



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE RUSSAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

THALES ELIAS MOURA

**MODELOS MATEMÁTICOS PREDITIVOS PARA ESTIMATIVA DAS
PROPRIEDADES DE SOLOS COMPACTADOS**

RUSSAS
2019

THALES ELIAS MOURA

MODELOS MATEMÁTICOS PREDITIVOS PARA ESTIMATIVA DAS PROPRIEDADES
DE SOLOS COMPACTADOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Civil do
Campus de Russas da Universidade Federal do
Ceará, como requisito parcial à obtenção do
grau de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Rosiel Ferreira Leme.

RUSSAS

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M889m Moura, Thales Elias.
Modelos matemáticos preditivos para estimativa das propriedades de solos compactados / Thales Elias
Moura. – 2019.
77 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas,
Curso de Curso de Engenharia Civil, Russas, 2019.
Orientação: Prof. Dr. Rosiel Ferreira Leme.

1. Solos compactados. 2. Modelos matemáticos. 3. Geotecnia. I. Título.

CDD 620

THALES ELIAS MOURA

MODELOS MATEMÁTICOS PREDITIVOS PARA ESTIMATIVA DAS PROPRIEDADES
DE SOLOS COMPACTADOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Civil do
Campus Russas da Universidade Federal do
Ceará, como requisito parcial à obtenção do
grau de bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Rosiel Ferreira Leme (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Ms. Andriele Nascimento de Souza
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Ms. Daniela Lima Machado da Silva
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Tadeu e Sandra.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus! Pelo dom da vida, pelas bênçãos, por me dá forças para superar os obstáculos que surgiram ao longo dessa caminhada e por sua misericórdia.

À minha família! Aos meus pais, Tadeu e Sandra Moura, por todo o esforço dispendido, por me apoiar, acreditar e sempre buscar o melhor para mim. Aos meus irmãos Taffarel e Thaís Moura, ao meu tio Fabiano Elias, à minha avó Fatima, por torcerem por mim e pela amizade de sempre. À minha tia Francisca (*in memoriam*) por ter sido um grande apoio à minha família, saudades! Aos meus primos e amigos Eduardo e Valda, Cadu e Caio, por quem tenho um carinho enorme.

À minha namorada, Larisse Oliveira, pelo companheirismo ao longo desses 3 anos. Obrigado por seu carinho e paciência, por sua companhia enquanto estava longe da minha família e principalmente pelo seu amor. Você faz parte dessa conquista e tem fundamental importância em minha vida. Que estejamos juntos nas vitórias que ainda estão por vir. Amo você! Agradeço também à Família Oliveira, pelo apoio durante esses anos que estive em Russas.

Ao meu orientador, Professor Dr. Rosiel Ferreira Leme e sua esposa, Fabíola Costa, agradeço por toda assistência, solicitude, disponibilidade e ensinamentos. Os considero como amigos. O meio acadêmico precisa de profissionais como vocês.

Aos membros da banca, pela disponibilidade. As análises elaboradas por vocês serão de grande valia para o presente trabalho.

Ao Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação da UFC e seus membros, pela oportunidade dada para adquirir um maior conhecimento sobre a Geotecnia.

Aos professores que fizeram parte da minha graduação. Em especial ao Professor Dr. Otávio Rangel de Oliveira e Cavalcante, que esteve desde o início acompanhando a trajetória da 1ª Turma de Engenharia Civil da UFC – Campus Russas, pela amizade construída.

Às minhas colegas de graduação: Jayane Nara, Alane Cavalcante, Thayssa Vieira, Josy Alves, Sabrina Saraiva, Thalyta Gomes, Larisse Gama, Rayanne Sousa, Kaenna Ingrid e Louise Caroline. Acreditem no potencial de vocês e conquistem seus espaços. Mostrem a força das mulheres no mercado da Engenharia Civil.

Aos meus colegas de graduação: Mateus Campos, João Augusto, Gilson Paiva, Renan Quaresma, Paulo Filho, Tayslan Queiroz, Luciano Oliveira, Marcos Germano, Daniel Lira e aos demais que me ajudaram e que também pude ajudar de alguma forma. Em especial aos membros da “República”, Germano Guedes, Lucas Pimentel, Ronildo Farias e Tallis Maia.

Agradeço a convivência ao longo desses anos, onde pudemos compartilhar momentos que nos ajudaram durante essa árdua caminhada.

Aos meus amigos, Abraão Lucas, Filipe Matias, Jorge Caldas e Iusa Carolina, Rodrigo Oliveira e Emanuela Santana, Érika Gondim, Matheus Andrade e Luís Sombra, pelo apoio, amizade e companheirismo de sempre.

Aos meus padrinhos, Francisco Cadeira e Liduina (*in memoriam*), por todo carinho. Saudades madrinha!

À Escola Moderna William Cartesius, aos membros e professores (Lerice, Régis, Branca, Cléa, Cida, Aurecilha, Lidinéia, Vanda, Neta, Franzé, entre outros), por ter sido o complemento da minha educação e onde pude me desenvolver como cidadão. Em especial aos diretores e proprietários, Seu Batista e Dona Lucicleide. Grato por todo o carinho e ajuda dada quando nas dificuldades enfrentadas.

Ao Consórcio Barragem Fronteiras (Galvão Engenharia/EIT Construções), em especial aos engenheiros Assis Souza, Cleidon Raulino, John Winston, Maurílio Freitas e Petrônio Martins, pela oportunidade de inserção no mercado de trabalho e pelos ensinamentos (profissionais e pessoais) transmitidos durante o período do meu estágio.

Por fim, a todos que de alguma forma contribuíram para essa conquista. Dedico essa vitória a vocês!

RESUMO

Este trabalho tem por finalidade a determinação de modelos matemáticos preditivos para obtenção dos parâmetros de solos compactados: peso específico seco máximo e teor de umidade ótima. A metodologia empregada compreendeu, inicialmente, a coleta e o cadastramento de 195 dados de ensaios laboratoriais de solos aplicados em 17 barragens no estado do Ceará, contendo propriedades geotécnicas importantes para o desenvolvimento do estudo. Em seguida, foram realizadas as análises estatísticas dos dados amostrais, sendo definido o modelo de regressão não-linear o mais adequado para representar o comportamento dos parâmetros de compactação frente às propriedades de caracterização dos solos estudados. Os modelos matemáticos determinados mostraram que alguns índices têm uma maior influência nos parâmetros de compactação, tais como: os limites de consistência, percentual de finos e o índice de vazios. Para validação da teoria proposta, foi utilizada uma amostra, contendo 14 resultados de ensaios de laboratório da Barragem Umari (Madalena/CE), no qual não fez parte do processo da modelagem matemática. Os resultados obtidos apresentaram erros percentuais médios da ordem de 2,3% para o peso específico seco máximo e 9,4% para o teor de umidade ótima. Além disso, as amostras foram aplicadas aos modelos matemáticos determinados por Omar *et al.* (2003) e Gurtug e Sridharan (2004), mostrando que tais modelos apresentam valores destoantes do real. Os resultados encontrados se mostraram promissores, indicando que os modelos empíricos representam satisfatoriamente os parâmetros de compactação, justificando a sua utilização na fase de estudos iniciais e anteprojeto, para estruturas que utilizam solos compactados, de modo que sejam reduzidos custos e tempo.

Palavras-chave: Solos compactados. Modelos matemáticos. Geotecnia.

ABSTRACT

The purpose of this work is to determine predictive mathematical models to obtain compacted soil parameters: maximum dry unit weight and optimum moisture content. The methodology used admitted that, initially, the collect and the data registration of laboratory tests of soils applied in 17 water dams in the state of Ceará, having geotechnical properties that are important for the development of the study. Then, the statistics of the sampled data were performed, being the nonlinear regression model defined as the most adequate to represent the parameters behavior of the compaction parameters against the characterization properties of the studied soils. Determined mathematical models have shown that some indices have a greater influence on the compaction parameters, such as consistency limits, percentage of fines and void ratio. To validate the proposed theory, a sample containing 14 laboratory test results from the Umari Dam (Madalena/CE) was used, which was not part of the process of mathematical modeling.process. The results obtained presented average percentage errors of the order of 2.3% for the maximum dry unit weight and 9.4% for the optimal moisture content.. In addition, the samples were applied to the mathematical models determined by Omar et al. (2003) and Gurtug & Sridharan (2004), showing that such models present values that are not equal to the real. The results were promising, indicating that the empirical models satisfactorily represent the compaction parameters, justifying their use in the initial study phase and preliminary design, for structures that use compacted soils, so that costs and time are reduced.

Keywords: Compacted soils. Mathematical models. Geotechnics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Comparação da implementação das teorias existentes em solos do semiárido - Barragem Ubaldinho - Cedro/CE	15
Figura 2 – Exemplo de curva de distribuição granulométrica.....	19
Figura 3 – Diferentes tipos de curvas de distribuição granulométrica	20
Figura 4 – Limites de Atterberg.....	21
Figura 5 – Esquema da determinação do volume dos sólidos pelo peso de água deslocada, método do picnômetro	23
Figura 6 – Curva de compactação	26
Figura 7 – Curvas de compactação de diversos solos brasileiros.....	26
Figura 8 – Processo iterativo de pesquisas empíricas.....	31
Figura 9 – Mapa de localização dos municípios do estudo	35

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Índices de Consistência de alguns solos brasileiros	22
Quadro 2 – Valores de densidade real para alguns tipos de solo.....	24
Quadro 3 – Resumo das amostras coletadas.....	34
Quadro 4 – Resumo da ocorrência das amostras.....	35
Quadro 5 – Estatísticas dos dados para o peso específico seco máximo.....	40
Quadro 6 – Estatísticas dos dados para o teor de umidade ótima.....	42
Quadro 7 – Estatísticas dos dados de validação para o peso específico seco máximo.....	43
Quadro 8 – Estatísticas dos dados de validação para o teor de umidade ótima	44
Quadro 9 – Dados estatísticos para a equação de Omar et al. (2003) - Barragem Umari, Madalena/CE	45
Quadro 10 – Dados estatísticos para a equação de Gurtug e Sridharan (2004) - Barragem Umari, Madalena/CE	46

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Resultados do modelo empírico para o peso específico seco máximo.....	40
Gráfico 2 – Resultados do modelo empírico para o teor de umidade ótima	41
Gráfico 3 – Validação do modelo matemático para $\gamma_{d,máx}$, Barragem Umari.	42
Gráfico 4 – Validação do modelo matemático para $w_{ótima}$, Barragem Umari.....	43
Gráfico 5 – Comparativo entre os modelos, para o $\gamma_{d,máx}$ – Barragem Umari.....	44
Gráfico 6 – Comparativo entre os modelos, para $w_{ótima}$ – Barragem Umari	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Atividade das Argilas
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CL	Argila de baixa plasticidade
COGERH	Companhia de Gestão de Recursos Hídricos
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNOCS	Departamento Nacional de Obras Contra as Secas
EC	Energia de Compactação
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IL	Índice de Liquidez
IP	Índice de Plasticidade
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LC	Limite de Contração
LL	Limite de Liquidez
LMSP	Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação
LP	Limite de Plasticidade
ME	Método de Ensaio
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
NM	Norma Mercosul
SC	Areia argilosa
SC-SM	Areia argilo-siltosa
SM	Areia siltosa
SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos
UFC	Universidade Federal do Ceará
USCS	<i>Unified Soil Classification System</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Considerações iniciais	14
1.2 Motivação	15
1.3 Objetivos.....	16
1.3.1 <i>Objetivo geral</i>	16
1.3.2 <i>Objetivos específicos</i>	16
1.4 Organização do trabalho	17
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1 Ensaio de caracterização do solo	18
2.1.1 <i>Análise granulométrica</i>	18
2.1.2 <i>Limites de consistência</i>	21
2.1.3 <i>Densidade real</i>	22
2.1.4 <i>Compactação do solo</i>	24
2.1.4.1 <i>Conceitos básicos</i>	24
2.1.4.2 <i>Valores típicos de solos compactados</i>	26
2.2 Modelos empíricos para estimativa dos parâmetros de compactação.....	27
2.3 Análises e modelos estatísticos	30
2.3.1 <i>Modelos de regressão linear e não-linear</i>	32
2.3.1.1 <i>Regressão linear</i>	32
2.3.1.2 <i>Regressão não-linear</i>	33
3 MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1 Obtenção e cadastramento de dados de laboratório	34
3.2 Análise estatística para determinação das equações empíricas.....	36
3.2.1 <i>Peso específico seco máximo</i>	36
3.2.2 <i>Teor de umidade ótima</i>	37
3.3 Validação dos modelos matemáticos	38

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
4.1 Modelos matemáticos para estimativa de parâmetros de compactação.....	39
<i>4.1.1 Modelo empírico para peso específico seco máximo</i>	<i>39</i>
<i>4.1.2 Modelo empírico para teor de umidade ótima</i>	<i>41</i>
4.2 Processo de validação dos modelos	42
4.3 Comparação com modelos empíricos da literatura.....	44
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	47
5.1 Equação matemática do peso específico seco máximo	47
5.2 Equação matemática da umidade ótima	47
5.3 Conclusões sobre o trabalho	48
5.4 Recomendações para pesquisas futuras	48
REFERÊNCIAS	49
APÊNDICE A – PLANILHA DOS DADOS COLETADOS.....	51
APÊNDICE B – AVALIAÇÃO DA PRECISÃO DA EQUAÇÃO PARA O PESO ESPECÍFICO SECO MÁXIMO.....	59
APÊNDICE C – AVALIAÇÃO DA PRECISÃO DA EQUAÇÃO PARA O TEOR DE UMIDADE ÓTIMA.....	63
APÊNDICE D – DADOS LABORATORIAIS DAS AMOSTRAS DA BARRAGEM UMARI, MADALENA/CE.....	68
APÊNDICE E – DETALHAMENTO DOS RESULTADOS NO PROCESSO DE VALIDAÇÃO DAS EQUAÇÕES EMPÍRICAS.....	70
APÊNDICE F – DETALHAMENTO DOS RESULTADOS NO PROCESSO DE COMPARAÇÃO ENTRE AS EQUAÇÕES EMPÍRICAS EXISTENTES.....	73

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

O solo compactado é comumente utilizado em obras de engenharia, como construção de aterros em barragens e rodovias. Craig e Knappett (2014) descrevem o aterro de engenharia como aquele no qual o solo foi selecionado e compactado de acordo com uma especificação apropriada, objetivando assegurar que a obra resultante tenha propriedades adequadas para suas funções. Porém, a obtenção das propriedades de compactação ótimas (peso específico seco máximo " $\gamma_{d,máximo}$ " e teor de umidade ótima " $w_{ótima}$ ") é feita a partir de testes de laboratório que requer tempo e esforços consideráveis (MATTEO; BIGOTTI; RICCO, 2009).

Para fases preliminares de um projeto de um aterro, tais como estudos de viabilidade e anteprojeto, em que os recursos financeiros são reduzidos, além do tempo de resposta curto para se ter conhecimento sobre a viabilidade da obra, exigem por parte dos projetistas em utilizarem estudos de campo mais simples, necessitando, desta forma, de metodologias precisas e imediatas para conhecimento das características do solo em estudo.

Para a avaliação preliminar da adequação do solo em estudo, o uso de modelo preditivo pode ser muito útil, especialmente quando algumas propriedades já são conhecidas, como por exemplo, a partir de referências bibliográficas, por dados tabelados de solos com características semelhantes, dentre outros. Essa prática permite ao projetista tomar conhecimento das características geotécnicas do material estudado, dando celeridade ao projeto nas fases preliminares.

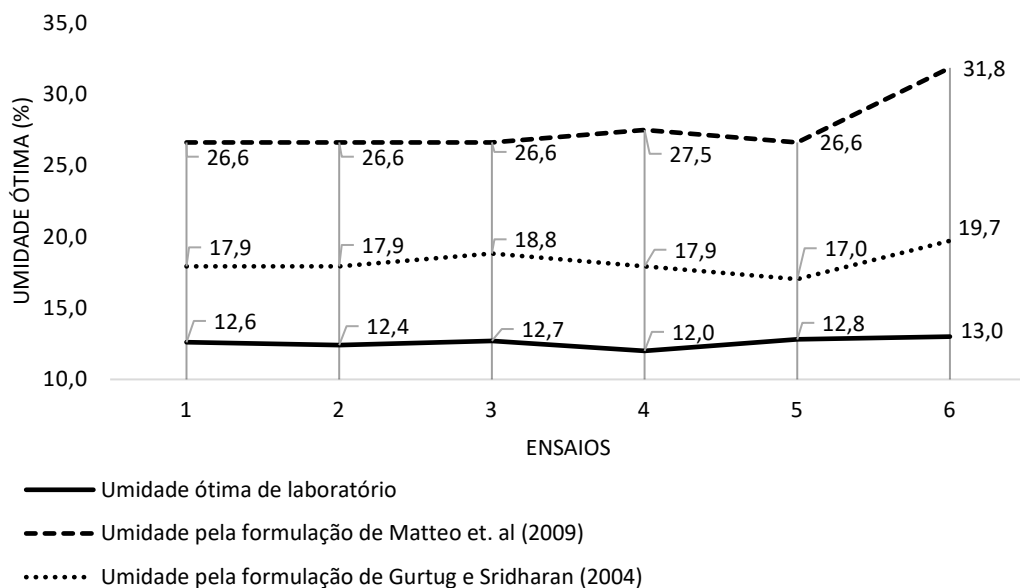
Muitos são os trabalhos realizados, no intuito de catalogar amostras de determinados tipos de solos, e através de ensaios de caracterização e posterior compactação, determinar modelos empíricos para correlacionar estas propriedades. Autores como Wang e Huang (1984) descreveram métodos para estimar o teor de umidade ideal e o peso máximo unitário seco de solos de grão fino para compactação Proctor normal. Tinjum, Benson e Blotz (1997) descreveram um método empírico para estimar o peso máximo unitário seco " $\gamma_{d,máximo}$ " e o teor de umidade ótima " $w_{ótima}$ " de solo argiloso em diferentes energias de compactação. Nagaraj (2000), com base em testes publicados e resultados obtidos por ele, permitiu correlacionar o limite de consistência com os parâmetros de compactação para energia Proctor normal. Omar *et al.* (2003) obtiveram correlações empíricas entre dados de caracterização como faixas de granulometria e limites de consistência para estimar os parâmetros de solos de diversas classificações. Nagaraj *et al.* (2004) avaliaram métodos em que o limite de plasticidade

apresentava uma correlação satisfatória com as características de compactação, quando em comparação à utilização do limite de liquidez e do índice de plasticidade. Gurtug e Sridharan (2004) obtiveram como resultado da correlação para os solos argilosos o valor da umidade ótima sendo 0,92 e 0,70 vezes o limite de plasticidade, para as energias Proctor normal e modificado, respectivamente. Entre as pesquisas mais recentes, Matteo, Bigotti e Ricco (2009), Farooq, Khalid e Mujtaba (2015) e Omar *et al.* (2018), também analisaram solos granulares finos e obtiveram correlações matemáticas entre os parâmetros de compactação e os limites de consistência.

1.2 Motivação

Apesar de existirem inúmeras pesquisas sobre o tema, as relações encontradas pelos pesquisadores supracitados não são adequadas para todos os tipos de solos. Esta afirmação é corroborada em estudo realizado por Xavier (2017), que avaliou a implementação de algumas metodologias propostas, como a de Matteo, Bigotti e Ricco (2009) e Gurtug e Sridharan (2004) em resultados de ensaios de laboratório da Barragem Ubaldinho, no município de Cedro/CE, como mostra a Figura 1.

Figura 1 – Comparação da implementação das teorias existentes em solos do semiárido - Barragem Ubaldinho - Cedro/CE



Fonte: Adaptado de Xavier (2017).

