



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

MARIANA PEREIRA RODRIGUES

**APLICAÇÃO DE EQUAÇÕES EMPÍRICAS PARA ESTIMAR OS PARÂMETROS
DE COMPACTAÇÃO DE SOLOS**

FORTALEZA
2022

MARIANA PEREIRA RODRIGUES

APLICAÇÃO DE EQUAÇÕES EMPÍRICAS PARA ESTIMAR OS PARÂMETROS DE
COMPACTAÇÃO DE SOLOS

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares.

Fortaleza

2022

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)

R614a Rodrigues, Mariana Pereira.

Aplicação de equações empíricas para estimar os parâmetros de compactação de solos /
Mariana Pereira Rodrigues. – 2022.
63 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro
de Tecnologia, Curso de Engenharia Ambiental, Fortaleza, 2022.

Orientação: Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares.

1. Parâmetros de compactação. 2. Limite de liquidez. 3. Peso específico seco máximo. 4.
Energia de compactação. I. Título.

CDD 628

MARIANA PEREIRA RODRIGUES

APLICAÇÃO DE EQUAÇÕES EMPÍRICAS PARA ESTIMAR OS PARÂMETROS DE
COMPACTAÇÃO DE SOLOS

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares.

Aprovada em: 18/07/2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

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

Me. Ricardo Cesar Bezerra Teles Júnior
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Aos meus avós, minhas estrelas no
céu, e aos meus pais, minhas estrelas
na terra.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela sua fidelidade e constância que nunca me desamparam. E pela intercessão da sua santa Mãe, Nossa Senhora, que sempre me leva ao melhor de mim.

Aos meus avós, Francisca, Teresinha, José e Francisco que são a base da minha história. Levo vocês para sempre no meu coração.

Aos meus pais, Francina e Júnior, por sempre acreditarem em mim. Pelo amor e apoio incondicionais. Pelas pequenas e pelas grandes coisas. Amo vocês.

À minha família, que é grande, unida e calorosa. A cada dia valorizo mais essas raras qualidades. Tenho sorte de ter nascido entre essas pessoas fortes representadas pelas minhas tias: Cláudia, Claudete e Francilene.

A todos os conselhos, carinho e amor do Cauê e das minhas amigas, Mônica e Emily. Aos meus amigos da Engenharia Ambiental, pela felicidade que foi estar ao lado de vocês nessa jornada.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Anderson, pelos direcionamentos, pela paciência e pela gentileza.

Ao Anselmo e ao seu Francisco, do Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação da UFC, que doaram um pouco do seu tempo, em meio a correria. Pela receptividade e solicitude.

Agradeço a todos, inclusive aos que não foram citados de maneira direta, mas sabem que estão nas entrelinhas. Vocês contribuíram para formar a pessoa por trás desse trabalho. Muito obrigada.

“Melhor viver, meu bem, pois há um lugar em que o sol brilha pra você chorar, sorrir também e depois dançar na chuva quando a chuva vem.” (Composição: Marcelo Jeneci e Chico Cesar)

RESUMO

A mecânica dos solos fornece o entendimento do comportamento dos solos e permite a utilização de técnicas de melhoria das propriedades geotécnicas das camadas de solo do terreno, como o melhoramento físico por meio da compactação. Esta técnica aumenta a densidade do solo por meio da aplicação de esforço manual ou mecânico, através da expulsão do ar contido nos vazios do solo, sob uma umidade ideal, denominada umidade ótima. O ensaio de compactação tem como principal objetivo a obtenção da curva de compactação sob energia específica, de onde é possível extrair dois parâmetros fundamentais: o peso específico seco máximo e a umidade ótima. Atualmente existem na literatura metodologias que permitem estimar os parâmetros de compactação a partir de propriedades de índice do solo, como o limite de liquidez e a energia de compactação. O presente trabalho tem como objetivo analisar a assertividade das metodologias propostas por Blotz *et al.* (1998) e Ramiah *et al.* (1970) para prever os parâmetros de compactação, a partir de propriedades índices do solo. O trabalho foi dividido em duas etapas: uma revisão de literatura para obter resultados experimentais de ensaios de compactação e as propriedades índices dos solos, e comparação dos dados experimentais com os obtidos pelas metodologias anteriormente expostas; e a realização de ensaios de compactação para validar as metodologias. As comparações entre os dados experimentais e teóricos obtidos nas duas metodologias foram analisadas para o conjunto de dados total e considerando diferentes condições, como energia de compactação e tipo de solo. Os resultados indicaram que ambas as metodologias são assertivas para estimar o peso específico seco máximo para energia de Proctor normal, enquanto para a energia Proctor modificada somente a metodologia de Blotz *et al.* (1998) mostrou-se eficiente, além de ter obtido melhor resultado para previsão do parâmetro em questão. Com relação à umidade ótima, apesar do método de Blotz *et al.* (1998) ter estimado melhores resultados, ambos apresentaram dispersão considerável, e a aplicação dessas metodologias deve ser limitada somente a obras de menor responsabilidade.

Palavras-chave: compactação; limite de liquidez; energia de compactação; umidade ótima; peso específico seco máximo.

ABSTRACT

Soil mechanics provides an understanding of soil behavior and allows the use of techniques to improve the geotechnical properties of the land, such as physical improvement through compaction. This technique increases the density of the soil through the application of manual or mechanical effort, through the expulsion of the air contained in the voids of the soil, under an ideal humidity, called optimal humidity. The main objective of the compaction test is to obtain the compaction curve under specific energy, from which it is possible to extract two fundamental parameters: the maximum dry specific weight and the optimal moisture. Currently, there are methodologies in the literature that allow the estimation of compaction parameters from soil index properties, such as the liquidity limit and compaction energy. The present work aims to analyze the assertiveness of the methodologies proposed by Blotz *et al.* (1998) and Ramiah *et al.* (1970) to predict soil compaction parameters from soil index properties. The work was divided into two stages: a literature review to obtain experimental results from compaction tests and soil index properties, and comparison of the experimental data with those obtained by the previously exposed methodologies; and carrying out compaction tests to validate the methodologies. The comparisons between the experimental and theoretical data obtained in both methodologies were analyzed for the total dataset and considering different conditions, such as compaction energy and soil type. The results indicated that both methodologies are assertive to estimate the maximum dry specific gravity for normal Proctor energy, while for modified Proctor energy only the methodology of Blotz *et al.* (1998) proved to be efficient, in addition to having obtained better results for predicting the parameter in question. Regarding the optimal humidity, despite the method by Blotz *et al.* (1998) have estimated better results, both showed considerable dispersion, and the application of these methodologies should be limited only to works of lesser responsibility.

Keywords: compaction; liquid limit; compaction energy; optimum water content; maximum dry unit weight.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1– Fases no solo	17
Figura 2 – Limites de consistência.....	18
Figura 3 - Aparelho Casagrande elétrico com contador.	32
Figura 4 - Amostra de Solo B retido e passante na peneira Nº 40.....	32
Figura 5 – Capsula com Solo B homogeneizado.	33
Figura 6 - Aparelho Casagrande com massa de solo e água.	33
Figura 7 – Aparelho Casagrande com ranhura aberta e fechada.	34
Figura 8 – Amostra Solo A umidificada e revolvida.	35
Figura 9 - Compactação do Solo A no cilindro pequeno.....	35
Figura 10 – Soquete pequeno, soquete grande e cilindro pequeno.	36
Figura 11 – Solo A rasado ao cilindro de compactação.....	36
Figura 12 – Amostras do Solo B do ensaio de compactação.	37

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Modelo de curva de compactação e saturação.	19
Gráfico 2– Curvas de compactação para diferentes tipos de solo.	20
Gráfico 3 – Curvas de compactação de um solo para diferentes energias.	21
Gráfico 4 – Estrutura de solos compactados.	24
Gráfico 5 – Relação dos parâmetros de compactação com a energia.	26
Gráfico 6 – Relação dos parâmetros de compactação com o limite de liquidez.	28
Gráfico 7 - Relação do índice de plasticidade e limite de plasticidade com o peso específico seco máximo.	28
Gráfico 8 – Relação entre o $\gamma_{d,máx}$ experimental e teórico.	38
Gráfico 9 – Relação entre o ω_{ot} experimental e teórico.	39
Gráfico 10 – Relação entre o $\gamma_{d,máx}$ experimental e teórico dos solos finos.	40
Gráfico 11 – Relação entre o $\gamma_{d,máx}$ experimental e teórico dos solos granulares.	41
Gráfico 12 - Relação entre a ω_{ot} experimental e teórica dos solos finos.	42
Gráfico 13 - Relação entre a ω_{ot} experimental e teórica dos solos finos.	42
Gráfico 14 - Relação entre o $\gamma_{d,máx}$ experimental e teórico para energia de Proctor normal.	44
Gráfico 15 - Relação entre o $\gamma_{d,máx}$ experimental e teórico para energia de Proctor modificado.	44
Gráfico 16 - Relação entre a ω_{ot} experimental e teórica para energia de Proctor normal.	45
Gráfico 17 - Relação entre o ω_{ot} experimental e teórico para energia Proctor modificada.	46
Gráfico 18 – Curva de fluidez do Solo A.	47
Gráfico 19 – Curva de fluidez do Solo B.	47
Gráfico 20 – Curva de compactação do Solo A.	48
Gráfico 21 – Curva de compactação do Solo B.	48
Gráfico 22 - Relação entre o $\gamma_{d,máx}$ e ω_{ot} experimental e teórico dos Solos A e B.	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de diferenciação do tamanho das partículas ABNT.....	16
Tabela 2 - Especificações para energias de compactação.	22
Tabela 3– Ilustrativo de Gráficos Gerais.	31
Tabela 4 – Ilustrativo de Gráficos Específicos.....	31
Tabela 5 – Média dos Erros Absolutos.....	39
Tabela 6 – Média dos erros absolutos do $\gamma_{d,máx}$ para solos finos e granulares.....	41
Tabela 7 – Média dos erros absolutos da ω_{ot} para solos finos e granulares.	43
Tabela 8 – Média dos erros absolutos do $\gamma_{d,máx}$ para Proctor normal e modificado...	45
Tabela 9 - Média dos erros absolutos da ω_{ot} para Proctor normal e modificado.....	46
Tabela 10 – Parâmetros obtidos nos ensaios de compactação.	49
Tabela 11 – Média dos erros absolutos dos parâmetros de compactação para os Solos A e B	50

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos	15
1.1.1	Objetivo Geral	15
1.1.2	Objetivos específicos	15
2	REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO	16
2.1	Introdução	16
2.2	Índices de Liquidez e Plasticidade	17
2.3	Compactação em solos	18
2.3.1	Energia de Compactação	21
2.3.2	Compactação de Campo e controle de compactação	22
2.3.3	Estrutura de Solos Compactados	24
2.4	Equações para estimar parâmetros de compactação em solos	25
2.4.1	Blotz et al. (1998)	25
2.4.2	Ramiah et al. (1970)	27
3	METODOLOGIA	30
3.1	Coleta de dados	30
3.2	Dados teóricos x Dados experimentais	30
3.3	Ensaio de laboratório	31
3.3.1	Ensaio do Limite de Liquidez	32
3.3.2	Ensaio de Compactação	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
4.1	Dados experimentais x Dados teóricos	38
4.1.1	Quanto a granulometria	40
4.1.2	Quanto a energia de compactação	43
4.2	Ensaio laboratoriais	46
4.2.1	Ensaio de Limite de Liquidez	47

4.2.2	<i>Ensaio de Compactação</i>	48
4.3	Análise dos Solos A e B	49
5	CONCLUSÕES	51
	REFERÊNCIAS	52
	APÊNDICE A – DADOS COLETADOS NA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	55
	APÊNDICE B – DADOS ENSAIO DE LIMITE DE LIQUIDEZ DOS SOLOS A E B ..	57
	APÊNDICE C – DADOS DO ENSAIO DE COMPACTAÇÃO DO SOLO A E B	58
	APÊNDICE D – DADOS EXPERIMENTAIS E DADOS TEÓRICOS	60

1 INTRODUÇÃO

Obras civis se assentam sobre o terreno natural e necessitam do conhecimento a respeito do comportamento do solo, que é afetado quando submetido a um alívio ou a um acréscimo de pressão. Os conhecimentos da mecânica dos solos, fornecem o entendimento do comportamento hidromecânico deles, que auxiliam no dimensionamento das obras.

Uma das técnicas que melhoram as propriedades geotécnicas do terreno é a compactação, que promove uma densificação do solo por meio da aplicação de um esforço mecânico ou manual, como descrito por Pinto (2006). A compactação é empregada em diversas obras civis, como barragens de terra, aterros e obras de terraplenagem em geral, sendo importante por estabilizar o maciço terroso, aumentando a sua resistência e diminuindo a compressibilidade.

No processo de compactação, o solo é submetido a determinado acréscimo de pressão (energia de compactação), e, sob umidade adequada, denominada de umidade ótima, consegue atingir o seu peso específico seco máximo. Em outras palavras, as partículas se reorganizam em uma configuração mais compacta, onde o mesmo peso sólido ocupa um volume menor (Pinto, 2006).

Entretanto, para se obter informações de umidade ótima e peso específico seco máximo para os solos, que são denominados de parâmetros de compactação, o engenheiro norte-americano Ralph Proctor desenvolveu o ensaio que leva o seu nome, padronizado no Brasil pela ABNT NBR 7182/2016, designado de ensaio de compactação.

Alguns autores desenvolveram relações teóricas, baseadas em dados experimentais, que correlacionam os parâmetros de compactação com o limite de liquidez e a energia de compactação. Estes métodos permitem estimar os mesmos parâmetros, antes da realização do ensaio de compactação, podendo ser útil para a uma avaliação preliminar ou para uso em locais onde não se tenha disponibilidade de realização do ensaio em questão. No entanto, deve-se ter um certo cuidado no uso dessas relações empíricas de verificar se elas produzem resultados adequados com os obtidos no ensaio de compactação. Como exemplo de métodos utilizados para estimar os parâmetros de compactação pode-se citar os métodos propostos por Blotz *et al.* (1998), e por Ramiah *et al.* (1970), adaptado por Livneh e Ishai (1978). O

presente trabalho pretende avaliar a aplicabilidade dos dois métodos citados na estimativa dos parâmetros de compactação e o seu uso em locais que não disponham de resultados de ensaios de compactação.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar a assertividade de dois métodos empíricos para estimar os parâmetros de compactação de solos do nordeste brasileiro.

1.1.2 Objetivos específicos

- Obter um banco de dados de solos com informações sobre a classificação granulométrica, o limite de liquidez, o peso específico seco, a umidade ótima e a energia de compactação.
- Realizar ensaios de laboratório com solos locais e verificar assertividade dos métodos propostos aos resultados experimentais.

2 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

2.1 Introdução

De acordo com Pinto (2006), os solos são dispostos pela natureza em depósitos heterogêneos, originando-se da decomposição das rochas. Essa decomposição é causada por agentes químicos e físicos, como por exemplo as variações de temperatura e a lixiviação de componentes solúveis. A ocorrência desses processos, dá início a formação dos solos, que são compostos por partículas que se diferenciam de acordo com o tamanho e a composição química e mineralógica.

A diferenciação do tamanho das partículas, pode seguir as recomendações da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) que adota os parâmetros indicados na tabela abaixo.

Tabela 1 - Parâmetros de diferenciação do tamanho das partículas ABNT.

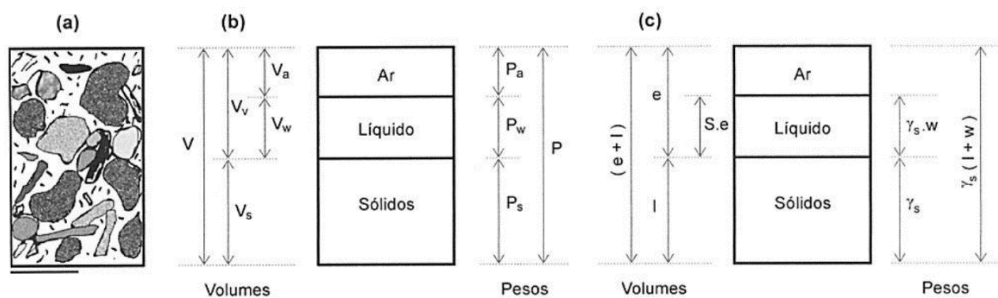
Fração	Limites definidos pela ABNT
Matacão	de 25 cm a 1 m
Pedra	de 7,6 cm a 25 cm
Pedregulho	de 4,8 mm a 7,6 mm
Areia grossa	de 2 mm a 4,8 mm
Areia média	de 0,42 mm a 2 mm
Areia fina	de 0,05 mm a 0,42 mm
Silte	de 0,005 mm a 0,05 mm
Argila	inferior a 0,005 mm

Fonte: Pinto (2006).

