



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA  
CAMPUS VIII  
CENTRO CIÊNCIAS, TECNOLOGIA E SAÚDE  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**MARIA JOSIELE LOPES GOMES**

**COMPACTAÇÃO DOS SOLOS: O EFEITO DA ENERGIA DE COMPACTAÇÃO  
EM UMA ABORDAGEM EXPERIMENTAL**

**ARARUNA-PB  
2018**

**MARIA JOSIELE LOPES GOMES**

**COMPACTAÇÃO DOS SOLOS: O EFEITO DA ENERGIA DE COMPACTAÇÃO  
EM UMA ABORDAGEM EXPERIMENTAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

**Área de concentração:** Geotecnia.

**Orientador:** Prof. Me Alan Barbosa Cavalcanti.

**ARARUNA- PB  
2018**

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

G633c Gomes, Maria Josiele Lopes.  
Compactação dos solos [manuscrito] : o efeito da energia de compactação em uma abordagem experimental / Maria Josiele Lopes Gomes. - 2018.  
42 p. : il. colorido.  
Digitado.  
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências, Tecnologia e Saúde , 2018.  
"Orientação : Prof. Me. Alan Barbosa Cavalcanti ,  
Coordenação do Curso de Engenharia Civil - CCTS."  
1. Análise de solos. 2. Engenharia. 3. Compactação de solos . I. Título  
21. ed. CDD 624.151 4

MARIA JOSIELE LOPES GOMES

COMPACTAÇÃO DOS SOLOS: O EFEITO DA ENERGIA DE COMPACTAÇÃO EM  
UMA ABORDAGEM EXPERIMENTAL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Curso de Graduação em Engenharia Civil  
da Universidade Estadual da Paraíba, como  
requisito parcial à obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Geotecnia.

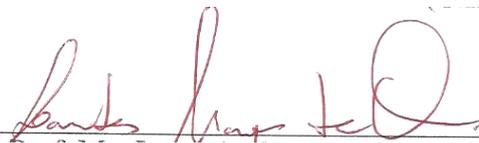
Aprovada em: 06/12/2018.

**BANCA EXAMINADORA**



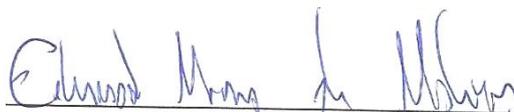
---

Prof. Me. Alan Barbosa Cavalcanti (Orientador)  
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



---

Prof. Me. Lauandes Marques de Oliveira  
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



---

Prof. Me. Eduardo Morais de Medeiros  
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

A Deus, o grande engenheiro do universo, pois tudo é dele e para ele, DEDICO.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, o responsável e razão de tudo, pois sem ele nada disso teria sido possível.

Aos meus pais Roberto e Maria, minha base, que sempre estiveram a me apoiar, aconselhando e tranquilizando, por todo amor e empenho a mim dedicado, essa vitória também é de vocês.

As minhas irmãs e sobrinhos, por terem estado ao meu lado dando-me forças. Em especial, a minha irmã Roberta, por sempre ter sido mais que uma irmã e, mesmo estando longe, nunca mediu esforços para me ajudar quando precisei.

Aos meus avós, tios, primos e cunhado, por toda contribuição dada nesse período, seja em uma carona ou nas palavras de incentivo.

Aos amigos que se tornaram família, me apoiando e compartilhando comigo os momentos vividos durante essa árdua caminhada. Também aos que mesmo não fazendo parte do curso contribuíram de alguma forma para minha formação.

Ao meu orientador, professor Me. Alan Barbosa Cavalcanti, por toda compreensão e suporte dado durante o desenvolvimento desse trabalho.

Aos engenheiros Paulo César Ferreira e Aldenir Negromonte por todo conhecimento compartilhado, me possibilitando aprender a prática da engenharia civil de forma ética, planejada, segura e competente.

A todos os professores que passaram na minha vida acadêmica, desde a escola até a graduação, em especial Rafael de Brito e Igor Ogata, por terem acreditado no meu potencial, até mesmo quando eu desacreditei.

A empresa PL&F Incorporadora, pela valorização desse trabalho em ter me possibilitado realizar as análises necessárias.

A direção, coordenação, técnicos e colaboradores do campus VIII da UEPB, que contribuíram direta ou indiretamente para minha formação, em especial ao técnico Divaldo Lima por toda atenção e suporte dado durante os ensaios necessários para realização desse estudo.

Por fim, agradeço a todos que passaram na minha vida durante essa trajetória e colaboraram de alguma forma para meu crescimento pessoal e profissional.

“Se você pode sonhar, você pode realizar.”

Walt Disney

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	7
<b>2.</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	9
2.1.	OBJETIVO GERAL .....	9
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	9
<b>3.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRAFICA</b> .....	9
3.1.	COMPACTAÇÃO DO SOLO.....	9
<b>3.1.1.</b>	<b>Tipo de solo</b> .....	10
3.1.1.1.	Classificação dos solos.....	10
<b>3.1.2.</b>	<b>Energia de compactação</b> .....	16
<b>3.1.3.</b>	<b>Teor de umidade</b> .....	17
3.2.	ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO.....	19
<b>3.2.1.</b>	<b>Ensaio de Laboratório (Método Proctor)</b> .....	20
<b>3.2.2.</b>	<b>Ensaio de campo</b> .....	21
<b>4.</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	23
4.1.	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SOLO .....	24
4.2.	CLASSIFICAÇÃO DO SOLO .....	25
4.3.	ENSAIO DE COMPACTAÇÃO (PROCTOR).....	25
4.4.	CURVAS .....	25
4.5.	COMPACTAÇÃO “ <i>IN SITU</i> ” .....	26
4.6.	CONFRONTAMENTO DOS RESULTADOS DE LABORATÓRIOS AOS OBTIDO “ <i>IN SITU</i> ” .....	26
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	27
5.1.	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E CLASSIFICAÇÃO DO SOLO .....	27
5.2.	ENSAIO DE COMPACTAÇÃO PROCTOR .....	29
5.3.	ENSAIO DE CAMPO .....	32
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	34
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	35

## COMPACTAÇÃO DOS SOLOS: O EFEITO DA ENERGIA DE COMPACTAÇÃO EM UMA ABORDAGEM EXPERIMENTAL

Maria Josiele Lopes Gomes\*

### RESUMO

A compactação apresenta alta significância para as diversas obras de engenharia, essa técnica atua em propriedades como resistência, permeabilidade e compressibilidade do solo. Em suma, a compactação sofre influência de três fatores principais: o tipo do solo, a energia de compactação e o teor de água, portanto, para se alcançar um melhor aproveitamento desse processo, torna-se imprescindível conhecê-los, assim como os efeitos que exercem sobre o solo. O presente trabalho buscou, através do confrontamento de experimentos realizados em laboratório e em campo, definir a melhor energia a ser empregada para compactação de um determinado solo, além de demonstrar, a partir do efeito desse parâmetro no comportamento geotécnico do material, sua importância para o resultado da compactação. Assim, em laboratório foram ensaiadas amostras para as energias normal, intermediária e modificada, estabelecidas pela norma DNIT – ME 164/2013 e em campo executou-se testes de densidade e umidade ao fim de 4, 6 e 8 passagens de rolo pé de carneiro, essas análises procederam-se em um aterro com finalidade de regularização de via executado em um condomínio situado no município de Bananeiras/PB. O estudo procurou ainda gerar informações como a classificação e a curva de saturação do solo, a fim de demonstrar a influência do tipo de solo e do teor de água nesse processo. Determinando através das análises dos resultados a energia intermediária como a mais eficiente para compactação do solo, que se classificou como uma areia argilosa, sendo aplicada no aterro em 6 passagens de rolo a uma umidade de aproximadamente 14%.

**Palavras-Chave:** Comportamento Geotécnico. Tipo de solo. Energia de compactação. Teor de Umidade.

### 1. INTRODUÇÃO

Devido aos efeitos na estabilização dos solos, a técnica de compactação, apesar de ser um procedimento simples, apresenta alta relevância para obras de pavimentação, barragens e aterros (MAGALHÃES, 2012). Essa técnica é realizada com a finalidade de evitar problemas como ruptura de taludes e barragens, assim como, recalques excessivos em aterros e rodovias. O procedimento de compactação foi difundido em 1933, quando o

---

\* Aluno de Graduação em Engenharia Civil na Universidade Estadual da Paraíba – Campus VIII.  
Email: mjlgomes@outlook.com

engenheiro norte-americano Ralph R. Proctor desenvolveu o método para controle de compactação de aterros.

A compactação pode ser definida como uma operação destinada a reduzir o volume de vazios de um solo por procedimento manual ou mecanizado, com o intuito de aumentar a sua massa específica, estabilidade e resistência (ARTERIS ES 108, 2015). E enfatiza-se, como citado em Souza (2014), que uma consequência clara do processo de compactação é a redução de sua permeabilidade e compressibilidade.

Silva (2008) sugere que “O nível desejado de compactação é melhor alcançado pela combinação do tipo de solo com o método de compactação adequado.” Por conseguinte, é de suma importância para a eficácia do processo, que se compreendam e se determine adequadamente alguns fatores que afetam a compactação em campo de determinado tipo de solo. Esses fatores, conforme Magalhães (2012), são o teor de umidade, o número de passagens do cilindro (energia aplicada), a espessura da camada compactada e as características do equipamento compactador.

Em seu estudo, Gurgel (2013) propõe que o efeito da energia de compactação na estrutura e nas propriedades geotécnicas dos solos compactados, seja ela de impacto, vibração, compressão estática ou dinâmica, é fundamental para o entendimento do comportamento dos materiais durante a vida útil da obra.

Atualmente no Brasil, as energias de compactação, geralmente usadas para obras de pavimentação rodoviária, seguem as determinações do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), antigo Departamento Nacional de Estradas e Rodagens (DNER).

O método de correlação do teor de umidade e da massa específica aparente do solo seco, determinado pela norma técnica DNIT-ME 164/2013, estabelece três níveis de energias de compactação: normal, intermediária e modificada.

A necessidade de aplicar energias de compactação diferentes para se obter as mesmas características em solos distintos, torna imprescindível a especificação de uma energia de compactação que leve em consideração a natureza dos solos e as propriedades geotécnicas desejadas para esses materiais após o processo de compactação (SANTOS, 2012).

Com tudo isso, é notória a importância para o controle da obra, a realização de experimentos a fim de determinar a energia necessária para se alcançar um grau de compactação esperado. Isso possibilita otimizar o uso dos equipamentos de compactação e define os valores mais convenientes para o número de passagens do cilindro, o teor em água do solo e espessura das camadas.