Conforme observa-se, a implementação das formulações empíricas existentes destoa dos valores reais. Neste caso, pode-se elencar inúmeros fatores que influenciam no insucesso da equação para o solo em questão, tais como: a constituição mineralógica do solo ou mesmo as condições de gênese distinta de cada solo, podendo assim influenciar nos parâmetros geotécnicos a serem estimados. Logo, as correlações existentes não são universais para qualquer natureza de solo, implicando na necessidade da realização de novas pesquisas que sejam específicas para a região de estudo.

Portanto, de acordo com o apresentado, verifica-se a necessidade do estudo das correlações empíricas, tendo como base parâmetros básicos de fácil determinação, como ensaios de caracterização do solo (granulometria, limites de consistência e densidade real), para regiões do semiárido nordestino, uma vez que se observa a escassez de pesquisa desta natureza para os solos desta região. Vale salientar ainda, que os resultados desta pesquisa permitirão um melhor uso do solo para fins de Engenharia Civil, além de fomentar a pesquisa e a caracterização dos solos do semiárido nordestino, estimulando o desenvolvimento da Mecânica dos Solos na região.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral é determinar correlações empíricas para estimativa de parâmetros geotécnicos de compactação para solos do semiárido do estado do Ceará.

1.3.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- a) Elaborar um banco de dados de parâmetros geotécnicos, contendo dados de compactação e de caracterização de solos de diversas classificações;
- b) Estudar as correlações empíricas para distintos tipos de materiais, relacionando os parâmetros de compactação para energia Proctor normal ($\gamma_{d.máximo}$ e $W_{ótima}$) com parâmetros geotécnicos de caracterização;
- c) Desenvolver novas tecnologias de forma a levar processos ou modelos com resultados de maior celeridade e de precisão satisfatória para os solos do semiárido nordestino, precisamente os do estado do Ceará.

1.4 Organização do trabalho

O presente trabalho está organizado e dividido em 5 capítulos:

- a) No capítulo 1 é apresentada, de forma resumida, a problemática do tema abordado, além da relevância e motivação da pesquisa, assim como os objetivos geral e específicos;
- b) No capítulo 2, é abordada a Fundamentação Teórica necessária para o entendimento da presente pesquisa, com a apresentação de conceitos relacionados à caracterização e compactação de solos, métodos estatísticos e modelos matemáticos existentes para determinação de parâmetros geotécnicos;
- c) No capítulo 3, é descrita a metodologia adotada para o desenvolvimento do estudo, bem como os procedimentos de coleta, organização e análise estatística dos dados, de modo a determinar as correlações empíricas das propriedades de solos compactados;
- d) No capítulo 4, são apresentados os resultados obtidos no presente estudo, e uma análise, contendo informações essenciais para a conclusão deste trabalho;
- e) No capítulo 5, é apresentada a conclusão do trabalho, além de sugestão para trabalhos futuros. Por último, são apresentadas as referências bibliográficas citadas no texto e os apêndices com os dados utilizados neste trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, é feita uma breve revisão a respeito da caracterização dos solos, apresentando conceitos fundamentais para entendimento do assunto abordado. Serão apresentados alguns dos principais conceitos a respeito de solos compactados, modelos preditivos para obtenção de parâmetros de compactação do solo, além de considerações a respeito de métodos estatísticos e modelos matemáticos não lineares.

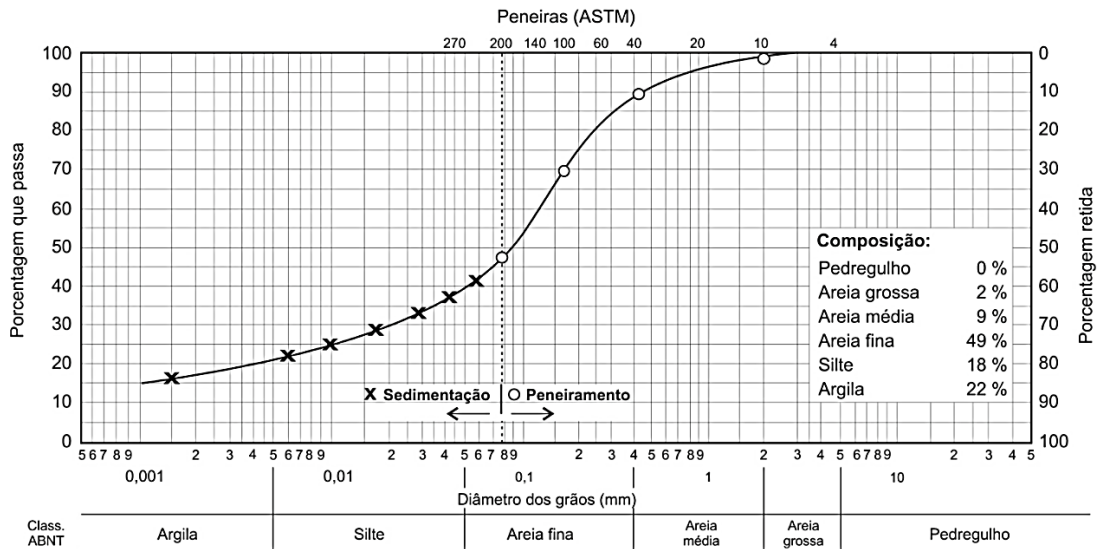
2.1 Ensaio de caracterização do solo

De acordo com Massad (2013), os primeiros homens que se preocuparam com os solos para fins de Engenharia Civil acreditavam que o comportamento destes dependia exclusivamente do tamanho dos grãos. Com o passar do tempo, o centro das atenções deslocou-se para outros aspectos dos solos. Desta forma, faz-se necessário a caracterização dos solos através de ensaios, úteis para o conhecimento de propriedades como granulometria, limites de Atterberg e índices físicos (ORTIGÃO, 2007). Tais parâmetros são essenciais para a compreensão do comportamento mecânico dos solos e que podem ser determinadas com a realização de ensaios como: análise granulométrica, índices de consistência e densidade real.

2.1.1 Análise granulométrica

A análise granulométrica tem como objetivo determinar as dimensões das partículas e suas proporções relativas de ocorrência, obtendo o traçado da curva granulométrica do solo apresentado na Figura 2. Realizam-se dois métodos de ensaio: peneiramento e sedimentação. Para os solos grossos (partículas com dimensões maiores que 0,075 mm) utiliza-se o ensaio por peneiramento e para os solos finos (partículas com dimensões menores que 0,075 mm) o ensaio por sedimentação. Os métodos de ensaios mencionados são normatizados no Brasil pela Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT seguindo a Norma Brasileira - NBR 7181:2016.

Figura 2 – Exemplo de curva de distribuição granulométrica



Fonte: Sousa Pinto (2006).

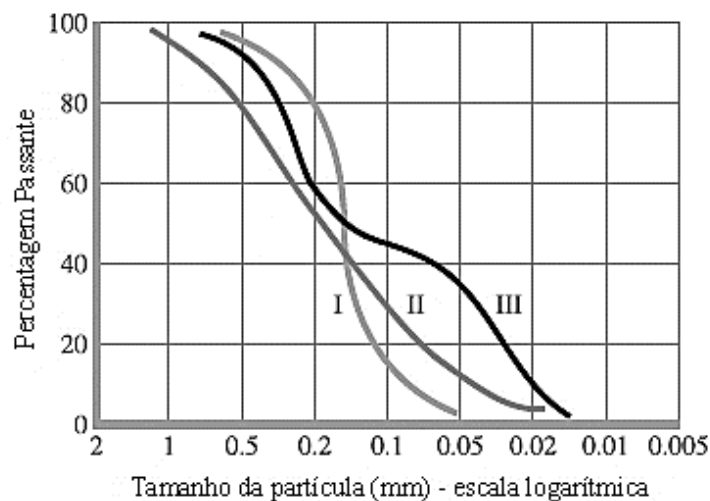
No ensaio por peneiramento obtém-se a porcentagem do material que passa pelas peneiras, padronizadas segundo a NBR NM ISO 3310-1, referido ao peso seco da amostra, e representa-se graficamente essa porcentagem em função da abertura da peneira. “A abertura nominal da peneira é considerada como o ‘diâmetro’ das partículas. Trata-se de um diâmetro equivalente, pois as partículas não são esféricas.” (PINTO, 2006, p. 22).

O método de sedimentação utilizado para a análise granulométrica, baseado na Lei de Stokes, consiste na colocação de uma certa quantidade de solo em suspensão em água, onde as partículas caem com velocidades proporcionais ao quadrado de seus diâmetros. Massad (2013) explica a Teoria da Sedimentação Contínua através de hipóteses simplificadoras, que validam a Lei de Stokes para o método de sedimentação, como a seguir:

- Para uma densidade de suspensão conhecida, não existe interferência entre as partículas de solo em queda livre;
- O valor da densidade dos grãos mantém-se constante, mesmo existindo partículas com densidades diferentes entre si. Massad (2013) mostra que essa hipótese simplificadora induz a erros na ordem de 3,0%, sendo desprezíveis diante das incertezas do método de ensaio;
- As partículas de solos são consideradas esféricas, mesmo que algumas partículas de solo apresentem formas de placas ou tubos. “A aplicação da lei de Stokes leva à determinação de diâmetros equivalentes, isto é, diâmetros de esferas que caem com a mesma velocidade que as placas ou tubos [...]” (MASSAD, 2013, p. 64);
- Movimentação das partículas é devido apenas à gravidade.

Com os dados obtidos nos ensaios por peneiramento e sedimentação, gera-se a curva de distribuição granulométrica que pode ser utilizada para determinação de dois parâmetros geotécnicos dos solos: o diâmetro efetivo (D_{10}) e o coeficiente de uniformidade (C_u). O diâmetro efetivo indica o diâmetro onde passa apenas 10% em massa na curva de distribuição granulométrica, sendo “[...] uma boa medida para estimar a condutividade hidráulica e drenagem através do solo.” (DAS; SOBHAN, 2014, p. 39). O coeficiente de uniformidade é a razão entre os diâmetros correspondentes a 60% (D_{60}) e 10% (D_{10}) tomados na curva granulométrica, indicando a “[...] ‘falta de uniformidade’, pois seu valor diminui ao ser mais uniforme o material.” (CAPUTO, 2015, p. 27). Além disso, a curva apresenta o tipo de distribuição das partículas, como mostra a Figura 3. A curva I representa o solo mal graduado, onde a maioria dos seus grãos são do mesmo tamanho. A curva II representa um solo bem graduado ou desuniforme, onde os tamanhos das partículas são distribuídos em uma ampla faixa. O solo com granulometria descontínua, representado pela curva III, tem a combinação de duas ou mais frações com granulação uniforme.

Figura 3 – Diferentes tipos de curvas de distribuição granulométrica



Fonte: Adaptado de Braja Das e Sobhan (2014).

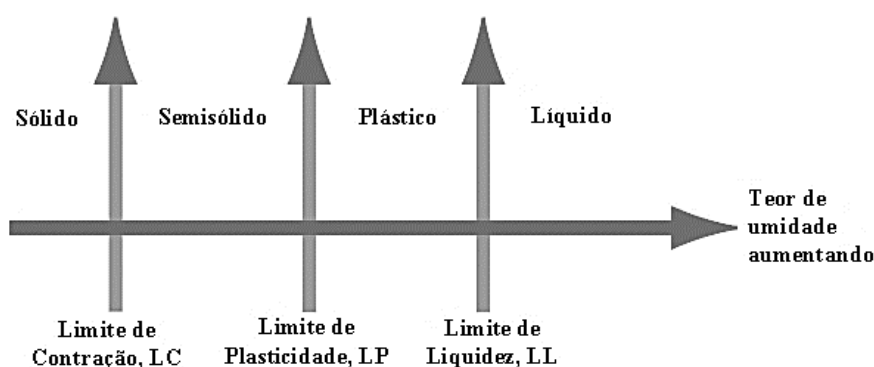
Observa-se na Figura 1 algumas designações que expressam as faixas granulométricas, como argila, silte, areia e pedregulho. Segundo Pinto (2006, p. 23), essas designações servem também para expressar o comportamento dos próprios solos, como por exemplo, “[...] diz-se que um solo é uma argila quando o seu comportamento é o de um solo argiloso, ainda que contenha partículas com diâmetros correspondentes às frações silte e areia.”

2.1.2 Limites de consistência

A consistência do solo varia em função de uma série de características do material, tais como, estrutura mineralógica, agentes cimentantes (matéria orgânica, óxidos de ferro e de alumínio), etc., porém, o estudo do seu comportamento através desses fatores é muito complexo. Devido à esta complexidade elaborou-se uma análise indireta do comportamento do solo em relação ao seu teor de umidade. Esses estudos são baseados em ensaios propostos pelo engenheiro químico Atterberg e que posteriormente foram padronizados pelo professor de Mecânica dos Solos, Arthur Casagrande.

Atterberg definiu limites que delimitam o intervalo de consistência do solo, denominados: Limite de Liquidez (LL), Limite de Plasticidade (LP) e Limite de Contração (LC). A Figura 4 ilustra os estados e limites de consistência do solo.

Figura 4 – Limites de Atterberg



Fonte: Adaptado de Braja Das e Sobhan (2014).

Das e Sobhan. (2014, p. 71) descrevem:

“O teor de umidade na qual ocorre a transição do estado sólido para o semissólido é definido como limite de contração, e é expresso em termos percentuais. O teor de umidade no ponto de transição do estado semissólido para o estado plástico é o limite de plasticidade, e o do estado plástico para o líquido é o limite de liquidez”.

Utiliza-se o Aparelho de Casagrande no ensaio de Limite de Liquidez e sua determinação se dá através de ensaio padronizado no Brasil pela ABNT – NBR 6459:2016. Para o ensaio do Limite de Plasticidade segue-se a NBR 7180:2016. A seguir, no Quadro 1, são apresentados resultados típicos de alguns solos brasileiros.

Quadro 1 – Índices de Consistência de alguns solos brasileiros

Solos	LL%	IP%
Residuais de arenito (arenosos finos)	29-44	11-20
Residual de gnaise	45-55	20-25
Residual de basalto	45-70	20-30
Residual de granito	45-55	14-18
Argilas orgânicas de várzeas quaternárias	70	30
Argilas orgânicas de baixadas litorâneas	120	80
Argila porosa vermelha de São Paulo	65 a 85	25 a 40
Argilas variegadas de São Paulo	40 a 80	15 a 45
Areias argilosas variegadas de São Paulo	20 a 40	5 a 15
Argilas duras, cinzas, de São Paulo	64	42

Fonte: Adaptado de Sousa Pinto (2006).

Alguns parâmetros geotécnicos estão relacionados aos limites de consistência, destacando-se entre eles o índice de plasticidade (IP) e o índice de liquidez (IL). De acordo com Ortigão (2007, p. 24), “Atterberg sugeriu que a diferença, em percentagem, entre os limites de plasticidade e liquidez, denominada índice de plasticidade (IP), informa quanto à amplitude da faixa de plasticidade [...]”. Das e Sobhan (2014, p. 83) definem o índice de liquidez como sendo a “[...] consistência relativa de um solo coesivo em estado natural.”

Para Pinto (2006, p. 27), “os índices de consistência mostram-se muitos úteis para a identificação dos solos e sua classificação. Dessa forma, com o seu conhecimento, pode-se prever muito do comportamento do solo, sob o ponto de vista da Engenharia [...]”.

2.1.3 Densidade real

A densidade real do solo é a relação entre o peso específico das partículas sólidas (γ_s), e o peso de igual volume de água pura a 4 °C (γ_w). Também é denominada densidade relativa das partículas que constituem o solo, definida como a seguir:

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \quad (1)$$

onde,

G_s : a densidade real do solo, adimensional;

γ_s : o peso específico das partículas do solo, em g/cm³;

γ_w : o peso específico da água pura a 4 °C, igual a 1,00 g/cm³.

Há de se considerar a densidade real do solo à uma determinada temperatura, comumente 20 °C, calculada como a seguir:

$$G_{s,20} = K_{20} \cdot G_s \quad (2)$$

onde,

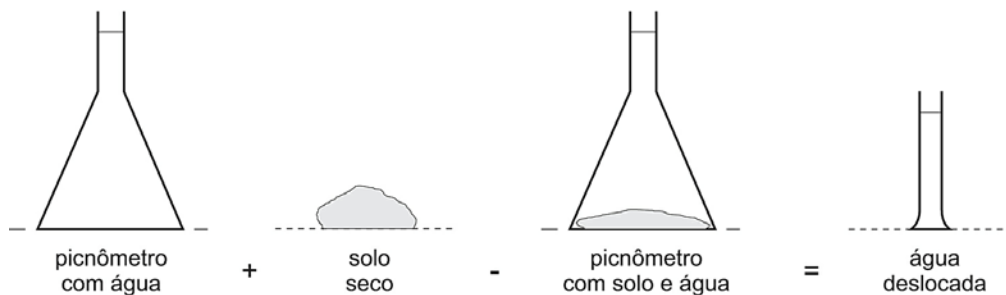
$G_{s,20}$: densidade real do solo a 20 °C, adimensional;

K_{20} : razão entre a densidade relativa da água à temperatura (t) e a densidade relativa da água a 20 °C, adimensional.

Para a determinação da densidade real do solo segue-se o método do picnômetro, ilustrado na Figura 5, normatizado pelo Departamento Nacional de Estradas e Rodagens (DNER) através do Método de Ensaio DNER-ME 093/94, descrito a seguir:

“Coloca-se um peso seco conhecido do solo num picnômetro, e completando-se com água, determina-se o peso total. O peso do picnômetro completado só com água, mais o peso do solo, menos o peso do picnômetro com solo e água, é o peso da água que foi substituída pelo solo [...]. Desse peso, calcula-se o volume de água que foi substituído pelo solo e que é o volume do solo. Com o peso e o volume, tem-se o peso específico.” (PINTO, 2006, p. 36).

Figura 5 – Esquema da determinação do volume dos sólidos pelo peso de água deslocada, método do picnômetro



Fonte: Sousa Pinto (2006).

O peso específico dos sólidos varia pouco entre os diferentes tipos de solo, sendo função da sua composição mineralógica. Alguns valores de densidade real do solo são apresentados no Quadro 2.

Quadro 2 – Valores de densidade real para alguns tipos de solo

Tipos de solos	Densidade real
Areia	2,65 a 2,67
Argila siltosa	2,67 a 2,70
Argila inorgânica	2,70 a 2,80
Solos com mica e ferro	2,75 a 3,00
Solos orgânicos	Variável, chegando a < 2,0

Fonte: Dados do Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação – LMSP/UFC (2019).

2.1.4 Compactação do solo

2.1.4.1 Conceitos básicos

“Compactação é o processo de aumentar a massa específica (densidade) de um solo, agrupando (adensando) as partículas com uma redução do volume de ar; não há mudança significativa no volume de água do solo.” (CRAIG; KNAPPETT, 2014, p. 21). Para Das e Sobhan (2014), o processo de densificação do solo se dá através da aplicação de energia mecânica, removendo o ar nele contido. Devido a essa energia de compactação o solo adquire um aumento do seu peso específico e da sua resistência, além de conferir um decréscimo no seu índice de vazios, permeabilidade e compressibilidade. As características dos solos, obtidas após sua compactação, têm relevância em obras de engenharia, como a construção de aterros em rodovias e barragens, pois lhe é conferido uma maior estabilidade quando comparado a um solo não compactado.

O engenheiro norte-americano Ralph Proctor, em 1933, deu início à técnica de compactação e observou que para uma determinada energia de compactação aplicada ao solo, a massa específica resultante variava com a umidade presente no solo. “Há, portanto, para a *energia aplicada*, um certo teor de umidade, denominado *umidade ótima*, que conduz a uma *massa específica seca máxima*, ou uma *densidade seca máxima*.” (PINTO, 2006, p. 78). Para a determinação dos parâmetros abordados, a ABNT padronizou o Ensaio de Compactação através da NBR 7182:2016. O ensaio é repetido para diferentes teores de umidade, onde determinam-se para cada um deles, o peso específico aparente. Em relação à energia de compactação há três métodos de ensaio em laboratório: (i) Proctor normal; (ii) Proctor intermediário; e (iii) Proctor modificado.