De acordo com as proporções das frações presentes em cada solo, podemos enquadrá-los em sistemas de classificação. Esses sistemas se baseiam nas características dos grãos, a fim de definir grupos com comportamentos semelhantes. Os dois sistemas mais empregados mundialmente são o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) e o Sistema Rodoviário de Classificação (HRB). Enquanto o primeiro sistema classifica um solo como fino havendo passagem de 50% do material pela peneira de nº 200 (0,075mm), para o HRB essa porcentagem é de 35%. A granulação fina tem ainda como parâmetro de classificação o Limite de Liquidez (LL) e o Índice de Plasticidade (IP) para ambos os sistemas. (Pinto, 2006).

Além da textura dos solos, que se refere aos tamanhos dos grãos que o compõe, outra propriedade importante que influencia o comportamento é a estrutura, que diz respeito ao arranjo das partículas sólidas. O volume de um solo é composto de partículas sólidas e espaços vazios entre os grãos, que são ocupados por água ou ar. As proporções entre esses três componentes e a forma que estão dispostos formam a estrutura ou esqueleto sólido, que influenciam no seu comportamento hidromecânico. As relações entre peso e volume são apresentadas na Figura 1, que mostram o solo como um sistema trifásico. Dentre os diversos índices que correlacionam essas três fases, pode-se citar o teor de umidade (w), o índice de vazios (e), grau de saturação (S) e o peso específico dos sólidos (γ_d).

Figura 1– Fases no solo



Fonte: Pinto (2006).

Fases no solo: (a) no estado natural; (b) separada em volume, (c) em função do volume de sólidos.

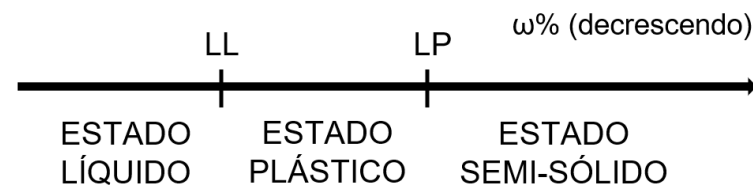
2.2 Índices de Liquidez e Plasticidade

As partículas sólidas do solo são os componentes variáveis mais determinantes para o seu comportamento. Devido a isso, a primeira tentativa em se diferenciar os solos foi feita pela determinação dos diferentes tamanhos dos grãos, através da análise granulométrica dada pelo ensaio ABNT (NBR 7181/2016). Segundo Caputo (1996), somente a granulometria do material não é suficiente para separar os solos por comportamento, e a experiência mostrou que solos com determinada porcentagem de fração fina precisam ser caracterizados também de acordo com as suas propriedades plásticas. Estas, por sua vez, dependem do teor de umidade, forma das partículas e da sua composição química e mineralógica.

As partículas finas do solo apresentam um comportamento diferenciado de acordo com o teor de umidade (que representa o peso da água pelo peso do solo

seco), como pode ser visualizado na Figura 2. A plasticidade do solo se refere a capacidade de ser moldado, sob determinado intervalo de umidade, a volume constante. Quando o solo apresenta umidades mais elevadas, ele se comporta como um fluido. Existe um teor de umidade que separa o estado líquido do estado plástico, que é denominado de limite de liquidez (LL). Além do limite de liquidez, há um limite que separa os estados plástico do estado semi-sólido, que é denominado de limite de plasticidade (LP), a partir do qual o solo tende a se desmanchar ao ser moldado. A determinação desses dois parâmetros é feita através do ensaio para a determinação do LL (ABNT NBR 6459/2016) e do LP (ABNT NBR 7180/2016).

Figura 2 – Limites de consistência.



Fonte: Caputo (1996) adaptado.

2.3 Compactação em solos

Segundo Caputo (1996), a compactação é o processo manual ou mecânico que visa reduzir o volume de vazios, expulsando o ar, tornando o solo compactado mais estável e aumentando a sua resistência. Além desses pontos, a compactação visa também melhorias no que diz respeito a permeabilidade e compressibilidade do solo, aumentando a estanqueidade e diminuindo as deformações da camada.

A compactação é realizada em diversas obras de engenharia, como aterros e camadas construtivas de pavimento. Nessas obras, o solo é transportado e depositado, deixando-o num estado fofo, com baixa resistência e elevada deformabilidade, sendo posteriormente densificado com a aplicação de um esforço mecânico, que acarreta a melhora nas suas propriedades geotécnicas.

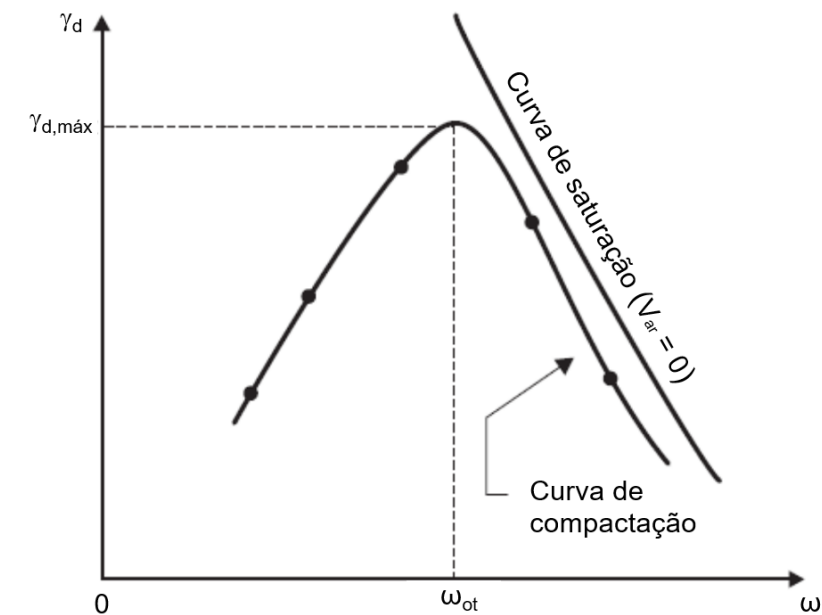
“O início da técnica de compactação foi creditado ao engenheiro norte-americano Proctor que, em 1933, publicou suas observações sobre a compactação de aterros, mostrando que, ao aplicar-se uma certa energia de compactação, a massa específica resultante é função da umidade em que o solo estiver.” Pinto (2006). Quando se realiza a compactação a baixa umidade, o atrito entre as partículas é muito elevado, fazendo que a acomodação entre elas não seja significativa. A água é

responsável por facilitar a adequação das partículas entre si, tendo um efeito lubrificante. Desta forma, quando a umidade aumenta, o deslizamento entre partículas é facilitado, fazendo com que a mesma quantidade de massa ocupe um menor volume, ou seja, aumente o peso específico.

Pode-se pensar que adição de água vai ser sempre positiva ao processo de compactação, entretanto, ao se ultrapassar determinada umidade, o peso específico tende a diminuir. Esse processo se dá, pois, quando a umidade é baixa, o ar se apresenta no solo em forma de canalículos intercomunicados. À medida em que se adiciona água ao solo, o seu grau de saturação aumenta, e após a umidade ótima (ω_{ot}), se torna muito elevado. Nesta condição, a água cerca as moléculas de ar, deixando-as oclusas, ou seja, dificultando sua expulsão do solo.

Existe um teor de umidade, onde o peso específico de um solo é máximo, para uma dada energia de compactação, sendo denominado de umidade ótima. A obtenção da umidade ótima e peso específico seco máximo ($\gamma_{d,m\acute{a}x}$) de um solo é obtido através do ensaio de compactação, padronizado no Brasil pela ABNT (NBR 7182/2016). A variação do peso específico com a umidade inicial de compactação, para uma dada energia de compactação, é representada pela curva de compactação do solo (Gráfico 1).

Gráfico 1 – Modelo de curva de compactação e saturação.

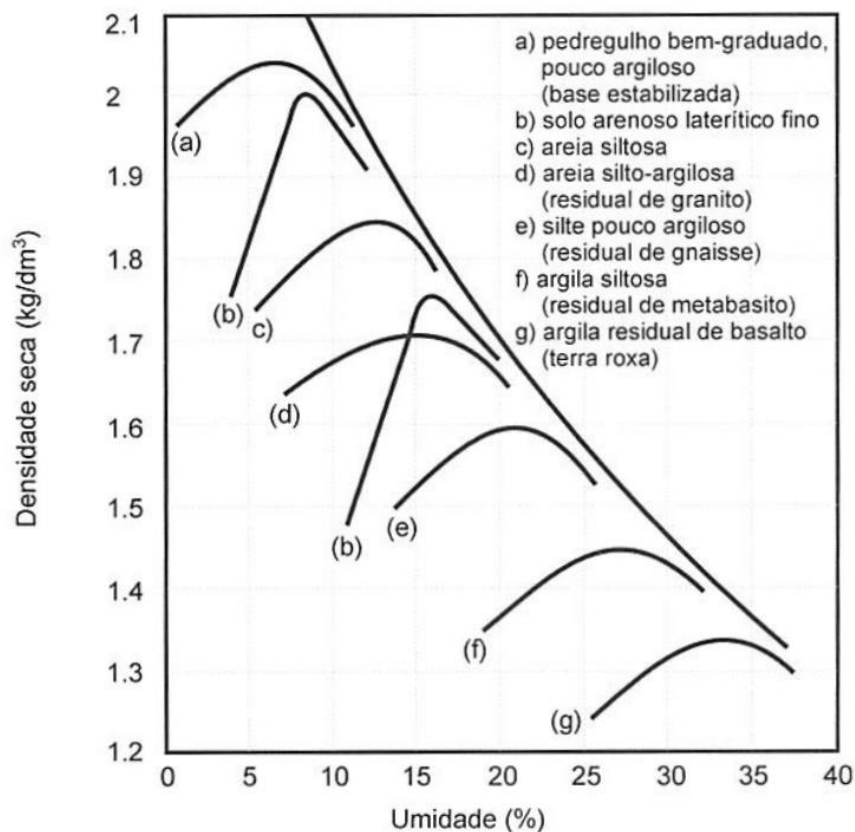


Fonte: Caputo (1996)

No ensaio de compactação, cinco a seis corpos de prova são compactados dentro de um molde de volume conhecido para obtenção dos pontos de umidade e peso específico, representados no Gráfico 1. Quanto ao comportamento do solo, é possível visualizar o aumento da umidade relacionado diretamente ao aumento do peso específico num primeiro momento (ramo ascendente). Porém, após se atingir a umidade ótima (ω_{ot}), o $\gamma_{d,máx}$ só tende a diminuir (ramo descendente). Pode-se notar também que a curva de compactação não alcança a de saturação ($V_{ar} = 0$), mostrando que não se consegue expulsar o ar do solo, quando esse for compactado com uma umidade superior à umidade ótima.

De acordo com Caputo (1996), apesar de existirem diferenças entre as curvas para cada tipo de solo, elas ainda têm semelhanças quanto a forma, como se pode conferir no Gráfico 2. Solos com pequenos diâmetros de grãos (argilosos) tendem a apresentar umidade ótima elevada e peso específico seco baixo. O contrário ocorre com os solos com diâmetros de grãos maiores (arenosos), estes apresentando baixa umidade ótima e peso específico seco elevado.

Gráfico 2 – Curvas de compactação para diferentes tipos de solo.

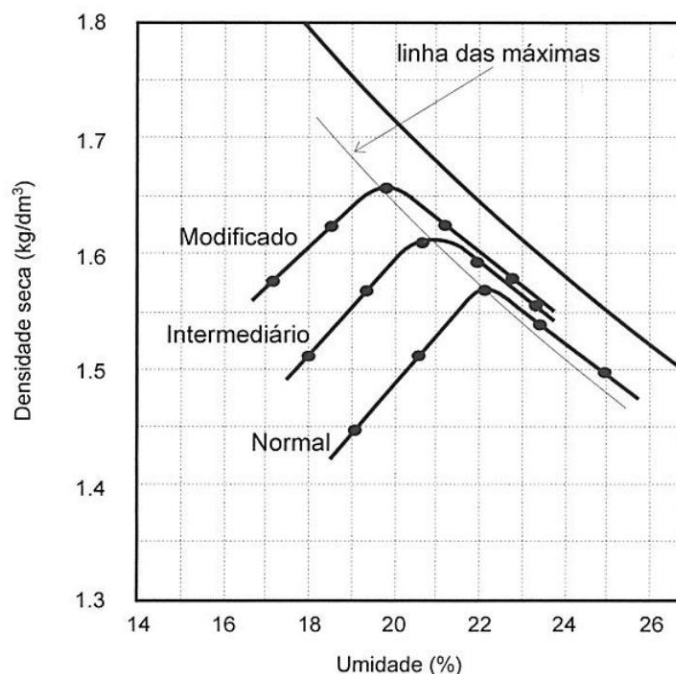


2.3.1 Energia de Compactação

Segundo Pinto (2006), os parâmetros umidade ótima (ω_{ot}) e peso específico seco máximo ($\gamma_{d,m\acute{a}x}$) não são índices físicos do solo. Na verdade, aqueles são fatores dependentes da energia de compactação aplicada no ensaio. A NBR 7182/2016 regulamenta três possíveis energias para o ensaio de compactação, que são: normal, intermediária e modificada.

Ao submeter um determinado solo a três ensaios de compactação, com diferentes energias (Proctor normal, intermediária e modificada), os resultados para umidade ótima (ω_{ot}) e peso específico seco máximo ($\gamma_{d,m\acute{a}x}$) serão diferentes. De acordo com Caputo (1996), a energia de compactação aplicada é diretamente proporcional ao $\gamma_{d,m\acute{a}x}$ e inversamente a ω_{ot} . Ou seja, para uma maior energia de compactação, maior serão os valores de peso específico seco máximo e menores serão as umidades ótimas, como se verifica no Gráfico 3.

Gráfico 3 – Curvas de compactação de um solo para diferentes energias.



Fonte: Pinto (2006).

A escolha do tipo de energia varia de acordo com o a finalidade do uso do solo. Para equipamentos mais pesados de campo, como os de compactação de aterro

e de camadas importantes de pavimento, faz-se o uso de energias mais elevadas em laboratório (Proctor intermediário ou modificado).

Para que se obtenha energias determinadas de forma padronizada, a NBR 7182/2016 descreve os procedimentos e equipamentos necessários com dimensões e pesos especificados. A Tabela 2 mostra as diferentes formas de se obter as energias de compactação padronizadas fazendo o uso variado dos equipamentos regulamentados.

Tabela 2 - Especificações para energias de compactação.

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

Fonte: ABNT NBR 7182/2016 adaptado.

A energia de compactação (E), dada em kg.cm/cm³, dos ensaios é definida pela expressão abaixo:

$$E = \frac{M.h.N_c.N_g}{V} \quad (1)$$

Onde, M é a massa do soquete em kg, h é a altura de queda do soquete em cm, N_c e N_g são o número de camadas e de golpes por camada, e V o volume do cilindro em cm³.

2.3.2 Compactação de Campo e controle de compactação

O processo de compactação em campo tem início com a escolha da área de empréstimo. Pinto (2006) afirma que essa etapa é um problema técnico-econômico, pois além de se levar em consideração a distância de transporte, deve-se também ponderar as características geotécnicas do material. Além disso, a umidade natural do solo é um fator que faz bastante diferença financeira no projeto, tendo em

vista que quanto mais próxima da umidade ótima de compactação, menos oneroso será o acerto da umidade.

Após essa etapa, são feitos o transporte e o espalhamento uniforme do material em camadas. A compactação no campo é feita com o uso de rolos compressores, vibradores, pilões e carros pipa com barra de distribuição para irrigação. Segundo Caputo (1996), as camadas de solo variam entre 10 e 30cm de espessura, enquanto Pinto (2006) diz que elas devem ter de 15 a 20 cm. O número de passadas do equipamento compressor se altera de acordo com os resultados obtidos num trecho experimental previamente selecionado, sendo constatado que após aproximadamente 10 passadas, a compactação se torna praticamente inútil. (1996).

