



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE PAU DOS FERROS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

ANTONIO NOGUEIRA NETO

**ANÁLISE ESTATÍSTICA DE PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO ENSAIO DE
COMPACTAÇÃO: UM ESTUDO DE CASO EM UM TRECHO DA BR-226**

PAU DOS FERROS

2019

ANTONIO NOGUEIRA NETO

**ANÁLISE ESTATÍSTICA DE PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO ENSAIO DE
COMPACTAÇÃO: UM ESTUDO DE CASO EM UM TRECHO DA BR-226**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Bel. José Henrique Maciel de Queiroz

Coorientador: Prof. Me. José Daniel Jales Silva

PAU DOS FERROS

2019

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

N469a Nogueira Neto, Antonio.
ANÁLISE ESTATÍSTICA DE PARÂMETROS GEOTÉCNICOS
DO ENSAIO DE COMPACTAÇÃO: UM ESTUDO DE CASO EM UM
TRECHO DA BR-226 / Antonio Nogueira Neto. - 2019.
36 f. : il.

Orientador: José Henrique Maciel de Queiroz.
Coorientador: José Daniel Jales Silva.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil,
2019.

1. Caracterização Geotécnica. 2. Peso específico
aparente seco. 3. Ensaio de compactação. 4. Solos
superficiais. 5. Geotecnia. I. Queiroz, José
Henrique Maciel de, orient. II. Silva, José
Daniel Jales, co-orient. III. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

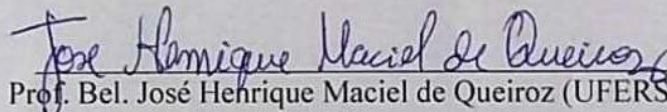
ANTONIO NOGUEIRA NETO

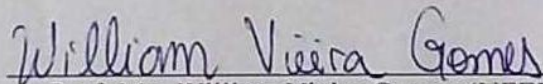
**ANÁLISE ESTATÍSTICA DE PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO ENSAIO DE
COMPACTAÇÃO: UM ESTUDO DE CASO EM UM TRECHO DA BR-226**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Defendida em: 13 / 08 / 2013.

BANCA EXAMINADORA


Prof. Bel. José Henrique Maciel de Queiroz (UFERSA)
Presidente


Prof. Me. William Vieira Gomes (UFERSA)
Membro Examinador


Prof. Bel. Fabíola Luana Rocha Maia (UFERSA)
Membro Examinador

A meu eterno amigo e avô paterno Carlos Ambrósio da Silva (In Memoriam), que será sempre minha fonte de inspiração e orgulho por sua luta, persistência e exemplo de pessoa a ser seguido.

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, por ser essencial em minha vida, autor de meu destino, meu guia, socorro presente na hora da angústia.

Ao meu pai Carlos Augusto que tanto sonhou com este momento, e que me ensinou a nunca desistir apesar das dificuldades. Minha mãe, e eterna mulher da minha vida Erlange Pontes que me fez ser hoje quem sou, e a minha irmã Maria Eduarda que será a próxima integrante da família com curso superior, para provar que filho de pobre também consegue.

Também dedico a toda minha família que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até este momento tão idealizado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, e todas as entidades religiosas que me abençoam grandemente pela oportunidade de realizar este trabalho, por me presentear com a vida e a chance de viver cada dia no presente e concluir mais este ciclo em minha jornada. Aos meus pais Carlos e Erlange pelo infinito amor, pelo conforto nos momentos mais difíceis, por seus gestos de carinho e afeto, no qual não mediram esforços para que eu concluísse esta formação. Dedico a vocês esta vitória. A toda minha família que sempre me deu o apoio necessário em todos os momentos que possuíram a oportunidade de contribuir.

Ao meu orientador Henrique Maciel pela oportunidade de ser seu orientando e toda a sua colaboração para o desenvolvimento deste trabalho. A meu co-orientador Daniel Jales pela essencial ajuda, amizade e contribuição sempre que solicitado para desenvolver este trabalho. Aos demais membros da banca examinadora, William Vieira e Fabíola Maia pela disponibilidade e contribuições sugeridas.

A todos os professores que fizeram parte da minha formação do curso e a todos os profissionais que fazem parte da UFERSA pela contribuição em cada uma de suas atividades para que eu conseguisse a obtenção deste título.

Aos colegas e amigos, pelo companheirismo, conhecimento de mundo adquirido e momentos vividos. Em especial a Augusto Albuquerque, Leonardo Sucupira, William Vieira, Cadmo Cordeiro, Pedro Neto, Tales Oliveira, Lucas Henrique, e tantos outros que sempre estarão comigo nos momentos de alegria, além de todos aqueles que estiveram presentes em minha vida em algum momento e que sempre desejaram o bem, e até mesmo o mal.

A todas as pessoas, que colaboraram direto ou indiretamente para a realização deste trabalho.

“Nada é impossível. Se puder ser
sonhado, então pode ser feito.”

