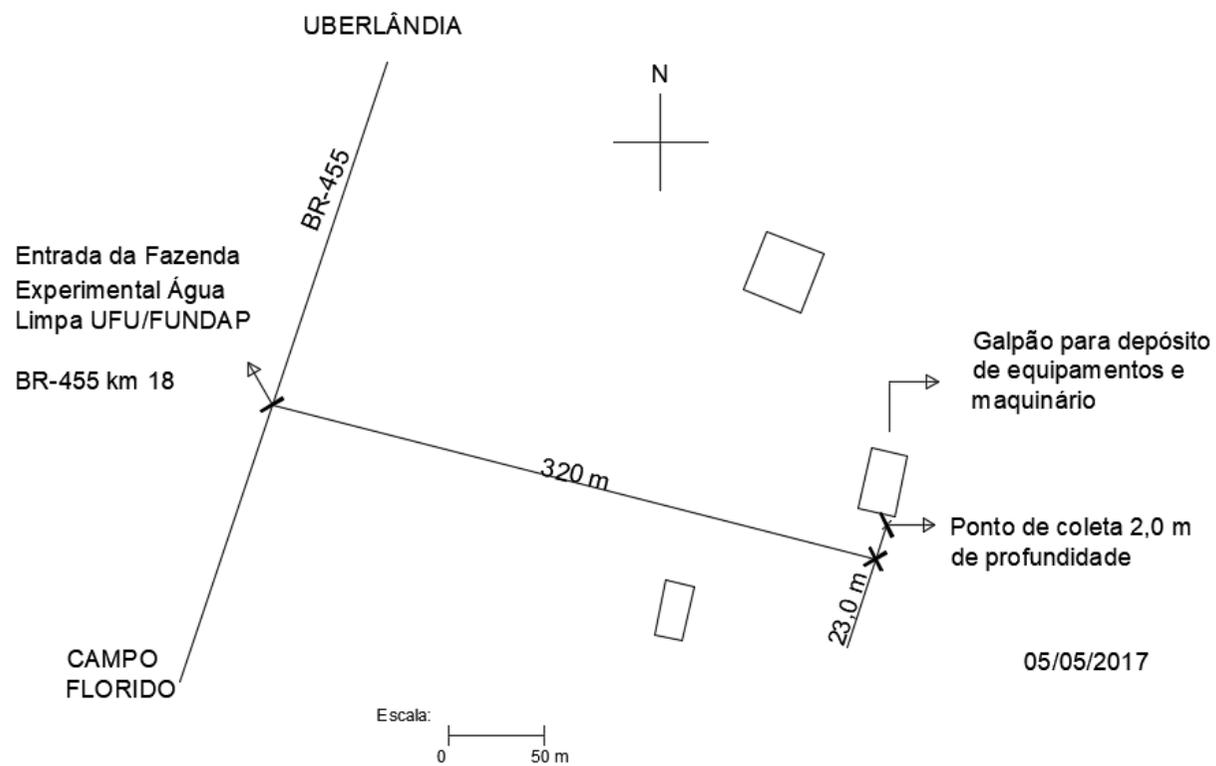
APÊNDICE A – Pontos de coleta de amostras

Figura A 1 - Local de coleta da amostra 1 no Campus Glória.



Fonte: autor (2017).

Figura A 2 -. Local de coleta da amostra 2 na Fazenda Experimental Água Limpa.



Fonte: autor (2017).

APÊNDICE B – Dados de ensaios de caracterização

Tabela B 1 – Sedimentação Amostra 1 – Campus Glória.

Tempo (min)	Leitura	T (°C)	$\mu \cdot 10^{-4}$ (Pa.s)	z (cm)	Leitura solução	D (mm)	P (< D) (%)
0,5	35,0	25,0	8,96	11,8	-2,6	0,068	88,61
1	34,5	25,0	8,96	11,9	-2,6	0,049	87,24
2	34,2	25,0	8,96	12,0	-2,6	0,034	86,42
4	34,1	25,0	8,96	12,0	-2,6	0,024	86,15
8	34,1	24,9	8,99	12,0	-2,7	0,017	86,08
15	34,0	24,9	8,99	12,0	-2,7	0,013	85,80
30	34,0	24,9	8,99	12,0	-2,7	0,009	85,80
60	33,9	24,8	9,01	12,0	-2,7	0,006	85,46
120	33,0	24,8	9,01	12,2	-2,7	0,004	83,00
240	32,7	24,7	9,03	12,3	-2,7	0,003	82,11
480	32,0	25,1	8,94	12,4	-2,6	0,002	80,47
1440	31,5	23,9	9,19	12,5	-2,9	0,001	78,28

Fonte: autor (2017).