A umidade é acertada com o uso da irrigação e aeração do solo, seguida de revolvimento mecânico para homogeneizá-lo. Para se controlar a umidade, a quantidade de água a ser adicionada ao solo é previamente calculada e posteriormente adicionada ao solo pela descarga da barra de uma distribuição acoplada a um carro pipa. Entretanto, não são somente esses parâmetros utilizados para controlar a compactação em campo. É necessária a determinação da umidade em campo, para verificar se está de acordo com a umidade ótima, com o uso do equipamento “speedy” (DNER-ME 052/64), ou utilizando um fogareiro com frigideira para secar o solo. A determinação do peso específico aparente do solo em campo, é obtido pelo método “frasco de areia” (NBR 7185/2016).

Com esses dados (campo e laboratório), pode-se calcular, com base na equação abaixo, o grau de compactação (G_c) aparente de campo.

$$G_c = \frac{\gamma_s(\text{campo})}{\gamma_{d,\text{máx}}(\text{laboratório})} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

G_c = grau de compactação [%];

γ_s = peso específico seco obtido em campo (frasco de areia);

$\gamma_{d,\text{máx}}$ = peso específico seco máximo.

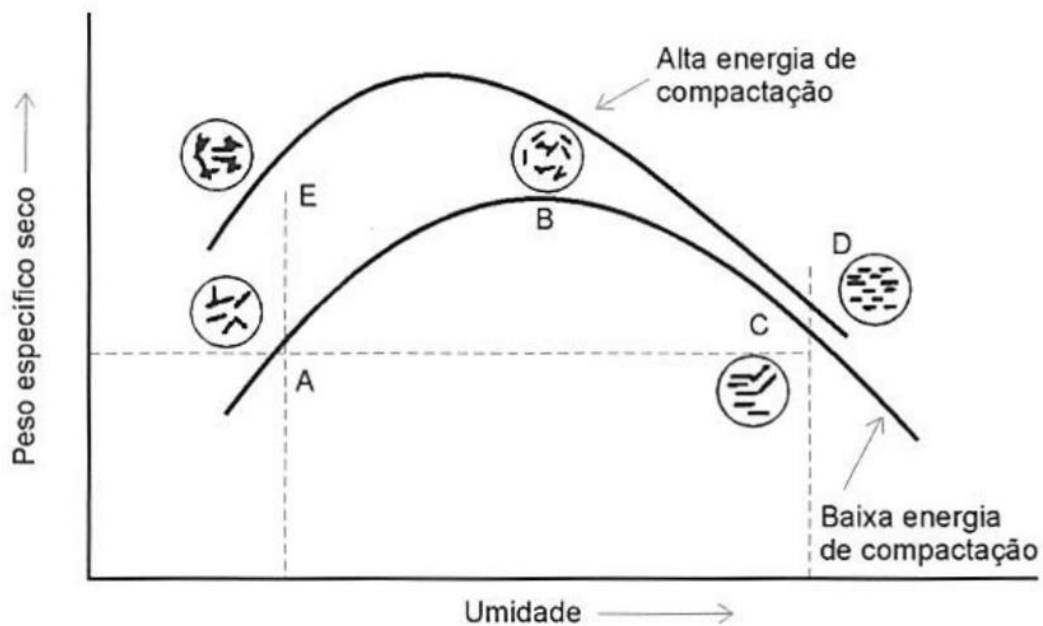
2.3.3 Estrutura de Solos Compactados

Assim como o peso específico seco e a umidade ótima, a estrutura de um solo compactado também depende da energia aplicada. Além disso, a quantidade de água presente no solo é outro fator determinante para a disposição das partículas.

De acordo com Pinto (2006), com baixa umidade a atração face-aresta das partículas não consegue ser vencida pela energia aplicada e o solo fica com uma estrutura chamada estrutura floculada. Já para maiores umidades, ocorre repulsão entre as partículas e a compactação orienta o seu posicionamento de forma paralela, ocorrendo a chamada estrutura dispersa.

Pode-se observar também no Gráfico 4, que para uma mesma umidade, a energia de compactação maior gera maior dispersão.

Gráfico 4 – Estrutura de solos compactados.



Fonte: Pinto (2006).

É importante ressaltar que em aterros reais o solo não é completamente destorroado antes de ser compactado, sendo assim as aglomerações naturais permanecem, fazendo com que o solo possua uma macro e uma microestrutura que se diferem.

2.4 Equações para estimar parâmetros de compactação em solos

O controle de compactação feito em campo é um fator determinante para garantir a qualidade da camada compactada a ser executada em campo. Como visto anteriormente, para realizar o controle de compactação deve-se obter os parâmetros de compactação em laboratório e em campo. Segundo Ramiah *et al.* (1970), Woods (1940) foi o primeiro investigador a correlacionar as características de plasticidade do solo com a compactação, após isso, alguns autores desenvolveram métodos para estimar esses parâmetros ($\gamma_{d,m\acute{a}x}$ e ω_{ot}), sem a realização do ensaio de compactação. A seguir, serão apresentadas duas dessas metodologias, a primeira desenvolvida por Blotz *et al.* (1998) e a segunda por Ramiah *et al.* (1970), e adaptada por Livneh e Ishai (1978).

2.4.1 Blotz *et al.* (1998)

De acordo com o estudo desenvolvido por Blotz *et al.* (1998), a partir de informações do solo como o limite de liquidez (LL) e a energia de compactação (E), pode-se estimar os parâmetros de compactação ($\gamma_{d,m\acute{a}x}$ e ω_{ot}) pelas equações a seguir:

$$\gamma_{d,m\acute{a}x} = (2,27 \log LL - 0,94) \log E - 0,16LL + 17,02 \quad (3)$$

e

$$\omega_{ot} = (12,39 - 12,21 \log LL) \log E + 0,67LL + 9,21 \quad (4)$$

Onde, E é a energia de compactação em kJ/m^3 , $\gamma_{d,m\acute{a}x}$, o peso específico seco máximo em kg/m^3 e ω_{ot} , a umidade ótima em porcentagem.

Para o desenvolvimento desse método, foram analisadas curvas de compactação e propriedades índice para 22 solos argilosos, cada um deles contendo pelo menos 3 curvas de compactação com diferentes energias.

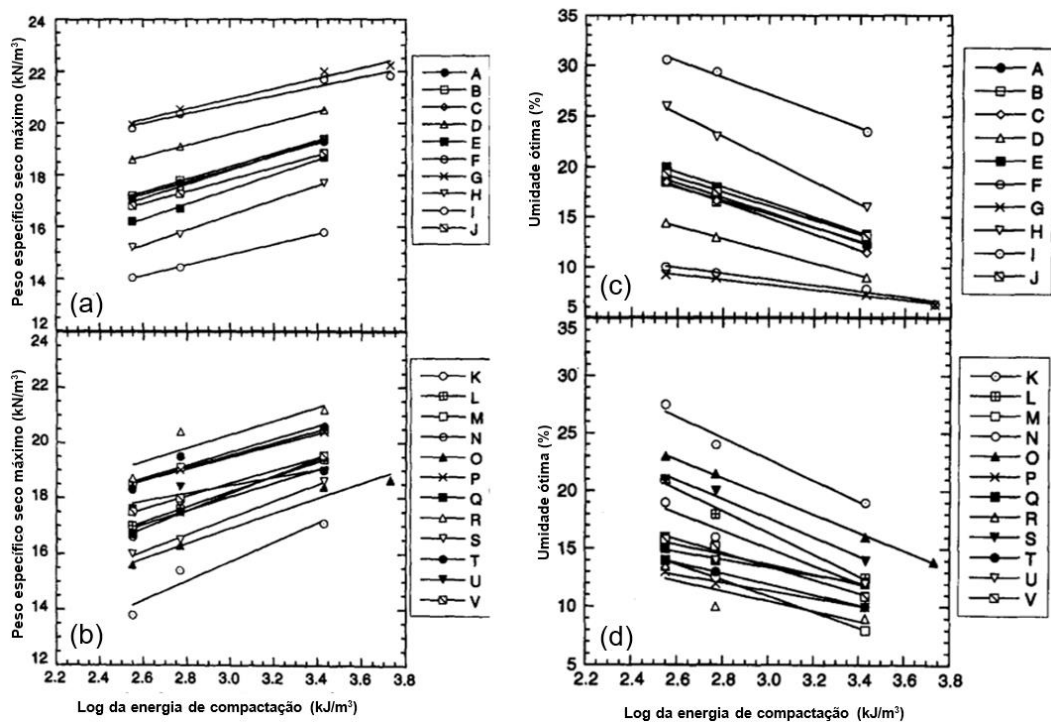
Os autores encontraram relações quase lineares entre o $\gamma_{d,m\acute{a}x}$ e o $\log E$, e entre a ω_{ot} e o $\log E$. Os ajustes foram feitos usando a regressão de mínimos quadrados e as relações estão representadas graficamente no Gráfico 5.

A partir dos coeficientes das equações encontradas, os autores investigaram se havia correlação entre aqueles e as propriedades índices. O limite de

liquidez obteve a correlação mais forte dentre as propriedades, sendo usado nas análises posteriores, onde obteve-se equações que relacionam esses parâmetros.

Para a aplicação desse método, fez-se a combinação entre algumas equações, obtendo como resultado a Equação 3 e a Equação 4. Em seguida as energias foram relacionadas aos parâmetros de compactação, como ilustrado no Gráfico 5, onde cada solo utilizado está representado por uma reta, identificado com uma letra maiúscula na legenda.

Gráfico 5 – Relação dos parâmetros de compactação com a energia.



Fonte: Blotz *et al.* (1998) adaptado.

Relação dos parâmetros de compactação com a energia: (a) e (b) Peso específico seco máximo *versus* Logaritmo da energia de compactação; (c) e (d) Umidade ótima *versus* Logaritmo da energia de compactação.

A validação do método foi dividida em duas etapas (validação A e B). Na primeira foram usados os solos tabelados para o desenvolvimento do método. Já na segunda, os dados para teste foram de cinco solos adicionais.

Blotz *et al.* (1998) concluiu que essa metodologia é apropriada para fazer estimativas dos parâmetros e verificar a coerência de um ponto ótimo. Além disso, esse processo é aplicável para as energias Proctor Normal, Intermediária e Modificada, sendo recomendável para argilas com LL entre 17 e 70.

2.4.2 Ramiah et al. (1970)

O trabalho de autoria de Livneh e Ishai (1978), apresenta equações para estimar os parâmetros de compactação que dependem do tipo de solo, com protagonismo do seu potencial de sucção, que é a diferença entre a energia da água do solo e a energia da água livre sob mesmas condições de temperatura, pressão e altitude. Esse potencial é diretamente proporcional ao aumento do limite plástico do material. As equações apresentadas foram desenvolvidas por Ramiah, Viswanath, Krishnamurthy e Purushothamaraj em 1970, onde os parâmetros de compactação dependem somente do Limite de Liquidez (LL). Elas são usadas como referência no trabalho apresentado por Livneh e Ishai (1978).

$$\gamma_{d,máx} = 2125 - 10LL \quad (5)$$

e

$$\omega_{ot} = \frac{LL+15}{3} \quad (6)$$

Onde:

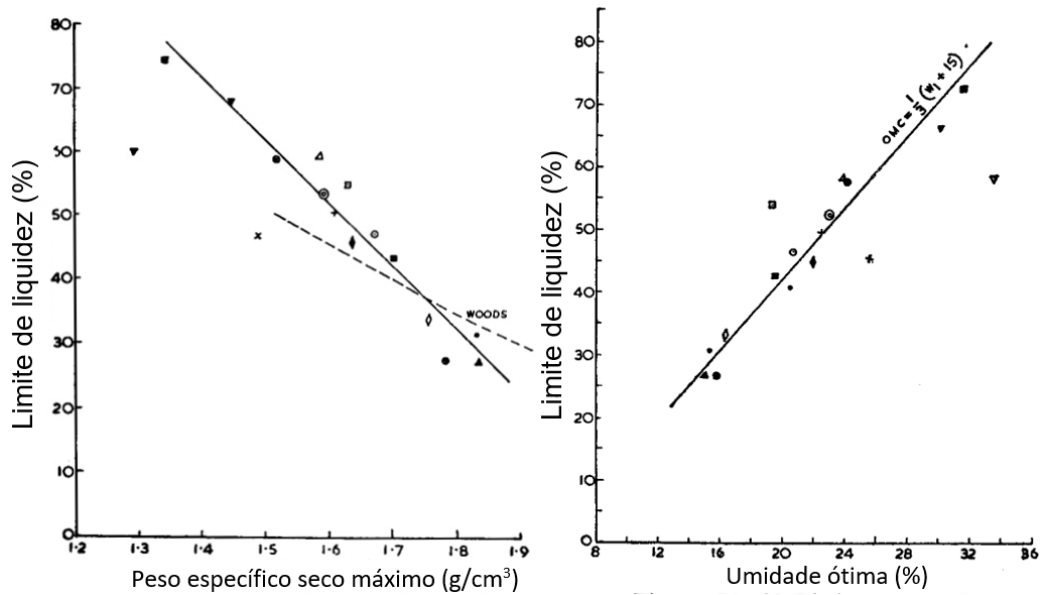
LL = Limite de Liquidez [%]

$\gamma_{d,máx}$ = Peso Específico Seco Máximo [kg/m^3]

ω_{ot} = Umidade Ótima [%]

O limite de liquidez foi utilizado como única variável neste método devido a melhor correlação obtida com os dados experimentais. Os autores tentaram correlacionar o índice de plasticidade (IP), limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP) com os parâmetros de compactação: umidade ótima e peso específico seco máximo. Os resultados estão expressos graficamente nos gráficos 6 e 7.

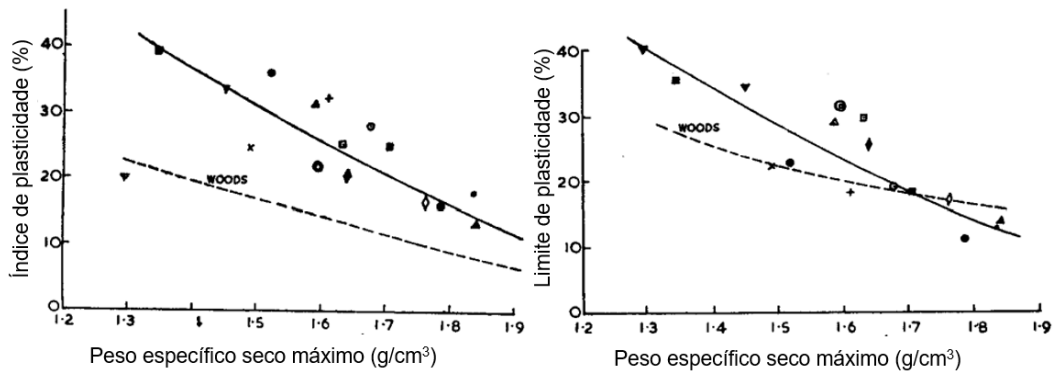
Gráfico 6 – Relação dos parâmetros de compactação com o limite de liquidez.



Fonte: Ramiah *et al.* (1970) adaptado.

Enquanto o LL e o $\gamma_{d,máx}$, e LL e ω_{ot} têm uma relação linear (Gráfico 6), observou-se que IP, LP e as variáveis da compactação não obtiveram correlação bem definida (Gráfico 7), segundo Ramiah *et al.* (1970).

Gráfico 7 - Relação do índice de plasticidade e limite de plasticidade com o peso específico seco máximo.



Fonte: Ramiah *et al.* (1970) adaptado.

O estudo em questão foi realizado pelo departamento de engenharia civil da Faculdade de Engenharia da Universidade Visvesvaraya e publicado na Segunda Conferência do Sudeste Asiático sobre Engenharia do Solo. Para realização dos testes, foram utilizados 16 solos de granulometria fina, com plasticidade de média a

alta, coletados no entorno de Bangalore e Nanjangud, na Índia, com LL entre 20% e 80%, como está representado no Gráfico 6.

3 METODOLOGIA

A metodologia utilizada na pesquisa consistiu na coleta de dados de diferentes solos do nordeste brasileiro e aplicação dos métodos teóricos de Blotz *et al.* (1998) e Ramiah *et al.* (1970) para a estimativa dos parâmetros de compactação, que foram comparados com resultados experimentais dos ensaios de compactação dos mesmos solos. As análises consideraram todo o conjunto de dados, sendo avaliado por método de previsão, o tipo de solo e a energia de compactação.

Para o uso das metodologias de estimativa dos parâmetros de compactação avaliadas nesse trabalho, dados específicos foram coletados, são eles: classificação do solo (SUCS), limite de liquidez diferente de zero, umidade ótima, peso específico seco máximo e energia de compactação.