Conforme supracitado, foi acompanhado e analisado o processo da técnica de compactação em um aterro para via localizado no município de Bananeiras/PB. Os dados coletados *in situ* foram confrontados com análises de laboratório, visando correlacionar a influência da energia de compactação com as características finais do solo compactado.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GERAL**

Analisar a influência da energia de compactação no comportamento geotécnico do solo através de ensaios realizados em laboratório e “*in situ*”.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Caracterizar e classificar o solo em estudo;
- Traçar as curvas de compactação para os níveis de energia normal, intermediário e modificado e a curva de saturação do solo;
- Estabelecer o teor de umidade ótima e massa específica aparente máxima do solo seco;
- Realizar análises do comportamento do solo quando compactado “*in situ*” com diferentes passagens de rolo;
- Comparar os resultados de laboratórios aos obtidos “*in situ*”.

## **3. REVISÃO BIBLIOGRAFICA**

### **3.1. COMPACTAÇÃO DO SOLO**

Caputo (1975) define compactação como o processo manual ou mecânico que busca diminuir o volume de vazios do solo, elevando sua resistência tornando-o mais estável. Essa redução de volume se dá pela expulsão de ar dos vazios do solo, sem que haja significativas alterações do teor de umidade e volume das partículas sólidas durante o processo.

Esse processo, quando mecânico, requer o uso de equipamentos que são empregados em função do tipo de solo a ser compactado, como cilindros de pés de carneiro, que são indicados para solos argilosos; cilindros de pneus, usados em uma vasta variedade de solos;

cilindros de rastos lisos, mais apropriados para solos granulares e cilindros vibradores que, por sua vez, são utilizados em materiais granulares. (RIBEIRO, 2015)

Em seus estudos, Proctor (1933) aponta que o resultado da compactação do solo depende de três fatores determinantes: o tipo de solo; o teor de umidade e a energia de compactação.

### 3.1.1. Tipo de solo

Silva (2008), ao estudar a compactação de solos, destacou a importância de se conhecer o tipo de solo para melhor resultado na aplicação de uma energia de compactação, nesse trabalho o autor fez a seguinte afirmação:

A constituição de um solo determina o melhor método de compactação a ser utilizado. Cada tipo de solo se comporta diferentemente com respeito à densidade máxima e umidade ótima. Então, cada tipo de solo tem suas exigências e controles próprios e individuais, tanto no campo como para fins de testes. (SILVA, 2008. p. 17)

Portanto, é nítida a significância de se classificar o solo ao qual se trabalha, para assim poder otimizar o processo da compactação.

#### 3.1.1.1. Classificação dos solos

Conforme Cavalcanti (2018), classificar um solo trata-se de enquadrá-lo em um determinado grupo de características e propriedades geotécnicas análogas. A classificação do solo se dá através de fatores como a sua origem, comportamento e dimensões das suas partículas.

A respeito da origem, denomina-se solos residuais quando formados por produtos do intemperismo no seu lugar de origem e, quando originados à medida que são transportados, são classificados em vários grupos, de acordo com seu modo de transporte e de deposição (solos glaciais, aluviais, lacustres, marinhos, eólicos e coluviais) (DAS, 2007).

Pinto (2006) expressa que, de acordo com seu comportamento, os solos podem ser separados em três grupos básicos: solos coesivos (formados por partículas menores e compactação mais complexa), granulares (possuem tamanho de partícula maior e são muito

aproveitáveis por suas propriedades de drenagem de água) e orgânicos (solos que contêm quantidade apreciável de matéria decorrente de decomposição de origem vegetal ou animal, em vários estágios de decomposição).

Enquanto Santos (2012) afirma, acerca da sua granulometria, que o solo pode ser classificado por apresentar partículas do tamanho de argila, silte, areia, cascalho e, até mesmo, pedras. Onde a determinação da porcentagem de cada fração presente no solo é feita por meio de análise granulométrica, em que, dependendo da predominância do tipo de partícula, define-se o solo como argiloso, siltoso ou arenoso.

Segundo Ribeiro (2015), sendo os solos, especialmente quando argilosos, capazes de apresentar granulometria análoga e comportamentos completamente distintos, para classificação dos solos, é de suma importância a realização de ensaios para determinar os limites de Atterberg, além da análise granulométrica.

O tamanho das partículas constituintes do solo (granulometria) trata-se de um parâmetro usado na sua classificação, determinado pela passagem do mesmo através de uma série de peneiras para separar os diferentes tamanhos de grãos, denominada análise granulométrica (SILVA, 2008). Essa análise pode ser feita por meio de ensaios de peneiramento preconizada pela norma DNER- ME 080/94.

Os limites de consistência, também conhecidos como Limites de Atterberg consistem na determinação dos teores de umidade que margeiam os estados sólido, plástico ou líquido do solo, e assim estabelecer seus limites de liquidez e plasticidade, possibilitando avaliar a natureza de um solo e com isso prever seu comportamento.

**Limite de liquidez (LL):** corresponde ao teor em água existente no solo quando no fechamento de uma ranhura padrão sob 25 golpes no Aparelho de Casagrande (Figura 1), ocorrendo a passagem do estado plástico para o estado líquido (PIRES, 2011).

**Figura 1** – Limite de liquidez pelo método de Casagrande: (a) Execução da ranhura (b) Aparelho de casa grande durante o ensaio



Fonte: Próprio autor, 2018.

**Limite de plasticidade (LP):** é definido na norma NBR 7180 (ABNT, 1984) como “teor de umidade em que o solo começa a trincar ao ser moldado um cilindro com 3 milímetros de diâmetro rolando-se o solo com a palma da mão sobre uma placa de vidro esmerilhado”. Corresponde ao teor de umidade relativo à mudança do estado plástico para o estado sólido do solo. A moldagem do cilindro para a determinação desse parâmetro está ilustrada a seguir (Figura 2):

**Figura 2** – Moldagem do cilindro para o ensaio de limite de plasticidade



**Fonte:** Próprio autor, 2018.

**Índice de plasticidade (IP):** parâmetro definido como a diferença entre os limites de liquidez e plasticidade do solo (Equação 1).

$$IP = LL - LP \quad [1]$$

Segundo a norma rodoviária DNER – ME 082/94, quando o limite de liquidez ou de plasticidade do solo não puderem ser determinados, o índice de plasticidade do solo é zero e o solo é dito como não plástico (NP).

Existem sistemas de normatização que fornecem uma linguagem simplificada para apresentar as características gerais do solo, são exemplos desses sistemas a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), American Association for State Highway and Transportation Officials (AASHTO), American Society for Testing Materials (ASTM) e Comité Européen de Normalisation (CEN). A Tabela 1 apresenta as dimensões empregadas para classificação do solo segundo os sistemas supracitados.

Tabela 1 - Classificação das partículas do solo segundo a ABNT, AASHTO, ASTM e CEN.

<b>Partícula</b>	<b>ABNT (mm)</b>	<b>AASHTO (mm)</b>	<b>ASTM (mm)</b>	<b>CEN (mm)</b>
<b>Pedregulho</b>	2-60	2-60	4,75-60	2-20
<b>Areia</b>	0,06-2	0,075-2	0,075-4,75	0,02-2
<b>Silte</b>	0,002-0,06	0,005-0,075	0,005-0,075	0,002-0,02
<b>Argila</b>	<0,002	0,001-0,005	0,001-0,005	< 0,002

Fonte: Santos, 2012

Apesar dos vários sistemas de classificação atualmente empregados, nenhum é totalmente cabível para todos os elementos e aplicações existentes. No entanto, mundialmente, os sistemas mais conhecidos são o sistema de classificação estabelecido pela AASTHO e o sistema unificado (SUCS). Descritos a seguir:

- ***Sistema de Classificação Rodoviário (AASTHO)***

Elaborado, em suma, para classificação dos subleitos de rodovias, o sistema de classificação rodoviário (AASTHO) baseia-se nos limites de Atterberg e na granulometria do solo.

Moura e Godoy (2018) expõe em seu trabalho que nesse sistema os solos são apresentados em 7 grupos que se subdividem em 11 subgrupos de acordo com sua granulometria (Anexo A). os subgrupos são separados ainda em duas categorias: a dos solos grossos, em que a porcentagem retida na peneira nº 200 é menor que 35%, e a dos solos finos, correspondente aos solos que tem mais de 35% dos grãos passantes na peneira nº 200. O autor ainda apresenta em seu trabalho que os solos grossos se dividem em três grupos, A1 (solos granulares sem finos), A2 (solos granulares com finos) e A3 (areia finas).

Os solos finos são subdivididos em quatro grupos: A4 (solos siltosos com pequena quantidade de material grosso e de argila), A5 (solos siltosos com pequena quantidade de material grosso e argila, rico em mica e diatomita), A6 (argilas siltosas medianamente plásticas com pouco ou nenhum material grosso) e A7 (argilas plásticas com presença de matéria orgânica).

Através da porcentagem de material passante na peneira nº 200 (0,075 mm de abertura) e dos Limites de Atterberg (LL e IP), é possível determinar outro parâmetro usado no sistema de classificação da AASTHO, o índice de grupo (IG), que segundo Montor (2015) define a capacidade de suporte do terreno de fundação de um pavimento.

O IG é um número inteiro variável de 0 a 20, que categoriza o solo segundo suas capacidades. Quanto maior o índice de grupo pior o solo, desta maneira o IG= 0 representa os solos ótimos e IG = 20 solos péssimos. Solos granulares geralmente apresentam IG entre 0 e 4, já os siltosos tem compreendidos entre 1 e 12 e os argilosos entre 13 e 20 (CORRÊA, 2015).

A determinação desse parâmetro é dada pela seguinte expressão (Equação 2):

$$IG = 0,2 a + 0,005 \times a \times c + 0,01 \times b \times d \quad [2]$$

Sendo:

a = Pp 200 - 0,35 (porcentagem do solo passante na peneira nº 200 menos 35%, onde  $0 \leq a \leq 40$ );

b = Pp 200 - 0,15 (porcentagem do solo que passa na peneira nº 200 menos 15%, sendo  $0 \leq b \leq 40$ );

c = LL - 0,4 (Limite de liquidez do solo menos 40%, onde  $0 \leq c \leq 20$ );

d = IP - 0,1 (Índice de plasticidade-10%, estando “d” entre 0 e 20)

Adotando-se, a = 0, b = 0, c = 0, assim como, d = 0, quando seus valores forem negativos, a = 40 e b = 40, c = 20 e d = 20, quando a > 40, b > 40, c > 20 e d > 20, respectivamente.