Tabela B 2 – Sedimentação Amostra 2 – Fazenda Experimental Água Limpa.

Tempo (min)	Leitura	T (°C)	$\mu \cdot 10^{-4}$ (Pa.s)	z (cm)	Leitura solução	D (mm)	P (< D) (%)
0,5	23,0	24,6	9,05	14,2	-2,7	0,074	30,44
1	21,0	24,6	9,05	14,6	-2,7	0,053	27,44
2	19,5	24,6	9,05	14,9	-2,7	0,038	25,18
4	19,0	24,6	9,05	15,0	-2,7	0,027	24,43
8	19,0	24,5	9,07	15,0	-2,8	0,019	24,39
15	18,9	24,5	9,07	15,0	-2,8	0,014	24,24
30	18,9	24,4	9,09	15,0	-2,8	0,010	24,21
60	18,8	24,2	9,13	15,0	-2,8	0,007	23,98
120	18,6	24,1	9,15	15,1	-2,9	0,005	23,65
240	18,4	24,5	9,07	15,1	-2,8	0,003	23,49
480	18,0	26,0	8,77	15,2	-2,4	0,002	23,47
1440	17,5	24,5	9,07	15,3	-2,8	0,001	22,14

Fonte: autor (2017).

Tabela B 3 – Peneiramento fino – Amostra 1 Campus Glória

Nº peneira	Diâmetro (mm)	Peso do solo seco (g)		% passante
		Retido acum.	Passado	
16	1,2	0,05	62,82	99,92
30	0,6	0,44	62,43	99,30
40	0,42	1,44	61,43	97,71
60	0,25	4,00	58,87	93,64
100	0,15	5,85	57,02	90,69
200	0,075	7,44	55,43	88,17

Fonte: autor (2017).

Tabela B 4 – Peneiramento fino – Amostra 2 Fazenda Experimental Água Limpa

Nº peneira	Diâmetro (mm)	Peso do solo seco (g)		% passante
		Retido acum.	Passado	
16	1,2	0,43	111,97	98,37
30	0,6	1,36	111,04	97,54
40	0,42	4,54	107,86	94,71
60	0,25	20,70	91,70	80,33
100	0,15	44,69	67,71	58,99
200	0,075	72,89	39,51	33,90

Fonte: autor (2017).

APÊNDICE C – Dados dos ensaios de compactação

Tabela C 1 – Compactação Proctor Normal da amostra 1.

Cilindro N°	2			2			2			2			2		
TEOR DE UMIDADE															
Cápsula N°	280	157	222	4	163	83	157	222	118	271	39	278	222	280	184
Tara (g)	15,62	15,35	15,93	10,14	14,86	11,23	15,36	15,94	16,00	15,39	12,40	15,22	15,94	15,63	14,25
Massa úmida (g)	33,48	30,10	33,77	28,37	31,51	25,22	31,23	32,07	32,80	31,60	28,56	33,94	30,12	34,16	29,45
Massa seca (g)	29,88	27,05	30,96	24,37	27,96	22,22	27,47	28,26	28,90	27,52	24,48	29,28	26,37	29,27	25,43
Umidade (%)	25,25	26,07	18,70	28,11	27,10	27,30	31,05	30,93	30,23	33,64	33,77	33,14	35,95	35,85	35,96
Umidade média (%)	25,66			27,50			30,74			33,52			35,92		
MASSA ESPECÍFICA SECA															
Tara (g)	2387,6			2387,4			2387,4			2387,6			2387,6		
Tara + Solo (g)	3852,8			4051,2			4192,8			4178,6			4131,2		
Solo (g)	1465,2			1663,8			1805,4			1791,0			1743,6		
M. esp. (g/cm ³)	1,481			1,682			1,825			1,810			1,762		
M. esp. seca (g/cm ³)	1,179			1,319			1,396			1,356			1,297		

Fonte: autor (2017).

Tabela C 2 – Compactação Proctor Internormal da amostra 1.