3.1 Coleta de dados

Realizou-se uma revisão bibliográfica em dissertações e teses das universidades federais do Nordeste: Universidade Federal do Maranhão (UFMA), Universidade Federal do Piauí (UFPI), Universidade Federal do Ceará (UFC), Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Universidade Federal De Sergipe (UFS), Universidade Federal da Bahia (UFBA). Dentre estas, somente UFC, UFRN, UFPE, e UFBA disponibilizavam trabalhos que apresentavam as informações necessárias para aplicação nessa pesquisa.

Um conjunto com 80 dados foi utilizado (Apêndice A), sendo compostos por solos arenosos e argilosos (conforme o SUCS), compactados sob diferentes energias (Proctor Normal e Modificada), com limite de liquidez diferente de zero.

3.2 Dados teóricos x Dados experimentais

A obtenção dos valores numéricos dos parâmetros de compactação foi feita a partir da aplicação das equações dos métodos de previsão, utilizando os dados de LL e energia de compactação.

Para análise dos resultados teóricos, foram avaliados o conjunto de dados totais (80 pontos), plotados em gráficos lineares, que relacionam os dados experimentais com os resultados teóricos, como descritos na Tabela 3.

Tabela 3– Ilustrativo de Gráficos Gerais.

		Dados Teóricos			
		Blotz et al.		Ramiah et al.	
		ω_{ot}	$\gamma_{dm\acute{a}x}$	ω_{ot}	$\gamma_{dm\acute{a}x}$
Dados Experimentais	ω_{ot}	X		X	
	$\gamma_{dm\acute{a}x}$		X		X
					Total de Gráficos: 4

Fonte: elaborada pelo autor.

As informações foram analisadas separadamente por tipo de solo (finos e granulares, de acordo com o SUCS) e por energia de compactação (Proctor normal e modificado). Os gráficos que demonstram esses resultados foram citados na Tabela 4.

Tabela 4 – Ilustrativo de Gráficos Específicos.

		Dados Experimentais							
		Solos Finos		Solos Granulares		Proctor Normal		Proctor Modificado	
		ω_{ot}	$\gamma_{dm\acute{a}x}$	ω_{ot}	$\gamma_{dm\acute{a}x}$	ω_{ot}	$\gamma_{dm\acute{a}x}$	ω_{ot}	$\gamma_{dm\acute{a}x}$
Dados Teóricos	Blotz et al.	ω_{ot}	X		X		X		X
		$\gamma_{dm\acute{a}x}$		X		X		X	
	Ramiah et al.	ω_{ot}	X		X		X		X
		$\gamma_{dm\acute{a}x}$		X		X		X	
									Total de Gráficos: 16

Fonte: elaborada pelo autor.

3.3 Ensaio de laboratório

Para os ensaios de laboratório foram utilizadas duas amostras de solo do Laboratório de mecânica dos solos e pavimentação da UFC a fim de incrementar a pesquisa com dados autorais. O Solo A e o Solo B, como serão denominadas ao longo do trabalho, foram submetidos a ensaios de compactação e de limite de liquidez, de modo a se obter os dados necessários para aplicação às metodologias de estimativa de dados de compactação.

3.3.1 Ensaio do Limite de Liquidez

Conforme definição de Atterberg, o limite de liquidez é a fronteira entre o estado plástico e o estado líquido do solo. O teor de umidade no qual o solo perde as características plásticas e passa a ter características de um fluido viscoso.

Para obtenção do LL em laboratório, realizou-se o ensaio de determinação do limite de liquidez para o Solo A e o Solo B, conforme ABNT 6459/2016. Este consiste, em determinar a umidade do solo em que são necessários 25 golpes no aparelho Casagrande (Figura 3) para fechar 1cm do sulco aberto no solo.

Figura 3 - Aparelho Casagrande elétrico com contador.



Fonte: Autor.

Para a realização deste ensaio, foi utilizado o material passante na peneira de 0,42mm, conforme a ABNT NBR 6457/2016, ilustrado na Figura 4.

Figura 4 - Amostra de Solo B retido e passante na peneira Nº 40.



Fonte: Autor

Cerca de 100g do material passante na peneira nº40, foi utilizado no ensaio e transferido para uma capsula de porcelana, onde água destilada foi gradualmente acrescentada, a fim de se obter uma pasta homogênea (Figura 5).

Figura 5 – Capsula com Solo B homogeneizado.



Fonte: Autor.

Em seguida, uma parte dessa mistura foi transferida para o Aparelho Casagrande, de forma a ocupar cerca de 2/3 da concha com o menor número de passadas de espátula possíveis, a fim de evitar a formação de bolhas (Figura 6). A pasta de solo teve espessura por volta de 10mm, que pôde ser conferida com o uso do gabarito.

Figura 6 - Aparelho Casagrande com massa de solo e água.



Fonte: Autor.

Com o cinzel foi feito um corte vertical na mistura, formando uma ranhura no centro, de forma a dividir a massa de solo em duas partes (Figura 7). O aparelho de Casagrande foi ligado de modo que a concha golpeasse a base com velocidade de duas voltas por segundo. Quando as bordas inferiores da ranhura se uniram em 1cm (Figura 7), o aparelho foi desligado, e o número de golpes necessários para fechar a ranhura anotado. Uma pequena quantidade do material das bordas que se uniram foi transferido para uma capsula para determinação da umidade. O processo foi repetido a fim de se obter ao mínimo quatro pontos de ensaio, entre 35 e 15 golpes.

Figura 7 – Aparelho Casagrande com ranhura aberta e fechada.



Fonte: Autor.

3.3.2 Ensaio de Compactação

Os ensaios de compactação foram realizados para determinar o peso específico seco máximo e a umidade ótima do Solo A e do Solo B para energia Proctor Normal e Modificada. Por meio dos resultados obtidos dos ensaios foi possível a elaboração das curvas de compactação e a comparação entre valores dos parâmetros experimentais e teóricos. Os últimos sendo obtidos após aplicação nos métodos de Blotz *et al.* (1998) e Ramiah *et al.* (1970).

As amostras de solo foram preparadas de acordo com a ABNT NBR 6457/2016. Foram realizados quatro ensaios de compactação no total, conforme a ABNT NBR 7182/2016, de modo que cada tipo de solo (Solo A e Solo B) foram

submetidos a duas diferentes energias de compactação (Proctor Normal e Modificado). Todos os ensaios foram realizados com reuso de material.

Para início dos procedimentos, a amostra foi colocada em uma bandeja metálica, onde foi acrescida de água de forma gradativa e revolvida continuamente (Figura 8).

Figura 8 – Amostra Solo A umidificada e revolvida.



Fonte: Autor.

Após homogeneizado, o material foi colocado no cilindro e compactado, como ilustrado na Figura 9. O número de camadas e de golpes utilizados para obtenção da energia desejada, seguiu as especificações da Tabela 2.

Figura 9 - Compactação do Solo A no cilindro pequeno.



Fonte: Autor.

É importante salientar que para a realização desses ensaios foram utilizados o soquete pequeno e o grande, e o cilindro pequeno (Figura 10).

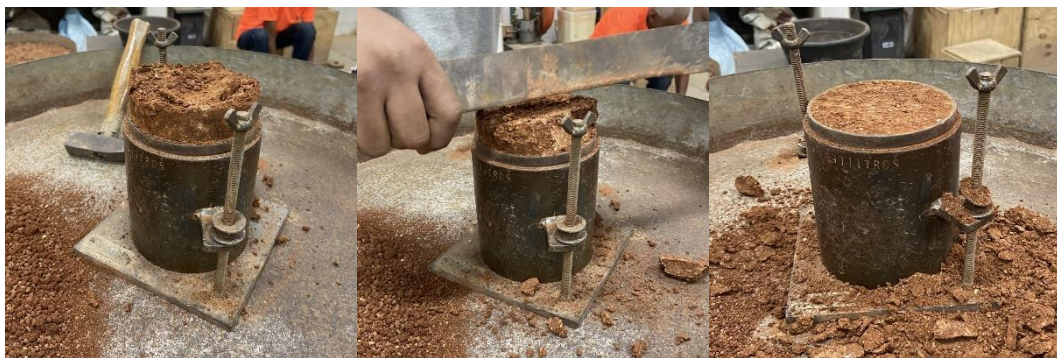
Figura 10 – Soquete pequeno, soquete grande e cilindro pequeno.



Fonte: Autor.

Finalizados os golpes da última camada, o colarinho foi retirado do cilindro e o solo excedente removido com o auxílio da régua biselada de forma que o material e o cilindro ficassem nivelados, como representado em sequência na Figura 11.

Figura 11 – Solo A rasado ao cilindro de compactação.



Fonte: Autor.

Removido da base, o conjunto cilindro-solo foi pesado. Com o auxílio do extrator o corpo de prova foi extraído do cilindro, e tomou-se uma amostra do seu centro para determinação da umidade. Em seguida, o corpo de prova foi destorroado e umidificado para repetição do processo a fim de se obter cinco pontos.

Na Figura 12 estão as amostras recolhidas para a determinação da umidade gravimétrica durante os ensaios de compactação na energia de Proctor normal e modificado do Solo B.

Figura 12 – Amostras do Solo B do ensaio de compactação.



Fonte: Autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

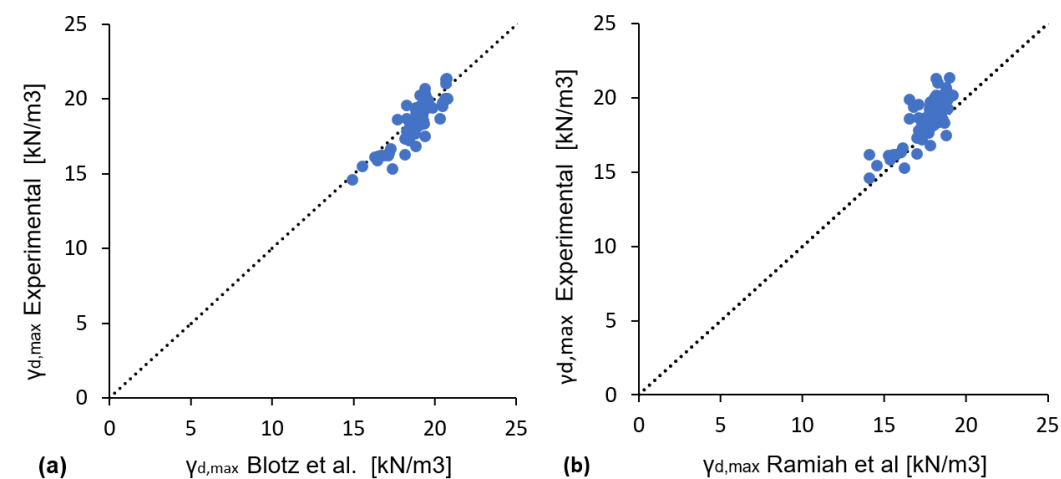
Neste capítulo estão presentes os resultados das análises comparativas entre os dados experimentais dos parâmetros de compactação, obtidos em revisão bibliográfica, e os dados teóricos resultantes da aplicação de equações dos métodos desenvolvidos por Blotz *et al.* (1998) e Ramiah *et al.* (1970).

Serão apresentados também os resultados dos ensaios de limite de liquidez e compactação realizados no laboratório da UFC para o Solo A e o Solo B. Em sequência, os resultados da comparação entre dados teóricos e experimentais de compactação para ambos os solos.

4.1 Dados experimentais x Dados teóricos

Os dados foram plotados em gráficos de maneira a observar a linearidade entre eles. Os gráficos gerais foram descritos na Tabela 3, neles estão presentes os 80 conjuntos de dados coletados nas universidades federais do nordeste: UFC, UFRN, UFPE e UFBA.

Gráfico 8 – Relação entre o $\gamma_{d,max}$ experimental e teórico.



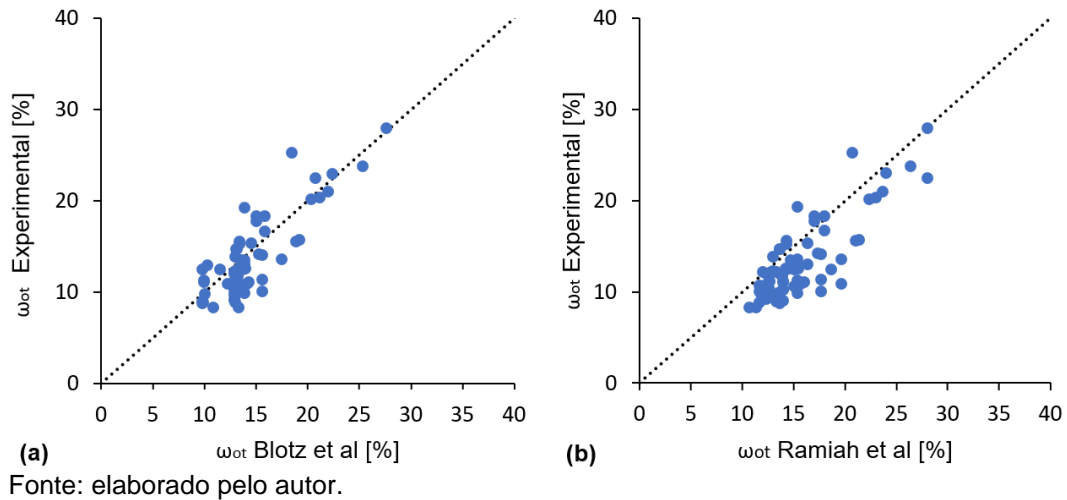
Fonte: elaborado pelo autor.

No Gráfico 8 estão apresentados os dados referentes ao peso específico seco máximo experimental e teórico, juntamente a uma reta linear que representa a igualdade entre valor proposto e encontrado. Pode-se observar que a metodologia proposta por Blotz *et al.* (1998) é pouco mais assertiva que a proposta por Ramiah *et*

al. (1970), cujos valores teóricos subestimam o peso específico seco máximo encontrado em laboratório.

A umidade ótima experimental e teórica foram comparadas no Gráfico 9, no qual nota-se que ambos os métodos, na maioria dos casos, tendem a superestimar os valores para esse parâmetro em questão, já que os pontos dos dados se encontram em sua maioria na parte inferior da reta linear. Ainda é possível observar que o método de Blotz *et al.*(1998) gera resultados com maior aproximação dos valores experimentais em relação ao método de Ramiah *et al.* (1970).

Gráfico 9 – Relação entre o ω_{ot} experimental e teórico.



De maneira geral, pode-se notar que o método de Blotz *et al.* (1998) é mais assertivo para estimar os parâmetros de compactação, do que o método proposto do por Ramiah *et al.* (1970).

Tabela 5 – Média dos Erros Absolutos.

Média dos Erros Absolutos		
	Blotz <i>et al.</i>	Ramiah <i>et al.</i>
$\gamma_{d,m\acute{a}x}$ [kN/m ³]	0,667	1,053
ω_{ot} [%]	2,111	2,856
Erro mínimo = 0 ; valor experimental = valor teórico.		
Desvio máximo da umidade ótima = 8,767%		

Fonte: elaborada pelo autor.

A fim de evidenciar essa inferência, o erro absoluto foi calculado para todos os pontos, onde o erro é a diferença entre o valor experimental e o valor teórico em módulo, ou seja, o quanto o valor teórico se distancia do resultado obtido em

laboratório. Dessa forma, a média dos erros absolutos mostra o erro médio de cada método em questão. Para os parâmetros observados, eles estão presentes na Tabela 5.

Com o objetivo de observar a existência de variáveis que fossem determinantes para a assertividade dos métodos, os dados foram setorizados quanto a granulometria do solo, depois quanto a energia de compactação do ensaio.

4.1.1 Quanto a granulometria

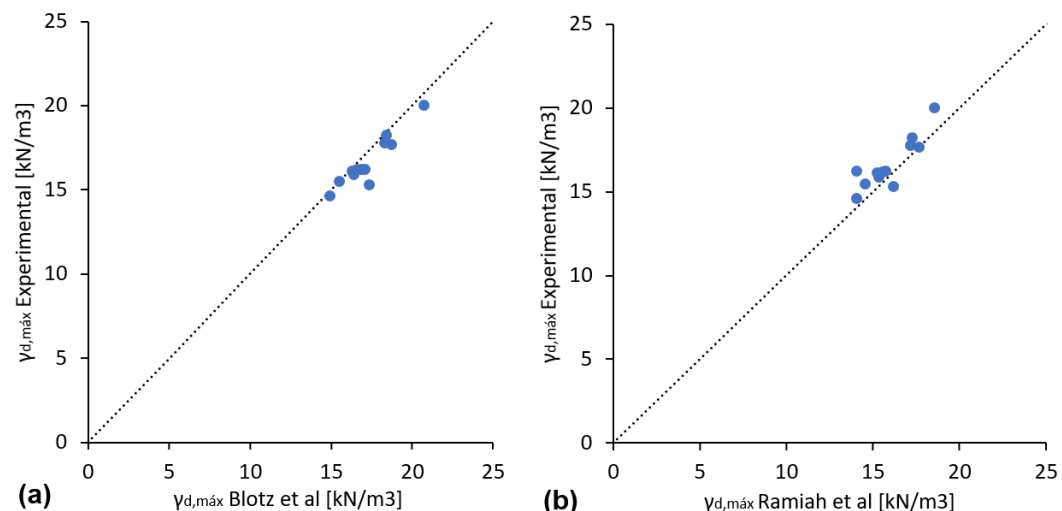
No que diz respeito a granulometria, os solos foram divididos em finos e granulares, conforme o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS).