- ***Sistema Unificado de classificação (SUCS)***

O SUCS, elaborado por Arthur Casagrande no início da década de 40, foi desenvolvido para ser utilizado em obras de aeroportos, porém, atualmente, vem sendo empregado principalmente em obras de barragens de terra.

Nesse método de classificação o solo é categorizado por 6 grupos: pedregulhos (G), areias (S), siltes inorgânicos e areias finas (M), argilas inorgânicas (C), e siltes e argilas orgânicos (O), o símbolo Pt é utilizado para turfa, terra preta e outros solos altamente orgânicos. Sendo cada grupo dividido em subgrupos, que de acordo com as características mais significativas, são definidos como: bem- graduados (W), mal graduado (P), baixa plasticidade (L) e alta plasticidade (H). (PIRES, 2011)

De acordo com Almeida (2005), no sistema unificado SUCS, os solos são ainda classificados em três grandes grupos: os solos grossos (pedregulhos, areias, solos pedregulhosos ou arenosos com pouca quantidade de finos, correspondendo aos solos cuja

maioria absoluta dos grãos apresentam diâmetros maiores que 0,075 mm), os finos (solos em que o diâmetro da maioria absoluta das partículas é menor que 0,075 mm, são estes os siltes e argilas) e as turfas (solos altamente orgânicos, em geral fibrilares e extremamente compressíveis). E, todos são identificados pelo conjunto de duas letras, em que a primeira indica o tipo principal de solo e a segunda indica suas características complementares. Assim como apresentado na Tabela 2.

**Tabela 2** - Classificação geral SUCS

<i>Classificação geral</i>	<i>Tipos principais</i>	<i>Símbolos</i>
<b>Solos Grossos</b> (menos que 50% passando nas peneiras nº 200)	Pedregulho ou solo pedregulhoso (G)	GW, GP, GC e GM
	Areia (S) ou solo arenoso	SW, SP, SC e SM
<b>Solos Finos</b> (mais que 50% passando nas peneiras nº 200)	Silte (M) ou argila (C)	Baixa compressibilidade (LL<50) ML, CL e OL
		Alta compressibilidade (LL>50) MH, CH, OH
<b>Solos altamente orgânicos</b>	Turfa	(Pt)

**Fonte:** Delgado, 2015.

O autor ainda diz que, quando denominado grosso, dependendo da predominância de suas frações granulométricas, o solo será classificado como pedregulho ou areia. Devendo ser classificados, ainda, como: bem graduados ou mal graduados.

Um solo bem graduado apresenta uma larga faixa de tamanhos de grãos, onde tem-se as partículas menores preenchendo os vazios existentes entre as partículas maiores, resultando em uma estrutura densa, favorável à compactação pois acarreta em uma menor compressibilidade e maior resistência. (SILVA, 2008).

De acordo com Sistema Unificado, Gurgel (2013) afirma que o pedregulho e a areia são considerados bem graduados quando apresentam coeficiente de curvatura ( $C_c$ ) entre 1 e 3 e coeficiente de uniformidade ( $C_u$ ) superior a 4 e 6, respectivamente. No entanto, a uniformidade da granulometria dos solos grossos, quando os mesmos dispõem de uma porcentagem de finos maior que 12%, passa a não os caracterizar, pois as propriedades dos finos exercem maior influência sobre o solo. Neste caso, os pedregulhos ou areias terão como classificação secundária como sendo argilosos (GC ou SC) ou siltosos (GM ou SM). Quando

os solos grossos apresentam de 5 a 12% de finos, é sugerido pelo SUCS que as características secundárias, uniformidade da granulometria e propriedade dos finos, sejam apresentadas. Classificando-os de forma intermediária.

Em sequência, o autor diz que, na predominância da fração fina, divide-se o solo em silte, argila ou solo orgânico e a classificação é feita em função da atividade da argila, tendo a compressibilidade como característica complementar. Os solos orgânicos são diferenciados dos siltes de forma visual, pois apresentam uma coloração escura típica.

Casagrande, em seus estudos, denotou que o comportamento desses solos é melhor demonstrado através dos limites de consistência, por meio da Carta de Plasticidade, gráfico que apresenta uma relação entre IP e LL, a qual ele chamou de linha A, que tem como equação  $IP = 0,73 \times (LL - 20)$  e é substituída no seu trecho inicial por uma faixa horizontal que corresponde a IP de 4 a 7. Quando os índices se aproximam muito das linhas considera-se um caso intermediário onde as duas classificações são apresentadas.

### 3.1.2. Energia de compactação

Em seus estudos Proctor desenvolveu um ensaio dinâmico, conhecido como ensaio Proctor Normal, que, por meio de uma energia potencial, possibilita a determinação da curva de compactação através da relação entre a massa específica aparente seca da amostra de solo passante na peneira 19 mm e o seu teor de umidade. (SOUZA JR,2005)

Com o surgimento de novos equipamentos de campo que permitiram o aumento da energia aplicada e velocidade do processo de compactação de aterros, surgiu a necessidade de criar ensaios com maiores energias que a empregada no ensaio de compactação Proctor Normal (CAVALCANTI,2018). Assim, mesmo mantendo o método de ensaio proposto por Proctor, através da Equação 3 é possível calcular diferentes energia para compactação:

$$E = \frac{PhNn}{V} \quad [3]$$

Onde:

P → Peso do Soquete (Kg);

H → Altura de Queda do Soquete (cm);

N → Número de Golpes por Camada;

n → Número de Camadas;

V → Volume de solo compactado (cm<sup>3</sup>).

A norma técnica DNIT 164/2013 estabelece três níveis de energia a ser utilizada no procedimento de compactação, são elas a energia normal, intermediária e modificada. Segundo Souza (2014), o que diferencia os tipos de energia é basicamente a variação de energia aplicada na compactação proveniente do maior número de golpes aferidos com o soquete, conforme mostra a Tabela 3.

**Tabela 3** - Parâmetros utilizados nos ensaios de compactação do DNIT.

<b>Ensaio</b>	<b>Nº de Camadas</b>	<b>Soquete</b>	<b>Nº de Golpes</b>	<b>Energia (kg.cm/ cm<sup>3</sup>)</b>
<b>Normal</b>	5	Grande	12	5,97
<b>Intermediário</b>	5	Grande	26	12,93
<b>Modificado</b>	5	Grande	55	27,35

**Fonte:** próprio autor, 2018.

Na especificação particular Arteris ES (2015), tem-se que a energia adotada na compactação deve ser a maior energia que o material empregado suporte diante as condições dos equipamentos utilizados. Esta, por sua vez, é de suma importância para o processo de compactação, pois define o ponto ótimo, ou seja, o ponto de maior capacidade de suporte do material.

Ralph Proctor (1993) propôs que a energia de compactação (energia potencial) varia em função da umidade em que o solo se encontra. Gerando um efeito de lubrificação entre as partículas sólidas que favorece a compactação, quando o solo se encontra com maior quantidade de água, provocando a acomodação dos grãos que deslizam com maior facilidade quando aplicada a energia, gerando um menor índice de vazios. Porém, a partir de um certo ponto a compactação não consegue expulsar o ar existente nos vazios, o grau de saturação torna-se elevado e os vazios encontram-se em forma de bolhas fechadas, sendo assim, a curva de compactação não poderá alcançar nunca a curva de saturação.

### 3.1.3. Teor de umidade

Segundo Santos (2012), o teor de umidade existente no solo durante o processo de compactação exerce influência direta na sua resistência e durabilidade. Além de estar diretamente ligado a massa específica do solo, resultante do processo de compactação.

Em seu trabalho, Pinto (2006) aborda o efeito do teor de umidade na eficiência do processo de compactação em relação a densidade do solo, atribuindo principalmente à atuação da umidade sobre o atrito existente entre os grãos. Ocorrendo uma redução das forças de capilaridade e das resistências ao atrito e ao cisalhamento do solo à medida que se acrescenta água, verificando-se um efeito de lubrificação entre as partículas, facilitando a saída do ar que se encontra no solo. Sendo, porém, prejudicada a redução dos vazios quando o solo apresenta umidades muito baixas, devido ao atrito entre as partículas ser alto.

De acordo com Souza Jr (2005), em um determinado teor de umidade, a água para de influenciar no arranjo das partículas e na de redução do atrito, passando a impedir a expulsão do ar, tornando a compactação ineficiente quanto ao aumento de densidade. De tal modo, para cada energia aplicada, existe uma densidade máxima possível de ser obtida e um teor de umidade correspondente, denominado umidade ótima. Concebendo-se, assim, uma relação ideal entre as porções líquida, sólida e gasosa do solo, representada pelo ponto de arqueamento da curva referente à energia aplicada no ensaio de compactação, onde se obtém a massa específica seca máxima.

Teor de umidade ( $w$ ) pode ser definido como o percentual equivalente a razão entre o peso da água ( $P_a$ ) contida em um certo volume de solo e o peso da parte sólida ( $P_s$ ) existente nesse mesmo volume (Almeida, 2005). Sendo, o peso da água existente na amostra de solo dado pela diferença entre o peso do solo úmido ( $P_w$ ) e o peso do solo seco ( $P_s$ ), já o teor de umidade revela-se pela relação entre essa diferença e o peso de sólidos ( $P_s$ ), como expresso pela Equação 4.

$$w = \frac{P_w - P_s}{P_s} \times 100 \quad [4]$$

Onde:

$w \rightarrow$  teor de umidade (%)

$P_w \rightarrow$  peso da massa de água (g)

$P_s \rightarrow$  peso dos sólidos (g)

Atualmente, há inúmeros métodos para determinação do teor de umidade do solo, dividindo-se em experimentos feitos em laboratório e os ensaios rápidos que podem ser executados em campo, como o método do “*speedy*”.

### 3.1.3.1. Método do “Speedy”

Segundo Silva (2008), a determinação da umidade do solo empregando esse método é realizada através da pressão do gás resultante da reação da água contida na amostra quando em contato com o carbureto de cálcio introduzido no o aparelho do “*speedy*”, (Figura 3).

**Figura 3** – Aparelho “*speedy*”.



**Fonte:** Próprio autor, 2018.

Este aparelho consiste num recipiente metálico fechado que se comunica com um manômetro destinado a medir a pressão interna quando uma determinada quantidade de solo, juntamente com esferas metálicas e uma porção de carbureto de cálcio, são inseridas no interior do recipiente, retornando o teor de umidade existente na amostra através da diferença de pressão devido a reação da água com o carbureto.