No método de ensaio Proctor normal, o solo, previamente seco ao ar até a umidade higroscópica e destorroado, é compactado em um cilindro metálico de volume determinado. Acrescenta-se gradativamente água destilada à amostra, revolvendo o material, procedendo

com a compactação de 03 (três) camadas, aplicando, em cada, 26 golpes, através de um soquete metálico de massa conhecida. Posteriormente, o corpo de prova deve ser extraído do cilindro e uma amostra é coletada do seu centro, afim de determinar a umidade (w). O procedimento é repetido até que sejam obtidos cinco pontos, de tal forma que os dois ou três últimos apresentem decréscimo no valor da massa específica aparente seca. Calcula-se a massa específica aparente seca, através da equação a seguir:

$$\rho_d = \frac{M_u \cdot 100}{V \cdot (100 + w)} \quad (3)$$

onde,

ρ_d : a massa específica aparente seca, em gramas por centímetro cúbico (g/cm^3);

M_u : a massa úmida do solo compactado, em gramas (g);

V: o volume útil do cilindro, em centímetros cúbicos (cm^3);

w: o teor de umidade do solo compactado, em porcentagem (%).

O peso específico seco, γ_d , é calculado multiplicando a massa específica aparente seca pela aceleração da gravidade, g, como a seguir:

$$\gamma_d = \rho_d \cdot g \cdot 1000 \quad (4)$$

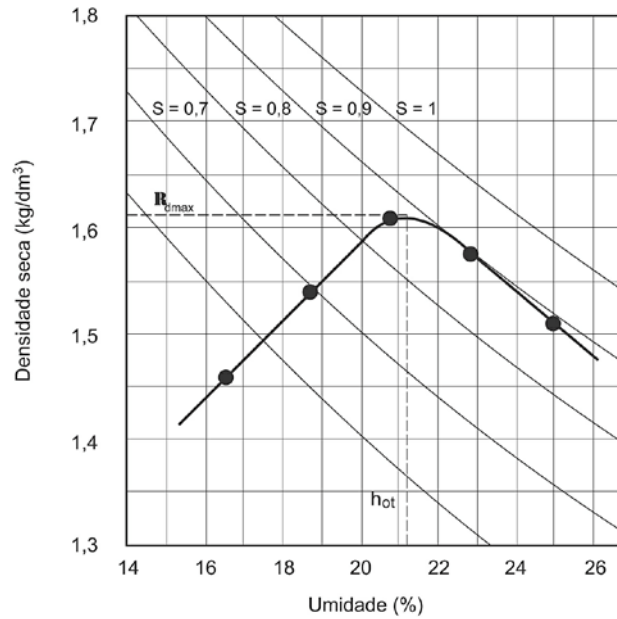
onde,

γ_d : o peso específico seco, em quilonewton por metro cúbico (kN/m^3);

g: a aceleração da gravidade, considerada aproximadamente igual a $9,81 \text{ m}/\text{s}^2$.

Com os dados obtidos traça-se a curva de compactação do solo, representando o peso específico seco, ou a massa específica aparente seca, em função do teor de umidade, mostrada na Figura 6. Como citado anteriormente, a curva apresenta uma massa específica aparente seca máxima que corresponde à uma umidade ótima. Também é representada no gráfico a curva de saturação, que corresponde ao lugar geométrico dos valores de densidade seca e umidade onde o solo está saturado. “O solo pode estar em qualquer posição abaixo da curva de saturação, mas nunca acima dela. Os pontos ótimos das curvas de compactação situam-se em torno de 80 a 90% de saturação.” (PINTO, 2006, p. 80).

Figura 6 – Curva de compactação

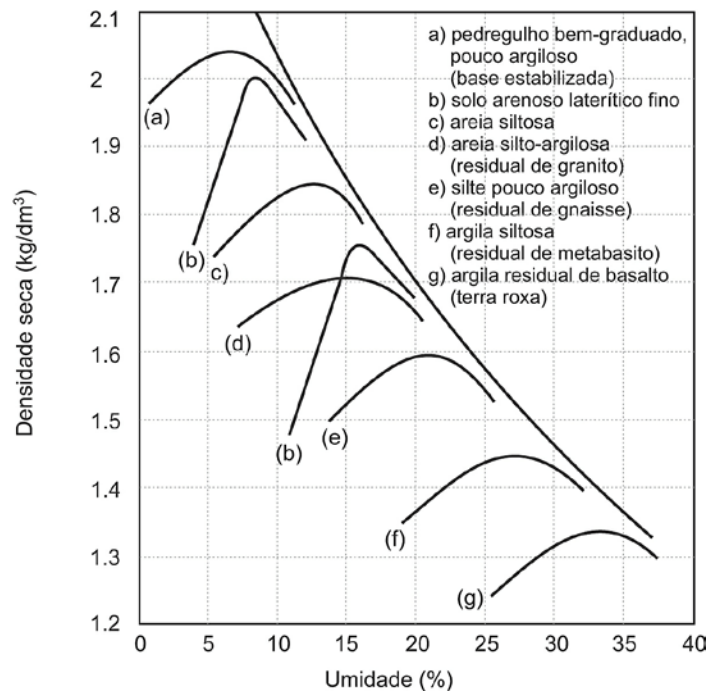


Fonte: Sousa Pinto (2006).

2.1.4.2 Valores típicos de solos compactados

Pinto (2006) apresenta algumas curvas de compactação para diferentes tipos de solo brasileiros, conforme pode ser observado na Figura 7.

Figura 7 – Curvas de compactação de diversos solos brasileiros



Fonte: Sousa Pinto (2006).

Pinto (2006) discorre ainda sobre os valores típicos de densidade seca máxima e teor de umidade ótima dos solos granulares e finos, como se segue:

- (a) Areias com pedregulhos, bem-graduadas e pouco argilosas: os valores de densidade seca máxima são da ordem de 2,0 a 2,1 kg/dm³, enquanto apresentam baixo teor de umidade ótima, aproximadamente 9 a 10%;
- (b) Areias finas argilosas lateríticas: apresentam densidade seca máxima em torno de 1,9 kg/dm³ e teor de umidade ótima de 12 a 14%;
- (c) Solos siltosos: o valor de densidade seca é da ordem de 1,6 kg/dm³ e teor de umidade ótima de 20 a 22%;
- (d) Solos argilosos: apresentam valores de umidade ótima de 25 a 30%, correspondendo às densidades secas máximas de 1,4 a 1,5 kg/dm³

Para Massad (2010, p.152) as diferenças apresentadas “[...] são marcantes, a ponto de se poder utilizar esses parâmetros como diferenciadores dos solos.” Além do que, para Pinto (2006, p. 81), “os valores são meramente indicativos da ordem de grandeza, pois há muita diferença de resultados de amostras de mesma procedência.”

2.2 Modelos empíricos para estimativa dos parâmetros de compactação

Neste tópico serão apresentados modelos empíricos encontrados na literatura que tem como objetivo estimar o teor de umidade ótima e o peso específico seco máximo, com base nos parâmetros geotécnicos de solos, tais como, limites de consistência, granulometria, energia de compactação, entre outros.

Os autores buscam através dos estudos uma avaliação preliminar da utilização de materiais de empréstimos aplicados em obras de engenharia. Diferentes tipos de solos, de diversas regiões, foram estudados para o desenvolvimento das correlações apresentadas a seguir.

Omar *et al.* (2003) realizaram estudos para avaliação das características de compactação, com dados de caracterização de 311 amostras de solos arenosos e areno-siltosos, coletadas em regiões dos Emirados Arábes Unidos, buscando o desenvolvimento de equações preditivas que determinassem correlações entre as propriedades geotécnicas destes solos. Executaram-se os ensaios nas amostras com a aplicação de energia de compactação Proctor modificado e, posteriormente, análises de regressão múltipla dos dados experimentais foram realizadas para o estabelecimento dos seguintes modelos matemáticos:

$$\rho_{d(\text{máx})}(\text{kg/m}^3) = [4.804.574 \cdot G_s - 195,55 \cdot (\text{LL}^2) + 156.971 \cdot (\text{R\#4})^{0.5} - 9.527.830]^{0.5} \quad (5)$$

$$\ln(w_{\text{ótima}}) = 1,195 \times 10^{-4} \cdot (\text{LL})^2 - 1,964 \cdot G_s - 6,617 \times 10^{-5} \cdot (\text{R\#4}) + 7,651 \quad (6)$$

onde,

$\rho_{d(\text{máx})}$: a massa específica seca máxima, em kg/m³;

$w_{\text{ótima}}$: o teor de umidade ótima, em porcentagem;

G_s : o peso específico relativo de sólidos;

LL: o limite de liquidez, em porcentagem;

R#4: o percentual retido na peneira n° 4 (4,75 mm).

Os modelos encontrados serviram como base para o desenvolvimento de soluções nomográficas, processo de cálculo onde a relação entre duas ou mais variáveis representa-se por um sistema de linhas e pontos, para estimar as propriedades de compactação de solos granulares. “As estimativas desses nomógrafos mostraram-se precisas dentro de 5% para a densidade seca máxima e dentro de 3% para o teor de umidade ideal.” (OMAR *et al.*, 2003, p. 295, tradução nossa). Concluiu-se, portanto, que “[...] os modelos desenvolvidos são precisos e podem ser utilizados como uma ferramenta simples para aproximar a densidade seca máxima e o teor de umidade ótima em solos granulares.” (OMAR *et al.*, 2003, p. 295, tradução nossa).

Com o objetivo de avaliar a variação dos parâmetros de compactação para diferentes níveis de energia, explicado pela utilização de diversos equipamentos no campo, Gurtug e Sridharan (2004) sugeriram correlações entre o limite de plasticidade (LP) e as propriedades de compactação de solos coesivos. As amostras de solos foram coletadas em regiões da República do Chipre e da Turquia, que, segundo os autores, são bastantes utilizadas em obras de engenharia, como aterros de pavimentação e estruturas de contenção de terra. A seguir estão os resultados obtidos no estudo:

$$w_{\text{ótima}} (\%) = [1,95 - 0,38 \cdot \log (EC)] \cdot (LP) \quad (7)$$

$$\gamma_{d(\text{máx})} (\text{kN/m}^3) = 23,68 \cdot e^{-0,0183 w_{\text{ótima}}} \quad (8)$$

onde,

LP: o limite de plasticidade (%);

EC: a energia de compactação (kN·m/m³).

Para Gurtug e Sridharan (2004, p.1, tradução nossa), “[...] a correlação acima com o limite de plasticidade permite não apenas economizar tempo, mas também custos de investigação para o projeto preliminar.”

Matteo, Bigotti e Ricco (2009) destacaram que haviam poucos estudos desenvolvidos para prever os parâmetros de compactação de solos de grãos finos, utilizando a energia Proctor modificado. Face à problemática, os autores analisaram modelos de regressão múltipla para estimar o teor de umidade ótima e a densidade seca máxima, com a utilização de propriedades geotécnicas de solos argilosos. Foram avaliadas 30 amostras de solos, coletadas em regiões da Itália, e 41 oriundas da literatura, como por exemplo, amostras dos estudos de Omar *et al.* (2003) e Gurtug e Sridharan (2004). Os resultados mostraram que as variáveis que mais influenciaram os parâmetros de compactação foram a densidade real e os limites de consistência, resultando nas seguintes equações:

$$w_{\text{ótima}} (\%) = -0,86 \cdot LL + 3,04 \cdot (LL/G_s) + 2,2 \quad (9)$$

$$\gamma_{d(\text{máx})} (\text{kN/m}^3) = \left[(40,316 \cdot w_{\text{ótima}}^{-0,295}) \cdot IP^{0,032} \right] - 2,4 \quad (10)$$

onde,

LL: o limite de liquidez (%);

IP: o índice de plasticidade (%);

G_s: a densidade real dos sólidos.

Matteo, Bigotti e Ricco (2009) especificaram ainda que para validação das equações devem ser satisfeitas as seguintes condições:

- a) $7 \leq w_{\text{ótima}} \leq 23\%$;
- b) $15 \leq \gamma_{d,\text{máx}} \leq 22 \text{ kN/m}^3$;
- c) $18 \leq LL \leq 82\%$
- d) $1 \leq IP \leq 51\%$;
- e) $2,47 \leq G_s \leq 3,09$.

Em pesquisa mais recente, Farooq, Khalid e Mujtaba (2015) utilizaram dados de 105 amostras de solos de grãos finos de áreas da província Punjab, no Paquistão, correlacionando os dados de limite de consistência, energia de compactação (EC), teor de umidade ótima e o peso específico seco máximo. Farooq, Khalid e Mujtaba (2015) também realizaram análises de regressão múltipla, obtendo como resultado os modelos apresentados

abaixo. Para validação das equações encontradas, foi utilizado um conjunto de dados independentes de 37 amostras oriundas de literaturas disponíveis.

$$\gamma_{d(\text{máx})}(\text{kN/m}^3) = -0,055 \cdot (\text{LL}) + 0,014 \cdot (\text{IP}) + 2,21 \cdot \log(\text{EC}) + 12,84 \quad (11)$$

$$w_{\text{ótima}}(\%) = 0,133 \cdot (\text{LL}) + 0,02 \cdot (\text{IP}) - 5,99 \cdot \log(\text{EC}) + 28,60 \quad (12)$$

onde,

LL: o limite de plasticidade (%);

IP: o índice de plasticidade (%);

EC: a energia de compactação (kN-m/m³).

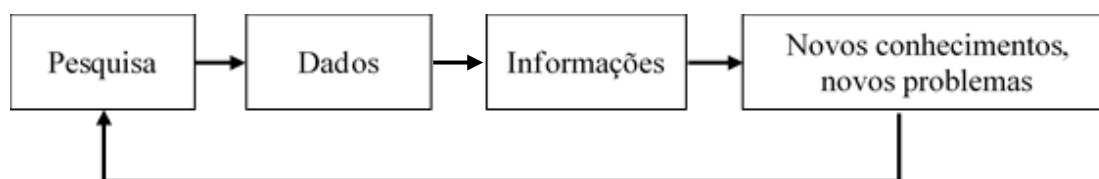
Os estudos apresentados mostram-se semelhantes, se observado os objetivos buscados, métodos de avaliação e validação dos modelos, e utilização de propriedades físicas como limites de consistência, granulometria e densidade real. Os autores utilizam dados baseados em literaturas e mostram que as correlações sugeridas por outros pesquisadores não retratam os parâmetros geotécnicos dos solos de diferentes regiões, demonstrando, portanto, a necessidade de se analisar o comportamento das propriedades de solos compactados frente às suas características físicas.

2.3 Análises e modelos estatísticos

Frequentemente os engenheiros realizam análises de dados, com o objetivo de observar fenômenos ocorridos em suas áreas e avaliar como estes se apresentam frente às variáveis que influenciam em seu comportamento. Para isso lança-se mão da Estatística, definida como “[...] a ciência do planejamento de estudos e experimentos, da obtenção de dados, e em seguida, da organização, resumo, apresentação, análise, interpretação e elaboração de conclusões com base nos dados.” (TRIOLA, 2013, p. 4).

Barbetta, Reis e Bornia (2010, p. 11) destacam que, “A análise estatística de dados geralmente tem por objetivo tomadas de decisões, resoluções de problemas ou produção de conhecimento. Mas novos conhecimentos normalmente geram novos problemas de pesquisa, resultando em um processo iterativo.”. O processo de iteração citado pelos autores está esquematizado na Figura 8.

Figura 8 – Processo iterativo de pesquisas empíricas



Fonte: Adaptado de Barbetta (2010).

Para Levine, Stephan e Szabat (2017), a aplicação da estatística de maneira adequada deve seguir uma estrutura de modo a minimizar possíveis erros de análise. A seguir é apresentada a estrutura DCOVA, que consiste nas seguintes etapas:

- (a) **D**efinir;
- (b) **C**oletar;
- (c) **O**rganizar;
- (d) **V**isualizar;
- (e) **A**nalisar.

A etapa “**D**efinir” é a determinação do que se deseja estudar, capaz de atender aos objetivos estabelecidos. Definido o estudo, procede-se com a “**C**oletar” dos dados, realizando-a em fontes adequadas. Posteriormente, deve-se “**O**rganizar” os dados em tabelas ou planilhas, de modo a “**V**isualizá-los” por meio de gráficos, prosseguindo com a “**A**nálise” para que sejam desenvolvidas as conclusões e apresentações dos resultados.

De acordo com o problema e os objetivos da pesquisa, Barbetta, Reis e Bornia (2010) indicam que se deve decidir entre uma pesquisa de levantamento e uma pesquisa experimental. Na pesquisa de levantamento (ou observacional) é realizada a observação ou medição das características de determinada população (conjunto de elementos), sem que haja manipulação dos dados. Na pesquisa experimental, comumente utilizada na área tecnológica, as variáveis independentes são manipuladas, de forma planejada, para verificar o efeito provocado em uma certa variável dependente.

“Quando se conhece pouco sobre o problema em estudo, é comum buscar a *caracterização do processo*, isto é, pesquisar quais são os fatores que provocam maiores alterações na resposta. Geralmente, esses estudos iniciam com grande número de fatores e, a partir de um estudo experimental planejado, faz-se uma triagem de fatores, escolhendo os mais significativos.” (BARBETTA; REIS; BORNIA, 2010, p. 34).

2.3.1 Modelos de regressão linear e não-linear

Buscando a representação da realidade de forma simplificada e de fácil interpretação, alguns modelos estatísticos são utilizados em pesquisas, exemplificando, os modelos mecanísticos e os empíricos. Os modelos mecanísticos são “[...] caracterizados por serem totalmente deduzidos do conhecimento sobre o fenômeno físico em questão. [Os modelos empíricos] são construídos com base em observações reais sobre o problema em estudo.” (BARBETTA; REIS; BORNIA, 2010, p. 16). Entre os tipos de modelos empíricos cita-se o de regressão linear e não-linear, que, segundo Zeviani, Ribeiro Júnior e Bonat (2013, p. 1),

“[...] são usados para descrever o comportamento de uma variável aleatória (v.a.) Y como uma função de condicionantes x chamadas de variáveis explicativas, covariáveis ou estímulos. Com tais modelos busca-se encontrar e descrever padrões de homogeneidade dentre a heterogeneidade observada em um conjunto de observações de Y .”

Segundo Morettin e Bussab (2013, p. 482), “Quando usamos modelos de regressão, [...] a situação ideal é aquela em que o pesquisador, por razões teóricas inerentes ao problema real sob estudo, pode sugerir a forma funcional da relação entre duas ou mais variáveis.”

2.3.1.1 Regressão linear

No modelo de regressão linear, uma ou mais variáveis independentes são utilizadas para prever a variável dependente. “A natureza da relação entre [...] variáveis pode assumir inúmeras formas, abrangendo desde funções matemáticas simples até funções matemáticas extremamente complicadas.” (LEVINE; STEPHAN; SZABAT, 2017, p. 474). Quando o estudo se limita à análise da relação entre duas variáveis, tem-se o modelo de *regressão linear simples*, dado como na Equação (13).

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \varepsilon_i \quad (13)$$

onde,

Y_i : a variável dependente associada à i -ésima observação;

β_0 : o intercepto de Y para a população;

β_1 : a inclinação da população;

X_i : a variável independente para a i -ésima observação;

ε_i : o erro aleatório em Y para a i -ésima observação.

2.3.1.2 Regressão não-linear

Quando a estimação de alguma variável, através do modelo linear, não satisfizer as condições de normalidade e linearidade, faz-se o uso do modelo de regressão não-linear. Para Mattos (2013, p. 16), o modelo de regressão não-linear “[...] é frequentemente utilizado por pesquisadores em diversas áreas do conhecimento, tais como, agricultura, engenharia, química, etc.”

Os modelos não-lineares usualmente são embasados por informações à cerca da relação entre as variáveis Y e X, vinculadas à “[...] 1) uma análise de um diagrama de dispersão de y contra x, 2) restrições de forma da função [...], 3) solução de uma equação diferencial sustentada por algum princípio/teoria, 4) ou interpretação dos seus parâmetros”. (ZEVIANI; RIBEIRO JÚNIOR; BONAT, 2013, p. 14).