Cilindro N°	2			2			2			2					
TEOR DE UMIDADE															
Cápsula N°	157	253	280	168	163	155	162	290	276	222	14	235	14	235	222
Tara (g)	15,38	15,09	15,67	14,86	14,86	13,22	13,78	15,93	15,48	15,94	15,48	15,86	15,48	15,86	15,94
Massa úmida (g)	25,69	27,08	29,39	28,40	28,89	25,38	28,00	29,19	28,23	31,70	30,11	27,82	28,70	28,92	30,53
Massa seca (g)	23,69	24,80	26,73	25,68	26,09	22,95	24,99	26,37	25,47	28,07	26,76	25,04	25,33	25,62	26,85
Umidade (%)	24,07	23,48	24,05	25,14	24,93	24,97	26,85	27,01	27,63	29,93	29,70	30,28	34,21	33,81	33,73
Umidade média (%)	23,77			25,02			27,16			29,97			33,92		
MASSA ESPECÍFICA SECA															
Tara (g)	2387,2			2387,2			2387,0			2387,2			2387,0		
Tara + Solo (g)	3850,0			4010,2			4185,6			4219,0			4170,8		
Solo (g)	1462,8			1623,0			1798,6			1831,8			1783,8		
M. esp. (g/cm ³)	1,479			1,641			1,818			1,852			1,803		
M. esp. seca (g/cm ³)	1,195			1,312			1,430			1,425			1,346		

Fonte: autor (2017).

Tabela C 3– Compactação Proctor Intermediário da amostra 1.

Cilindro N°	2			2			2			2			2		
TEOR DE UMIDADE															
Cápsula N°	68	87	83	235	209	157	162	276	14	235	155	290	253	168	222
Tara (g)	10,61	10,94	11,28	15,86	14,39	15,36	13,77	15,48	15,48	15,86	13,23	15,92	15,08	14,82	15,94
Massa úmida (g)	22,98	24,77	25,01	33,75	26,10	28,96	29,49	25,45	28,46	26,59	26,73	31,73	27,58	26,90	30,01
Massa seca (g)	20,70	22,26	22,45	30,11	23,69	26,18	25,24	23,28	25,64	24,17	23,65	28,2	24,62	24,07	26,67
Umidade (%)	22,60	22,17	22,92	25,54	25,91	25,69	37,05	27,82	27,76	29,12	29,56	28,75	31,03	30,59	31,13
Umidade média (%)	22,38			25,72			27,79			29,14			30,92		
MASSA ESPECÍFICA SECA															
Tara (g)	2386,8			2386,8			2386,6			2386,7			2387,0		
Tara + Solo (g)	3871,3			4183,8			4252,8			4253,4			4208,3		
Solo (g)	1484,5			1797,0			1866,2			1866,7			1821,3		
M. esp. (g/cm ³)	1,501			1,816			1,886			1,887			1,841		
M. esp. seca (g/cm ³)	1,226			1,445			1,476			1,461			1,406		

Fonte: autor (2017).

Tabela C 4– Compactação Proctor Intermodificado da amostra 1.

Cilindro N°	2			2			2			2					
TEOR DE UMIDADE															
Cápsula N°	14	168	118	163	87	271	290	276	68	83	253	155	280	162	222
Tara (g)	15,48	14,86	16,00	14,86	10,93	15,39	15,92	15,47	10,61	11,23	15,09	13,23	15,63	13,77	15,94
Massa úmida (g)	24,41	21,39	26,43	27,54	26,33	29,06	33,46	29,15	22,29	22,82	29,41	29,6	23,46	29,23	27,39
Massa seca (g)	22,88	20,29	24,66	25,14	23,44	26,47	29,91	26,38	19,92	20,28	26,31	26,08	21,72	25,79	24,83
Umidade (%)	20,68	20,26	20,44	23,35	23,10	23,38	25,38	25,39	25,46	28,07	27,63	27,39	28,57	28,62	28,80
Umidade média (%)	20,47			23,27			25,42			27,70			28,66		
MASSA ESPECÍFICA SECA															
Tara (g)	2387,0			2387,0			2387,0			2387,0			2387,4		
Tara + Solo (g)	3880,2			4106,0			4246,8			4277,2			4258,4		
Solo (g)	1493,2			1719,0			1859,8			1890,2			1871,0		
M. esp. (g/cm ³)	1,509			1,738			1,880			1,911			1,891		
M. esp. seca (g/cm ³)	1,253			1,410			1,499			1,496			1,470		

Fonte: autor (2017).

Tabela C 5– Compactação Proctor Normal da amostra 2.