## 3.2. ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO

Atualmente, vários tipos de ensaios se dividem em procedimentos de campo (“*in situ*”) e de laboratório, um exemplo é o método de compactação Proctor, introduzido no Brasil pela ABNT, que apresenta várias formas e alternativas à realização desse ensaio e de outros, onde para cada um deles especifica-se o tipo de solo e a forma adequada de compactação. (Massad,2003).

### 3.2.1. Ensaio de Laboratório (Método Proctor)

O método de compactação Proctor Standard (Proctor Simples) baseia-se na aplicação de um número determinado de golpes de forma distribuída sobre as camadas de solo. De acordo com o método, compacta-se, em um molde cilíndrico padrão, várias amostras de solo com porcentagens crescentes de umidade, com um soquete de dimensões, peso e altura de queda especificados por norma. (Souza Jr, 2005)

Para execução do ensaio é utilizado compactador manual ou mecânico, controlando assim a energia de compactação utilizada. Ao fim de cada processo de compactação, a massa e o volume presentes no molde são registados para posteriormente sintetizar todo este trabalho num gráfico, a curva de compactação do solo. Neste gráfico, o eixo das coordenadas corresponde a porcentagem do teor de umidade do solo e o eixo das abcissas a massa específica seca do mesmo, o que possibilita facilmente se observar a umidade ótima ( $W_{otm}$ ) que corresponde à massa específica seca máxima. (Ribeiro,2015)

Segundo Santos (2008), para um determinado valor do grau de saturação há uma relação entre o teor em água ( $W$ ) e a massa específica seca ( $\gamma_s$ ) expressa pela Equação 5 e, portanto, representável na curva de compactação.

$$\gamma_s = \frac{d_s \gamma_h}{1 + \frac{d_s W}{S_r}} \quad [5]$$

Onde:

$\gamma_s$  → massa específica aparente do solo seco;

$\gamma_h$  → massa específica aparente da água;

$d_s$  → densidade das partículas sólidas;

$W$  → teor de água;

$S_r$  → Grau de saturação.

Sendo a curva de saturação o limite correspondente a absoluta expulsão do ar existente no solo, traduzida na Equação 5 para um grau de saturação de 100%.

### 3.2.2. Ensaio de campo

Em campo, no processo de compactação, são empregadas três formas de transmissão da energia: a pressão, o impacto e a vibração. Os equipamentos compactadores, empregados para realização desse processo, são divididos em três categorias: cilindro estáticos (compreendendo os cilindros de rasto liso de rodas de aço, os cilindros de pneus e os cilindros de pés de carneiro), cilindros vibradores (com as mesmas variantes da categoria anterior) e equipamentos de percussão. (Santos, 2008)

Segundo Ribeiro (2015), a compactação dos aterros é feita por camadas e cada uma é sujeita ao respectivo controle, associado ao teor de umidade e a massa específica aparente do solo seco, “*in situ*”. Esses valores são posteriormente comparados com os valores da massa específica do solo seco máxima ( $\gamma_{s,máx}$ ) e o teor em água ótimo ( $w_{ótimo}$ ) apurados em laboratório com base em ensaios de compactação Proctor, verificando se esses valores atendem aos requisitos do caderno de encargos da obra, como o grau de compactação mínimo estabelecido.

Um dos principais métodos para determinação da massa específica aparente do solo seco ( $\mu_s$ ) é o método do frasco de areia, descrito na norma do DNER- ME 092/94.

Este método permite determinar, por meio do volume de cavidades escavadas no terreno, do peso do solo retirado e da determinação do teor de água, a massa aparente seca do solo através da Equação 6.

$$\mu_s = \frac{\mu_h}{100 + h} \times 100 \quad [6]$$

Onde a massa específica aparente do solo úmido ( $\mu_h$ ) é definida pela Equação 7, e “h” corresponde ao teor de umidade do solo.

$$\mu_h = \mu_a \times \frac{P_h}{P_{10}} \quad [7]$$

Sendo:

$\mu_a$  → massa específica aparente da areia;

$P_h$  → Peso do solo recolhido;

$P_{10}$  → Peso da areia que enche a cavidade do solo.

O frasco e a cavidade devem apresentar as dimensões preconizadas na norma (figura 4).

**Figura 4** – Determinação da massa específica aparente "in situ" (a) execução do furo (b) conjunto frasco, bandeija e funil.



**Fonte:** Próprio autor, 2018.

A norma define ainda o Grau de Compactação (GC) como a relação percentual entre a massa específica aparente seca obtida pela compactação no campo ( $\mu_s$ ) e a massa específica de solo máxima ( $\gamma_{sm\acute{a}x}$ ) obtida no laboratório (equação 8), quando a amostra em umidade ótima.

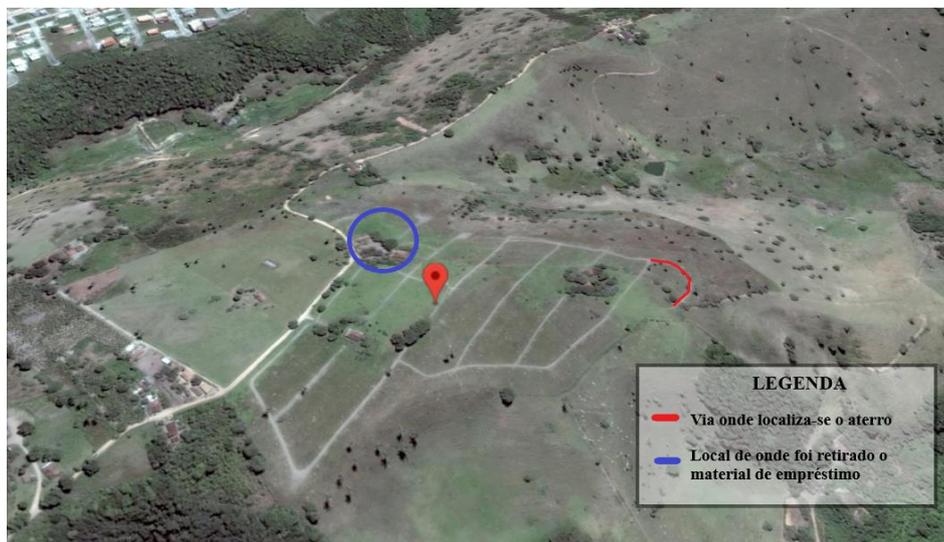
$$GC = \frac{\mu_s}{\gamma_{sm\acute{a}x}} \quad [8]$$

Esse parâmetro é usado durante a execução de aterros como forma de avaliar a qualidade das obras de compactação.

#### 4. METODOLOGIA

O presente trabalho tomou como objeto de estudo um aterro executado em uma das ruas existentes em um condomínio situado no município de Bananeiras/ PB, (Figura 5). O aterro tem cerca de 60 metros, foi realizado com o objetivo a regularização da via em destaque, o material empregado na obra, assim como o ensaiado em laboratório, foi retirado de uma área de empréstimo existente no mesmo local, proveniente da terraplanagem executada em outro setor do condomínio, e transportado por caçambas a medida que foi extraído.

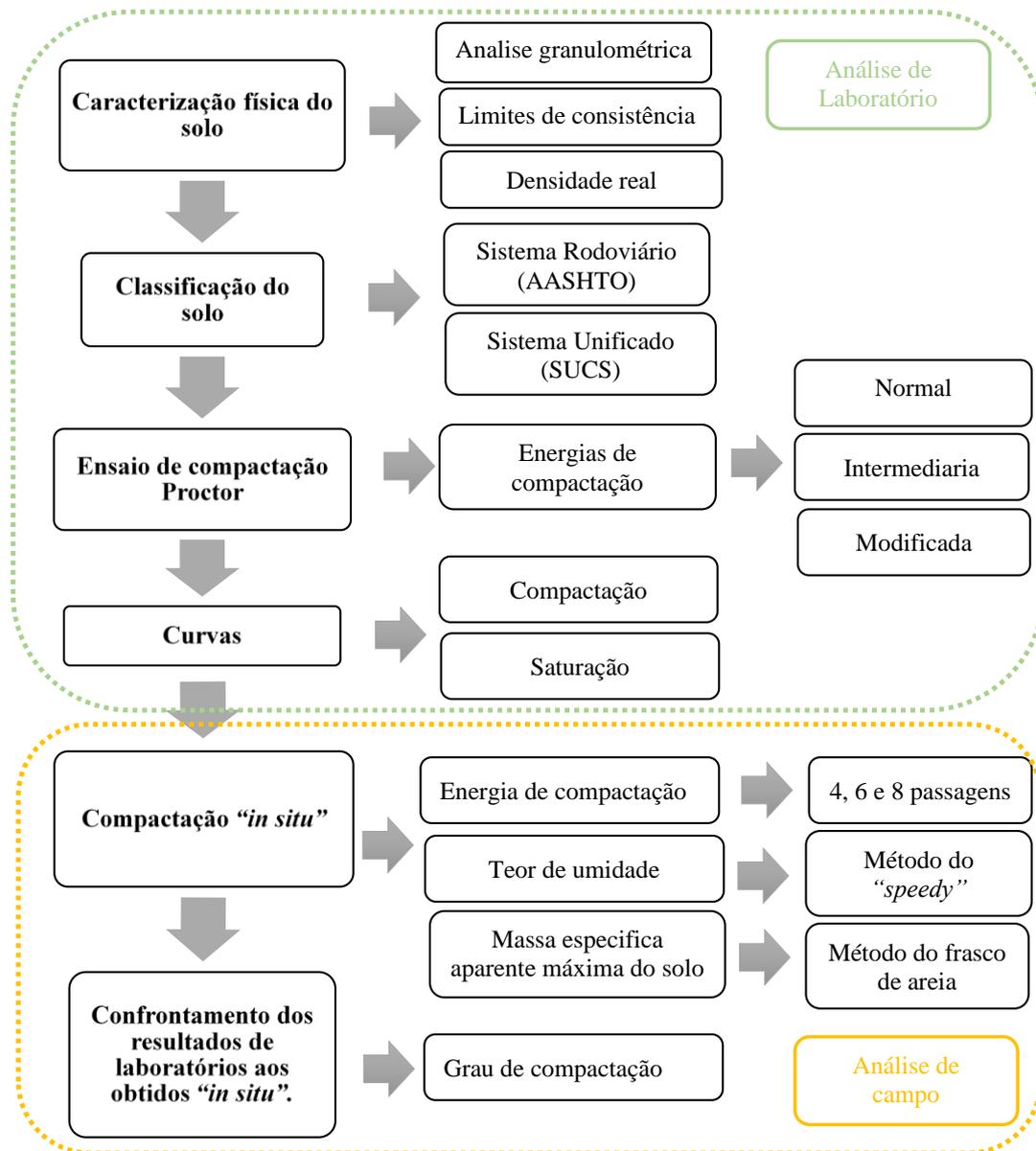
**Figura 5** – Vista superior do condomínio com enfoque na via onde o aterro foi executado e na área de empréstimo.