Segundo Zeviani, Ribeiro Júnior e Bonat (2013), apesar do modelo ser descrito como uma função não linear dos parâmetros estudados, apresentam relações não-lineares entre as variáveis. A representação do modelo, segundo Mattos (2013), é mostrada a seguir.

$$Y_i = f(X_i, \theta) + \varepsilon_i \quad i = 1, \dots, n \quad (14)$$

onde,

Y_i : a variável resposta;

X_i : a variável explicativa;

$f(\cdot)$: a função não linear com forma conhecida;

θ : parâmetros desconhecidos a serem estimados;

ε_i : erros aleatórios.

A seguir são descritas as vantagens e desvantagens dos modelos de regressão não-lineares sobre os de regressão lineares. Entre as vantagens:

- (a) O fenômeno alvo é de conhecimento do pesquisador;
- (b) Apresenta praticidade na interpretação dos parâmetros;
- (c) A escolha pelo modelo se sustenta em teorias ou processos mecânicos;
- (d) Pode ocorrer previsões fora do domínio observado de X.

Entre as desvantagens:

- (a) Exige conhecimento do pesquisador sobre o fenômeno estudado;
- (b) Necessidade de se realizar procedimentos iterativos, com base em valores iniciais determinados aos parâmetros.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo é abordada a metodologia empregada para o desenvolvimento do presente estudo. Também são descritas as atividades de obtenção, cadastramento e análise estatística dos dados, além do processo de validação da pesquisa com dados fora da amostra utilizada para a determinação das equações preditivas.

3.1 Obtenção e cadastramento de dados de laboratório

Para o desenvolvimento desta pesquisa, selecionou-se dados de ensaios de laboratório de 17 obras de barragens projetadas no estado do Ceará, totalizando 195 amostras de solos, como mostrado no Quadro 3 e Quadro 4. A obtenção dos dados foi realizada no histórico de amostras ensaiadas no Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação - LMSP da Universidade Federal do Ceará, além de pesquisas bibliográficas em órgãos públicos como a Companhia de Gestão de Recursos Hídricos – COGERH e o Departamento Nacional de Obras Contra as Secas – DNOCS.

Quadro 3 – Resumo das amostras coletadas

Barragens	Município	Nº Amostras	Classificação USCS
Angicos	Coreaú	15	CL
Arneiroz II	Arneiroz	16	SM
Catú Cinzenta	Aquiraz	12	CL / SC
Cauípe	Caucaia	09	SC / SM / SC-SM
Diamantino II	Marco	18	SC / SM
Faé	Quixelô	05	CL / SC / SC-SM
Farias Brito	Farias Brito	07	CL
Flor do Campo	Novo Oriente	02	CL
Itaúna	Granja	13	CL / SC / SM
Malcozinhado	Cascavel	04	SC
Melancia	São Luis do Curu	04	SC
Paulo Sarasate	Varjota	04	CL / SC
Rosário	Lavras da Mangabeira	10	CL / SC
Sítios Novos	Caucaia	28	CL / SC / SM / SC-SM
Trussu	Iguatu	05	SC
Ubalzinho	Cedro	29	CL / SC / SC-SM
Umari ¹	Madalena	14	SC
Total de Amostras Coletadas		195	-

Fonte: Dados da pesquisa (2019).

¹ Amostras de solos utilizadas para a validação dos modelos matemáticos preditivos, conforme seção 3.3.

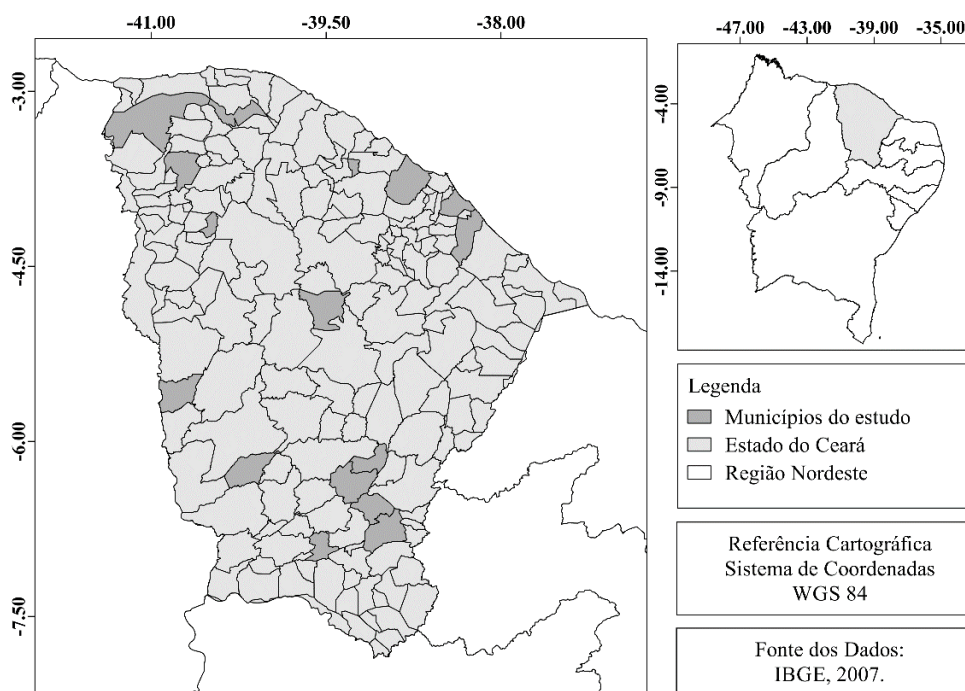
Quadro 4 – Resumo da ocorrência das amostras

Classificação USCS	Ocorrência %
CL = Argila de baixa compressibilidade	34,9%
SC = Areia argilosa	42,1%
SM = Areia siltosa	12,8%
SC-SM = Areia argilo-siltosa	10,2%

Fonte: Dados da pesquisa (2019).

A Figura 9 apresenta o mapa de localização dos municípios compreendidos no estudo. Nota-se que as áreas de ocorrência dos solos abrangem regiões distintas, buscando representar a aplicabilidade do estudo para o estado do Ceará.

Figura 9 – Mapa de localização dos municípios do estudo



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Os dados obtidos, ver Apêndice A, são pertinentes aos parâmetros de compactação, peso específico seco máximo e teor de umidade ótima, além de resultados de ensaios de caracterização do solo, tais como: granulometria, ensaios de consistência e densidade real. A classificação dos solos foi realizada de acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos – SUCS (*Unified Soil Classification System – USCS*).

Como apresentado no Quadro 4, há predominância, cerca de 75%, dos solos classificados como argila de baixa compressibilidade (CL) e areia argilosa (SC). Segundo Vieira (1996), estes solos são bastante empregados em obras do semiárido nordestino devido à sua

elevada ocorrência e por garantir às estruturas, como aterros de barragens, características de boa resistência ao cisalhamento, impermeabilidade e baixa deformabilidade.

3.2 Análise estatística para determinação das equações empíricas

A análise estatística para o estudo das correlações existentes entre os parâmetros geotécnicos foi realizada com o uso do *software Microsoft® Excel*. Para cada amostra coletada, os parâmetros de compactação foram agrupados em relação às propriedades de caracterização dos solos.

Com base nos estudos empíricos já realizados e citados, como de Omar *et al.* (2003), Gurtug e Sridharan (2004), Matteo, Bigotti e Ricco (2009) e Farooq, Khalid e Mujtaba (2015), foram selecionadas as principais propriedades geotécnicas utilizadas pelos pesquisadores para estimar os parâmetros de compactação.

Isto posto, e com base nos estudos já apresentados, escolheu-se por utilizar o modelo de regressão não-linear do tipo:

$$\gamma_{d,m\acute{a}x} \text{ ou } w_{\acute{o}tima} = a_0(a_1A^\alpha + a_2B^\beta + a_3C^\delta + \dots + a_nX^\mu)^\omega \quad (15)$$

onde,

$a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ são coeficientes;

A, B, ..., X são parâmetros geotécnicos;

$\alpha, \beta, \delta, \mu, \omega$ são coeficiente de potenciação.

3.2.1 Peso específico seco máximo

Para a determinação da equação do peso específico seco máximo, foram avaliadas possíveis propriedades que pudessem influenciá-lo, tal como a densidade dos grãos, por exemplo, que se assemelha ao parâmetro pesquisado por ser também um valor de densidade. Além disso, nota-se que a granulometria também pode influenciar, uma vez que, segundo Pinto (2006), solos mais finos tendem a ter peso específicos secos máximos menos densos enquanto solos arenosos e pedregulhosos tendem a ter pesos específicos secos máximos de maiores valores.

Face ao exposto, selecionou-se os parâmetros LL, LP, %P#10, %P#40, %P#200, e o peso específico dos grãos, com a seguinte estrutura:

$$\gamma_{d,m\acute{a}x \text{ (preditivo)}} = a_0 \left(a_1 LL^\alpha + a_2 LP^\beta + a_3 \%P\#10^\delta + a_4 \%P\#40^\epsilon + a_5 \%P\#200^\theta + a_6 \gamma_s^\mu \right)^\omega \quad (16)$$

onde,

$\gamma_{d,m\acute{a}x \text{ (preditivo)}}$: o peso específico seco máximo preditivo, em kN/m³;

LL: o limite de liquidez, em %;

LP: o limite de plasticidade, em %;

%P#10: a porcentagem de material passante na peneira n° 10;

%P#40: a porcentagem de material passante na peneira n° 40;

%P#200: a porcentagem de material passante na peneira n° 200;

γ_s : o peso específico dos grãos, em kN/m³.

Foi atribuído para os coeficientes (a_0 , a_1 , a_2 , a_3 , a_4 , a_5 e a_6) e coeficientes de potenciação (α , β , δ , ϵ , θ , μ e ω) o valor inicial de 1,00. Utilizando a planilha do programa *Microsoft® Excel*, fez-se os cálculos para todos os 181 conjuntos de parâmetros de laboratório, avaliando o erro para cada, permitindo a obtenção do erro médio de toda a amostra da seguinte forma:

$$\text{Erro médio} = \frac{\sum \left(\gamma_{d,m\acute{a}x \text{ (laboratório)}} - \gamma_{d,m\acute{a}x \text{ (preditivo)}} \right)}{\text{números de ensaios}} \quad (17)$$

Empregando o *Solver* do *Microsoft® Excel*, atribuiu-se a todos os coeficientes e potências da expressão a condição de variáveis, de forma que a ferramenta solucionasse iterativamente o problema, para que o somatório do erro de todos os 181 conjuntos de ensaios resultasse no menor valor possível.

Após o cálculo, o próprio processo iterativo do *Solver* anulou alguns valores de busca (coeficientes), excluindo assim alguns parâmetros inicialmente adotados. Com base nas variáveis restantes, verificou-se ainda a qualidade dos resultados obtidos, avaliando os conjuntos de resultados com maiores valores de erros dentro da amostra. Posterior à análise dos valores extremos dos erros, estabeleceu-se ainda limites para alguns parâmetros do modelo, de tal forma que a equação obtivesse erros com menores valores.

3.2.2 Teor de umidade ótima

De modo semelhante ao processo para o peso específico seco máximo, foram determinados alguns parâmetros geotécnicos que pudessem interferir no teor de umidade ótima

(granulometria, densidade dos grãos, limites de consistência, entre outros). Os parâmetros de consistência (LL e LP) foram selecionados por serem parâmetros de umidade, com semelhança ao parâmetro em pesquisa.

De acordo com Sousa Pinto (2006), a granulometria também influencia no teor de umidade ótima, sendo maior para solos mais argilosos e menor em solos arenosos, logo, também foi selecionado parâmetros de granulometria neste estudo.

Além dos parâmetros supracitados, o índice de vazios também foi definido como propriedade de potencial influência, pois, para um maior volume de vazios, o mesmo apresenta uma maior capacidade de retenção hídrica, aumentando consequentemente o teor de umidade ótima do solo.

Diante disso, selecionou-se os parâmetros LL, LP, %P#10, %P#40, %P#200, e o índice de vazios, apresentando a seguinte estrutura:

$$W_{\text{ótima}} = a_0 \left(a_1 LL^{\alpha} + a_2 LP^{\beta} + a_3 \%P\#10^{\delta} + a_4 \%P\#40^{\epsilon} + a_5 \%P\#200^{\theta} + a_6 e^{\mu} \right)^{\omega} \quad (18)$$

onde,

$W_{\text{ótima}}$: o teor de umidade ótima, em porcentagem %;

e : o índice de vazios do solo.

O processo de análise do modelo para a estimativa do teor de umidade ótima, com o uso da ferramenta *Solver*, ocorreu da mesma forma descrita na seção 3.2.1. Com a anulação de certos termos da Equação (18), o modelo foi otimizado através da limitação nos valores de alguns parâmetros remanescentes.

3.3 Validação dos modelos matemáticos

Os modelos matemáticos obtidos têm a finalidade de descrever matematicamente a resposta dos parâmetros de compactação às propriedades de caracterização dos solos. Destarte, visando a validação do estudo, os modelos foram testados em um conjunto de dados distintos das amostras utilizadas em sua determinação.

Foram aplicados dados laboratoriais de 14 amostras de solos aplicados na Barragem de Umari, no município de Madalena-CE, levando em consideração os limites impostos pelos modelos. Os resultados da validação são apresentados no capítulo 4.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados das análises estatísticas para determinação dos modelos empíricos para estimativa dos parâmetros de compactação dos solos, de acordo com as metodologias e os procedimentos mostrados no capítulo 3.

Inicialmente, são apresentados os modelos matemáticos obtidos, além da avaliação da precisão das equações dentro do domínio da amostrada coletada. Em seguida, a equação proposta é avaliada por resultados de uma amostra distinta em um processo nomeado de validação. Por fim, é feito um comparativo dos resultados preditivos em relação a outras equações empíricas aplicadas aos dados da Barragem Umari, em Madalena/CE.

4.1 Modelos matemáticos para estimativa de parâmetros de compactação

4.1.1 Modelo empírico para peso específico seco máximo

Com base na metodologia, o modelo empírico para determinação do peso específico seco máximo ($\gamma_{d,m\acute{a}x}$) foi determinado com a seguinte expressão matemática:

$$\gamma_{d,m\acute{a}x} \text{ (kN/m}^3\text{)} = 9,2 \left[3,3 \gamma_s^{0,3} - 0,09 \left(LP^{1,13} \right) - 0,02 \left(\%P\#200 \right) \right]^{0,42} \quad (19)$$

onde,

γ_s : o peso específico dos grãos, em kN/m³;

LP: o limite de plasticidade, em %;

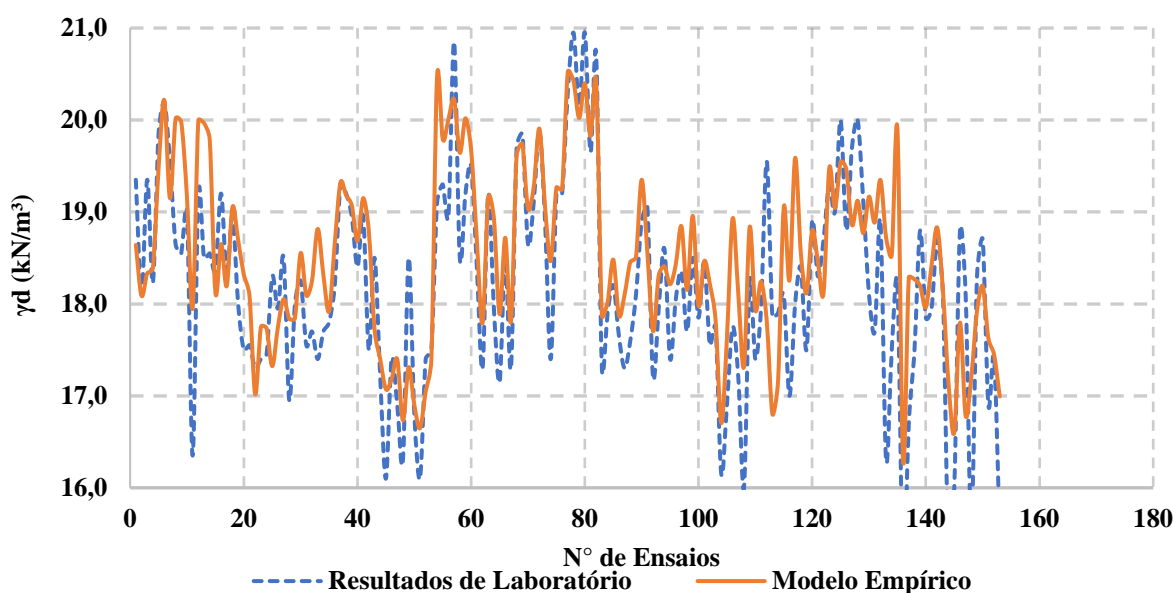
%P#200: o valor percentual de solo passante na peneira n° 200.

Algumas propriedades geotécnicas consideradas para a construção do modelo tiveram seus valores anulados, mostrando que estes não influenciariam na determinação do parâmetro de compactação em questão. Avaliando a interferência de cada coeficiente, é possível observar que, como previsto na descrição metodológica, o peso específico dos grãos apresenta uma maior influência no cálculo do peso específico seco máximo.

É importante destacar também o que Pinto (2006) descreve no comportamento dos solos compactados, que para solos arenosos e pedregulhosos, com baixos índices de LP e de partículas finas (%P#200), o peso específico seco máximo tende a aumentar e para solos argilosos, o aumento de percentual de finos e conseqüentemente de maior plasticidade,

apresenta um peso específico seco menor. Essa afirmação está coerente com a equação proposta, visto que as parcelas devidas ao limite de plasticidade e ao percentual de solo passante na peneira nº 200 são negativas. Ou seja, os solos argilosos em comparação aos solos arenosos e pedregulhosos apresentam maiores valores para as parcelas negativas da Equação (19), resultando em um menor valor para o peso específico seco máximo. O Gráfico 1, apresenta os resultados da Equação (19) aplicada às amostras coletadas, em comparação com os dados laboratoriais destas. Deve-se destacar que a equação proposta apresenta uma limitação para ser implementada, não sendo indicada para solos com o LP inferior a 10% e superior a 25%.

Gráfico 1 – Resultados do modelo empírico para o peso específico seco máximo



Fonte: Dados da pesquisa - Detalhamento no Apêndice B (2019).

As estatísticas descritivas dos dados após a modelagem matemática são mostradas no Quadro 5. Nota-se que apesar do aumento na diferença entre os valores extremos determinados na equação empírica, o valor médio do peso específico seco máximo difere apenas em 0,32 kN/m³ do valor médio real.

Quadro 5 – Estatísticas dos dados para o peso específico seco máximo

	$\gamma_{d,m\acute{a}x}$ (kN/m ³) laboratorial	$\gamma_{d,m\acute{a}x}$ (kN/m ³) empírico	Erro (kN/m ³)	Erro (%)
Máximo	20,52	20,95	1,73	14,9%
Mínimo	16,28	15,10	-2,42	0,1%
Média	18,51	18,19	-0,31	3,3%
Desvio Padrão	0,94	1,12	0,70	2,8%

Fonte: Dados da pesquisa - Detalhamento no Apêndice B (2019).