Cilindro N°	2			2			2			2					
TEOR DE UMIDADE															
Cápsula N°	157	130	162	16	276	206	271	280	222	173	194	118	39	271	118
Tara (g)	15,36	15,41	13,77	10,56	15,47	14,79	15,39	15,63	15,94	14,50	14,55	16	12,39	15,39	16,01
Massa úmida (g)	31,63	36,19	33,31	27,89	33,32	36,03	32,84	36,53	32,80	35,64	33,84	32,61	29,93	40,41	34,83
Massa seca (g)	30,30	34,51	31,73	26,28	31,64	34,03	30,93	34,22	30,95	33,01	31,46	30,59	27,56	36,97	32,33
Umidade (%)	8,90	8,80	8,80	10,24	10,39	10,40	12,29	12,43	12,33	14,21	14,07	13,85	15,62	15,94	15,32
Umidade média (%)	8,83			10,34			12,35			14,04			15,63		
MASSA ESPECÍFICA SECA															
Tara (g)	2387,6			2387,8			2387,6			2387,6			2390,2		
Tara + Solo (g)	4241,8			4382,8			4483,6			4480,2			4457,2		
Solo (g)	1854,2			1995,0			2096,0			2092,6			2067,0		
M. esp. (g/cm ³)	1,874			2,017			2,119			2,115			2,089		
M. esp. seca (g/cm ³)	1,722			1,828			1,886			1,855			1,807		

Fonte: autor (2017).

Tabela C 6– Compactação Proctor Internormal da amostra 2.

Cilindro N°	2			2			2			2			2		
TEOR DE UMIDADE															
Cápsula N°	118	278	222	168	235	14	163	184	155	39	168	83	100	41	12
Tara (g)	15,01	15,22	15,94	14,86	15,86	15,48	14,86	14,25	13,22	12,39	14,85	11,24	12,24	12,44	12,76
Massa úmida (g)	32,95	36,69	37,93	32,02	33,85	35,20	33,71	25,48	30,95	37,51	29,37	30,02	28,26	28,10	36,97
Massa seca (g)	31,87	35,32	36,52	30,62	32,35	33,59	31,68	24,25	28,89	34,35	27,51	27,64	26,82	26,60	34,71
Umidade (%)	6,41	6,82	6,85	8,88	9,10	8,89	12,07	12,30	13,15	14,39	14,69	14,51	9,88	10,59	10,30
Umidade média (%)	6,69			8,96			12,51			14,53			10,26		
MASSA ESPECÍFICA SECA															
Tara (g)	2387,2			2387,2			2387,6			2387,4			2386,6		
Tara + Solo (g)	4016,2			4314,0			4499,4			4474,2			4425,0		
Solo (g)	1629,0			1926,8			2111,8			2086,8			2038,4		
M. esp. (g/cm ³)	1,647			1,948			2,135			2,109			2,060		
M. esp. seca (g/cm ³)	1,543			1,788			1,897			1,842			1,869		

Fonte: autor (2017).

Tabela C 7– Compactação Proctor Intermediário da amostra 2.

Cilindro N°	2			2			2			2			2		
TEOR DE UMIDADE															
Cápsula N°	87	68	39	4	278	222	118	235	271	211	280	157	184	83	39
Tara (g)	10,94	10,61	15,48	10,14	15,22	15,94	16,01	15,86	15,39	14,55	15,63	15,36	14,25	11,24	12,39
Massa úmida (g)	28,36	26,77	33,87	30,18	32,07	34,64	30,03	32,49	27,47	34,84	38,20	36,07	30,88	27,13	36,05
Massa seca (g)	27,27	25,74	32,71	28,55	30,71	33,16	28,70	30,90	26,31	32,43	35,72	33,76	28,85	25,21	33,21
Umidade (%)	6,67	6,81	6,73	8,85	8,78	8,59	10,48	10,57	10,62	13,48	12,34	12,55	13,90	13,74	13,64
Umidade média (%)	6,74			8,74			10,56			12,45			13,76		
MASSA ESPECÍFICA SECA															
Tara (g)	2387,6			2387,4			2387,4			2387,4			2387,4		
Tara + Solo (g)	4084,6			4390,0			4499,2			4550,6			4507,4		
Solo (g)	1697,0			2002,6			2111,8			2163,2			2120,0		
M. esp. (g/cm ³)	1,715			2,024			2,135			2,187			2,143		
M. esp. seca (g/cm ³)	1,607			1,862			1,931			1,945			1,884		

Fonte: autor (2017).

Tabela C 8– Compactação Proctor Intermodificado da amostra 2.