Fonte: Google Earth.

Por conseguinte, em busca de satisfazer os objetivos propostos nesse trabalho, optou-se por desenvolver as atividades de acordo com o fluxograma apresentado na Figura 6.

**Figura 6 – Fluxograma de atividades**



Fonte: Próprio Autor, 2018

#### 4.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SOLO

Para obtenção das características físicas do solo utilizado na confecção dos corpos de prova, foram adotados os procedimentos descritos pelo Departamento Nacional de Estradas e Rodagens (DNER).

- DNER –ME 080/94– Análise granulométrica por peneiramento;
- DNER –ME 122/94– Determinação do Limite de Liquidez;
- DNER –ME 082/94– Determinação do Limite de Plasticidade;
- DNER –ME 093/94– Determinação da Densidade Real.

## 4.2. CLASSIFICAÇÃO DO SOLO

Com base nos resultados obtidos a partir da caracterização do solo, foi possível classificá-lo através do sistema de classificação rodoviário da Associação Americana de Funcionários de Transporte e Estradas Estatais (AASHTO) e do Sistema Unificado de Classificação (SUCS).

## 4.3. ENSAIO DE COMPACTAÇÃO (PROCTOR)

Em laboratório realizou-se o ensaio de compactação conforme as especificações da norma DNIT- ME 164/2013, sendo confeccionados cinco corpos de provas para cada um dos três tipos de energias de compactação (normal, intermediária e modificada). Inicialmente, devido já se haver um conhecimento prévio de uma umidade ótima estimada por meio de outras análises realizadas pela empresa responsável da obra, adotou-se um teor em água de 8% do peso da amostra de solo e prosseguiu-se acrescentando 2% para cada novo corpo de prova, que foram moldados no cilindro com diâmetro interno de 15,24 centímetros e altura de 14,78, adotando uma altura de queda de 45,72 centímetros para o soquete que pesa 4,524 quilogramas (figura7).

**Figura 7-** Equipamentos usados para realização do ensaio de compactação



Fonte: Próprio autor, 2018.

## 4.4. CURVAS

Após o ensaio de compactação Proctor, foram definidos os teores de umidade ótimas e massa específica aparente máxima seca para cada nível de energia, através das curvas de

compactação do solo. Foi determinada ainda a curva de saturação do solo, a partir da Equação 5.

#### 4.5. COMPACTAÇÃO “*IN SITU*”

De posse dos resultados obtidos em laboratório procedeu-se a compactação “*in situ*”, onde o aterro em estudo foi executado em trechos com 20 metros de comprimento e camadas com 20 centímetros de espessura, a umidade ( $W$ ) do solo foi aferida pelo método do “*Speedy*” descrito na norma DNER-ME 052/94, e a densidade do solo seco ( $\mu_s$ ) ao fim de 4, 6 e 8 passagens do rolo compactador pé de carneiro, do tipo cilindro vibratório DYNAPAC CA25 (Figura 8), foi determinada através do ensaio de frasco de areia especificado pela norma DNER – ME 092/94.

**Figura 8** – Rolo compactador do tipo cilindro pés de carneiro.



**Fonte:** Próprio autor, 2018.

Através da maior massa específica aparente seca, da energia e do teor de umidade ( $W_{\text{ótimo}}$ ), obtidos em laboratório, foi possível determinar o grau de compactação do solo.

#### 4.6. CONFRONTAMENTO DOS RESULTADOS DE LABORATÓRIOS AOS OBTIDO “*IN SITU*”

Por fim, foi possível comparar os resultados obtidos em laboratórios e em campo, possibilitando estipular a quantidade de passagens do rolo necessárias para atender o grau de compactação mínimo de 100%, para camadas de subleito conforme estabelece o método DNER- ME 129/94.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As análises presentes nesse trabalho se procederam em duas etapas, que foram ensaios de laboratório e de campo.

### 5.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E CLASSIFICAÇÃO DO SOLO

A fase executada em laboratório teve início com a caracterização física do solo, por meio dos ensaios de limites de consistência e da análise granulométrica de uma amostra de aproximadamente 50 Kg que foi coletada na jazida de empréstimo. A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos no ensaio de limite de liquidez.

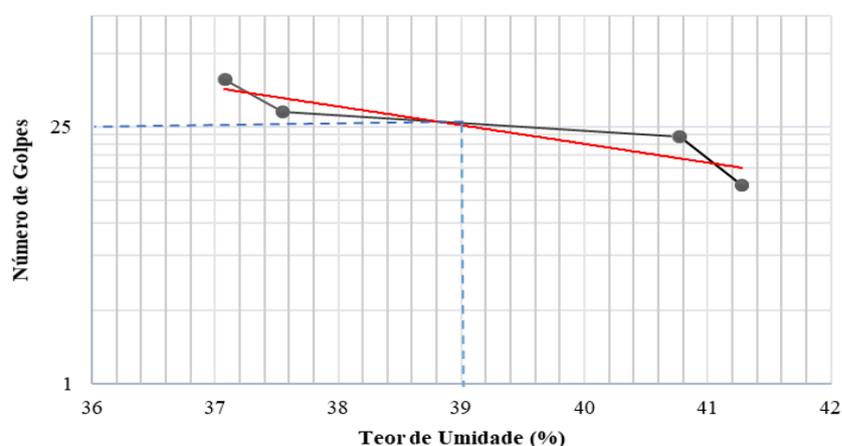
**Tabela 4 - Resultados do ensaio de Limite de Liquidez.**

Cadinho	Peso do cadinho (g)	Peso da amostra úmida (g)	Peso da amostra seca (g)	Umidade (%)	Número de golpes
LL 1	7,7	3,29	2,4	37,08	45
LL 2	6,65	3,97	2,81	41,28	12
LL 3	7,3	3,48	2,53	37,55	30
LL 4	6,66	3,28	2,33	40,77	22

Fonte: Próprio autor, 2018.

Seguindo o preconizado pela norma do DNER ME- 122/94, através do Gráfico 1, que correlaciona o teor de umidade da amostra e o número de golpes empregados no aparelho de casa grande, determinou-se o limite de liquidez do solo, LL= 39.

**Gráfico 1 – Determinação do limite de liquidez do solo**



Fonte: Próprio autor, 2018.

Por conseguinte, o limite de plasticidade do solo foi estabelecido, como descrito pelo DNIT na norma DNER- ME 122/94, por meio da média aritmética das umidades dispostas na Tabela 5, que resultou em um limite de plasticidade de 25,03.

**Tabela 5** - Resultados do ensaio de Limites de Plasticidade.

<b>Cadinho</b>	<b>Peso do cadinho (g)</b>	<b>Peso da amostra úmida (g)</b>	<b>Peso da amostra seca (g)</b>	<b>Umidade (%)</b>
<b>LP 1</b>	6,01	0,44	0,33	33,33
<b>LP 2</b>	7,45	0,65	0,52	25,00
<b>LP 3</b>	7,48	0,43	0,35	22,86
<b>LP 4</b>	7,73	0,44	0,37	18,92

**Fonte:** Próprio autor, 2018.

Assim, de posse dos valores dos limites de liquidez e plasticidade, através da Equação 1, foi possível determinar o Índice de plasticidade,  $IP= 13,97$ . Que junto aos dados da análise granulométrica presentes na Tabela 6, obtidos conforme disponibilizado no método de ensaio da DNER ME- 080/94, estabeleceu-se o índice de grupo ( $IG=0$ ) usado pela AASHTO para classificar o solo.

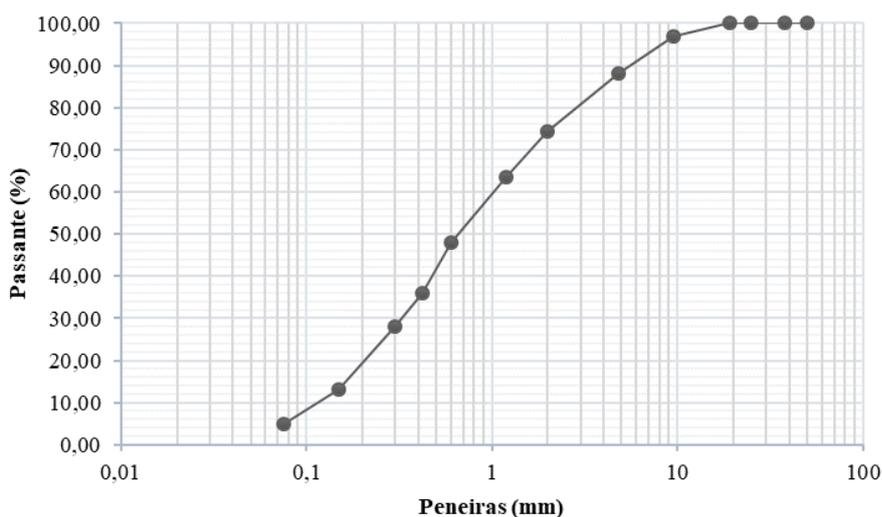
**Tabela 6** - Distribuição granulométrica do solo

<b>Peneiras (mm)</b>	<b>Massa retida (g)</b>	<b>Retida (%)</b>	<b>Retida acumulada (%)</b>	<b>Massa passante (g)</b>	<b>Passante (%)</b>
<b>50</b>	0	0,00	0,00	1000	100,00
<b>38</b>	0	0,00	0,00	1000	100,00
<b>25</b>	0	0,00	0,00	1000	100,00
<b>19</b>	0	0,00	0,00	1000	100,00
<b>9,5</b>	30,4	3,04	3,04	969,6	96,96
<b>4,8</b>	89,65	8,97	12,01	879,95	88,00
<b>2</b>	136,23	13,62	25,63	743,72	74,37
<b>1,2</b>	108,87	10,89	36,52	634,85	63,49
<b>0,6</b>	154,35	15,44	51,95	480,5	48,05
<b>0,42</b>	119,64	11,96	63,91	360,86	36,09
<b>0,3</b>	80,89	8,09	72,00	279,97	28,00
<b>0,15</b>	147,68	14,77	86,77	132,29	13,23
<b>0,075</b>	83,96	8,40	95,17	48,33	4,83

**Fonte:** Próprio autor, 2018.

Mediante a distribuição granulométrica fixada no ensaio, foi possível traçar a curva presente no Gráfico 2, por meio da qual se determinou os coeficientes de uniformidade ( $C_u=8,33$ ) e de curvatura ( $C_c=0,853$ ), parâmetros usados para classificação do solo pelo método da SUCS.