4.1.2 Modelo empírico para teor de umidade ótima

O modelo empírico para determinação do teor de umidade ótima ($W_{ótima}$) é apresentado a seguir:

$$W_{ótima} (\%) = (0,6 \cdot LL^2 + 8 \cdot LP^{1,6} + 2300 \cdot e)^{0,32} \quad (20)$$

onde,

LL: o limite de liquidez, em %;

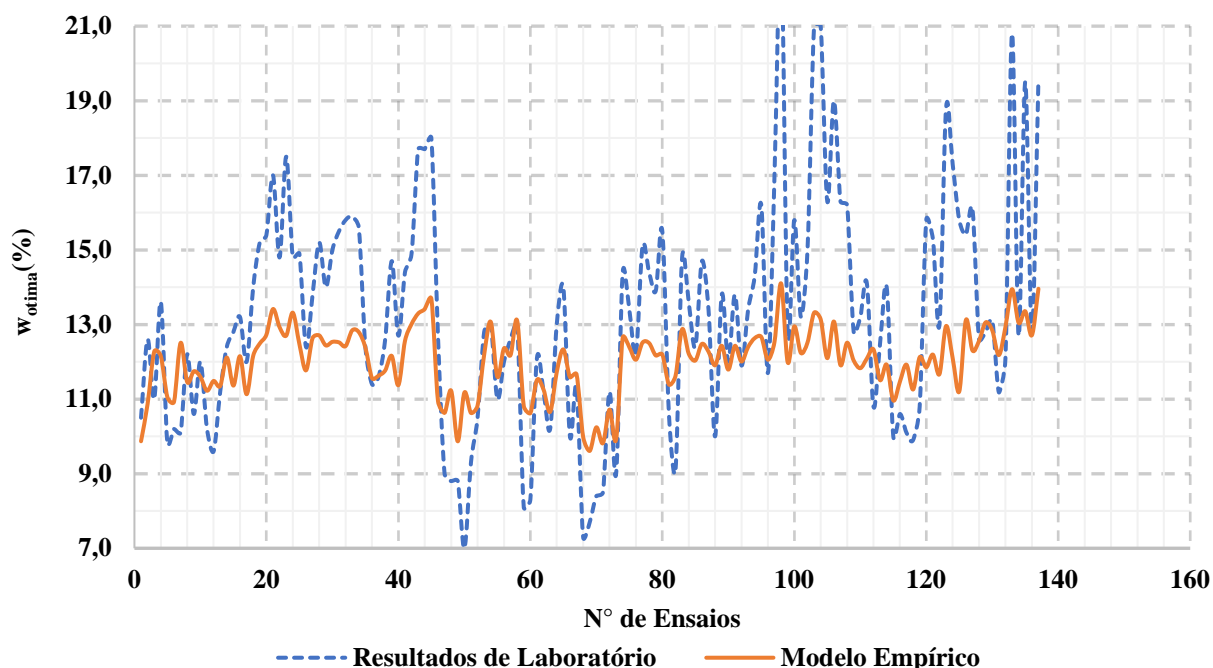
LP: o limite de plasticidade, em %;

e: o índice de vazios do solo.

Analisando a equação proposta, observa-se que o teor de umidade ótima é diretamente proporcional aos parâmetros de consistência e índice de vazios. Isto está em conformidade ao comportamento típico de solos argilosos descrito por Pinto (2006).

Observa-se no Gráfico 2, que a equação gera resultados com tendência a aumentar a umidade quando realmente ocorre aumentos de umidade nos resultados de laboratório, porém os picos são de menor intensidade. Isso se deve ao fato de ainda não ter sido observado algum parâmetro que tenha expressiva influência ou mesmo o próprio arranjo da equação que dê respostas semelhantes e mais precisas em relação aos dados reais.

Gráfico 2 – Resultados do modelo empírico para o teor de umidade ótima



Fonte: Dados da pesquisa - Detalhamento no Apêndice C (2019).

O Quadro 6 apresenta as estatísticas dos dados para o teor de umidade ótima. Nota-se a considerável diferença entre os valores extremos dos dados, porém o valor médio do parâmetro determinado empiricamente destoa apenas em 1,2% em relação ao valor médio real.

Quadro 6 – Estatísticas dos dados para o teor de umidade ótima

	Wótima (%) laboratorial	Wótima (%) empírico	Erro	Erro (%)
Máximo	14,1	23,2	9,1	59,6%
Mínimo	9,6	7,0	-4,2	0,1%
Média	12,0	13,2	1,2	14,2%
Desvio Padrão	0,9	3,0	2,4	10,2%

Fonte: Dados da pesquisa - Detalhamento no Apêndice C (2019).

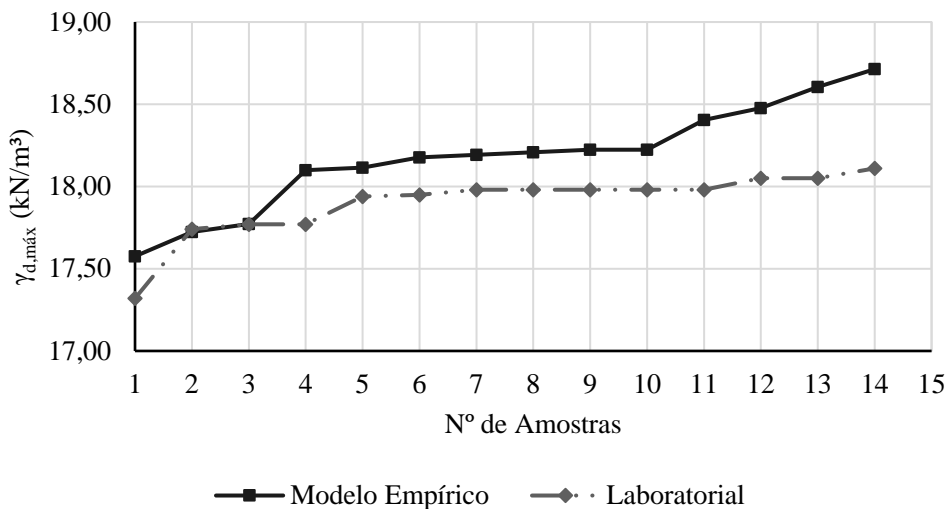
A limitação imposta ao peso específico seco máximo também é válida para a equação preditiva de umidade ótima, devendo ser respeitado o limite $10\% \leq LP \leq 25\%$.

4.2 Processo de validação dos modelos

4.2.1 Validação da equação do peso específico máximo seco

Para validar os modelos empíricos, estes foram aplicados em amostras de solos da Barragem Umari, ver Apêndice D, que não fizeram parte do processo de modelagem das equações. Os resultados para o peso específico seco máximo são apresentados no Gráfico 3.

Gráfico 3 – Validação do modelo matemático para $\gamma_{d,máx}$, Barragem Umari.



Fonte: Dados da pesquisa - Detalhamento no Apêndice E (2019).

Quadro 7 – Estatísticas dos dados de validação para o peso específico seco máximo

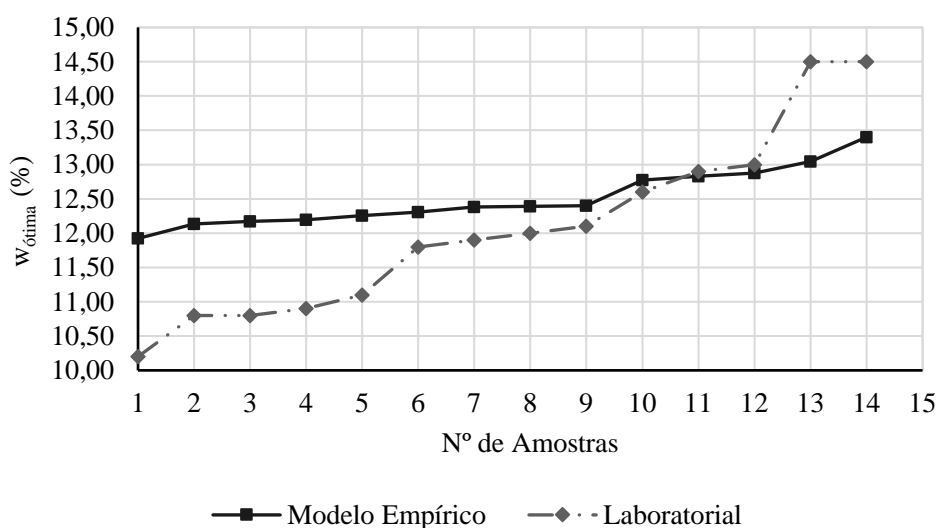
	$\gamma_{d,m\acute{a}x}$ (kN/m ³) laboratorial	$\gamma_{d,m\acute{a}x}$ (kN/m ³) empírico	Erro (kN/m ³)	Erro (%)
Máximo	18,11	18,71	0,40	8,0%
Mínimo	17,32	17,58	-1,39	0,6%
Média	17,90	18,18	-0,28	2,3%
Desvio Padrão	0,20	0,32	0,47	2,0%

Fonte: Dados da pesquisa - Detalhamento no Apêndice E (2019).

Conforme Quadro 7, o resultado obtido é promissor, visto que o erro percentual médio é da ordem de 2,3% e os valores extremos determinados empiricamente se aproximam dos reais, fazendo com que do peso específico seco máximo empírico esteja condizente ao valor determinado em laboratório.

4.2.2 Validação da equação do teor de umidade ótima

A seguir, no Gráfico 4, têm-se os resultados da validação do modelo empírico para o teor de umidade ótima.

Gráfico 4 – Validação do modelo matemático para $w_{\acute{o}tima}$, Barragem Umari.

Fonte: Dados da pesquisa - Detalhamento no Apêndice E (2019).

Quadro 8 – Estatísticas dos dados de validação para o teor de umidade ótima

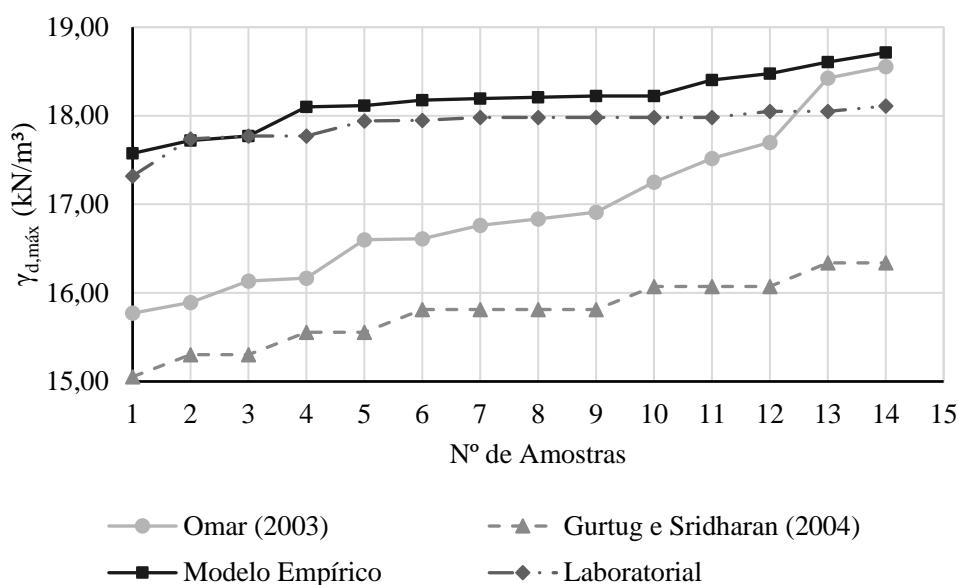
	Wótima (%) laboratorial	Wótima (%) empírico	Erro	Erro (%)
Máximo	14,5	13,4	1,6	19,7%
Mínimo	10,8	11,9	-2,1	1,0%
Média	12,2	12,5	-0,3	8,5%
Desvio Padrão	1,2	0,4	1,2	5,9%

Fonte: Dados da pesquisa - Detalhamento no Apêndice E (2019).

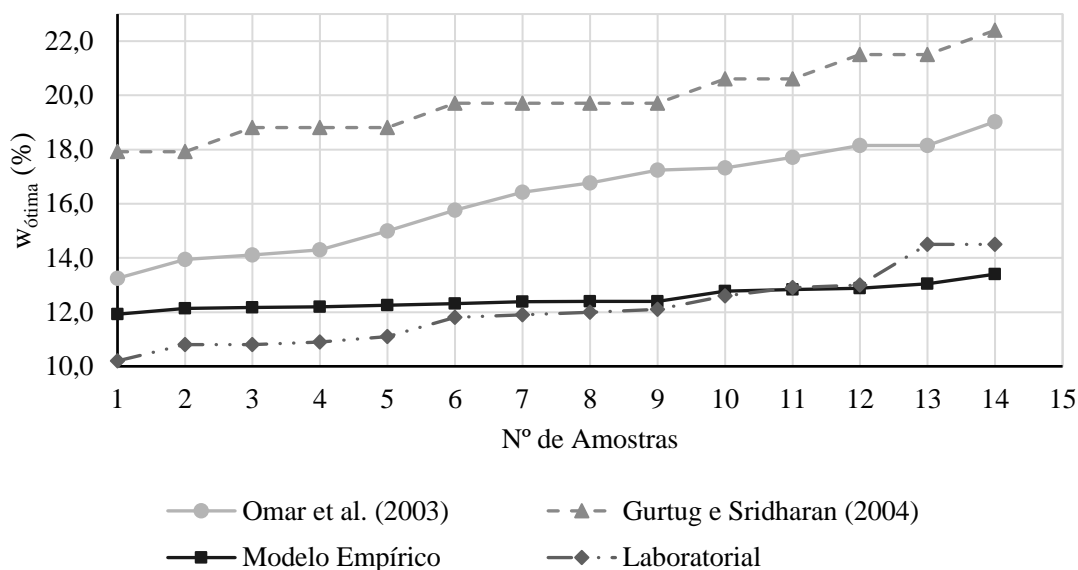
Conforme observamos, a faixa de erro médio encontrado para a amostra foi de apenas 0,3% de teor de umidade, indicando um erro amostral pequeno. Todavia, analisando alguns resultados pontuais, é identificado que a diferença de umidade entre o valor real e calculado atingiu uma margem de 2,1% de teor de umidade. Analisando os erros obtidos para a amostra, para um projeto em fase preliminar, os mesmos são julgados como aceitáveis.

4.3 Comparação com modelos empíricos da literatura

Algumas amostras foram avaliadas para as equações propostas por Omar *et al.* (2003) e Gurtug e Sridharan (2004). As equações foram aplicadas na amostra de solos da Barragem Umari e os resultados encontrados foram comparados aos determinados no processo de validação dos modelos empíricos do presente estudo, como mostra o Gráfico 5, para o peso específico seco máximo e o Gráfico 6, para o teor de umidade ótima.

Gráfico 5 – Comparativo entre os modelos, para o $\gamma_{d,máx}$ – Barragem Umari

Fonte: Dados da pesquisa - Detalhamento no Apêndice F (2019).

Gráfico 6 – Comparativo entre os modelos, para $w_{ótima}$ – Barragem Umari

Fonte: Dados da pesquisa - Detalhamento no Apêndice F (2019).

Os modelos empíricos de Omar *et al.* (2003) e Gurtug e Sridharan (2004) apresentam erros consideráveis, como mostram os dados estatísticos no Quadro 9 e Quadro 10, respectivamente. Os valores destoam consideravelmente dos reais, tendo sido discutidos na seção 1.2 os possíveis fatores que influenciam no insucesso dos modelos. A análise é corroborada pelo estudo de Xavier (2017), na Barragem Ubaldinho.

Quadro 9 – Dados estatísticos para a equação de Omar *et al.* (2003) - Barragem Umari, Madalena/CE

	$\gamma_{d,máx}$ (kN/m ³) laboratorial	$\gamma_{d,máx}$ (kN/m ³) empírico	Erro (kN/m ³)	Erro (%)
Máximo	18,11	18,55	1,98	11,2%
Mínimo	17,32	15,77	-0,60	0,9%
Média	17,90	16,94	0,96	6,3%
Desvio Padrão	0,20	0,87	0,89	3,5%
	$w_{ótima}$ (%) laboratorial	$w_{ótima}$ (%) empírico	Erro	Erro (%)
Máximo	14,50	19,0	0,6	59,7%
Mínimo	10,20	13,9	-6,4	3,8%
Média	11,91	16,4	-4,5	39,8%
Desvio Padrão	1,13	1,6	1,9	14,7%

Fonte: Dados da pesquisa - Detalhamento no Apêndice F (2019).

Quadro 10 – Dados estatísticos para a equação de Gurtug e Sridharan (2004) - Barragem Umari, Madalena/CE

	$\gamma_{d,m\acute{a}x}$ (kN/m ³) laboratorial	$\gamma_{d,m\acute{a}x}$ (kN/m ³) empírico	Erro (kN/m ³)	Erro (%)
Máximo	18,11	16,34	2,75	15,2%
Mínimo	17,32	15,30	0,98	5,7%
Média	17,89	15,83	2,06	11,5%
Desvio Padrão	0,20	0,33	0,46	2,5%
	wótima (%) laboratorial	wótima (%) empírico	Erro	Erro (%)
Máximo	14,5	22,4	-5,0	102,0%
Mínimo	10,2	17,9	-10,7	38,9%
Média	12,1	19,8	-7,8	66,1%
Desvio Padrão	1,3	1,4	1,9	21,9%

Fonte: Dados da pesquisa - Detalhamento no Apêndice F (2019).

Desta forma, ratifica-se o emprego das equações determinadas nesse trabalho para os solos do semiárido nordestino, pois as análises incorridas mostram que os resultados apresentaram erros percentuais médios consideravelmente satisfatórios, frente aos modelos empíricos de literaturas.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente estudo teve como objetivo avaliar as correlações empíricas para distintos tipos de solos, relacionando os parâmetros de compactação para energia Proctor normal com parâmetros básicos de caracterização, de modo a obter modelos matemáticos que pudessem prever o peso específico seco máximo e o teor de umidade ótima para solos compactados.

A seguir, serão apresentadas as conclusões obtidas durante a realização da pesquisa, e algumas proposições para pesquisas futuras.

5.1 Equação matemática do peso específico seco máximo

O processo de modelagem para a determinação da equação do peso específico seco máximo mostrou que os parâmetros de compactação são influenciados pelas propriedades geotécnicas como: limite de plasticidade, porcentagem de finos (percentual de material passando pela peneira nº 200) e pelo peso específico dos grãos.

Na implementação dos dados de caracterização da Barragem Umari, no processo denominado nesta pesquisa de validação, a equação apresentou resultados satisfatórios com erro médio da ordem de 0,28 kN/m³.

Em comparação com outras metodologias de equações empíricas na literatura, observou-se que a equação proposta pelo presente trabalho obteve um menor erro para a amostra de validação da Barragem Umari.

5.2 Equação matemática da umidade ótima

A equação proposta para determinação empírica da umidade ótima também apresentou uma razoável aproximação, tendo uma maior influência dos parâmetros de consistência (LL e LP) além do índice de vazios.

No processo de validação com os dados da barragem Umari, foi observado um erro médio da ordem de 0,3% de teor de umidade, atestando assim a razoável precisão da metodologia proposta.

No processo de comparação dos resultados da equação proposta em relação a outras metodologias para com os dados da amostra de validação (Barragem Umari), foi observado também que a equação proposta teve resultados mais próximos dos dados de teores de umidade ótima de laboratório.

Apesar do resultado médio apresentar-se satisfatório dentro da amostra de desenvolvimento da equação e na amostra de validação, foi verificado que a equação não tem uma boa resposta para valores extremos de umidade, havendo assim a necessidade de um aperfeiçoamento da equação em pesquisas futuras.

5.3 Conclusões sobre o trabalho

Apesar dos resultados apresentados terem tido erros menores que outras equações preditivas, não se pode afirmar que se trata de uma metodologia mais precisa ou confiável. O solo trata-se de um material extremamente complexo, de forma que, as equações propostas podem ter excelentes resultados para solos do estado do Ceará, mas podem não apresentar resultados coerentes para solos de outras localidades ou países.

Deve-se destacar que a equação proposta é indicada apenas para fases preliminares de projeto e estudos de simples reconhecimento, não sendo recomendado o uso para projetos executivos e estudos mais complexos.