Cilindro N°	2			2			2			2			2		
TEOR DE UMIDADE															
Cápsula N°	185	62	194	259	162	276	182	195	253	260	243	174	292	208	246
Tara (g)	14,51	10,67	14,55	14,79	13,77	15,47	14,86	16,61	15,08	15,06	15,53	14,90	15,47	14,30	14,79
Massa úmida (g)	27,97	25,86	30,71	33,27	30,22	33,34	35,86	37,59	34,13	37,01	32,32	32,19	37,90	31,31	33,76
Massa seca (g)	27,11	24,90	29,69	31,79	28,92	31,90	33,82	35,51	32,26	34,73	30,55	30,38	35,05	29,16	31,35
Umidade (%)	6,83	6,75	6,74	8,71	8,58	8,76	10,76	11,01	10,88	11,59	11,78	11,69	14,56	14,47	14,55
Umidade média (%)	6,77			8,68			10,88			11,74			14,53		
MASSA ESPECÍFICA SECA															
Tara (g)	2387,2			2387,2			2387,2			2387,0			2387,0		
Tara + Solo (g)	4171,4			4434,2			4588,0			4586,8			4499,6		
Solo (g)	1784,2			2047,0			2200,8			2199,8			2112,6		
M. esp. (g/cm³)	1,804			2,069			2,225			2,224			2,135		
M. esp. seca (g/cm³)	1,689			1,904			2,006			1,990			1,865		

Fonte: autor (2017).

APÊNDICE D – Dados dos ensaios de CBR

Tabela D 1 – CBR da amostra 1 no ponto ótimo da energia Proctor Normal.

Tempo (min)	Penetr. (mm)	Carga (mm)	Carga (kgf)	Pressão (MPa)
0	0,000	0,000	0,0	0,00
0,5	0,599	0,006	9,2	0,05
1	1,379	0,016	24,2	0,13
1,5	2,014	0,023	35,9	0,19
2	2,639	0,030	46,8	0,24
2,5	3,269	0,035	54,6	0,28
3	3,899	0,040	61,9	0,32
3,5	4,529	0,044	67,8	0,35
4	5,129	0,046	71,9	0,37
5	6,409	0,052	81,2	0,42
6	7,659	0,056	87,3	0,45
7	8,934	0,061	95,4	0,49
8	10,184	0,066	103,3	0,53
9	11,479	0,072	111,4	0,58
10	12,709	0,077	119,6	0,62

Fonte: autor (2017)

Tabela D 2 – CBR da amostra 1 no ponto ótimo da energia Proctor Internormal.

Tempo (min)	Penetr. (mm)	Carga (mm)	Carga (kgf)	Pressão (MPa)
0	0,000	0,000	0,0	0,00
0,5	0,451	0,026	40,5	0,21
1	1,081	0,066	102,9	0,53
1,5	1,716	0,079	122,4	0,63
2	2,381	0,088	137,5	0,71
2,5	3,011	0,097	151,5	0,78
3	3,691	0,107	166,8	0,86
3,5	4,361	0,118	183,1	0,95
4	4,951	0,126	195,6	1,01
5	6,111	0,141	219,0	1,13
6	7,341	0,151	235,4	1,22
7	8,681	0,171	266,5	1,38
8	9,966	0,186	289,8	1,50
9	11,121	0,199	310,2	1,61
10	12,341	0,212	329,8	1,71

Fonte: autor (2017)

Tabela D 3 – CBR da amostra 1 no ponto ótimo da energia Proctor Intermediário.

Tempo (min)	Penetr. (mm)	Carga (mm)	Carga (kgf)	Pressão (MPa)
0	0,000	0,000	0,0	0,00
0,5	0,590	0,010	14,8	0,08
1	1,165	0,022	34,3	0,18
1,5	1,790	0,038	58,8	0,30
2	2,440	0,053	82,6	0,43
2,5	3,095	0,065	100,5	0,52
3	3,750	0,072	112,2	0,58
3,5	4,425	0,079	123,0	0,64
4	5,035	0,086	134,4	0,70
5	6,200	0,099	154,6	0,80
6	7,450	0,121	188,3	0,97
7	8,775	0,132	206,2	1,07
8	10,075	0,150	233,0	1,21
9	11,225	0,160	248,6	1,29
10	12,46	0,180	281,2	1,46

Fonte: autor (2017)

Tabela D 4 – CBR da amostra 1 no ponto ótimo da energia Proctor Intermodificado.