**Gráfico 2** – Curva de distribuição granulométrica do solo.



**Fonte:** Próprio autor, 2018.

A partir dos resultados obtidos na caracterização física do solo, foi possível classificá-lo. Com base no sistema de classificação rodoviário AASTHO, o mesmo foi enquadrado como A-2-6, grupo referente as areia e areias siltsas ou argilosas, solos considerados de comportamento excelente a bom quando empregado como subleito.

Por meio do sistema unificado SUCS, através da análise do fluxograma disposto no Anexo B, o solo foi classificado como areia argilosa (SC), mistura mal graduada de areia e argila. Bem como, demonstrado no Anexo C, apresenta compressibilidade e expansão de escassa a média e características de drenagem escassas a praticamente impermeável. Foi observada uma resistência do solo seco média a grande, como disposta na obra de Caputo (1988).

## 5.2. ENSAIO DE COMPACTAÇÃO PROCTOR

Dando procedência as análises de laboratório, através do ensaio de compactação, obtiveram-se os dados descritos nas Tabela 5.

**Tabela 5** - Dados determinado no ensaio de compactação

Energia	Capsula	Pu (g)	Pc (g)	Pw (g)	Ps (g)	(%) W	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_s$ (g/cm <sup>3</sup> )
Normal	1	4124,1	7,79	8,97	8,02	11,85	1,55	1,38
	2	4538,1	8,14	15,61	13,74	13,61	1,70	1,50
	3	4676,1	7,32	15,25	13,32	14,49	1,75	1,53
	4	4454,1	6,6	12,27	10,46	17,30	1,67	1,42
	5	4420,1	6,56	15,25	12,94	17,85	1,66	1,41
Intermediaria	1	4440,1	7,97	33,8	30,31	11,51	1,66	1,49
	2	5008,1	7,65	31,63	27,82	13,70	1,88	1,65
	3	5056,1	7,69	18,43	16,12	14,33	1,90	1,66
	4	4964,1	7,81	40,14	34,45	16,52	1,86	1,60
	5	4888,1	7,99	23,98	20,32	18,01	1,83	1,55
Modificada	1	4768,1	7,86	25,18	22,66	11,12	1,79	1,61
	2	5469,1	7,76	14,76	13,03	13,28	2,05	1,81
	3	5566,1	7,82	21,62	18,91	14,33	2,09	1,83
	4	5484,1	7,57	14,1	12,21	15,48	2,06	1,78
	5	5357,1	7,58	19,01	16,2	17,35	2,01	1,71

Fonte: próprio autor, 2018.

Onde:

Pu → Peso úmido do solo compactado;

Pc → Peso da capsula;

Pw → Peso da amostra úmida;

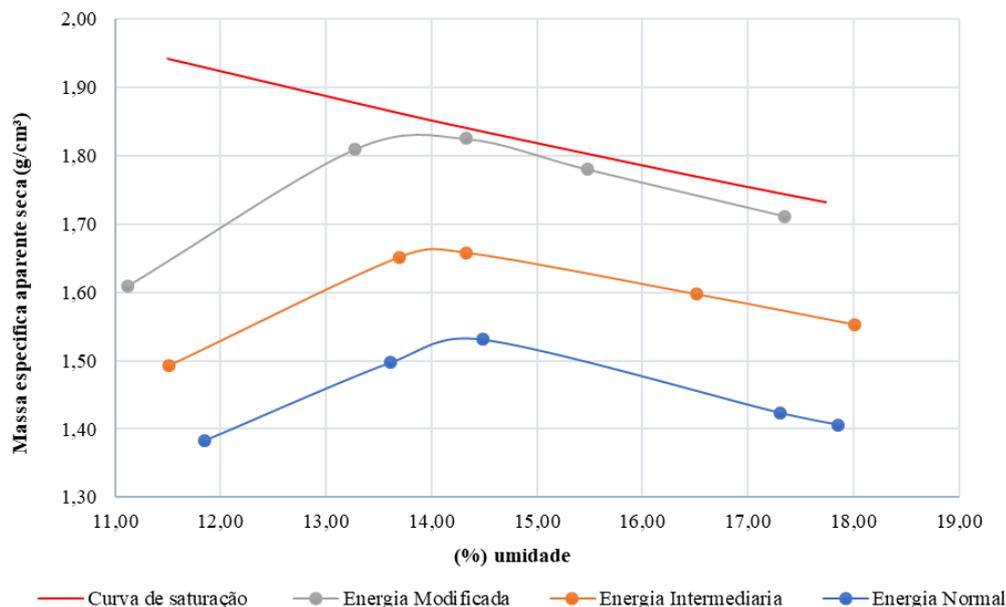
Ps → Peso da amostra seca;

W → teor de água;

$\gamma_d$  → massa específica natural;

$\gamma_s$  → massa específica aparente do solo seco.

Portanto, de posse desses dados foram geradas as curvas de compactação do solo para os três níveis de energia, assim como a curva de saturação (Gráfico 3), determinada através da Equação 5, adotando uma densidade das partículas solidas igual a 2,5. Esse valor foi obtido por meio do ensaio de determinação da densidade real, prescrito na norma rodoviária DNER 093/94.

**Gráfico 3** – Curvas de compactação e saturação do solo

Fonte: Próprio autor, 2018.

Ao se analisar o gráfico, torna-se possível determinar os teores de umidade ótimo e de massa específicas seca máxima do solo dispostos na Tabela 6.

**Tabela 6** - Umidades ótimas e massa específica aparente seca

<b>Energia</b>	<b>Umidade ótima (%)</b>	<b>Massa específica aparente seca (g/cm<sup>3</sup>)</b>
Normal	14,4	1,54
Intermediária	14,0	1,66
Modificada	13,7	1,84

Fonte: Próprio autor, 2018.

Assim, ao passo em que se eleva a energia de compactação, é perceptível que há um aumento da massa específica aparente seca máxima e uma redução do teor de umidade ótimo. Demonstrando que quando o solo é compactado com diferentes níveis de energia, a variação da massa específica aparente máxima seca tem relação direta a energia aplicada, já o teor de umidade é inversamente proporcional. Isto é, quanto maior a energia aplicada, maior a massa específica seca do solo e menor o teor de umidade ótimo requerido. No entanto, por meio da curva de saturação, fica nítido que o aumento da energia levará o solo a se aproximar da saturação máxima, o que não deve ocorrer, pois quando a saturação máxima é atingida ocorre a máxima expulsão do ar e a água passa a preencher os vazios recebendo parte da energia aplicada.

## 5.3. ENSAIO DE CAMPO

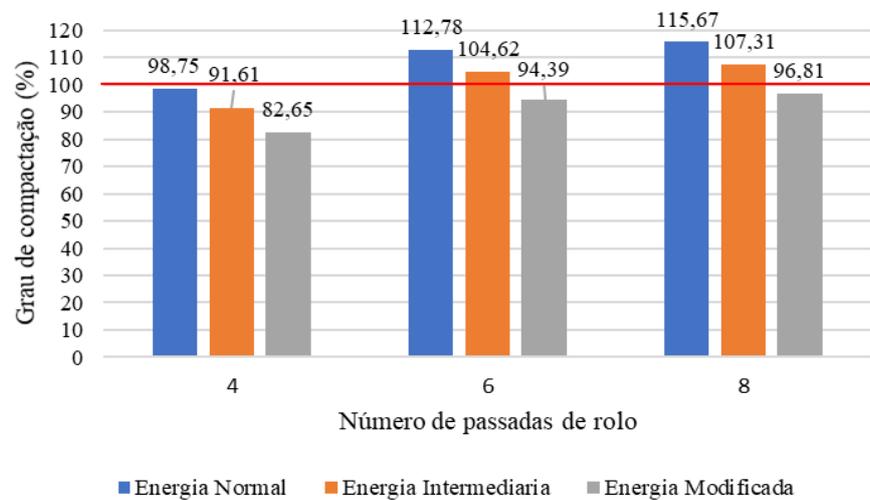
A segunda etapa desse estudo se deu através dos ensaios de campo, onde foi definido os valores de umidade e densidade do solo seco, diante a compactação do aterro por diferentes quantidades de passagens de rolo, esses dados estão dispostos na Tabela 7.

**Tabela 7 - Resultados obtidos em campo**

<b>Energia</b>	<b>Passagens de rolo</b>	<b>Umidade (%)</b>	<b>Massa específica máxima (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Massa específica aparente (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Grau de compactação (%)</b>
<b>Normal</b>			1,54	1,521	98,75
<b>Intermediaria</b>	4	24,7	1,66	1,521	91,61
<b>Modificada</b>			1,84	1,521	82,65
<b>Normal</b>			1,54	1,737	112,78
<b>Intermediaria</b>	6	14,8	1,66	1,737	104,62
<b>Modificada</b>			1,84	1,737	94,39
<b>Normal</b>			1,54	1,781	115,67
<b>Intermediaria</b>	8	13,4	1,66	1,781	107,31
<b>Modificada</b>			1,84	1,781	96,81

Fonte: Próprio autor, 2018.

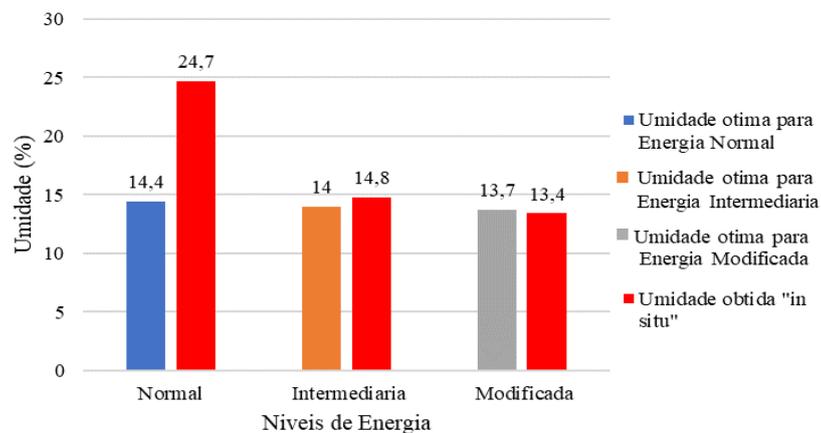
A partir dos dados supracitados, é perceptível que a medida em que se aumentou o número de passagens de rolo ocorreu uma variação da massa específica aparente do solo, assim como uma diminuição do teor de umidade. Comprovando, portanto, mais uma vez, o efeito da energia de compactação nesses parâmetros. Estes resultados possibilitaram, ainda, mediante ao cálculo do grau de compactação, identificar a relação entre o número de passagens de rolo e as energias ensaiadas em laboratório (Gráfico 4).