4.1.1.1 Resultados peso específico seco máximo

O Gráfico 10 mostra o peso específico seco máximo dos solos finos e o Gráfico 11 o dos solos granulares sob os dois métodos teóricos.

Apesar de haver um menor número de dados (12) para os solos finos, é perceptível a aproximação dos pontos da reta linear. Observando o Gráfico 10 a e b, é possível notar, que embora sutil, existe um ajuste mais adequado entre os dados resultantes do método de Blotz *et al.* (1998) ao valor experimental, do que os dados obtidos pelo método de Ramiah *et al.* (1970) para solos finos.

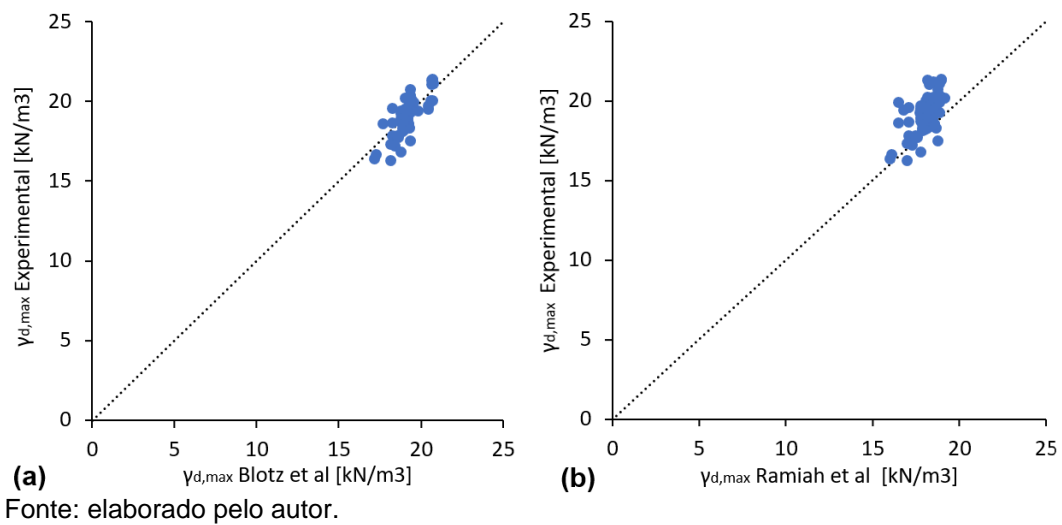
Gráfico 10 – Relação entre o $\gamma_{d,m\acute{a}x}$ experimental e teórico dos solos finos.



Fonte: elaborado pelo autor.

Em se tratando dos solos granulares, foram usados 68 conjuntos de dados para análise, e os resultados comparativos entre os dois métodos para estimar o parâmetro de compactação peso específico seco máximo foram demonstrados nos itens a e b do Gráfico 11, sobre os quais é possível inferir que o método proposto por Ramiah *et al.* (1970) tende a subestimar valores de $\gamma_{d,máx}$ para os solos granulares, enquanto o de Blotz *et al.* (1998) é mais coerente com os dados experimentais.

Gráfico 11 – Relação entre o $\gamma_{d,máx}$ experimental e teórico dos solos granulares.



De acordo com os dados da Tabela 6, é possível constatar a pequena diferença entre os erros dos métodos em se tratando do $\gamma_{d,máx}$ para solos finos. Enquanto para solos granulares essa variação é um pouco maior. Observando cada método de maneira individual, nota-se que a diferença entre os tipos de solo é pouco representada na média dos erros médios absolutos.

Tabela 6 – Média dos erros absolutos do $\gamma_{d,máx}$ para solos finos e granulares.

$\gamma_{d,máx}$ - Média dos erros absolutos		
	Blotz <i>et al.</i>	Ramiah <i>et al.</i>
Finos	0,675	0,821
Granulares	0,666	1,094

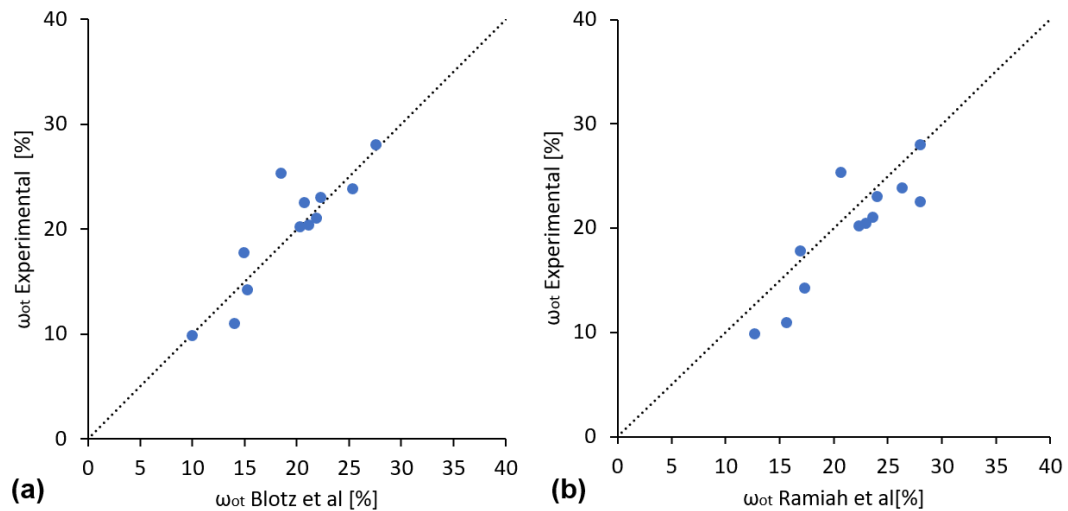
Erro mínimo = 0 ; valor experimental = valor teórico

Fonte: elaborada pelo autor.

4.1.1.2 Resultados umidade ótima

Considerando agora a umidade ótima, o Gráfico 12 mostra os produtos das aplicações dos métodos de previsão desse parâmetro de compactação para solos finos, e o Gráfico 13 para os solos granulares.

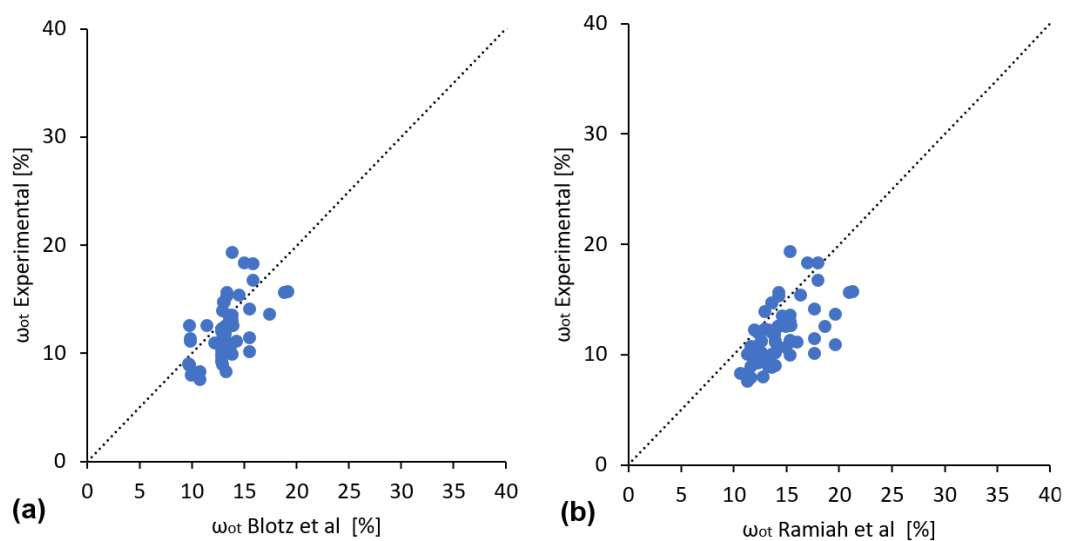
Gráfico 12 - Relação entre a ω_{ot} experimental e teórica dos solos finos.



Fonte: elaborado pelo autor.

Nos solos finos, embora tenha tido uma melhor previsão pelo método de Blotz *et al.* (1998), ambas as metodologias apresentam elevada dispersão, como se pode observar no Gráfico 12 a e b.

Gráfico 13 - Relação entre a ω_{ot} experimental e teórica dos solos granulares.



Fonte: elaborado pelo autor.

O mesmo pode ser afirmado para os solos granulares, onde apesar de a metodologia de Blotz *et al.* (1998) mostrar-se mais assertiva, ambos os métodos apresentam grande diferença entre os valores experimentais e teóricos, e em geral tenderam a superestimar o valor da umidade ótima. (Gráfico 13).

Tabela 7 – Média dos erros absolutos da ω_{ot} para solos finos e granulares.

ω_{ot} - Média dos erros absolutos		
	Blotz <i>et al.</i>	Ramiah <i>et al.</i>
Finos	1,682	2,718
Granulares	2,186	2,880
Erro mínimo = 0 ; valor experimental = valor teórico		
Desvio máximo da umidade ótima = 8,767%		

Fonte: elaborada pelo autor.

A média dos erros absolutos para os dois tipos de solo (Tabela 7) embasa as inferências anteriores, devido aos seus valores elevados, o que evidencia a dispersão das proposições empíricas para o parâmetro de umidade ótima. Em ambos os métodos, o erro dos solos granulares, quando comparado ao dos solos finos é maior.

4.1.2 Quanto a energia de compactação

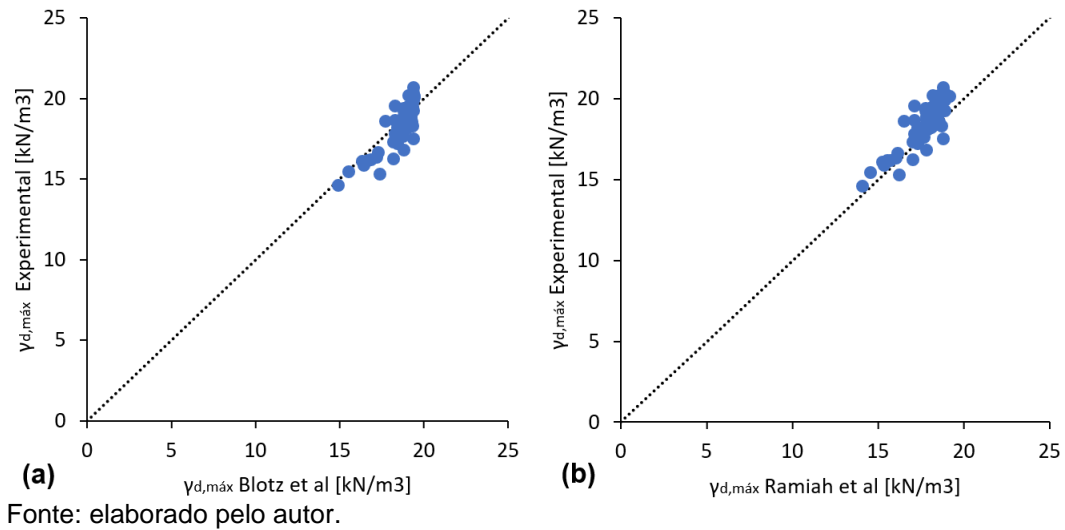
O presente tópico trata da análise dos resultados da aplicação dos métodos para duas diferentes energias de compactação, Proctor Normal e Modificado.

4.1.2.1 Resultados peso específico seco máximo

A compactação com a energia de Proctor normal foi utilizada em 65 dos 80 conjuntos de dados empregados nesta pesquisa.

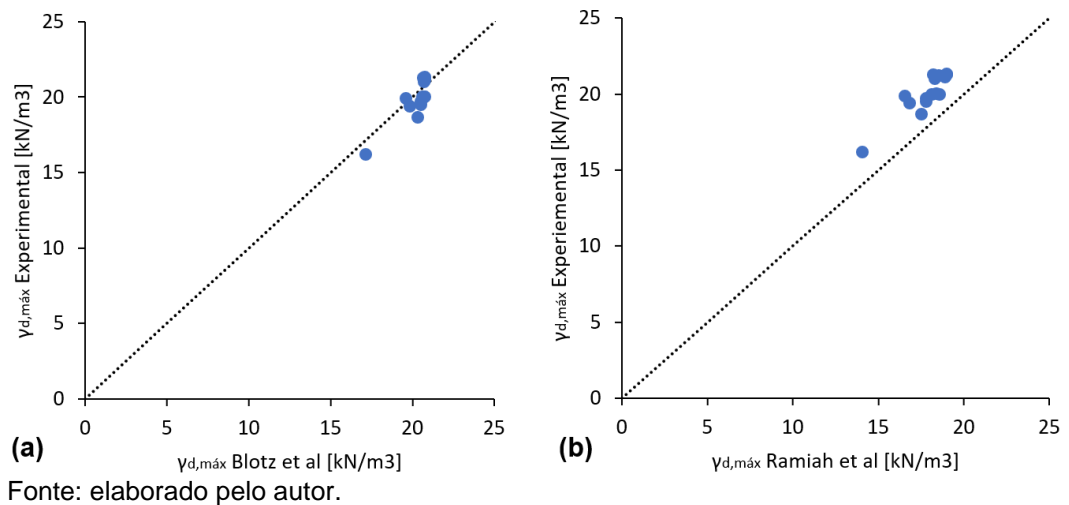
O Gráfico 14 mostra o desempenho dos diferentes métodos para estimar o peso específico seco máximo para energia de compactação Proctor normal, enquanto o Gráfico 15 demonstra o resultado para energia de Proctor modificado.

Gráfico 14 - Relação entre o $\gamma_{d,m\acute{a}x}$ experimental e teórico para energia de Proctor normal.



Enquanto os resultados para Proctor normal apresentados pelo método de Ramiah *et al.* (1970) subestimam o $\gamma_{d,m\acute{a}x}$ experimental, considerando que a maioria dos pontos do Gráfico 14 b estão acima da reta linear, os produtos da aplicação do método de Blotz *et al.* (1998) se mostram assertivos (Gráfico 14 a). O mesmo pode ser dito a respeito dos resultados obtidos para Proctor modificado, tendo em vista o Gráfico 15 a e b.

Gráfico 15 - Relação entre o $\gamma_{d,m\acute{a}x}$ experimental e teórico para energia de Proctor modificado.



A média dos erros absolutos apresentada na Tabela 8, mostra a pequena diferença entre os erros de ambos os métodos para a energia de Proctor normal. Essa

afirmação não pode ser feita para os resultados apresentados para Proctor modificado, devido ao seu erro discrepante quando se trata da metodologia proposta por Ramiah *et al.* (1970).

Tabela 8 – Média dos erros absolutos do $\gamma_{d,máx}$ para Proctor normal e modificado.

$\gamma_{d,máx}$ - Média dos erros absolutos		
	Blotz <i>et al.</i>	Ramiah <i>et al.</i>
Normal	0,666	0,784
Modificado	0,673	2,217

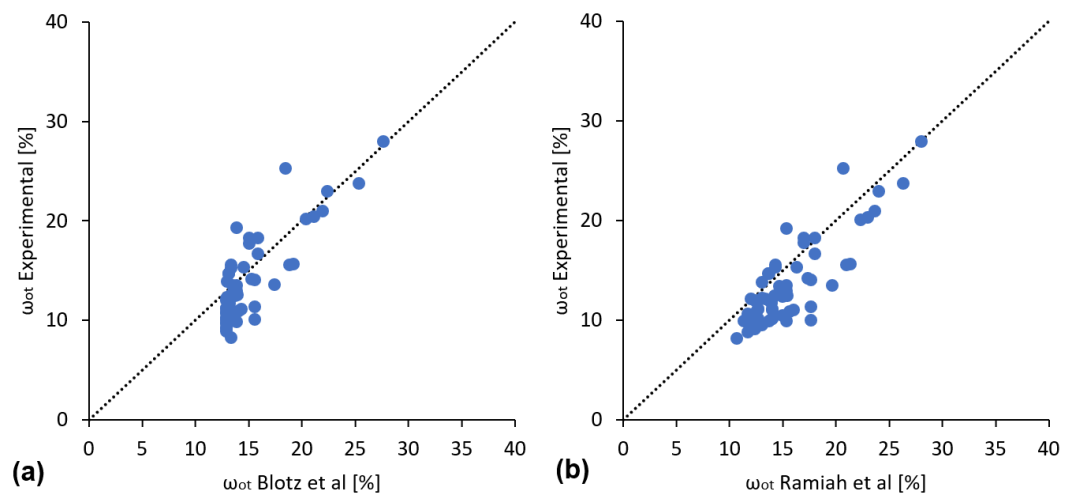
Erro mínimo = 0 ; valor experimental = valor teórico

Fonte: elaborado pelo autor.