5.4 Recomendações para pesquisas futuras

A seguir, são listadas algumas sugestões para trabalhos futuros, que possam dar continuidade ao presente estudo:

- (a) Aperfeiçoar a equação de umidade ótima, obtendo uma melhor resposta para teores de umidade elevados;
- (b) Estudar o desenvolvimento de equações preditivas para determinação de parâmetros de solos compactados para outras energias de compactação (Proctor modificado e intermediário);
- (c) Expandir a pesquisa para solos de diferentes localidades;
- (d) Avaliar a estimativa das equações empíricas para solos compactados implementando o uso de Redes Neurais Artificiais.

REFERÊNCIAS

- BARBETTA, Pedro Alberto; REIS, Marcelo Menezes; BORNIA, Antonio Cezar. **Estatística para Cursos de Engenharia e Informática**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2010.
- CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos Solos e Suas Aplicações**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.
- CRAIG, R. F.; KNAPPETT, J. A.. **Craig Mecânica dos Solos**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014. Tradução de: Amir Elias Abdalla Kurban.
- DAS, Braja M.; SOBHAN, Khaled. **Fundamentos de engenharia geotécnica**: Tradução da 8ª edição norte-americana. São Paulo: Cengage Learning, 2014. Tradução de: Noveritis do Brasil. Revisão Técnica de: Roberta Boszczowski.
- FAROOQ, K.; KHALID, U.; MUJTABA, H.. Prediction of Compaction Characteristics of Fine-Grained Soils Using Consistency Limits. **Arabian Journal For Science And Engineering**, [s.l.], v. 41, n. 4, p.1319-1328, 29 out. 2015. Springer Science and Business Media LLC. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s13369-015-1918-0>. Acesso em: 29 set. 2019.
- GURTUG, Yesim; SRIDHARAN, A.. Compaction Behaviour And Prediction Of Its Characteristics Of Fine Grained Soils With Particular Reference To Compaction Energy. **Soils And Foundations**, [s.l.], v. 44, n. 5, p.27-36, 2004. Elsevier BV. Disponível em: http://dx.doi.org/10.3208/sandf.44.5_27. Acesso em: 28 set. 2019.
- LEVINE, David. M.; STEPHAN, David F.; SZABAT, Kathryn A.. **Estatística: Teoria e Aplicações usando o Microsoft® Excel em Português**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017. Tradução e revisão técnica de: Teresa Cristina Padilha de Souza.
- MASSAD, Faiçal. **Mecânica dos solos experimental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.
- MASSAD, Faiçal. **Obras de terra: curso básico de geotécnica**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.
- MATTEO, Lucio di; BIGOTTI, Federica; RICCO, Remo. Best-Fit Models to Estimate Modified Proctor Properties of Compacted Soil. **Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering**, [s.l.], v. 135, n. 7, p.992-996, jul. 2009. American Society of Civil Engineers (ASCE). Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0000022](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000022). Acesso em: 28 out. 2019.
- MATTOS, Thalita do Bem. **Modelos Não Lineares e suas Aplicações**. 2013. 58 f. Monografia (Graduação) - Curso de Estatística, Instituto de Ciências Exatas: Departamento de Estatística, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2013. Disponível em: <http://www.ufjf.br/cursoestatistica/files/2014/04/Modelos-N%C3%A3o-Lineares-e-suas-Aplica%C3%A7%C3%B5es.pdf>. Acesso em: 28 out. 2019.
- MORETTIN, Pedro A.; BUSSAB, Wilton de O.. **Estatística Básica**. 8. ed. São Paulo: Saraiva, 2013.

NAGARAJ, H. B.. **Prediction of engineering properties of fine-grained soils from their index properties**. Ph. D Thesis, Civil Engineering, Indian Institute Of Science, Bangalore, India, 2000.

OMAR, Maher et al. Advanced mathematical models and their comparison to predict compaction properties of fine-grained soils from various physical properties. **Soils And Foundations**, [s.l.], v. 58, n. 6, p.1383-1399, dez. 2018. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sandf.2018.08.004>. Acesso em: 12 set. 2019.

OMAR, Maher *et al.* Compaction characteristics of granular soils in United Arab Emirates. **Geotechnical And Geological Engineering**, [s.l.], v. 21, n. 3, p.283-295, 2003. Springer Nature. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1023/a:1024927719730>. Acesso em: 23 out. 2019.

ORTIGÃO, J. A. R.. **Introdução à Mecânica dos Solos dos Estrados Críticos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Terratek, 2007.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

TINJUM, James M.; BENSON, Craig H.; BLOTZ, Lisa R.. Soil-Water Characteristic Curves for Compacted Clays. **Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering**, [s.l.], v. 123, n. 11, p.1060-1069, nov. 1997. American Society of Civil Engineers (ASCE). Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(1997\)123:11\(1060\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(1997)123:11(1060)). Acesso em: 28 out. 2019.

TRIOLA, Mário F.. **Introdução à Estatística: Atualização da Tecnologia**. 11. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014. Tradução e revisão técnica de: Ana Maria Lima de Farias, D.Sc. e Vera Regina Lima de Farias e Flores, M.Sc..

VIEIRA, Vicente P. P. B. et al. **Roteiro para projeto de pequenos açudes** / Antonio Nunes de Miranda. Fortaleza: UFC - Centro de Tecnologia. Casa José de Alencar, 1996. 160 p.

WANG, M. C.; HUANG, C. C.. Closure to "Soil Compaction and Permeability Prediction Models" by M. C. Wang and C. C. Huang (December, 1984, Vol. 110, No. 6). **Journal Of Environmental Engineering**, [s.l.], v. 113, n. 6, p.1389-1390, dez. 1987. American Society of Civil Engineers (ASCE). Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9372\(1987\)113:6\(1389\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0733-9372(1987)113:6(1389)). Acesso em: 29 out. 2019.

XAVIER, Louise Caroline Peixoto. **Modelos Matemáticos para Estimativa das Propriedades de Solos Compactados**. In: ENCONTROS UNIVERSITÁRIOS DA UFC/RUSSAS, 2., 2017, Russas.

ZEVIANI, Walmes Marques; RIBEIRO JÚNIOR, Paulo Justiniano; BONAT, Wagner Hugo. **Modelos de regressão não linear**. Paraná: 2013. Curso ministrado na 58ª RBras e 15º SEAGRO em Campina Grande-PB. Disponível em: <https://www.ime.unicamp.br/~cnaber/cursomodelosnaolinearesR.pdf>. Acesso em: 28 out. 2019.

APÊNDICE A – PLANILHA DOS DADOS COLETADOS

Conteúdo: Dados de ensaios laboratoriais das amostras coletadas nos acervos da COGERH, DNOCS e LMSP.

Barragens	Classif. USCS	Parâmetros de Compactação		Limites de Consistência			Granulometria					Densidade dos Grãos (kN/m³)
		$\gamma_{d,máx}$ (kN/m³)	$w_{ótima}$ (%)	LL(%)	LP(%)	IP (%)	3/8	Nº4	Nº10	Nº40	Nº200	
Angicos	CL	18,37	12,4	29	19	10	100	87	79	71	65	26,61
Angicos	CL	19,20	12,8	27	16	11	100	98	96	90	69	26,54
Angicos	CL	18,30	13,2	31	18	13	100	98	94	86	71	26,80
Angicos	CL	18,95	12,0	25	14	11	100	100	97	88	70	26,64
Angicos	CL	18,00	14,0	30	17	13	100	99	93	81	63	27,11
Angicos	CL	17,50	15,2	32	18	14	100	92	86	80	68	27,02
Angicos	CL	17,55	15,4	34	20	14	100	84	75	68	58	26,47
Angicos	CL	17,30	17,0	38	23	15	100	86	82	80	71	26,87
Angicos	CL	17,40	14,8	33	22	11	100	73	66	62	54	26,49
Angicos	CL	17,45	17,5	33	20	13	100	86	83	79	70	26,59
Angicos	CL	18,30	14,8	37	24	13	100	81	66	61	57	27,48
Angicos	CL	17,95	14,9	32	20	12	100	93	88	82	69	26,47
Angicos	CL	18,50	12,4	27	18	9	100	99	98	93	73	26,26
Angicos	CL	16,95	13,8	30	20	10	100	86	85	81	65	26,24
Angicos	CL	16,50	18,8	39	25	14	100	93	85	81	75	27,44
Arneiroz II	SM	20,20	14,5	32	25	7	100	98	98	88	34	26,10
Arneiroz II	SM	20,15	14,7	32	25	7	100	100	99	88	36	26,80
Arneiroz II	SM	20,15	14,0	33	25	8	100	100	99	88	35	26,10
Arneiroz II	SM	19,95	14,4	33	26	7	100	100	99	88	34	26,20
Arneiroz II	SM	20,10	14,0	31	25	6	100	100	99	89	42	26,30
Arneiroz II	SM	19,85	13,3	31	25	6	100	100	99	90	40	26,20
Arneiroz II	SM	19,55	15,0	32	24	8	100	99	98	87	35	26,20
Arneiroz II	SM	20,00	14,9	38	26	12	100	98	97	88	43	26,10
Arneiroz II	SM	20,20	14,8	38	26	12	100	100	98	86	40	26,00
Arneiroz II	SM	19,30	14,1	35	25	10	100	99	97	85	40	26,20
Arneiroz II	SM	20,10	15,0	36	25	11	100	100	98	98	40	26,30
Arneiroz II	CL	18,14	19,1	39	25	14	100	97	95	91	74	26,20

Barragens	Classif. USCS	Parâmetros de Compactação		Limites de Consistência			Granulometria					Densidade dos Grãos (kN/m³)
		$\gamma_{d,máx}$ (kN/m³)	$w_{ótima}$ (%)	LL(%)	LP(%)	IP (%)	3/8	Nº4	Nº10	Nº40	Nº200	
Arneiroz II	SM	19,50	15,0	34	25	9	100	100	99	90	40	26,20
Arneiroz II	SM	19,30	15,5	34	25	9	100	100	99	90	40	25,90
Arneiroz II	SM	19,30	14,6	35	25	10	100	98	97	86	38	25,80
Arneiroz II	CL	18,15	18,6	38	26	12	100	95	94	89	78	25,90
Catú Cinzenta	CL	18,00	15,2	32	22	10	100	100	98	89	51	26,52
Catú Cinzenta	SC	18,25	14,0	32	20	12	100	100	96	83	43	26,59
Catú Cinzenta	CL	17,55	15,0	30	20	10	100	100	97	90	59	26,70
Catú Cinzenta	CL	17,70	15,5	31	20	11	100	100	97	87	53	26,56
Catú Cinzenta	SC	17,40	15,8	30	19	11	100	99	96	89	41	26,50
Catú Cinzenta	CL	17,70	15,9	37	20	17	100	100	98	86	50	26,38
Catú Cinzenta	SC	17,80	15,6	33	22	11	100	100	98	87	48	26,39
Catú Cinzenta	SC	18,20	12,4	31	20	11	100	100	98	88	39	26,51
Catú Cinzenta	SC	19,30	11,4	29	17	12	100	100	99	95	38	26,51
Catú Cinzenta	SC	19,20	11,6	28	18	10	100	100	99	89	35	26,39
Catú Cinzenta	SC	18,95	12,6	29	18	11	100	100	99	87	39	26,41
Catú Cinzenta	SC	18,40	14,7	31	19	12	100	100	99	90	45	26,39
Cauípe	SC	20,20	10,2	27	15	12	100	94	79	38	19	26,47
Cauípe	SC	19,55	10,1	38	20	18	100	79	67	43	23	26,75
Cauípe	SM	18,65	12,2	25	16	9	100	89	77	44	20	26,59
Cauípe	SC	18,55	10,6	30	16	14	100	72	60	34	21	26,48
Cauípe	SC	19,00	12,0	26	18	8	100	89	79	60	36	26,43
Cauípe	SC	16,35	15,7	49	23	26	100	90	86	71	42	26,96
Cauípe	SM-SC	19,20	10,2	23	16	7	100	82	76	55	22	26,85
Cauípe	SC	18,50	9,6	24	16	8	100	80	74	52	23	26,82
Cauípe	SM-SC	18,55	11,2	23	16	7	100	100	98	73	28	26,49
Diamantino II	SM	17,50	12,8	24	21	3	100	89	75	57	42	25,00
Diamantino II	SM	16,60	17,4	30	25	5	100	96	86	60	39	25,00

Barragens	Classif. USCS	Parâmetros de Compactação		Limites de Consistência			Granulometria					Densidade dos Grãos (kN/m³)
		$\gamma_{d,máx}$ (kN/m³)	$w_{ótima}$ (%)	LL(%)	LP(%)	IP (%)	3/8	Nº4	Nº10	Nº40	Nº200	
Diamantino II	SC	18,90	13,2	27	20	7	100	82	66	48	31	25,90
Diamantino II	SM	19,20	13,1	30	26	4	100	67	58	38	34	25,70
Diamantino II	SC	18,30	14,1	28	21	7	100	93	75	52	33	25,50
Diamantino II	SC	18,70	10,8	32	22	10	100	72	64	50	37	25,50
Diamantino II	SC	19,30	12,5	28	18	10	100	70	60	39	22	25,90
Diamantino II	SC	19,00	14,0	30	20	10	100	66	56	36	21	25,60
Diamantino II	SC	20,00	10,0	29	16	13	100	100	96	60	30	25,10
Diamantino II	SC	18,80	10,6	30	17	13	100	100	92	58	25	25,00
Diamantino II	SC	19,70	10,1	30	20	10	100	100	96	63	32	26,50
Diamantino II	SC	20,00	9,9	30	18	12	100	100	97	60	30	25,00
Diamantino II	SC	19,10	10,8	33	21	12	100	91	80	34	21	25,20
Diamantino II	SC	18,10	15,8	29	19	10	100	84	77	50	21	25,00
Diamantino II	SC	17,70	15,3	31	19	12	100	86	79	56	33	25,40
Diamantino II	SC	18,90	13,0	30	18	12	100	95	88	48	25	25,60
Diamantino II	SC	16,30	18,8	33	22	11	100	57	46	23	14	25,00
Diamantino II	SC	17,50	17,3	30	19	11	100	87	78	61	43	25,00
Faé	SM-SC	19,35	10,5	27	20	7	100	96	86	59	39	26,39
Faé	SC	18,10	12,6	32	22	10	100	81	74	55	44	26,71
Faé	SC	19,35	11,0	31	22	9	100	94	77	50	34	26,33
Faé	CL	18,23	13,6	29	19	10	100	99	98	78	56	26,59
Faé	SM-SC	19,85	9,8	23	17	6	100	92	80	54	32	26,41
Farias Brito	SM	17,80	18,2	36	25	11	100	98	94	79	45	26,20
Farias Brito	CL	18,10	20,9	40	25	15	100	95	87	77	53	26,00
Farias Brito	CL	16,75	19,9	43	26	17	100	99	96	89	76	25,80
Farias Brito	CL	16,92	20,0	41	25	16	100	97	95	91	73	25,60
Farias Brito	CL	17,75	19,3	41	25	16	100	97	95	89	70	25,90
Farias Brito	CL	17,86	21,0	39	24	15	100	98	94	85	66	26,10

Barragens	Classif. USCS	Parâmetros de Compactação		Limites de Consistência			Granulometria					Densidade dos Grãos (kN/m³)
		$\gamma_{d,máx}$ (kN/m³)	$w_{ótima}$ (%)	LL(%)	LP(%)	IP (%)	3/8	Nº4	Nº10	Nº40	Nº200	
Farias Brito	CL	17,90	21,0	36	24	12	100	95	85	76	55	26,10
Flor do Campo	CL	18,95	12,7	25	16	9	100	100	98	81	52	26,63
Flor do Campo	CL	17,50	14,4	32	18	14	100	93	89	78	53	27,23
Itaúna	SC	18,50	14,9	36	24	12	100	90	80	64	38	26,20
Itaúna	CL	17,20	17,7	38	23	15	100	94	86	70	55	26,00
Itaúna	CL	16,10	19,8	45	23	22	100	94	92	76	63	25,60
Itaúna	CL	17,40	17,7	43	24	19	100	94	89	71	53	25,80
Itaúna	CL	16,90	17,7	39	23	16	100	92	86	69	54	25,80
Itaúna	SM	16,30	19,0	46	24	22	100	95	94	81	66	25,70
Itaúna	SC	18,90	14,5	34	25	9	100	83	71	39	23	26,20
Itaúna	SM	18,50	14,9	45	24	21	100	85	78	65	49	25,80
Itaúna	CL	18,40	14,5	34	25	9	100	92	85	63	38	26,00
Itaúna	CL	16,80	18,6	46	24	22	100	96	91	78	61	25,70
Itaúna	SC	16,10	20,2	47	24	23	100	99	96	81	68	25,60
Itaúna	CL	17,40	18,0	44	24	20	100	94	87	70	57	25,80
Itaúna	CL	17,50	17,3	43	23	20	100	91	83	68	54	25,80
Malcozinhado	SC	18,25	13,7	27	9	18	100	78	40	40	40	26,50
Malcozinhado	SC	19,10	12,7	29	11	18	100	89	38	38	38	26,57
Malcozinhado	SC	17,70	15,9	34	13	21	100	66	34	34	34	26,57
Malcozinhado	SC	19,50	7,6	17	3	14	100	100	24	24	24	26,50
Melancia	SC	18,10	16,3	32	17	15	100	97	92	75	47	26,40
Melancia	SC	17,00	19,0	36	21	15	100	98	87	70	44	26,30
Melancia	SC	18,00	16,3	32	16	16	100	94	80	60	33	26,00
Melancia	SC	18,40	16,2	36	20	16	100	92	81	60	40	26,00
Paulo Sarasate	SC	18,20	15,8	27	14	13	100	80	67	49	33	25,40
Paulo Sarasate	CL	15,10	22,3	45	23	22	100	95	90	83	74	23,30
Paulo Sarasate	CL	16,70	15,4	38	19	19	100	97	91	75	59	26,50

Barragens	Classif. USCS	Parâmetros de Compactação		Limites de Consistência			Granulometria					Densidade dos Grãos (kN/m³)
		$\gamma_{d,máx}$ (kN/m³)	$w_{ótima}$ (%)	LL(%)	LP(%)	IP (%)	3/8	Nº4	Nº10	Nº40	Nº200	
Paulo Sarasate	CL	17,50	16,1	34	19	15	100	83	77	66	51	24,80
Rosário	CL	15,30	21,2	40	22	18	100	100	98	91	69	25,60
Rosário	CL	16,00	20,8	44	23	21	100	99	97	91	78	25,80
Rosário	SC	18,80	15,8	42	22	20	100	80	72	67	50	26,00
Rosário	CL	18,10	12,7	36	24	12	100	95	91	85	65	25,80
Rosário	CL	15,60	19,5	36	21	15	100	95	93	86	74	25,60
Rosário	CL	18,30	15,2	40	20	20	100	91	85	79	61	26,00
Rosário	SC	18,70	12,8	36	22	14	100	75	62	53	38	26,20
Rosário	CL	16,90	19,5	43	21	22	100	98	96	87	62	25,80
Rosário	CL	17,40	19,0	42	22	20	100	84	81	74	60	25,80
Rosário	CL	15,50	19,6	44	22	22	100	96	93	86	73	25,60
Sítios Novos	SM-SC	19,30	9,0	20	14	6	100	100	98	56	41	26,20
Sítios Novos	SM-SC	18,95	8,8	23	16	7	100	73	70	50	20	26,52
Sítios Novos	CL	20,85	8,8	17	13	4	100	100	88	56	33	26,46
Sítios Novos	SM-SC	18,50	7,0	21	15	6	100	100	97	77	41	26,56
Sítios Novos	SM-SC	19,20	9,3	19	14	5	100	100	97	65	33	26,32
Sítios Novos	SC	19,50	10,5	23	15	8	100	99	92	72	38	26,16
Sítios Novos	CL	18,40	12,8	34	18	16	100	100	87	71	51	26,16
Sítios Novos	SC	17,30	13,0	33	23	10	100	100	90	67	45	26,50
Sítios Novos	SC	19,20	11,0	26	18	8	100	100	90	60	37	26,62
Sítios Novos	SC	17,95	12,0	32	19	13	100	87	74	55	36	26,31
Sítios Novos	SC	17,15	13,7	45	23	22	100	80	65	48	38	25,73
Sítios Novos	SC	18,50	12,6	32	19	13	100	96	87	63	43	26,24
Sítios Novos	SC	17,30	13,0	33	23	10	100	100	90	67	45	26,63
Sítios Novos	SM-SC	19,70	8,1	22	15	7	100	100	98	76	42	26,56
Sítios Novos	SM-SC	19,85	8,3	21	15	6	100	100	97	74	36	26,30
Sítios Novos	CL	18,65	12,1	26	16	10	100	100	99	87	56	26,61