**Gráfico 4 – Graus de compactação do solo**

Fonte: Próprio autor, 2018.

Ao avaliar o grau de compactação, foi possível perceber que com 4 passadas de rolo a energia normal é a que mais se aproxima de 100% de grau de compactação, com 6 passadas a energia que atinge esse patamar passa a ser a energia intermediária e, por fim, com 8 passadas a energia modificada é a que mais se aproxima de 100% de compactação.

Além disso, a determinação do melhor nível de energia a ser aplicado no processo de compactação desse solo pode ser feita ao relacionarmos a umidade a qual o mesmo se encontrava “in situ” com a umidade ótima determinada em laboratório (Gráfico 5).

**Gráfico 5 – Umidade ótimas X Umidades obtidas “in situ”.**

Fonte: Próprio autor, 2018.

Diante do gráfico 5, que apresenta os teores de umidades obtidas “in situ” para as três variações de passada de rolo, assim como, as umidades ótimas para cada nível de energia

ensaiado, o que ao ser analisado, junto ao apresentado no gráfico 4, demonstra o nível intermediário como o mais adequado para a compactação desse solo, pois foi o que mais se aproximou do teor de umidade ótimo para um grau de compactação admissível, próximo ao mínimo estabelecido de 100%, uma vez que o solo quando compactado com 4 passadas de rolo estava a uma umidade muito alta distante da ótima estabelecida em laboratório e quando compactado com 8 passadas de rolo, mesmo tendo se aproximado mais da umidade ótima para energia modificada, não conseguiu alcançar o grau de compactação mínimo estabelecido.

## 6. CONCLUSÃO

O desenvolvimento do presente estudo possibilitou compreender a importância de se conhecer os parâmetros que influenciam no processo de compactação, sendo estes, o tipo de solo, teor de umidade e, principalmente, a energia empregada. Comprovou-se, por meio do confronto das análises realizadas, o efeito dos mesmos no comportamento do solo compactado.

Foram então, determinadas as características físicas do material em estudo e por meio da sua classificação, observou-se que mesmo sendo classificado como um solo mal graduado de baixa compressibilidade, o que torna os esforços de compactação menos efetivos, o solo estudado é considerado adequado para a finalidade a qual foi destinado.

Deste modo, com a realização dos testes experimentais, de laboratório e de campo, onde executou-se a compactação empregando diferentes tipos de energias, foi possível entender como se dá a influência desse parâmetro. Tendo maiores valores de massa específica aparente seca máxima e menores teores de umidade ótima, a medida que se aumenta a energia empregada.

Portanto, partindo dos resultados obtidos, é possível constatar que no caso apresentado nessa pesquisa, mediante as características do solo e equipamentos utilizados, o melhor nível de energia a ser utilizado é o intermediário por apresentar maior eficiência na compactação. Por fim, propõe-se como continuidade desse trabalho, para uma melhor aplicação da técnica de compactação e maior entendimento do efeito dos parâmetros que exercem influência sobre essa técnica, a realização de análises acerca da resistência do solo ao variar a energia.

## COMPOSITION OF SOILS: THE EFFECT OF COMPACTION ENERGY IN AN EXPERIMENTAL APPROACH

### ABSTRACT

The compaction has high significance for the different engineering works, this technique acts on properties such as resistance, permeability and soil compressibility. In summary, the compaction is influenced by three main factors: soil type, compaction energy and water content, so in order to achieve a better use of this process, it is imperative to know them, as well as the effects which they exert on the ground. The present study sought to define the best energy to be used for compaction of a given soil, through the comparison of experiments carried out in the laboratory and in loco, and to demonstrate, from the effect of this parameter on the geotechnical behavior of the material, its importance for the result of the compression. Thus, in the laboratory, samples were tested for the normal, intermediate and modified energies established by DNIT - ME 164/2013 and in the field tests of density and humidity were carried out at the end of 4, 6 and 8 passages of foot roller, these analyzes were carried out in a landfill with the purpose of regularization of roadway executed in a condominium located in the municipality of Bananeiras / PB. The study also sought to generate information such as classification and soil saturation curve, in order to demonstrate the influence of soil type and water content in this process. By determining through the analysis of the results the intermediate energy as the most efficient for compaction of the soil, which was classified as a clay sand, being applied to the landfill in 6 roller passes at a humidity of approximately 14%.

**Keywords:** Geotechnical behaviour. Soil type. Compaction Energy. Moisture content.

▪

## REFERÊNCIAS

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7180: Solo - determinação do limite de plasticidade**. Método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ. 1984.

ARTERIS ES. **Especificação Particular para Execução de Terraplanagem – Execução de Aterros**. Centro De Desenvolvimento Tecnológico- CDT. Rev. 108. 00. 2015.

ALMEIDA, G. C. P. **Caracterização Física e Classificação dos Solos**. Universidade Federal de Juiz de Fora- UFJF. Juiz de Fora- MG. 2005.

CAVALCANTI, A. B. **Compactação dos solos**. Notas de aula da disciplina Mecânica do solos I. Universidade Estadual da Paraíba, UEPB. Araruna. 2018.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos**. Volume I, Rio de Janeiro: Editora Livros Técnicos e Científicos S.S., 1975.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e suas aplicações**. Rio de Janeiro: Editora Livros Técnicos e Científicos S.S., 1988.

CORRÊA, C. **Aula Classificação dos solos**, Nota de Aula da disciplina de pedologia, 2015. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/karolpoa/aula-classificacao-dos-solos>. Acesso em 14/11/2018

DAS, B.M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. Thomsom Learning, tradução da 6ª edição norte-americana, São Paulo. 2007.

DELGADO, A. K. C. **Sistemas de classificação dos solos**. Notas de aulas da disciplina de Geotecnia I. 2015.

DNER- ME 052 -**Solos e agregados miúdos- Determinação da umidade com o emprego do “speedy”**. Método de ensaio. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem Rio de Janeiro, RJ. 1994.

DNER- ME 080 -**Solos- Analise granulométrica**. Método de ensaio. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem Rio de Janeiro, RJ. 1994.

DNER- ME 082- **Solos- Determinação do limite de plasticidade.** Método de ensaio. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem Rio de Janeiro, RJ. 1994.

DNER- ME 092- **Solos- Determinação da massa específica aparente “in situ”, com emprego do frasco de areia.** Método de ensaio. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem Rio de Janeiro, RJ. 1994.

DNER- ME 093-. **Solos- Determinação da densidade real.** Método de ensaio. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem Rio de Janeiro, RJ. 1994.

DNER- ME 122-. **Solos- Determinação do limite de liquidez- método de referência e método expedido.** Método de ensaio. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem Rio de Janeiro, RJ. 1994.

DNER- ME 129-. **Pavimentos flexíveis – Regularização do subleito -** Especificação de serviço. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem Rio de Janeiro, RJ. 1994.

DNIT -ME 164- **Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas.** Método de Ensaio. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro, RJ. 2013.

GURGEL, J. G. B. **Apostila de solos.** Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Mossoró-RN. 2013.

MAGALHÃES, F. M. **Influência dos Equipamentos no Processo de Compactação em solos na Cidade de Mossoró.** Monografia (graduação em ciências e tecnologia) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA. Mossoró. 2012.

MASSAD, F. **Obras de Terra-Curso Básico de Geotécnica.** Editora Oficina de Textos, 2003.

MONTOR, A. **Aula 4: Classificação dos solos,** Notas de aulas da disciplina de Mecânica dos solos. FEITEP- Faculdade de Engenharia e Arquitetura, 2015.

MOURA, E.; GODOY, R. H. F. **Classificação de Solos Hrb – Highway Research Bord – AASHTO - Para Finalidades Rodoviárias** Notas de aulas da disciplina de Transportes e Obras de Terra. FATEC – Faculdade de Tecnologia de Pavimentação. São Paulo, 2018.

PROCTOR, R. R. **Fundamental principles of soil compaction.** Engineering News Record, v.111, n. 10, 1933

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**, 3. ed. São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2006.

PIRES, P.J.M. **Classificação dos Solos do Ponto de Vista da Engenharia**, Notas de aula da disciplina de Geotecnia. 2011

RIBEIRO, R. M. B. C. G. **Estimativa dos parâmetros de compactação de solos usando técnicas de data mining**. Dissertação de Mestrado. Universidade do Minho, Escola de Engenharia, 2015.

SANTOS, J. A. **Obras Geotécnicas- Compactação: Elementos Teóricos**. Mestrado, Instituto Superior Técnico. Lisboa, Portugal. 2008.

SANTOS, M. N. **Análise do Efeito da Estabilização Mecânica em Matrizes de Terra**. Relatório Final De Iniciação Científica. Pontifícia Universidade Católica- PUC. Rio de Janeiro. 2012

SANTOS, J. N. B. **Classificação dos solos- SUCS**. Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC. 2017.

SILVA, L. R. E. **Compactação do Solo**. Monografia. Universidade São Francisco. Itatiba-SP. 2008.

SOUZA, F. B. R. **Controle Tecnológico Aplicado a Obras de Terraplenagem**. Projeto de Graduação: UFRJ/Escola Politécnica, Rio de Janeiro 2014.

SOUZA JR, J. D. **O Efeito da Energia de Compactação em Propriedades dos Solos Utilizados na Pavimentação do Estado do Ceará**. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia do Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 211 fl.n 2005.

## ANEXO A – Tabela de classificação do solo pelo método da ASSHTO (Cavalcanti, 2018)

## CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS: Sugestão do Highway Research Board-HRB adotada pela AASHTO

Classificação Geral	Materiais granulares (35% ou menos passando na peneira nº 200)							Materiais siltosos e argilosos (mais de 35% passando na peneira nº 200)			
	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				
Peneiração: % que passa: Nº 10 Nº 40 Nº 200 (p)	50 máx. 30 máx. 15 máx.	50 máx. 25 máx.	51 mín. 10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Características da fração que passa nº 40 Limite de Liquidez - LL (%) Índice de Plasticidade IP (%)				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de Grupo	6 máx.		NP	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Índice de Grupo	0		0	0		4 máx.		8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais que predominam	Pedra Britada pedregulho e areia		Areia fina	Areia e areia silosa ou argilosa				Solos Siltosos		Solos argilosos	
Comportamento geral como subleito	Excelente a bom							Fraco a pobre			

**Processo de classificação:** Com os dados de laboratório, iniciar a classificação da esquerda para a direita, por eliminação.