4.1.2.2 Resultados umidade ótima

Para o parâmetro da umidade ótima com a aplicação da energia Proctor normal, os resultados estão demonstrados no Gráfico 16.

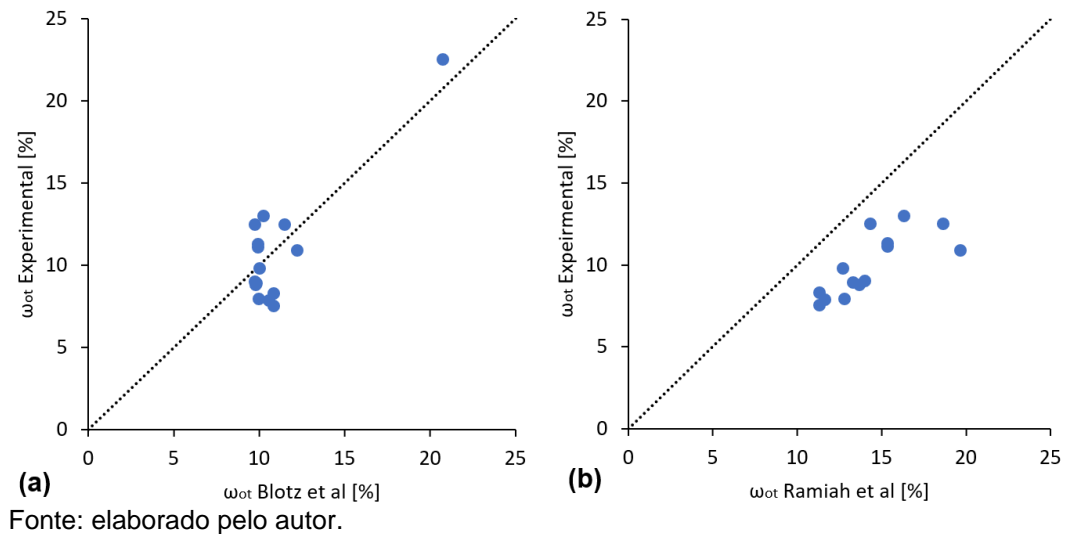
Gráfico 16 - Relação entre a ω_{ot} experimental e teórica para energia de Proctor normal.



Fonte: elaborado pelo autor.

A concentração de pontos presente no Gráfico 16 a, demonstra uma melhor previsibilidade de resultados para o método de Blotz *et al.* (1998), quando comparado ao Gráfico 16 b, mas apresentou também uma elevada dispersão.

Gráfico 17 - Relação entre o ω_{ot} experimental e teórico para energia Proctor modificada.



Para energia modificada (Gráfico 17), por mais que a metodologia de Blotz *et al.* (1998) não seja tão assertiva, a discrepância entre os valores teóricos propostos por Ramiah *et al.* (1970) e os valores experimentais da ω_{ot} é bem mais evidente e alarmante, com resultados teóricos superestimando os obtidos em laboratório.

Essa afirmativa pode ser confirmada pelos valores das médias dos erros absolutos apresentados na Tabela 9, onde apesar de todos os valores serem elevados, a estimativa de umidade ótima de Ramiah *et al.* (1970) para Proctor modificado é destoante dos demais valores.

Tabela 9 - Média dos erros absolutos da ω_{ot} para Proctor normal e modificado.

ω_{ot} - Média dos erros absolutos		
	Blotz <i>et al.</i>	Ramiah <i>et al.</i>
Normal	2,205	2,491
Modificado	1,630	4,438
Erro mínimo = 0 ; valor experimental = valor teórico		
Desvio máximo da umidade ótima = 8,767%		

Fonte: elaborada pelo autor.

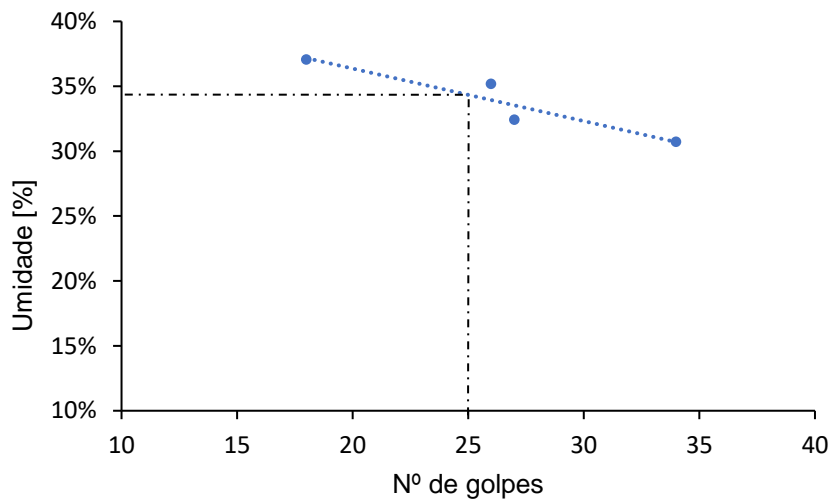
4.2 Ensaios laboratoriais

Este subtópico apresenta os resultados obtidos através dos ensaios de compactação e limite de liquidez para o Solo A e o Solo B realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação da UFC.

4.2.1 Ensaio de Limite de Liquidez

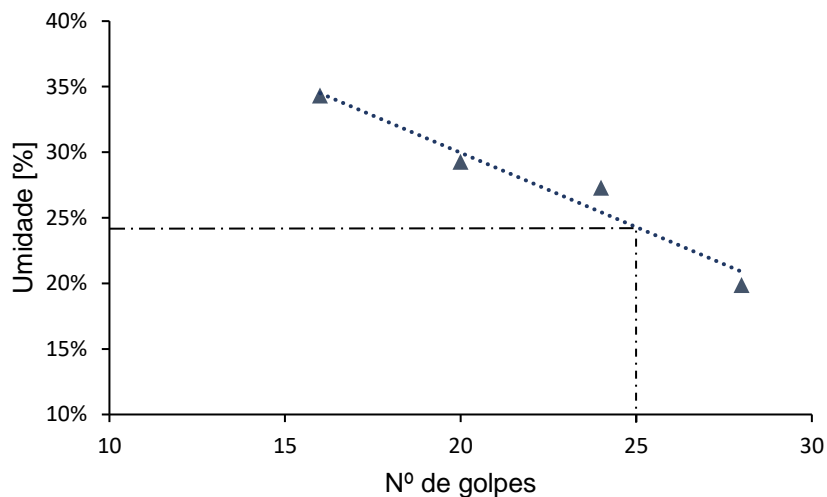
Fazendo uso resultados do ensaio do limite de liquidez (Apêndice B), foram elaborados os Gráficos 18 e 19 com as curvas de fluidez do Solo A e do Solo B, respectivamente.

Gráfico 18 – Curva de fluidez do Solo A.



Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 19 – Curva de fluidez do Solo B.



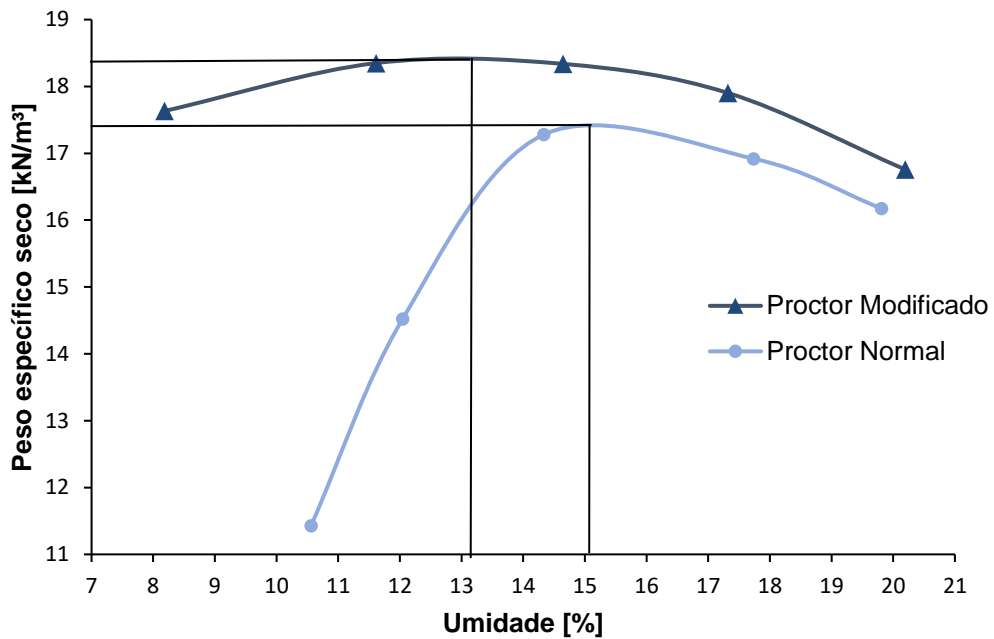
Fonte: elaborado pelo autor.

Como demonstrado nas curvas de fluidez, o limite de liquidez do Solo A é igual a 34,5%, e o do Solo B igual a 24%. Ambos os índices estão dentro do intervalo de valores trabalhados pelos autores Blotz *et al.* (1998) e Ramiah *et al.* (1970).

4.2.2 Ensaio de Compactação

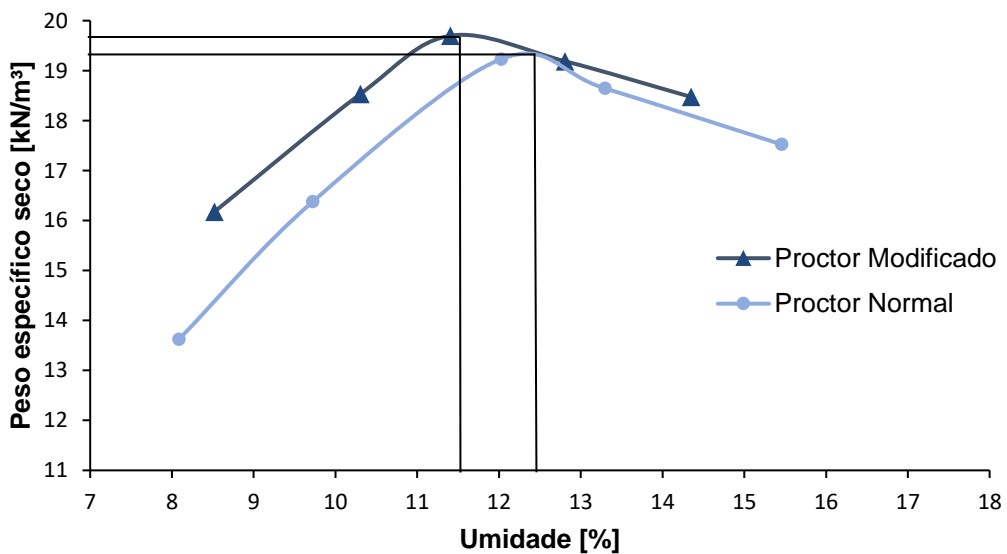
Por meio dos resultados dos ensaios de compactação com a energia Proctor normal e modificada (Apêndice C), as curvas de compactação (Gráficos 20 e 21) foram desenhadas para o Solo A e Solo B respectivamente.

Gráfico 20 – Curva de compactação do Solo A.



Fonte: elaborada pelo autor.

Gráfico 21 – Curva de compactação do Solo B.



Fonte: elaborada pelo autor.

As umidades ótimas (ω_{ot}) e os pesos específicos secos máximos ($\gamma_{d,m\acute{a}x}$) dos dois solos para ambas as energias de compactação estão presentes na Tabela 10.

Tabela 10 – Parâmetros obtidos nos ensaios de compactação.

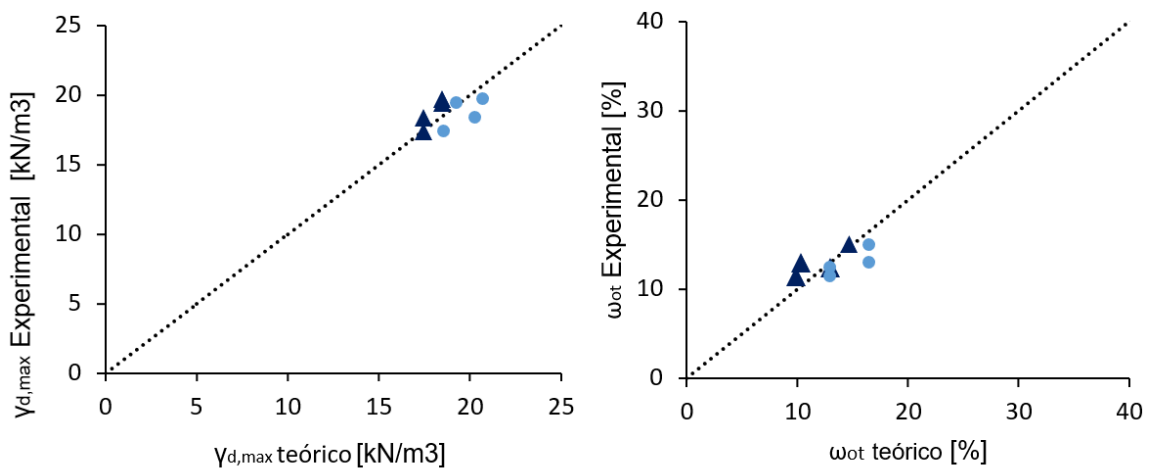
	Proctor Normal		Proctor Modificado	
	$\gamma_{d,m\acute{a}x}$ [kN/m ³]	ω_{ot} [%]	$\gamma_{d,m\acute{a}x}$ [kN/m ³]	ω_{ot} [%]
Solo A	17,40	14,96	18,40	13,00
Solo B	19,40	12,40	19,70	11,40

Fonte: elaborado pelo autor.

4.3 Análise dos Solos A e B

Os dados obtidos no ensaio de limite de liquidez e a energia de compactação usada em seu respectivo ensaio, foram aplicados nas metodologias de Blotz *et al.* (1998) e Ramiah *et al.* (1970). Os resultados foram expostos graficamente para cada parâmetro de compactação e estão apresentados no Gráfico 22.

Gráfico 22 - Relação entre o $\gamma_{d,m\acute{a}x}$ e ω_{ot} experimental e teórico dos Solos A e B.



● Blotz et al (1998) ▲ Ramiah et al (1970)

Fonte: elaborado pelo autor.

Pode-se observar graficamente que no que diz respeito ao peso específico seco máximo, o método proposto por Ramiah *et al.* (1970) foi mais assertivo, em discordância com os resultados obtidos anteriormente. Isto pode ter acontecido devido ao menor número de amostras usadas nessa etapa. Entretanto, para umidade ótima,

Blotz *et al.* (1998) continua sendo o mais eficiente. Pode-se dizer que houve uma boa correlação entre os parâmetros de compactação obtidos experimentalmente para os solos A e B com os métodos teóricos.

Tabela 11 – Média dos erros absolutos dos parâmetros de compactação para os Solos A e B.

Solo A e B - Média dos Erros Absolutos		
	Blotz <i>et al.</i>	Ramiah <i>et al.</i>
$\gamma_{d,m\acute{a}x}$ [kN/m ³]	1,061	0,782
ω_{ot} [%]	1,258	1,810
Erro mínimo = 0 ; valor experimental = valor teórico		

Fonte: elaborado pelo autor.

Os dados apresentados pela Tabela 11 reiteram as inferências sobre a assertividade do método de Ramiah *et al.*(1970) para o $\gamma_{d,m\acute{a}x}$, por apresentar uma média de erros absolutos menor que a outra metodologia. Quanto as umidades ótimas teóricas, essas continuam apresentando maior distanciamento dos valores experimentais do que o peso específico seco máximo. Esta afirmação é aplicável a todas as análises apresentadas nesse trabalho.