Barragens	Classif. USCS	Parâmetros de Compactação		Limites de Consistência			Granulometria					Densidade dos Grãos (kN/m³)
		$\gamma_{d,máx}$ (kN/m³)	$w_{ótima}$ (%)	LL(%)	LP(%)	IP (%)	3/8	Nº4	Nº10	Nº40	Nº200	
Sítios Novos	SM	19,10	11,2	21	17	4	100	93	84	69	41	26,73
Sítios Novos	SC	19,88	10,2	24	14	10	100	100	94	69	37	26,27
Sítios Novos	SC	18,90	13,0	29	17	12	100	99	96	74	48	26,65
Sítios Novos	CL	17,40	14,0	29	19	10	100	100	97	82	52	26,31
Sítios Novos	SC	19,20	10,0	30	17	13	100	95	86	58	38	26,13
Sítios Novos	SC	19,20	11,3	30	17	13	100	98	94	64	40	26,40
Sítios Novos	SM	20,30	7,3	16	13	3	100	76	63	48	21	26,38
Sítios Novos	SM-SC	20,95	7,7	16	12	4	100	100	94	71	32	26,43
Sítios Novos	SM-SC	20,15	8,4	19	13	6	100	100	96	72	41	26,52
Sítios Novos	SM	20,95	8,5	16	13	3	100	99	92	62	27	26,60
Sítios Novos	SM-SC	19,65	11,2	21	15	6	100	99	92	68	33	26,30
Sítios Novos	SM-SC	20,70	9,0	17	13	4	100	99	95	64	26	26,50
Trussu	SC	18,80	12,6	33	22	11	100	100	99	71	40	26,60
Trussu	SC	17,85	12,8	35	23	12	100	100	98	61	40	26,60
Trussu	SC	17,95	13,1	33	21	12	100	100	98	76	44	27,40
Trussu	SC	18,70	11,2	32	19	13	100	100	99	72	41	26,60
Trussu	SC	18,10	12,1	34	23	11	100	100	98	61	34	26,60
Ubalzinho	CL	17,30	14,4	30	21	9	100	97	93	77	57	26,38
Ubalzinho	CL	17,90	13,4	29	21	8	100	99	94	73	51	26,12
Ubalzinho	SM-SC	18,20	12,2	27	20	7	100	99	94	67	43	26,11
Ubalzinho	CL	17,65	15,1	30	21	9	100	97	93	75	56	26,17
Ubalzinho	CL	17,30	14,4	30	20	10	100	96	92	73	56	26,18
Ubalzinho	CL	17,60	13,9	28	19	9	100	96	87	70	51	26,04
Ubalzinho	SC	18,10	15,5	31	19	12	100	97	87	67	49	26,02
Ubalzinho	SM-SC	18,90	10,6	22	18	4	100	91	78	50	28	26,21
Ubalzinho	SM	19,05	9,1	23	20	3	100	100	98	66	40	26,02
Ubalzinho	CL	17,20	14,8	32	22	10	100	90	85	71	54	26,20

Barragens	Classif. USCS	Parâmetros de Compactação		Limites de Consistência			Granulometria					Densidade dos Grãos (kN/m³)
		$\gamma_{d,máx}$ (kN/m³)	$w_{ótima}$ (%)	LL(%)	LP(%)	IP (%)	3/8	Nº4	Nº10	Nº40	Nº200	
Ubalzinho	SC	17,95	13,6	28	20	8	100	95	82	65	49	26,16
Ubalzinho	SC	18,60	12,4	28	20	8	100	99	95	67	46	26,22
Ubalzinho	SC	17,40	14,7	28	21	7	100	70	62	55	44	26,02
Ubalzinho	SC	18,05	13,4	29	20	9	100	98	92	70	46	26,35
Ubalzinho	SM-SC	18,35	10,0	24	20	4	100	91	82	59	31	26,20
Ubalzinho	CL	17,70	13,8	30	20	10	100	98	95	72	55	26,30
Ubalzinho	SM-SC	18,50	12,0	25	19	6	100	100	92	58	35	26,29
Ubalzinho	CL	17,85	13,8	29	21	8	100	100	94	71	53	26,27
Ubalzinho	SM-SC	18,45	11,9	25	21	4	100	99	91	61	36	26,10
Ubalzinho	CL	17,55	13,4	28	20	8	100	100	97	83	54	26,51
Ubalzinho	CL	17,75	14,3	30	22	8	100	98	90	68	50	26,19
Ubalzinho	CL	16,15	18,8	42	23	19	100	99	97	93	79	26,59
Ubalzinho	CL	16,90	16,2	29	21	8	100	97	93	79	63	26,04
Ubalzinho	SM-SC	17,75	11,7	25	19	6	100	95	89	67	37	26,49
Ubalzinho	CL	17,20	17,0	30	20	10	100	100	97	79	56	26,20
Ubalzinho	CL	16,00	23,2	44	24	20	100	92	84	66	50	26,04
Ubalzinho	SC	18,25	12,8	28	19	9	100	90	79	56	38	26,04
Ubalzinho	SC	17,40	15,8	34	22	12	100	97	86	65	47	26,28
Ubalzinho	CL	17,95	13,2	29	20	9	100	100	96	69	51	26,10

**APÊNDICE B – AVALIAÇÃO DA PRECISÃO DA EQUAÇÃO PARA O PESO
ESPECÍFICO SECO MÁXIMO**

Conteúdo: Resultados do modelo matemático para determinação do peso específico seco máximo, após análise estatística aplicada às amostras apresentadas no Apêndice A.

Barragens	Classif. USCS	$\gamma_{d,m\acute{a}x}$ (kN/m ³) empírico	$\gamma_{d,m\acute{a}x}$ (kN/m ³) laboratorial	Erro (kN/m ³)	Erro (%)
Angicos	CL	17,82	18,37	0,55	8,9%
Angicos	CL	17,85	19,20	1,35	0,9%
Angicos	CL	18,55	18,30	(0,25)	1,7%
Angicos	CL	18,09	18,95	0,86	3,1%
Angicos	CL	18,25	18,00	(0,25)	3,1%
Angicos	CL	18,82	17,50	(1,32)	8,1%
Angicos	CL	18,31	17,55	(0,76)	3,5%
Angicos	CL	17,92	17,30	(0,62)	0,7%
Angicos	CL	18,66	17,40	(1,26)	2,5%
Angicos	CL	19,32	17,45	(1,87)	0,1%
Angicos	CL	19,18	18,30	(0,88)	0,1%
Angicos	CL	19,07	17,95	(1,12)	0,6%
Angicos	CL	18,68	18,50	(0,18)	1,5%
Angicos	CL	20,22	16,95	(3,27)	0,1%
Arneiroz II	SM	19,27	19,55	0,28	0,3%
Catu	CL	19,15	18,00	(1,15)	2,0%
Catu	SC	20,02	18,25	(1,77)	7,3%
Catu	CL	19,97	17,55	(2,42)	7,7%
Catu	CL	19,16	17,70	(1,46)	0,8%
Catu	SC	17,96	17,40	(0,56)	9,8%
Catu	CL	20,00	17,70	(2,30)	4,2%
Catu	SC	19,97	17,80	(2,17)	7,9%
Catu	SC	19,79	18,20	(1,59)	6,7%
Catu	SC	18,64	19,30	0,66	3,7%
Catu	SC	18,09	19,20	1,11	0,1%
Catu	SC	18,33	18,95	0,62	5,3%
Catu	SC	18,39	18,40	0,01	0,9%
Cauípe	SC	18,32	20,20	1,88	4,7%
Cauípe	SC	18,09	19,55	1,46	3,1%
Cauípe	SM	17,02	18,65	1,63	1,6%
Cauípe	SC	17,75	18,55	0,80	2,0%
Cauípe	SC	17,74	19,00	1,26	1,6%
Cauípe	SC	17,32	16,35	(0,97)	5,3%
Cauípe	SM-SC	17,75	19,20	1,45	1,1%
Cauípe	SC	18,05	18,50	0,45	2,4%
Cauípe	SM-SC	17,84	18,55	0,71	5,2%
Faé	SM-SC	18,12	19,35	1,23	1,3%
Faé	SC	18,65	18,10	(0,55)	2,9%
Faé	SC	18,19	19,35	1,16	0,6%
Faé	CL	19,05	18,23	(0,82)	0,5%
Faé	SM-SC	18,69	19,85	1,16	3,9%
Farias Brito	CL	19,25	17,86	(1,39)	0,3%
Farias Brito	CL	20,52	17,90	(2,62)	1,1%
Flor do Campo	CL	19,47	18,95	(0,52)	1,9%
Flor do Campo	CL	16,80	17,50	0,70	5,9%
Itaúna	SC	17,17	18,50	1,33	4,1%
Itaúna	CL	19,15	17,20	(1,95)	1,1%
Itaúna	CL	18,79	16,10	(2,69)	7,4%
Itaúna	CL	17,73	17,40	(0,33)	4,2%
Itaúna	CL	17,40	16,90	(0,50)	1,1%
Itaúna	SM	17,07	16,30	(0,77)	6,0%
Itaúna	SM	17,18	18,50	1,32	1,3%

Barragens	Classif. USCS	$\gamma_{d,m\acute{a}x}$ (kN/m ³) empírico	$\gamma_{d,m\acute{a}x}$ (kN/m ³) laboratorial	Erro (kN/m ³)	Erro (%)
Itaúna	CL	17,40	16,80	(0,60)	2,9%
Itaúna	SC	16,73	16,10	(0,63)	2,7%
Itaúna	CL	17,31	17,40	0,09	6,4%
Itaúna	CL	16,90	17,50	0,60	0,6%
Malcozinhado	SC	16,65	19,10	2,45	3,4%
Marco	SM	20,41	17,50	(2,91)	1,4%
Marco	SC	18,19	18,90	0,71	3,2%
Marco	SC	17,96	18,30	0,34	0,6%
Marco	SC	18,42	18,70	0,28	2,6%
Marco	SC	18,83	19,30	0,47	0,7%
Marco	SC	18,15	19,00	0,85	0,2%
Marco	SC	17,87	20,00	2,13	3,3%
Marco	SC	18,02	18,80	0,78	0,7%
Marco	SC	18,48	19,70	1,22	1,5%
Marco	SC	17,87	20,00	2,13	1,3%
Marco	SC	18,10	19,10	1,00	4,6%
Marco	SC	18,46	18,10	(0,36)	4,9%
Marco	SC	18,51	17,70	(0,81)	2,3%
Marco	SC	19,35	18,90	(0,45)	2,4%
Marco	SC	18,56	16,30	(2,26)	2,6%
Marco	SC	17,70	17,50	(0,20)	2,9%
Melancia	SC	20,43	18,10	(2,33)	2,5%
Melancia	SC	20,02	17,00	(3,02)	0,6%
Melancia	SC	20,40	18,00	(2,40)	2,6%
Melancia	SC	19,82	18,40	(1,42)	0,9%
Paulo	SC	18,31	18,20	(0,11)	2,0%
Paulo	CL	18,41	15,10	(3,31)	1,0%
Paulo	CL	18,21	16,70	(1,51)	4,7%
Paulo	CL	18,43	17,50	(0,93)	2,1%
Rosário	CL	18,21	15,30	(2,91)	3,8%
Rosário	CL	17,83	16,00	(1,83)	0,4%
Rosário	SC	16,70	18,80	2,10	3,4%
Rosário	CL	17,63	18,10	0,47	4,3%
Rosário	CL	18,93	15,60	(3,33)	6,6%
Rosário	CL	18,11	18,30	0,19	5,3%
Rosário	SC	17,32	18,70	1,38	8,2%
Rosário	CL	18,83	16,90	(1,93)	3,2%
Rosário	CL	17,93	17,40	(0,53)	3,1%
Sítios Novos	SM-SC	17,05	19,30	2,25	2,0%
Sítios Novos	SM-SC	17,40	18,95	1,55	0,6%
Sítios Novos	CL	20,47	20,85	0,38	7,2%
Sítios Novos	SM-SC	18,12	18,50	0,38	3,5%
Sítios Novos	SM-SC	18,80	19,20	0,40	0,5%
Sítios Novos	SC	18,46	19,50	1,04	0,9%
Sítios Novos	CL	18,12	18,40	0,28	3,1%
Sítios Novos	SC	19,47	17,30	(2,17)	0,9%
Sítios Novos	SC	19,04	19,20	0,16	0,2%
Sítios Novos	SC	19,54	17,95	(1,59)	2,3%
Sítios Novos	SC	19,47	17,15	(2,32)	3,5%
Sítios Novos	SC	18,86	18,50	(0,36)	4,3%
Sítios Novos	SC	19,12	17,30	(1,82)	4,4%
Sítios Novos	SM-SC	18,77	19,70	0,93	1,7%

Barragens	Classif. USCS	$\gamma_{d,m\acute{a}x}$ (kN/m ³) empírico	$\gamma_{d,m\acute{a}x}$ (kN/m ³) laboratorial	Erro (kN/m ³)	Erro (%)
Sítios Novos	SM-SC	19,17	19,85	0,68	5,9%
Sítios Novos	CL	18,88	18,65	(0,23)	6,7%
Sítios Novos	SM	19,35	19,10	(0,25)	2,4%
Sítios Novos	SC	18,72	19,88	1,16	14,9%
Sítios Novos	SC	18,53	18,90	0,37	5,9%
Sítios Novos	CL	19,05	17,40	(1,65)	5,3%
Sítios Novos	SC	18,26	19,20	0,94	7,4%
Sítios Novos	SC	19,59	19,20	(0,39)	8,8%
Sítios Novos	SM	18,55	20,30	1,75	0,8%
Sítios Novos	SM-SC	19,89	20,95	1,06	9,3%
Sítios Novos	SM-SC	16,28	20,15	3,87	7,8%
Sítios Novos	SM	18,29	20,95	2,66	9,5%
Sítios Novos	SM-SC	18,27	19,65	1,38	4,4%
Sítios Novos	SM-SC	17,13	20,70	3,57	11,9%
Trussu	SC	18,84	18,80	(0,04)	2,7%
Trussu	SC	18,15	17,85	(0,30)	2,6%
Trussu	SC	18,96	17,95	(1,01)	2,5%
Trussu	SC	17,98	18,70	0,72	0,7%
Trussu	SC	18,46	18,10	(0,36)	0,1%
Ubalzinho	CL	16,60	17,30	0,70	3,8%
Ubalzinho	CL	17,80	17,90	0,10	5,3%
Ubalzinho	SM-SC	16,78	18,20	1,42	7,3%
Ubalzinho	CL	17,21	17,65	0,44	10,3%
Ubalzinho	CL	17,92	17,30	(0,62)	2,1%
Ubalzinho	CL	18,19	17,60	(0,59)	2,7%
Ubalzinho	SC	17,63	18,10	0,47	4,3%

APÊNDICE C – AVALIAÇÃO DA PRECISÃO DA EQUAÇÃO PARA O TEOR DE UMIDADE ÓTIMA

Conteúdo: Resultados do modelo matemático para determinação do teor de umidade ótima, após análise estatística aplicada às amostras apresentadas no Apêndice A.

Barragens	Classif. USCS	W _{ótima} (%) empírico	W _{ótima} (%) laboratorial	Erro (kN/m ³)	Erro (%)
Faé	SM-SC	9,9	10,5	0,63	6,0%
Faé	SC	10,9	12,6	1,73	13,7%
Faé	SC	12,3	11,0	(1,27)	11,6%
Faé	CL	12,2	13,6	1,45	10,6%
Faé	SM-SC	11,0	9,8	(1,25)	12,7%
Cauípe	SC	10,9	10,2	(0,73)	7,1%
Cauípe	SC	12,5	10,1	(2,41)	23,8%
Cauípe	SM	11,5	12,2	0,74	6,1%
Cauípe	SC	11,7	10,6	(1,15)	10,8%
Cauípe	SC	11,6	12,0	0,40	3,4%
Cauípe	SM-SC	11,2	10,2	(1,02)	10,0%
Cauípe	SC	11,5	9,6	(1,89)	19,6%
Cauípe	SM-SC	11,4	11,2	(0,15)	1,4%
Angicos	CL	12,1	12,4	0,28	2,3%
Angicos	CL	11,4	12,8	1,44	11,2%
Angicos	CL	12,1	13,2	1,05	8,0%
Angicos	CL	11,1	12,0	0,87	7,2%
Angicos	CL	12,2	14,0	1,84	13,1%
Angicos	CL	12,5	15,2	2,71	17,8%
Angicos	CL	12,7	15,4	2,67	17,4%
Angicos	CL	13,4	17,0	3,59	21,1%
Angicos	CL	12,9	14,8	1,87	12,7%
Angicos	CL	12,7	17,5	4,80	27,4%
Angicos	CL	13,3	14,8	1,48	10,0%
Angicos	CL	12,5	14,9	2,43	16,3%
Angicos	CL	11,8	12,4	0,63	5,1%
Angicos	CL	12,6	13,8	1,16	8,4%
Catú Cinzenta	CL	12,7	15,2	2,49	16,4%
Catú Cinzenta	SC	12,4	14,0	1,56	11,1%
Catú Cinzenta	CL	12,5	15,0	2,47	16,4%
Catú Cinzenta	CL	12,5	15,5	2,98	19,2%
Catú Cinzenta	SC	12,4	15,8	3,38	21,4%
Catú Cinzenta	CL	12,8	15,9	3,06	19,2%
Catú Cinzenta	SC	12,8	15,6	2,80	18,0%
Catú Cinzenta	SC	12,4	12,4	0,02	0,1%
Catú Cinzenta	SC	11,6	11,4	(0,16)	1,4%
Catú Cinzenta	SC	11,6	11,6	(0,03)	0,3%
Catú Cinzenta	SC	11,8	12,6	0,83	6,6%
Catú Cinzenta	SC	12,2	14,7	2,54	17,3%
Flor do Campo	CL	11,4	12,7	1,33	10,4%
Flor do Campo	CL	12,6	14,4	1,84	12,8%