Tempo (min)	Penetr. (mm)	Carga (mm)	Carga (kgf)	Pressão (MPa)
0	0,000	0,000	0,0	0,00
0,5	0,599	0,008	12,5	0,06
1	1,189	0,028	43,6	0,23
1,5	1,794	0,060	92,7	0,48
2	2,424	0,087	135,6	0,70
2,5	2,989	0,106	165,4	0,86
3	3,624	0,119	185,5	0,96
3,5	4,244	0,133	207,3	1,07
4	4,889	0,147	228,7	1,18
5	6,194	0,175	272,8	1,41
6	7,444	0,203	316,4	1,64
7	8,624	0,228	355,7	1,84
8	9,899	0,258	401,8	2,08
9	11,189	0,284	441,9	2,29
10	12,434	0,311	484,8	2,51

Fonte: autor (2017)

Tabela D 5 – CBR da amostra 2 no ponto ótimo da energia Proctor Normal.

Tempo (min)	Penetr. (mm)	Carga (mm)	Carga (kgf)	Pressão (MPa)
0	0,000	0,000	0,0	0,00
0,5	0,569	0,009	14,0	0,07
1	1,139	0,020	30,9	0,16
1,5	1,744	0,031	48,3	0,25
2	2,379	0,046	71,2	0,37
2,5	3,034	0,063	98,2	0,51
3	3,659	0,081	126,3	0,65
3,5	4,314	0,101	157,4	0,81
4	4,919	0,125	194,8	1,01
5	6,024	0,158	245,5	1,27
6	7,294	0,193	300,0	1,55
7	8,664	0,227	353,8	1,83
8	9,844	0,262	407,6	2,11
9	10,984	0,293	456,7	2,36
10	12,239	0,327	509,7	2,64

Fonte: autor (2017)

Tabela D 6 – CBR da amostra 2 no ponto ótimo da energia Proctor Internormal.

Tempo (min)	Penetr. (mm)	Carga (mm)	Carga (kgf)	Pressão (MPa)
0	0	0,000	0,0	0,00
0,5	0,219	0,043	67,0	0,35
1	0,688	0,077	120,0	0,62
1,5	1,343	0,118	183,9	0,95
2	1,988	0,163	254,1	1,32
2,5	2,588	0,203	315,6	1,63
3	3,238	0,235	366,3	1,90
3,5	3,903	0,263	409,9	2,12
4	4,493	0,282	438,8	2,27
5	5,608	0,321	500,3	2,59
6	6,853	0,363	565,8	2,93
7	8,118	0,402	626,6	3,24
8	9,368	0,443	689,7	3,57
9	10,473	0,480	748,2	3,87
10	11,738	0,520	809,7	4,19

Fonte: autor (2017)

Tabela D 7 – CBR da amostra 2 no ponto ótimo da energia Proctor Intermediário.

Tempo (min)	Penetr. (mm)	Carga (mm)	Carga (kgf)	Pressão (MPa)
0	0,000	0,000	0,0	0,00
0,5	0,089	0,053	82,6	0,43
1	0,544	0,136	212,0	1,10
1,5	1,139	0,225	350,7	1,82
2	1,764	0,308	480,1	2,48
2,5	2,374	0,390	607,9	3,15
3	2,939	0,453	706,1	3,65
3,5	3,524	0,517	805,8	4,17
4	4,064	0,569	886,9	4,59
5	5,279	0,646	1006,9	5,21
6	6,589	0,705	1098,1	5,68
7	7,829	0,753	1172,9	6,07
8	8,989	0,797	1242,3	6,43
9	10,209	0,821	1278,9	6,62
10	11,579	0,826	1286,7	6,66

Fonte: autor (2017)

Tabela D 8 – CBR da amostra 2 no ponto ótimo da energia Proctor Intermodificado.

Tempo (min)	Penetr. (mm)	Carga (mm)	Carga (kgf)	Pressão (MPa)
0	0,000	0,000	0,0	0,00
0,5	0,321	0,060	93,5	0,48
1	0,856	0,168	261,9	1,36
1,5	1,486	0,292	455,1	2,36
2	2,066	0,415	646,9	3,35
2,5	2,621	0,540	841,7	4,36
3	3,131	0,655	1020,9	5,28
3,5	3,641	0,762	1187,7	6,15
4	4,196	0,860	1340,5	6,94
5	5,416	1,036	1614,8	8,36
6	6,586	1,175	1831,5	9,48
7	7,756	1,266	1973,3	10,21
8	8,971	1,290	2010,7	10,41
9	10,29	1,297	2021,6	10,46
10	11,586	1,291	2012,3	10,42

Fonte: autor (2017)