5 CONCLUSÕES

De acordo com as comparações feitas durante esta pesquisa, para um conjunto de dados de 80 pontos, o método de Blotz *et al.* (1998) se mostrou mais assertivo no que diz respeito a previsibilidade do parâmetro de compactação peso específico seco máximo ($\gamma_{d,m\acute{a}x}$), com média de erro absoluto em torno de 0,667 kN/m³.

Quando as análises se concentram em solos finos e granulares (de acordo com o SUCS), a metodologia de Blotz *et al.* (1998) tendeu a apresentar uma melhor aproximação com os dados experimentais de $\gamma_{d,m\acute{a}x}$, do que o método de Ramiah *et al.* (1970). Para a análise de acordo com a energia de compactação, concluiu-se que o método de Ramiah *et al.* (1970) não é adequado para prever o parâmetro de compactação em questão na energia Proctor modificada, onde os valores de $\gamma_{d,m\acute{a}x}$ são subestimados por esse modelo. Já o método de Blotz *et al.* (1998), conseguiu prever os resultados experimentais de forma mais assertiva, independente da energia aplicada.

No que diz respeito a umidade ótima teórica, ambos os métodos tenderam, na maior parte dos casos, a superestimar o valor experimental, independentemente do tipo de solo ou da energia aplicada, e quando analisado de maneira geral é possível notar a elevada dispersão desse parâmetro.

Com relação aos resultados obtidos no ensaio de laboratório para dois tipos de solo, A e B, os resultados obtidos para a previsão do peso específico com os métodos teóricos indicaram uma proximidade com os resultados experimentais. Com relação à previsão da umidade, o método de Blotz *et al.* (1998) forneceu uma maior aproximação com os resultados experimentais, ao contrário do método de Ramiah *et al.* (1970), que seguiu a tendência observada no conjunto de dados, de apresentar resultados discrepantes para esse parâmetro.

Em suma, pode-se concluir que as metodologias propostas por Blotz *et al.* (1998), para estimar o parâmetro de compactação, peso específico seco máximo, sob energia de Proctor normal e modificado, é conveniente, aceitável e menos suscetível a erro que o método de Ramiah *et al.* (1970). Este, por sua vez, mostrou-se qualificado somente para prever o $\gamma_{d,m\acute{a}x}$ para energia de Proctor normal. No que diz respeito a umidade ótima, essas metodologias de previsão não foram consideradas muito adequadas.

REFERÊNCIAS

- ABNT. **NBR 10520**: Informação e documentação – Citações em Documentos – Apresentação. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2002.
- ABNT. **NBR 6457**: Amostras de solo - preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização – versão corrigida 2016. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016a.
- ABNT. **NBR 6459**: Solo – determinação do limite de liquidez – versão corrigida 2016. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016b.
- ABNT. **NBR 7180**: Solo – determinação do limite de plasticidade, método de ensaio – versão corrigida 2016. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016c.
- ABNT. **NBR 7182**: Solo – ensaio de compactação – versão corrigida 2016. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016e.
- ALCÂNTARA, P. B. **Avaliação da influência da composição de resíduos sólidos urbanos no comportamento de aterros simulados**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, 2007.
- ALMEIDA, M. S. S. **Estudo da resistência ao cisalhamento de um solo não saturado quando percolado por fluidos de diferentes constantes dielétricas**. 2016. Tese (Doutorado em Ciências, Energia, Ambiente) - Universidade Federal da Bahia, Salvador-BA, 2016.
- ARAUJO, A. A. F. **Estudo teórico e experimental da segurança de filtros de barragens de terra à erosão interna**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, 2019.
- ARAÚJO, F. R. **Risco geotécnico: uma abordagem estocástica para análise da estabilidade de taludes da barragem olho d'água no estado do Ceará**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, 2013.
- ARAUJO, S. C. J. F. N. **Análise de microestrutura e de características geotécnicas de misturas de resíduo de polimento de porcelanato e solo**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2016.
- AYALA, G. R. L. **Verificação da estabilidade do talude de montante em barragem de terra submetida a rebaixamento rápido realizada com ensaios em solos não saturados e modelagem numérica**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, 2018.
- BARRETO, A. C. **Desempenho técnico de misturas de diferentes tipos de solos com RDC para uso em obras de pavimentação**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2020.

- BATISTA, J. S. **Características de infiltração de amostras do solo residual do granulito-gnaiss percoladas por água e efluente tratado de esgoto**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) - Universidade Federal da Bahia, Salvador-BA, 2009.
- BITENCOURT, B. M. O. **Influência do teor de bentonita nas propriedades hidromecânicas de um solo compactado**. 2016. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2016.
- BLOTZ, L. R., BENSON, C. H., BOUTWELL, G. P. **Estimating optimum water content and maximum dry unit weight for compacted clays**. Journal of Geotechnical and geoenvironmental engineering. 1998. p. 907-912.
- CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações** Fundamentos. 6.ed., v. 1. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.,1996.
- CARVALHO, Z. S. **Comportamento de barreiras minerais com solo compactado na faixa granulométrica ótima para contenção de líquidos orgânicos**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) - Universidade Federal da Bahia, Salvador-BA, 2015.
- CASTRO, M. A. **Utilização de solos saprolíticos na construção de pequenas barragens de terras**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, 2014.
- DIAS, T. G. N. **Caracterização e determinação das propriedades mecânicas do resíduo de britagem de rocha calcária da região oeste potiguar**. 2017. Artigo Científico (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2017.
- LIMA, F. A. L. V. **Transporte de contaminantes oriundos da água de produção da indústria petrolífera em solos areno-argilosos compactados**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal da Bahia, Salvador-BA, 2018.
- LIMA, F. C. **Uso de agregados de rochas calcárias para camadas de pavimentos estabilizadas granulometricamente**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa-PB, 2015.
- LIVNEH, M., ISHAI, I. **Using indicative properties to predict the density-moisture relationship of soils**. Committee on Compaction. Transportation Research Institute. Haifa, Israel. 1978.
- MACIEL, F. J. **Estudo da geração, percolação e emissão de gases no aterro de resíduos sólidos da Muribeca/PE**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, 2003.
- MAGALHÃES, P. R. F. **Caracterização de argilas para utilização em camadas de impermeabilização em sistemas de cobertura de aterros sanitários no**

semiárido. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, 2019.

NASCIMENTO, P. R. F. B. **Capacidade de carga de misturas de solo laterítico e desbastes de pneus**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2015.

NETO, J. B. L. **Um estudo experimental e numérico de solos compactados colapsíveis: aplicação em uma pequena barragem de terra**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, 2013.

OLIVEIRA, A. D. **Comportamento mecânico de solo artificialmente cimentados: ensaios, modelagem e aplicação**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, 2015.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

RAMIAH, B. K., VISWANATH, C., KRISHNAMURTHY, H. V., PURUSHOTHAMARAJ, P. **Interrelationship of compaction and index properties**. 2nd Southeast Asian Conference on Soil Engineering, Singapore, 1970. p. 577-587.

SANTOS, N. M. **Uso de rejeito do beneficiamento de granito para substituição parcial de um solo em camadas de pavimentação**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2019.

SILVA, F. B. S. **Avaliação de misturas de solo e resíduo de polimento de porcelanato para emprego em obras rodoviárias**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2016.

SILVA, L. A. **Estudo experimental do comportamento de tensão, deformação e resistência de solos artificialmente cimentados**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, 2016.

SOUSA, F. D. M. **Estudo da influência da sucção na estabilidade do talude de montante da barragem do Cauhipe realizada por meio de análises de equilíbrio limite e elementos finitos**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, 2019.

TOLEDO, A. L. L. **Comportamento geotécnico de misturas de solo e resíduos de perfuração onshore**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2014.

WOODS, K.B. **Design & construction of highway embankments**. Conference of soil mechanics & its application, 1940. p. 355.

APÊNDICE A – DADOS COLETADOS NA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Dados coletados na revisão bibliográfica						
Ensaio	Fonte	LL [%]	Compactação			Classificação SUCS
			Energia	$\gamma_{d,m\acute{a}x}$ [kN/m ³]	ω [%]	
1	ALCÂNTARA (2007)	56,00	Normal	15,86	21,00	MH
2	ALCÂNTARA (2007)	52,00	Normal	16,20	20,20	MH
3	ALMEIDA (2016)	47,00	Normal	15,30	25,30	ML
4	ARAÚJO (2013)	32,00	Normal	17,64	10,94	CL-ML
5	ARAÚJO (2013)	37,00	Normal	17,74	14,19	CL
6	ARAÚJO (2013)	31,00	Normal	18,70	13,54	SC-SM
7	ARAÚJO (2013)	28,00	Normal	18,22	15,58	SM
8	ARAÚJO (2016)	26,70	Normal	19,40	11,72	SC
9	ARAÚJO (2019)	36,00	Normal	17,20	18,30	SM
10	AYALA (2018)	25,80	Normal	18,40	14,70	SC
11	BARRETO (2020)	28,00	Normal	18,50	15,30	SM
12	BARRETO (2020)	28,00	Modificado	20,00	12,50	SM
13	BARRETO (2020)	31,00	Modificado	19,50	11,30	SM
14	BATISTA (2009)	39,00	Normal	16,25	18,29	SM
15	BITENCOURT (2016)	22,00	Normal	19,80	9,20	SC
16	CARVALHO (2015)	41,00	Modificado	19,40	12,50	SC
17	CARVALHO (2015)	31,00	Modificado	19,70	11,10	SC
18	CARVALHO (2015)	44,00	Normal	18,60	13,60	SC
19	CARVALHO (2015)	44,00	Modificado	19,90	10,90	SC
20	CARVALHO (2015)	69,00	Normal	14,60	28,00	MH
21	CARVALHO (2015)	69,00	Modificado	16,20	22,50	MH
22	CASTRO (2014)	30,00	Normal	18,10	13,00	SM
23	CASTRO (2014)	26,00	Normal	19,00	10,00	SM
24	DIAS (2017)	26,00	Modificado	21,03	8,80	SC
25	DIAS (2017)	19,00	Modificado	21,35	8,30	SC
26	LIMA (2015)	27,00	Modificado	21,30	9,00	SC
27	LIMA (2018)	25,00	Modificado	20,03	8,92	SC
28	LIMA (2018)	48,00	Normal	16,64	15,58	SC
29	LIMA (2018)	34,00	Normal	17,80	15,36	SC
30	LIMA (2018)	34,00	Modificado	18,67	12,99	SC
31	MACIEL (2003)	57,00	Normal	16,10	23,00	CH
32	MAGALHÃES (2019)	54,00	Normal	16,18	20,40	CH
33	MAGALHÃES (2019)	64,00	Normal	15,46	23,80	CH
34	NASCIMENTO (2015)	20,60	Normal	20,00	9,80	SC
35	NETO (2013)	26,00	Normal	18,40	14,70	SC
36	OLIVEIRA (2015)	22,00	Normal	19,50	12,00	SM-SC
37	SANTOS (2019)	23,40	Normal	20,20	9,71	SC
38	SANTOS (2019)	23,40	Modificado	21,20	7,94	SC
39	SANTOS (2019)	19,00	Normal	20,10	10,00	SC
40	SANTOS (2019)	19,00	Modificado	21,30	7,53	SC

Ensaio	Fonte	LL [%]	Compactação			Classificação SUCS
			Energia	$\gamma_{d,máx}$ [kN/m ³]	ω [%]	
41	SANTOS (2019)	20,00	Normal	20,00	10,30	SC
42	SANTOS (2019)	20,00	Modificado	21,10	7,85	SC
43	SILVA (2016)	26,70	Normal	19,00	11,95	SC
44	SOUSA (2019)	31,00	Normal	18,90	9,90	SC
45	SOUSA (2019)	30,00	Normal	18,30	12,50	SC
46	SOUSA (2019)	20,00	Normal	19,25	10,10	SM-SC
47	SOUSA (2019)	21,00	Normal	20,70	9,20	SM-SC
48	SOUSA (2019)	27,00	Normal	20,20	10,20	SC
49	SOUSA (2019)	24,00	Normal	18,75	13,90	SM-SC
50	SOUSA (2019)	24,00	Normal	18,90	12,30	SM-SC
51	SOUSA (2019)	38,00	Normal	19,55	10,10	SC
52	SOUSA (2019)	27,00	Normal	19,00	11,10	SC
53	SOUSA (2019)	20,00	Normal	20,35	8,90	SC-SC
54	SOUSA (2019)	29,00	Normal	18,20	13,50	SM-SC
55	SOUSA (2019)	25,00	Normal	18,65	12,20	SM
56	SOUSA (2019)	23,00	Normal	18,45	11,20	SM-SC
57	SOUSA (2019)	30,00	Normal	18,55	10,60	SC
58	SOUSA (2019)	26,00	Normal	19,00	12,00	SC
59	SOUSA (2019)	22,00	Normal	18,30	10,80	SM-SC
60	SOUSA (2019)	49,00	Normal	16,35	15,70	SC
61	SOUSA (2019)	21,00	Normal	17,50	12,20	SC
62	SOUSA (2019)	23,00	Normal	19,20	10,20	SM-SC
63	SOUSA (2019)	20,00	Normal	19,90	10,70	GC
64	SOUSA (2019)	24,00	Normal	18,50	9,60	SC
65	SOUSA (2019)	27,00	Normal	19,50	10,20	SC
66	SOUSA (2019)	39,00	Normal	17,30	16,70	SC
67	SOUSA (2019)	17,00	Normal	20,15	8,30	GM-GC
68	SOUSA (2019)	27,00	Normal	18,30	11,20	SC
69	SOUSA (2019)	38,00	Normal	18,65	11,40	SC
70	SOUSA (2019)	38,00	Normal	17,80	14,10	SC
71	SOUSA (2019)	31,00	Normal	16,80	13,00	SC
72	SOUSA (2019)	23,00	Normal	18,55	11,20	SM-SC
73	SOUSA (2019)	33,00	Normal	17,70	11,10	SC
74	SOUSA (2019)	30,20	Normal	19,23	12,91	SC
75	SOUSA (2019)	27,70	Normal	19,47	12,56	SC
76	SOUSA (2019)	35,93	Normal	18,21	17,75	CL
77	SOUSA (2019)	31,30	Normal	19,24	12,57	SC
78	SOUSA (2019)	31,10	Normal	19,40	19,29	SC
79	SOUSA (2019)	29,20	Normal	18,75	12,73	SC
80	TOLEDO (2014)	23,10	Modificado	20,00	9,80	CL-ML

Fonte: elaborada pelo autor.

APÊNDICE B – DADOS ENSAIO DE LIMITE DE LIQUIDEZ DOS SOLOS

A E B

Limite de Liquidez				
Solo A				
Nº da capsula	989	23	141	45
Nº de golpes	34	27	26	18
Peso solo + caps. + água	14,03	16,61	15,02	18,6
Peso solo + caps.	12,15	14,05	12,46	15,18
Peso Cápsula	6,03	6,15	5,18	5,95
Peso do solo	6,12	7,9	7,28	9,23
Peso da água	1,88	2,56	2,56	3,42
Umidade (LL)	31%	32%	35%	37%
			LL =	34,5%

Limite de Liquidez				
Solo B				
Nº da capsula	49	10	29	18
Nº de golpes	28	24	20	16
Peso solo + caps. + água	14,95	13,45	12,76	13,27
Peso solo + caps.	13,46	11,91	11,27	11,32
Peso Cápsula	5,96	6,27	6,18	5,64
Peso do solo	7,5	5,64	5,09	5,68
Peso da água	1,49	1,54	1,49	1,95
Umidade (LL)	20%	27%	29%	34%
			LL =	24%

Fonte: elaborada pelo autor.