Barragens	Classif. USCS	W_{ótima} (%) empírico	W_{ótima} (%) laboratorial	Erro (kN/m³)	Erro (%)
Itaúna	SC	13,0	14,9	1,89	12,7%
Itaúna	CL	13,3	17,7	4,41	24,9%
Itaúna	CL	13,4	17,7	4,29	24,2%
Itaúna	CL	13,7	18,0	4,31	23,9%
Malcozinhado	SC	11,0	12,7	1,75	13,8%
Sítios Novos	SM-SC	10,6	9,0	(1,63)	18,1%
Sítios Novos	SM-SC	11,2	8,8	(2,42)	27,5%
Sítios Novos	CL	9,9	8,8	(1,07)	12,1%
Sítios Novos	SM-SC	11,2	7,0	(4,17)	59,6%
Sítios Novos	SM-SC	10,6	9,3	(1,33)	14,3%
Sítios Novos	SC	10,8	10,5	(0,33)	3,1%
Sítios Novos	CL	12,2	12,8	0,61	4,8%
Sítios Novos	SC	13,1	13,0	(0,07)	0,6%
Sítios Novos	SC	11,6	11,0	(0,60)	5,4%
Sítios Novos	SC	12,4	12,0	(0,36)	3,0%
Sítios Novos	SC	12,2	12,6	0,42	3,3%
Sítios Novos	SC	13,1	13,0	(0,10)	0,8%
Sítios Novos	SM-SC	10,8	8,1	(2,72)	33,5%
Sítios Novos	SM-SC	10,6	8,3	(2,32)	28,0%
Sítios Novos	CL	11,5	12,1	0,59	4,9%
Sítios Novos	SM	11,3	11,2	(0,05)	0,5%
Sítios Novos	SC	10,7	10,2	(0,46)	4,5%
Sítios Novos	SC	11,7	13,0	1,28	9,8%
Sítios Novos	CL	12,3	14,0	1,67	11,9%
Sítios Novos	SC	11,6	10,0	(1,59)	15,9%
Sítios Novos	SC	11,7	11,3	(0,37)	3,2%
Sítios Novos	SM	10,0	7,3	(2,69)	36,8%
Sítios Novos	SM-SC	9,6	7,7	(1,91)	24,8%
Sítios Novos	SM-SC	10,2	8,4	(1,84)	21,9%
Sítios Novos	SM	9,8	8,5	(1,32)	15,5%
Sítios Novos	SM-SC	10,7	11,2	0,48	4,3%
Sítios Novos	SM-SC	9,9	9,0	(0,92)	10,3%
Ubalzinho	CL	12,6	14,4	1,75	12,2%
Ubalzinho	CL	12,4	13,4	1,01	7,5%
Ubalzinho	SM-SC	12,1	12,2	0,14	1,2%
Ubalzinho	CL	12,5	15,1	2,59	17,1%
Ubalzinho	CL	12,5	14,4	1,90	13,2%
Ubalzinho	CL	12,2	13,9	1,73	12,4%
Ubalzinho	SC	12,2	15,5	3,31	21,3%
Ubalzinho	SM-SC	11,4	10,6	(0,79)	7,5%
Ubalzinho	SM	11,6	9,1	(2,52)	27,7%

Barragens	Classif. USCS	W_{ótima} (%) empírico	W_{ótima} (%) laboratorial	Erro (kN/m³)	Erro (%)
Ubaldinho	CL	12,9	14,8	1,93	13,0%
Ubaldinho	SC	12,2	13,6	1,38	10,2%
Ubaldinho	SC	12,0	12,4	0,37	2,9%
Ubaldinho	SC	12,5	14,7	2,22	15,1%
Ubaldinho	SC	12,3	13,4	1,13	8,4%
Ubaldinho	SM-SC	11,9	10,0	(1,91)	19,1%
Ubaldinho	CL	12,4	13,8	1,37	9,9%
Ubaldinho	SM-SC	11,8	12,0	0,21	1,8%
Ubaldinho	CL	12,4	13,8	1,37	10,0%
Ubaldinho	SM-SC	12,0	11,9	(0,11)	0,9%
Ubaldinho	CL	12,4	13,4	1,00	7,5%
Ubaldinho	CL	12,6	14,3	1,67	11,7%
Ubaldinho	CL	12,7	16,2	3,53	21,8%
Ubaldinho	SM-SC	12,1	11,7	(0,36)	3,0%
Ubaldinho	CL	12,5	17,0	4,47	26,3%
Ubaldinho	CL	14,1	23,2	9,10	39,2%
Ubaldinho	SC	12,0	12,8	0,81	6,4%
Ubaldinho	SC	12,9	15,8	2,85	18,0%
Ubaldinho	CL	12,2	13,2	0,96	7,3%
Arneiroz II	SM	12,5	15,0	2,48	16,6%
Farias Brito	CL	13,3	21,0	7,68	36,6%
Farias Brito	CL	13,1	21,0	7,86	37,4%
Melancia	SC	12,1	16,3	4,20	25,8%
Melancia	SC	13,1	19,0	5,92	31,2%
Melancia	SC	11,9	16,3	4,39	26,9%
Melancia	SC	12,5	16,2	3,69	22,8%
Diamantino II	SM	12,0	12,8	0,77	6,0%
Diamantino II	SC	11,8	13,2	1,37	10,4%
Diamantino II	SC	12,1	14,1	2,01	14,3%
Diamantino II	SC	12,3	10,8	(1,53)	14,2%
Diamantino II	SC	11,5	12,5	0,99	7,9%
Diamantino II	SC	11,9	14,0	2,08	14,8%
Diamantino II	SC	11,0	10,0	(0,96)	9,6%
Diamantino II	SC	11,5	10,6	(0,86)	8,1%
Diamantino II	SC	11,9	10,1	(1,82)	18,0%
Diamantino II	SC	11,3	9,9	(1,36)	13,7%
Diamantino II	SC	12,1	10,8	(1,32)	12,2%
Diamantino II	SC	11,9	15,8	3,95	25,0%
Diamantino II	SC	12,2	15,3	3,11	20,3%
Diamantino II	SC	11,7	13,0	1,33	10,2%
Diamantino II	SC	13,0	18,8	5,84	31,1%

Barragens	Classif. USCS	W_{ótima} (%) empírico	W_{ótima} (%) laboratorial	Erro (kN/m³)	Erro (%)
Diamantino II	SC	12,1	17,3	5,20	30,1%
Paulo Sarasate	SC	11,2	15,8	4,59	29,1%
Paulo Sarasate	CL	13,1	15,4	2,28	14,8%
Paulo Sarasate	CL	12,3	16,1	3,80	23,6%
Trussu	SC	12,6	12,6	0,04	0,3%
Trussu	SC	13,1	12,8	(0,26)	2,0%
Trussu	SC	12,8	13,1	0,25	1,9%
Trussu	SC	12,2	11,2	(1,00)	8,9%
Trussu	SC	12,9	12,1	(0,84)	6,9%
Rosário	CL	13,9	20,8	6,85	32,9%
Rosário	CL	13,0	12,7	(0,34)	2,7%
Rosário	CL	13,4	19,5	6,14	31,5%
Rosário	SC	12,7	12,8	0,09	0,7%
Rosário	CL	14,0	19,6	5,64	28,8%

**APÊNDICE D – DADOS LABORATORIAIS DAS AMOSTRAS DA BARRAGEM
UMARI, MADALENA/CE**

Conteúdo: Dados dos ensaios laboratoriais das amostras de solos da Barragem Umari, Madalena/CE. As amostras foram utilizadas no processo de validação das equações empíricas encontradas no estudo.

Amostras da Barragem	Classif. USCS	Parâmetro de Compactação		Parâmetros Avaliados						
		$\gamma_{d,m\acute{a}x}$ (kN/m ³)	w _{ótima} (%)	LL(%)	LP(%)	$\gamma_{s,m\acute{a}x}$ (kN/m ³)	γ_s (kN/m ³)	Índice de vazios e	Densidade dos grãos (kN/m ³)	%P#200
UMARI	SC	17,50	11,8	30,0	20,0	18,75	25,31	0,35	25,31	31
UMARI	SC	17,95	10,2	34,0	20,0	18,52	24,72	0,34	25,31	13
UMARI	SC	18,23	10,8	32,0	21,0	18,44	24,92	0,35	25,31	32
UMARI	SC	18,23	10,8	33,0	21,0	18,26	24,53	0,34	25,31	31
UMARI	SC	17,95	12,6	34,0	21,0	18,22	24,43	0,34	25,31	36
UMARI	SC	18,14	12,0	31,0	22,0	18,26	25,02	0,37	25,31	33
UMARI	SC	17,92	13,0	30,0	23,0	18,64	25,51	0,37	25,31	37
UMARI	SC	18,13	12,9	33,0	22,0	18,15	24,72	0,36	25,31	36
UMARI	SC	18,29	11,1	32,0	22,0	18,25	25,11	0,38	25,31	31
UMARI	SC	18,17	11,9	34,0	23,0	18,23	25,90	0,42	25,31	32
UMARI	SC	18,17	14,5	34,0	24,0	17,76	24,82	0,40	25,31	32
UMARI	SC	18,17	14,5	36,0	22,0	18,14	26,39	0,45	25,31	35
UMARI	SC	18,17	10,9	36,0	24,0	17,81	25,51	0,43	25,31	33
UMARI	SC	18,17	12,1	37,0	25,0	17,62	26,19	0,49	25,31	39

**APÊNDICE E – DETALHAMENTO DOS RESULTADOS NO PROCESSO DE
VALIDAÇÃO DAS EQUAÇÕES EMPÍRICAS**

Conteúdo: Apresentação dos valores dos parâmetros adotados no processo de validação dos modelos matemáticos, com a utilização de amostras da Barragem Umari.

MODELO MATEMÁTICO PREDITIVO $\rightarrow \gamma_{d,m\acute{a}x} \text{ (kN/m}^3\text{)} = 9,2 [3,3 \cdot \gamma_s^{0,3} - 0,09 \cdot (LP^{1,13}) - 0,02 \cdot (\%P\#200)]^{0,42}$								
Amostras da Barragem	Classif. USCS	Parâmetro de Compactação Analisado	Parâmetros			Parâmetro de Compactação pela Equação Matemática	Erro (kN/m ³)	Erro (%)
		$\gamma_{d,m\acute{a}x}$ (kN/m ³)	Peso Específico dos Grãos (kN/m ³)	LP(%)	%P#200	$\gamma_{d,m\acute{a}x}$ (kN/m ³)		
UMARI	SC	17,98	26,19	25,0	35,0	17,58	0,40	2,2%
UMARI	SC	18,05	24,82	24,0	31,0	17,72	0,33	1,8%
UMARI	SC	17,98	25,51	24,0	33,0	17,77	0,21	1,2%
UMARI	SC	17,98	25,9	23,0	32,0	18,10	-0,12	0,7%
UMARI	SC	17,95	24,72	22,0	33,0	18,12	-0,17	0,9%
UMARI	SC	17,74	24,43	21,0	37,0	18,18	-0,44	2,5%
UMARI	SC	17,98	26,39	22,0	39,0	18,19	-0,21	1,2%
UMARI	SC	18,05	25,11	22,0	32,0	18,21	-0,16	0,9%
UMARI	SC	18,11	25,02	22,0	31,0	18,22	-0,11	0,6%
UMARI	SC	17,77	24,53	21,0	36,0	18,22	-0,45	2,6%
UMARI	SC	17,98	24,92	21,0	32,0	18,40	-0,42	2,4%
UMARI	SC	17,94	24,72	20,0	36,0	18,48	-0,54	3,0%
UMARI	SC	17,77	25,51	23,0	13,0	18,61	-0,84	4,7%
UMARI	SC	17,32	25,31	20,0	31,0	18,71	-1,39	8,0%

MODELO MATEMÁTICO PREDITIVO $\rightarrow w_{\text{ótima}} = (0,6 \cdot LL^2 + 8 \cdot LP^{1,6} + 2300 \cdot e)^{0,32}$										
Amostras da Barragem	Classif. USCS	Parâmetro de Compactação Analisado	Parâmetros do Modelo					Parâmetro de Compactação pela Equação Matemática	Erro (kN/m ³)	Erro (%)
		$w_{\text{ótima}}$	$\gamma_{s,\text{máx}}$ (kN/m ³)	γ_s (kN/m ³)	e	LL(%)	LP(%)	$w_{\text{ótima}}$		
UMARI	SC	11,80	18,75	25,31	0,35	30,0	20,0	11,92	-0,12	1,0%
UMARI	SC	12,90	18,52	24,72	0,34	34,0	20,0	12,13	0,77	5,9%
UMARI	SC	11,90	18,44	24,92	0,35	32,0	21,0	12,17	-0,27	2,3%
UMARI	SC	12,60	18,26	24,53	0,34	33,0	21,0	12,20	0,40	3,2%
UMARI	SC	13,00	18,22	24,43	0,34	34,0	21,0	12,26	0,74	5,7%
UMARI	SC	11,10	18,26	25,02	0,37	31,0	22,0	12,31	-1,21	10,9%
UMARI	SC	10,20	18,64	25,51	0,37	30,0	23,0	12,38	-2,18	21,4%
UMARI	SC	12,00	18,15	24,72	0,36	33,0	22,0	12,39	-0,39	3,3%
UMARI	SC	10,80	18,25	25,11	0,38	32,0	22,0	12,40	-1,60	14,8%
UMARI	SC	12,10	18,23	25,90	0,42	34,0	23,0	12,78	-0,68	5,6%
UMARI	SC	10,80	17,76	24,82	0,40	34,0	24,0	12,83	-2,03	18,8%
UMARI	SC	14,50	18,14	26,39	0,45	36,0	22,0	12,87	1,63	11,2%
UMARI	SC	10,90	17,81	25,51	0,43	36,0	24,0	13,04	-2,14	19,7%
UMARI	SC	14,50	17,62	26,19	0,49	37,0	25,0	13,40	1,10	7,6%

APÊNDICE F – DETALHAMENTO DOS RESULTADOS NO PROCESSO DE COMPARAÇÃO ENTRE AS EQUAÇÕES EMPÍRICAS EXISTENTES

Conteúdo: Apresentação da aplicação dos modelos de Omar *et al.* (2003) e Gurtug e Sridharan (2004), nas amostras de solo da Barragem Umari, de modo a obter os resultados para os parâmetros de compactação e posteriormente serem realizados comparativos com os resultados dos modelos matemáticos do presente estudo.

MODELO MATEMÁTICO DE OMAR <i>et al.</i> (2003) $\rightarrow \rho_{d(máx)} (kg/m^3) = [4.804.57 \cdot G_s - 195,56 \cdot (LL^2) + 156.971 \cdot (R\#4)^{0,5} - 9.527.830]^{0,5}$								
Amostras da Barragem	Classif. USCS	Parâmetro de Compactação Analisado	Parâmetros			Parâmetro de Compactação pela Equação Matemática	Erro (kN/m ³)	Erro (%)
		$\rho_{d(máx)} (kg/m^3)$	G_s	LL(%)	%R#4	$\rho_{d(máx)} (kg/m^3)$		
UMARI	SC	1810,0	2,50	33,0	4,0	1607,67	202,33	11,2%
UMARI	SC	1810,0	2,49	34,0	7,0	1620,13	189,87	10,5%
UMARI	SC	1830,0	2,52	34,0	5,0	1644,58	185,42	10,1%
UMARI	SC	1840,0	2,53	34,0	4,0	1647,92	192,08	10,4%
UMARI	SC	1830,0	2,52	33,0	10,0	1692,08	137,92	7,5%
UMARI	SC	1830,0	2,60	36,0	1,0	1693,40	136,60	7,5%
UMARI	SC	1850,0	2,55	31,0	6,0	1708,92	141,08	7,6%
UMARI	SC	1810,0	2,60	30,0	1,0	1716,11	93,89	5,2%
UMARI	SC	1830,0	2,54	32,0	10,0	1723,93	106,07	5,8%
UMARI	SC	1840,0	2,56	32,0	11,0	1758,48	81,52	4,4%
UMARI	SC	1770,0	2,58	30,0	10,0	1785,60	-15,60	0,9%
UMARI	SC	1830,0	2,67	37,0	2,0	1804,07	25,93	1,4%
UMARI	SC	1830,0	2,69	36,0	6,0	1878,18	-48,18	2,6%
UMARI	SC	1830,0	2,64	34,0	17,0	1891,40	-61,40	3,4%

MODELO MATEMÁTICO DE OMAR et al.(2003) $\rightarrow \ln(w_{ótima}) = 1,195 \times 10^{-4} \cdot LL^2 - 1,964 \cdot G_s - 6,617 \times 10^{-5} \cdot R\#4 + 7,651$								
Amostras da Barragem	Classif. USCS	Parâmetro de Compactação Analisado	Parâmetros do Modelo			Parâmetro de Compactação pela Equação Matemática	Erro (kN/m ³)	Erro (%)
		W _{ótima}	LL(%)	G _s	R#4	W _{ótima}		
UMARI	SC	14,50	37,0	2,67	2,0	13,25	1,25	8,6%
UMARI	SC	14,50	36,0	2,69	17,0	13,95	0,55	3,8%
UMARI	SC	12,10	34,4	2,64	6,0	14,11	-2,01	16,6%
UMARI	SC	10,20	30,2	2,60	1,0	14,30	-4,10	40,2%
UMARI	SC	10,90	36,2	2,60	1,0	15,00	-4,10	37,6%
UMARI	SC	11,80	30,0	2,58	10,0	15,76	-3,96	33,6%
UMARI	SC	11,10	31,2	2,55	6,0	16,43	-5,33	48,0%
UMARI	SC	10,80	32,1	2,56	11,0	16,76	-5,96	55,2%
UMARI	SC	10,80	34,1	2,53	4,0	17,24	-6,44	59,7%
UMARI	SC	11,90	32,1	2,54	10,0	17,32	-5,42	45,5%
UMARI	SC	12,90	34,2	2,52	5,0	17,72	-4,82	37,3%
UMARI	SC	12,60	33,1	2,50	4,0	18,14	-5,54	44,0%
UMARI	SC	12,00	33,1	2,52	10,0	18,15	-6,15	51,3%
UMARI	SC	13,00	34,1	2,49	7,0	19,03	-6,03	46,4%

MODELO MATEMÁTICO DE GURTUG E SRIDHARAN (2004) $\rightarrow \gamma_{d,m\acute{a}x} = 23,68 \cdot e^{-0,0183w_{\acute{o}tima}}$						
Amostras da Barragem	Classif. USCS	Parâmetro de Compactação Analisado	Parâmetros	Parâmetro de Compactação pela Equação Matemática	Erro (kN/m ³)	Erro (%)
		$\gamma_{d,m\acute{a}x}$ (kN/m ³)	$w_{\acute{o}tima}$	$\gamma_{d,m\acute{a}x}$ (kN/m ³)		
UMARI	SC	17,98	22,4	15,05	2,93	16,3%
UMARI	SC	17,98	21,5	15,30	2,68	14,9%
UMARI	SC	18,05	21,5	15,30	2,75	15,2%
UMARI	SC	17,77	20,6	15,55	2,22	12,5%
UMARI	SC	17,98	20,6	15,55	2,43	13,5%
UMARI	SC	17,95	19,7	15,81	2,14	11,9%
UMARI	SC	17,98	19,7	15,81	2,17	12,1%
UMARI	SC	18,05	19,7	15,81	2,24	12,4%
UMARI	SC	18,11	19,7	15,81	2,30	12,7%
UMARI	SC	17,74	18,8	16,07	1,67	9,4%
UMARI	SC	17,77	18,8	16,07	1,70	9,5%
UMARI	SC	17,98	18,8	16,07	1,91	10,6%
UMARI	SC	17,32	17,9	16,34	0,98	5,7%
UMARI	SC	17,94	17,9	16,34	1,60	8,9%

MODELO MATEMÁTICO DE GURTUG E SRIDHARAN (2004) → $w_{ótima} = [1,95-0,38(\log E)] \cdot LP$							
Amostras da Barragem	Classif. USCS	Parâmetro de Compactação Analisado	Parâmetros do Modelo		Parâmetro de Compactação pela Equação Matemática	Erro (kN/m ³)	Erro (%)
		$w_{ótima}$	LP(%)	E (kN-m/m ³)	$w_{ótima}$		
UMARI	SC	11,80	20,0	594,00	17,92	-6,12	51,9%
UMARI	SC	12,90	20,0	594,00	17,92	-5,02	38,9%
UMARI	SC	12,60	21,0	594,00	18,82	-6,22	49,3%
UMARI	SC	13,00	21,0	594,00	18,82	-5,82	44,7%
UMARI	SC	11,90	21,0	594,00	18,82	-6,92	58,1%
UMARI	SC	10,80	22,0	594,00	19,71	-8,91	82,5%
UMARI	SC	12,00	22,0	594,00	19,71	-7,71	64,3%
UMARI	SC	11,10	22,0	594,00	19,71	-8,61	77,6%
UMARI	SC	12,10	22,0	594,00	19,71	-7,61	62,9%
UMARI	SC	10,20	23,0	594,00	20,61	-10,41	102,0%
UMARI	SC	14,50	23,0	594,00	20,61	-6,11	42,1%
UMARI	SC	10,80	24,0	594,00	21,50	-10,70	99,1%
UMARI	SC	10,90	24,0	594,00	21,50	-10,60	97,3%
UMARI	SC	14,50	25,0	594,00	22,40	-7,90	54,5%