O primeiro grupo da esquerda que satisfizer os dados será o grupo procurado.

**SOLOS A-7:** Se  $IP \leq LL - 30$ , será A-7-5; Se  $IP > LL - 30$ , será A-7-6.

**Índice de Grupo (IG):**  $IG = 0,2 \cdot a + 0,005 \cdot a \cdot c + 0,01 \cdot b \cdot d$

Onde:

p: teor de silte + argila do solo, ou seja, a porcentagem que passa na peneira nº 200.

$a = p - 35$  (se  $p > 75\%$ , adota-se 75 e se  $p < 35\%$ , adota-se 35)

$a$  varia de 0 a 40 e 0,2 .  $a$  varia de 0 a 8.

$b = p - 15$  (se  $p > 55\%$ , adota-se 55 e se  $p < 15\%$ , adota-se 15)

$b$  varia de 0 a 40 e 0,01 .  $b \cdot d$  varia de 0 a 8.

$c = LL - 40$  (se  $LL > 60\%$ , adota-se 60 e se  $LL < 40\%$ , adota-se 40)

$c$  varia de 0 a 20 e 0,005 .  $a \cdot c$  varia de 0 a 4.

$d = IP - 10$  (se  $IP > 30$ , adota-se 30 e se  $IP < 10$ , adota-se 10)

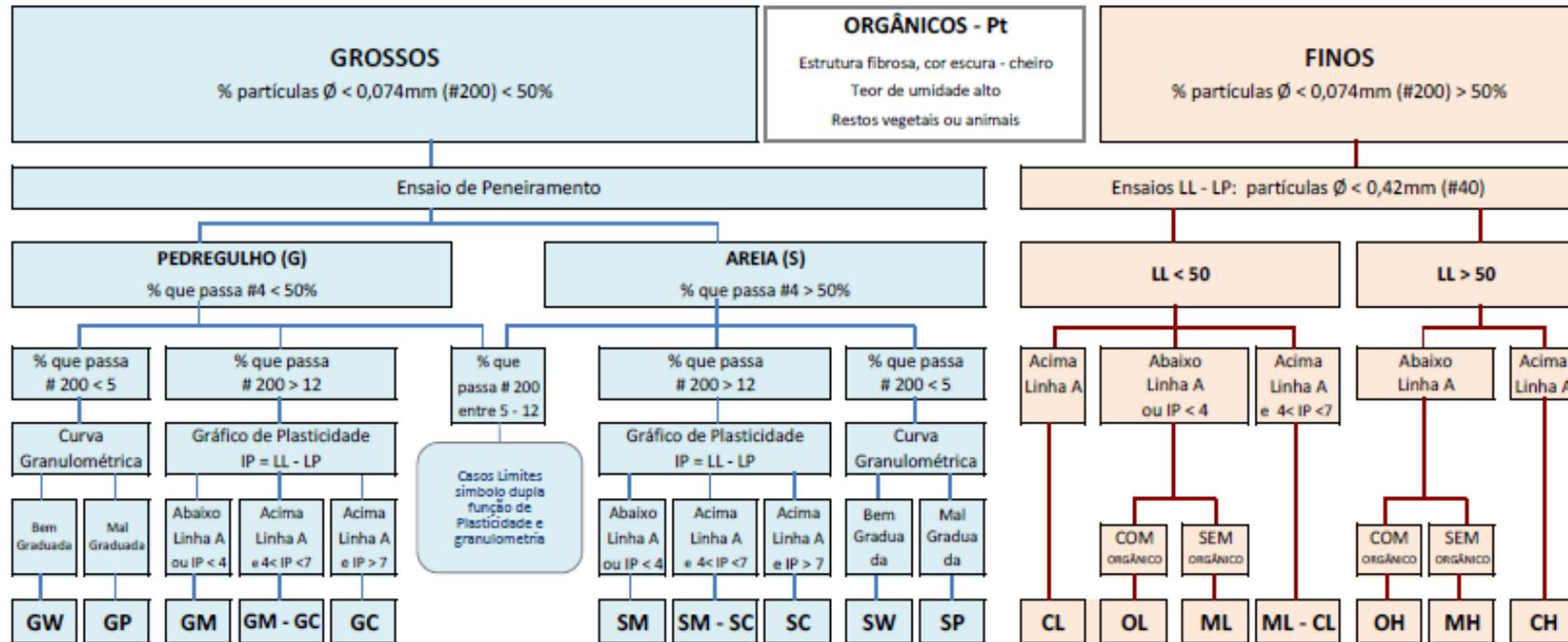
$d$  varia de 0 a 20 e 0,01 .  $b \cdot d$  varia de 0 a 8.

$IG_{\min.} = 0$

$IG_{\max.} = 20$

IG - o resultado final obtido deve ser um nº inteiro - aproximação para o nº inteiro acima.

ANEXO B – Fluxograma de classificação do solo – SUCS (Santos, 2017).



GW:  $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$  e  $C_c = \frac{(D_{60})^2}{D_{10} \cdot D_{30}}$  entre 1 e 3

GP: quando não são satisfeitos os requisitos de GW

SW:  $C_u > 6$  e  $C_c$  entre 1 e 3

SP: quando não são satisfeitos os requisitos de SW

SOLOS GROSSOS:

G = gravel (pedregulho)

S = sand (areia)

W = well graded (bem graduado)

P = poorly graded (mal graduado)

C = clay (com argila)

TURFAS (Pt):

Solos altamente orgânicos, geralmente fibrilares e

multo compressíveis.

SOLOS FINOS:

L = low (baixa compressibilidade)

H = high (alta compressibilidade)

M = mo (silte em sueco)

O = organic (silte ou argila, orgânicos)

C = clay (argila inorgânica)

ANEXO C – Tabela de Classificação pelo método da SUCS

DIVISÕES PRINCIPAIS		LETURA	NOME	VALOR COMO FUNDAÇÃO QUANDO NÃO SUJEITO À AÇÃO DO GELO	VALOR COMO BASE DIRETAMENTE SOB A SUPERFÍCIE EM USO	AÇÃO POTENCIAL DO GELO	COMPRESSIBILIDADE E EXPANSÃO	CARACTERÍSTICAS DE DRENAGEM	EQUIPAMENTO DE COMPACTAÇÃO	PESO ESPECÍFICO SECO (%)	CBR DE CAM-PO	MÓDULO DO SUBLEITO
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)		(10)	(11)	(12)	(13)
SOLOS DE GRANULAÇÃO GROSSA	Pedregulhos e solos pedregulhosos	GW	Pedregulho ou pedregulho arenoso bem graduado	Excelente	Bom	Nenhuma a muito escassa	Quase inexistente	Excelente	Trator de esteira, equipamento de roda de borracha, rolo com roda de aço	125 - 140	60 - 80	500 ou mais
		GP	Pedregulho ou pedregulho arenoso mal graduado	Bom a excelente	Insatisfatório a moderado	-	-	-	-	120 - 130	35 - 60	300 ou mais
		GU	Pedregulho ou pedregulho arenoso, uniformemente graduado	Bom	Insatisfatório	-	-	-	Trator de esteira, equipamento de roda de borracha	115 - 125	25 - 50	300 ou mais
		GM	Pedregulho siltoso ou pedregulho arenoso siltoso	Bom a excelente	Moderado a bom	Escassa a média	Muito escassa	Moderado a insatisfatório	Equipamento com roda de borracha	130 - 145	40 - 80	300 ou mais
		GC	Pedregulho argiloso ou pedregulho arenoso argiloso	Bom	Insatisfatório	Escassa a média	Escassa	Insatisfatório a praticamente impermeável	Equipamento de roda de borracha, rolo de pé de carneiro	120 - 140	20 - 40	200 - 300
	Areias e solos arenosos	SW	Areia ou areia pedregulhosa, bem graduada	Bom	Insatisfatório	Nenhuma a muito escassa	Quase inexistente	Excelente	Trator de esteira, equipamento de roda de borracha	110 - 130	20 - 40	200 - 300
		SP	Areia ou areia pedregulhosa, mal graduada	Moderado a bom	Insatisfatório a inadequado	-	-	-	-	105 - 120	15 - 25	200 - 300
		SU	Areia ou areia pedregulhosa uniformemente graduada	Moderado a bom	Inadequado	-	-	-	-	100 - 115	10 - 20	200 - 200
		SM	Areia siltosa ou areia pedregulhosa siltosa	Bom	Insatisfatório	Escassa a alta	Muito escassa	Moderado a insatisfatório	Equipamento com roda de borracha, rolo pé de carneiro, controle rígido da umidade	120 - 135	20 - 40	200 - 300
		SC	Areia argilosa ou areia pedregulhosa argilosa	Moderado a bom	Inadequado	-	Escassa a média	Insatisfatório a praticamente impermeável	Equipamento de roda de borracha, rolo de pé de carneiro	105 - 130	10 - 20	200 - 300
SOLOS DE GRANULAÇÃO FINA	Baixa compressibilidade	ML	Siltos, siltos arenosos e pedregulhosos ou solos diatomáceos	Moderado a insatisfatório	Inadequado	Média a muito alta	Escassa a média	Moderado a insatisfatório	Equipamento de roda de borracha, rolo pé de carneiro, controle rígido da umidade	100 - 125	5 - 15	100 - 200
		CL	Argilas magras, argilas arenosas ou pedregulhosas	-	-	Média a alta	Média	Praticamente impermeável	Equipamento de roda de borracha, rolo de pé de carneiro	100 - 125	5 - 15	100 - 200
		OL	Siltos orgânicos ou argilas orgânicas magras	Insatisfatório	-	-	Média a alta	Insatisfatório	-	90 - 105	4 - 8	100 - 200
	Alta compressibilidade	MH	Argilas micáceas ou solos diatomáceos	Insatisfatório	Inadequado	Média a muito alta	Alta	Moderado a insatisfatório	Equipamento com roda de borracha, rolo pé de carneiro	80 - 100	4 - 8	100 - 200
		CH	Argilas gordas	Insatisfatório a muito insatisfatório	Inadequado	Média	Alta	Praticamente impermeável	-	90 - 110	3 - 5	50 - 100
		OH	Argilas orgânicas gordas	-	-	-	Alta	-	-	80 - 105	3 - 5	50 - 100
Turfa e outros solos orgânicos fibrosos	Pt	Turfa, húmus e outros	Inadequado	Inadequado	Escassa	Muito alta	Moderado a insatisfatório	Compactação não é prática	-	-	-	