APÊNDICE C – DADOS DO ENSAIO DE COMPACTAÇÃO DO SOLO A E B

ENSAIO DE COMPACTAÇÃO - PROCTOR NORMAL						
AMOSTRA: Solo A						
RESULTADOS:						
PESO ESPECÍFICO SECO MÁXIMO:					17,400 kN/m ³	
UMIDADE ÓTIMA:			14,96 %			
CILINDRO	VOLUME	997	cm ³	PESO	2078 g	
No. DE GOLPES	26	P.DA AMOSTRA		3000	g	
P. DA AMOSTRA + CILINDRO (g)		3338	3700	4048	4064	4010
PESO DA AMOSTRA (g)		1260	1622	1970	1986	1932
PESO ESPECÍFICO ÚMIDO (g/cm ³)		1,264	1,627	1,976	1,992	1,938
CÁPSULA No.		39	30	12	52	18
P.BRUTO ÚMIDO (g)		82,31	59,32	99,50	66,09	75,33
P. BRUTO SECO (g)		75,81	54,30	89,94	58,14	67,15
P.DA CÁPSULA (g)		14,26	12,62	23,26	13,32	25,86
ÁGUA (g)		6,50	5,02	9,56	7,95	8,18
SOLO (g)		61,55	41,68	66,68	44,82	41,29
UMIDADE (%)		10,56	12,04	14,34	17,74	19,81
PESO ESP. SECO (kN/m ³)		11,431	14,520	17,282	16,919	16,174
ENSAIO DE COMPACTAÇÃO - PROCTOR MODIFICADA						
AMOSTRA: Solo A						
RESULTADOS:						
PESO ESPECÍFICO SECO MÁXIMO:					18,400 kN/m ³	
UMIDADE ÓTIMA:			13,00 %			
CILINDRO	VOLUME	997	cm ³	PESO	2078 g	
No. DE GOLPES	27	P.DA AMOSTRA		3000	g	
P. DA AMOSTRA + CILINDRO (g)		3980	4120	4174	4172	4086
PESO DA AMOSTRA (g)		1902	2042	2096	2094	2008
PESO ESPECÍFICO ÚMIDO (g/cm ³)		1,908	2,048	2,102	2,100	2,014
CÁPSULA No.		17	7	8	10	38
P.BRUTO ÚMIDO (g)		89,15	67,79	86,15	60,60	118,94
P. BRUTO SECO (g)		84,19	62,10	78,16	53,68	103,30
P.DA CÁPSULA (g)		23,60	13,11	23,61	13,73	25,86
ÁGUA (g)		4,96	5,69	7,99	6,92	15,64
SOLO (g)		60,59	48,99	54,55	39,95	77,44
UMIDADE (%)		8,19	11,61	14,65	17,32	20,20
PESO ESP. SECO (kN/m ³)		17,634	18,350	18,337	17,902	16,756

Fonte: elaborada pelo autor.

ENSAIO DE COMPACTAÇÃO - PROCTOR NORMAL						
AMOSTRA: Solo B						
RESULTADOS:						
PESO ESPECÍFICO SECO MÁXIMO:				19,400 kN/m ³		
UMIDADE ÓTIMA:				12,40 %		
CILINDRO	VOLUME	997	cm ³	PESO	2486 g	
No. DE GOLPES	26	P.DA AMOSTRA		3000	g	
P. DA AMOSTRA + CILINDRO (g)		3954	4278	4634	4592	4503
PESO DA AMOSTRA (g)		1468	1792	2148	2106	2017
PESO ESPECÍFICO ÚMIDO (g/cm ³)		1,472	1,797	2,154	2,112	2,023
CÁPSULA No.		30	31	101	7	23
P.BRUTO ÚMIDO (g)		89,53	91,56	78,55	78,09	87,14
P. BRUTO SECO (g)		84,75	85,43	72,33	71,66	78,74
P.DA CÁPSULA (g)		25,63	22,39	20,61	23,30	24,40
ÁGUA (g)		4,78	6,13	6,22	6,43	8,40
SOLO (g)		59,12	63,04	51,72	48,36	54,34
UMIDADE (%)		8,09	9,72	12,03	13,30	15,46
PESO ESP. SECO (kN/m ³)		13,623	16,381	19,232	18,644	17,522
ENSAIO DE COMPACTAÇÃO - PROCTOR MODIFICADA						
AMOSTRA: Solo B						
RESULTADOS:						
PESO ESPECÍFICO SECO MÁXIMO:				19,700 kN/m ³		
UMIDADE ÓTIMA:				11,40 %		
CILINDRO	VOLUME	997	cm ³	PESO	2486 g	
No. DE GOLPES	27	P.DA AMOSTRA		3000	g	
P. DA AMOSTRA + CILINDRO (g)		4236	4524	4674	4644	4592
PESO DA AMOSTRA (g)		1750	2038	2188	2158	2106
PESO ESPECÍFICO ÚMIDO (g/cm ³)		1,755	2,044	2,195	2,164	2,112
CÁPSULA No.		35	6	65	411	10
P.BRUTO ÚMIDO (g)		74,93	66,80	47,71	58,92	73,32
P. BRUTO SECO (g)		70,96	62,02	43,84	53,68	65,85
P.DA CÁPSULA (g)		24,36	15,63	9,91	12,77	13,80
ÁGUA (g)		3,97	4,78	3,87	5,24	7,47
SOLO (g)		46,60	46,39	33,93	40,91	52,05
UMIDADE (%)		8,52	10,30	11,41	12,81	14,35
PESO ESP. SECO (kN/m ³)		16,175	18,532	19,699	19,187	18,472

Fonte: Elaborada pelo autor.

APÊNDICE D – DADOS EXPERIMENTAIS E DADOS TEÓRICOS

Ensaio	Fonte	Dados experimentais				Dados teóricos				Classificação SUCS
		LL [%]	Energia	$\gamma_d, \text{máx} [\text{kN/m}^3]$	ω [%]	Blotz <i>et al.</i> (1998)		Ramiah <i>et al.</i> (1970)		
						$\gamma_d, \text{máx} [\text{kN/m}^3]$	ω [%]	$\gamma_d, \text{máx} [\text{kN/m}^3]$	ω [%]	
1	ALCÂNTARA (2007)	56,00	Normal	15,86	21,00	16,44	21,95	15,35	23,67	MH
2	ALCÂNTARA (2007)	52,00	Normal	16,20	20,20	16,88	20,36	15,74	22,33	MH
3	ALMEIDA (2016)	47,00	Normal	15,30	25,30	17,40	18,49	16,23	20,67	ML
4	ARAÚJO (2013)	32,00	Normal	17,64	10,94	18,75	14,08	17,70	15,67	CL-ML
5	ARAÚJO (2013)	37,00	Normal	17,74	14,19	18,35	15,30	17,21	17,33	CL
6	ARAÚJO (2013)	31,00	Normal	18,70	13,54	18,83	13,88	17,80	15,33	SC-SM
7	ARAÚJO (2013)	28,00	Normal	18,22	15,58	19,03	13,36	18,09	14,33	SM
8	ARAÚJO (2016)	26,70	Normal	19,40	11,72	19,11	13,19	18,22	13,90	SC
9	ARAÚJO (2019)	36,00	Normal	17,20	18,30	18,43	15,03	17,31	17,00	SM
10	AYALA (2018)	25,80	Normal	18,40	14,70	19,16	13,09	18,31	13,60	SC
11	BARRETO (2020)	28,00	Normal	18,50	15,30	19,03	13,36	18,09	14,33	SM
12	BARRETO (2020)	28,00	Modificado	20,00	12,50	20,62	9,77	18,09	14,33	SM
13	BARRETO (2020)	31,00	Modificado	19,50	11,30	20,49	9,92	17,80	15,33	SM
14	BATISTA (2009)	39,00	Normal	16,25	18,29	18,17	15,87	17,01	18,00	SM
15	BITENCOURT (2016)	22,00	Normal	19,80	9,20	19,33	12,88	18,68	12,33	SC
16	CARVALHO (2015)	41,00	Modificado	19,40	12,50	19,84	11,51	16,82	18,67	SC
17	CARVALHO (2015)	31,00	Modificado	19,70	11,10	20,49	9,92	17,80	15,33	SC
18	CARVALHO (2015)	44,00	Normal	18,60	13,60	17,70	17,45	16,52	19,67	SC
19	CARVALHO (2015)	44,00	Modificado	19,90	10,90	19,60	12,23	16,52	19,67	SC
20	CARVALHO (2015)	69,00	Normal	14,60	28,00	14,93	27,60	14,07	28,00	MH
21	CARVALHO (2015)	69,00	Modificado	16,20	22,50	17,13	20,75	14,07	28,00	MH
22	CASTRO (2014)	30,00	Normal	18,10	13,00	18,90	13,69	17,90	15,00	SM
23	CASTRO (2014)	26,00	Normal	19,00	10,00	19,15	13,11	18,29	13,67	SM
24	DIAS (2017)	26,00	Modificado	21,03	8,80	20,69	9,78	18,29	13,67	SC
25	DIAS (2017)	19,00	Modificado	21,35	8,30	20,75	10,83	18,98	11,33	SC

Ensaio	Fonte	Dados experimentais				Dados teóricos				Classificação SUCS
		LL [%]	Energia	$\gamma_d, \text{máx} [\text{kN/m}^3]$	ω [%]	Blotz <i>et al.</i> (1998)		Ramiah <i>et al.</i> (1970)		
						$\gamma_d, \text{máx} [\text{kN/m}^3]$	ω [%]	$\gamma_d, \text{máx} [\text{kN/m}^3]$	ω [%]	
26	LIMA (2015)	27,00	Modificado	21,30	9,00	20,66	9,76	18,19	14,00	SC
27	LIMA (2018)	25,00	Modificado	20,03	8,92	20,72	9,83	18,39	13,33	SC
28	LIMA (2018)	48,00	Normal	16,64	15,58	17,30	18,85	16,13	21,00	SC
29	LIMA (2018)	34,00	Normal	17,80	15,36	18,60	14,53	17,50	16,33	SC
30	LIMA (2018)	34,00	Modificado	18,67	12,99	20,32	10,24	17,50	16,33	SC
31	MACIEL (2003)	57,00	Normal	16,10	23,00	16,33	22,36	15,25	24,00	CH
32	MAGALHÃES (2019)	54,00	Normal	16,18	20,40	16,66	21,14	15,54	23,00	CH
33	MAGALHÃES (2019)	64,00	Normal	15,46	23,80	15,52	25,35	14,56	26,33	CH
34	NASCIMENTO (2015)	20,60	Normal	20,00	9,80	19,38	12,91	18,82	11,87	SC
35	NETO (2013)	26,00	Normal	18,40	14,70	19,15	13,11	18,29	13,67	SC
36	OLIVEIRA (2015)	22,00	Normal	19,50	12,00	19,33	12,88	18,68	12,33	SM-SC
37	SANTOS (2019)	23,40	Normal	20,20	9,71	19,28	12,91	18,54	12,80	SC
38	SANTOS (2019)	23,40	Modificado	21,20	7,94	20,75	9,97	18,54	12,80	SC
39	SANTOS (2019)	19,00	Normal	20,10	10,00	19,41	13,02	18,98	11,33	SC
40	SANTOS (2019)	19,00	Modificado	21,30	7,53	20,75	10,83	18,98	11,33	SC
41	SANTOS (2019)	20,00	Normal	20,00	10,30	19,39	12,94	18,88	11,67	SC
42	SANTOS (2019)	20,00	Modificado	21,10	7,85	20,76	10,56	18,88	11,67	SC
43	SILVA (2016)	26,70	Normal	19,00	11,95	19,11	13,19	18,22	13,90	SC
44	SOUSA (2019)	31,00	Normal	18,90	9,90	18,83	13,88	17,80	15,33	SC
45	SOUSA (2019)	30,00	Normal	18,30	12,50	18,90	13,69	17,90	15,00	SC
46	SOUSA (2019)	20,00	Normal	19,25	10,10	19,39	12,94	18,88	11,67	SM-SC
47	SOUSA (2019)	21,00	Normal	20,70	9,20	19,36	12,89	18,78	12,00	SM-SC
48	SOUSA (2019)	27,00	Normal	20,20	10,20	19,09	13,22	18,19	14,00	SC
49	SOUSA (2019)	24,00	Normal	18,75	13,90	19,25	12,94	18,49	13,00	SM-SC
50	SOUSA (2019)	24,00	Normal	18,90	12,30	19,25	12,94	18,49	13,00	SM-SC
51	SOUSA (2019)	38,00	Normal	19,55	10,10	18,26	15,58	17,11	17,67	SC
52	SOUSA (2019)	27,00	Normal	19,00	11,10	19,09	13,22	18,19	14,00	SC

Ensaio	Fonte	Dados experimentais				Dados teóricos				Classificação
		LL [%]	Energia	$\gamma_d, \text{máx} [\text{kN/m}^3]$	ω [%]	Blotz <i>et al.</i> (1998)		Ramiah <i>et al.</i> (1970)		
						$\gamma_d, \text{máx} [\text{kN/m}^3]$	ω [%]	$\gamma_d, \text{máx} [\text{kN/m}^3]$	ω [%]	
53	SOUSA (2019)	20,00	Normal	20,35	8,90	19,39	12,94	18,88	11,67	SC-SC
54	SOUSA (2019)	29,00	Normal	18,20	13,50	18,96	13,52	18,00	14,67	SM-SC
55	SOUSA (2019)	25,00	Normal	18,65	12,20	19,20	13,01	18,39	13,33	SM
56	SOUSA (2019)	23,00	Normal	18,45	11,20	19,29	12,90	18,58	12,67	SM-SC
57	SOUSA (2019)	30,00	Normal	18,55	10,60	18,90	13,69	17,90	15,00	SC
58	SOUSA (2019)	26,00	Normal	19,00	12,00	19,15	13,11	18,29	13,67	SC
59	SOUSA (2019)	22,00	Normal	18,30	10,80	19,33	12,88	18,68	12,33	SM-SC
60	SOUSA (2019)	49,00	Normal	16,35	15,70	17,20	19,22	16,03	21,33	SC
61	SOUSA (2019)	21,00	Normal	17,50	12,20	19,36	12,89	18,78	12,00	SC
62	SOUSA (2019)	23,00	Normal	19,20	10,20	19,29	12,90	18,58	12,67	SM-SC
63	SOUSA (2019)	20,00	Normal	19,90	10,70	19,39	12,94	18,88	11,67	GC
64	SOUSA (2019)	24,00	Normal	18,50	9,60	19,25	12,94	18,49	13,00	SC
65	SOUSA (2019)	27,00	Normal	19,50	10,20	19,09	13,22	18,19	14,00	SC
66	SOUSA (2019)	39,00	Normal	17,30	16,70	18,17	15,87	17,01	18,00	SC
67	SOUSA (2019)	17,00	Normal	20,15	8,30	19,43	13,31	19,17	10,67	GM-GC
68	SOUSA (2019)	27,00	Normal	18,30	11,20	19,09	13,22	18,19	14,00	SC
69	SOUSA (2019)	38,00	Normal	18,65	11,40	18,26	15,58	17,11	17,67	SC
70	SOUSA (2019)	38,00	Normal	17,80	14,10	18,26	15,58	17,11	17,67	SC
71	SOUSA (2019)	31,00	Normal	16,80	13,00	18,83	13,88	17,80	15,33	SC
72	SOUSA (2019)	23,00	Normal	18,55	11,20	19,29	12,90	18,58	12,67	SM-SC
73	SOUSA (2019)	33,00	Normal	17,70	11,10	18,68	14,30	17,60	16,00	SC
74	SOUSA (2019)	30,20	Normal	19,23	12,91	18,88	13,72	17,88	15,07	SC
75	SOUSA (2019)	27,70	Normal	19,47	12,56	19,05	13,32	18,12	14,23	SC
76	SOUSA (2019)	35,93	Normal	18,21	17,75	18,44	15,01	17,32	16,98	CL
77	SOUSA (2019)	31,30	Normal	19,24	12,57	18,81	13,94	17,77	15,43	SC
78	SOUSA (2019)	31,10	Normal	19,40	19,29	18,82	13,90	17,79	15,37	SC
79	SOUSA (2019)	29,20	Normal	18,75	12,73	18,95	13,55	17,98	14,73	SC

Ensaio	Fonte	Dados experimentais				Dados teóricos				Classificação SUCS
		LL [%]	Energia	$\gamma_d, \text{máx} [\text{kN/m}^3]$	ω [%]	Blotz <i>et al.</i> (1998)		Ramiah <i>et al.</i> (1970)		
						$\gamma_d, \text{máx} [\text{kN/m}^3]$	ω [%]	$\gamma_d, \text{máx} [\text{kN/m}^3]$	ω [%]	
80	TOLEDO (2014)	23,10	Modificado	20,00	9,80	20,75	10,00	18,57	12,70	CL-ML
81	AUTOR (2022)	34,50	Normal	17,40	14,96	18,56	14,65	17,46	16,50	-
82	AUTOR (2022)	34,50	Modificado	18,40	13,00	20,29	10,31	17,46	16,50	-
83	AUTOR (2022)	24,00	Normal	19,40	12,40	19,25	12,94	18,49	13,00	-
84	AUTOR (2022)	24,00	Modificado	19,70	11,40	20,74	9,91	18,49	13,00	-

Fonte: elaborada pelo autor.