Theodore Roosevelt

RESUMO

No contexto geotécnico, para que os projetos aliem soluções seguras e econômicas, o conhecimento do solo e do subsolo para uma obra é um requisito de fundamental importância, independentemente de seu porte. Dessa forma, com o levantamento das características *in situ* se faz de extrema importância para conhecer as informações daquela área e executar projetos mais seguros. Baseado nestas informações, este trabalho tem como objetivo realizar o estudo geotécnico dos solos superficiais do Município de Pau dos Ferros/RN, utilizando como método de análise o ensaio de compactação. Após as atividades de coleta dos 4 pontos analisados em campo, realizou-se os ensaios em laboratório para a determinação das umidades ótimas de cada ponto e seus pesos específicos aparentes seco máximo, e comparar os valores obtidos através da distribuição estatística t-student a fim de encontrar correlações entre as curvas encontradas. Os valores encontrados condizem com os valores médios, apresentando pequenos valores de desvio padrão para o peso específico seco aparente máximo e elevados para a umidade ótima, e encontrou-se uma região de correlação entre os pontos analisados no trabalho. Logo, para um maior entendimento sobre a região de onde as amostras foram retiradas, recomenda-se o emprego de mais pontos para que a estatística dos dados se aproxime mais da população das amostras. Somente assim é possível refinar ainda mais a análise e inferir com maior precisão.

Palavras-chave: Caracterização geotécnica; Peso específico aparente seco; Ensaio de compactação; Solos superficiais; Geotecnia.

ABSTRACT

In the geotechnical context, for projects to combine safe and economical solutions, knowledge of the soil and subsoil for a work is a fundamental requirement, regardless of its size. Thus, with the survey of the in situ characteristics is extremely important to know the information of that area and execute safer projects. Based on this information, this work aims to carry out the geotechnical study of the superficial soils of the city of Pau dos Ferros / RN, using as a method of analysis the compaction test. After collecting the 4 points analyzed in the field, laboratory tests were performed to determine the optimum humidity of each point and its specific maximum apparent dry weights, and to compare the values obtained through the t-student statistical distribution in order to determine the optimum humidity to find correlations between the curves found. The values found are consistent with the mean values, showing small standard deviation values for the maximum apparent dry specific weight and high for the optimum humidity, and a correlation region was found between the points analyzed in the study. Therefore, for a better understanding of the region from which the samples were taken, it is recommended to use more points to bring the data statistics closer to the sample population. Only in this way is it possible to further refine the analysis and infer more accurately.

Keywords: Geotechnical characterization; Specific apparent dry weight; Compaction test; Surface soils; Geotechnics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de solos do Brasil.....	18
Figura 2 - Mapa de Pau dos Ferros/RN.....	21
Figura 3 – Localização dos pontos de coleta de amostra ao longo da BR-226	22
Figura 4 – (a) utilização da enxada para preparação da superfície de escavação; (b) medição da profundidade da cava.....	22
Figura 5 – Peneiramento da amostra antes do processo de compactação.....	24
Figura 6 – Retirada da amostra úmida do solo compactado.....	25
Figura 7 – Aplicação da energia de compactação durante o ensaio	25
Figura 8 – (a) Molde, extrator e colher de pedreiro; (b) Amostra de solo compactada removida.....	26
Figura 9 – Curvas de compactação para o ensaio de Proctor Normal. (a) Amostra 1; (b) Amostra 2; (c) Amostra 3; (d) Amostra 4.....	28
Figura 10 – (a) Comparação entre as curvas de compactação.....	29
Figura 11 – Dispersão dos dados e tentativa de correlação linear.....	30
Figura 12 – Região de probabilidade de encontrar um pico da curva de compactação da região analisada.....	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Descrição das características e coordenadas dos pontos de coleta de amostras	23
Tabela 2 – Valores de Umidade versus Peso específico seco para cinco pontos da curva de compactação relativos às quatro amostras analisadas.....	27
Tabela 3 – Valores de umidade ótima e peso específico máximo para as quatro amostras analisadas, bem como a média e o desvio padrão dos valores.....	28

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BR-226	Rodovia Brasileira
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
Dr	Doutor
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
Me	Mestre
MPAS	Ministério da Previdência e Assistência Social
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
RN	Rio Grande do Norte
UFERSA	Universidade Federal Rural do Semi-Árido

LISTA DE SÍMBOLOS

@	Arroba
©	Copyright
γ_n	Peso Específico Natural do Solo
h	Umidade do solo
h_{ot}	Umidade ótima
m_w	Massa de água
m_s	Massa de solo seco
®	Marca registrada
$P_{cilindro}$	Peso do molde cilíndrico
$P_{cilindro+solo}$	Peso do molde + solo
γ_d	Peso Específico Aparente Seco
$\gamma_{d,max}$	Peso Específico Aparente Seco Máximo
%	Porcentagem
\$	Cifrão

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 OBJETIVOS	15
1.1.1 OBJETIVO GERAL	15
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
2. REVISÃO TEÓRICA	16
2.1 ESTRUTURA DO SOLO	16
2.2 TIPOS DE SOLOS	17
2.3 COMPACTAÇÃO DE SOLOS SUPERFICIAIS	18
2.4 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO	19
3. METODOLOGIA	20
3.1 CARACTERIZAÇÃO DO CAMPO DE ESTUDO E PROCEDIMENTO DE AMOSTRAGEM	21
3.2 PROCEDIMENTO DO ENSAIO DE COMPACTAÇÃO	23
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
4.1 ANÁLISE DAS CURVAS DE COMPACTAÇÃO	27
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	32
REFERÊNCIAS	33

1 INTRODUÇÃO

No contexto geotécnico, para que os projetos aliem soluções seguras e econômicas, o conhecimento do solo e do subsolo para uma obra é um requisito de fundamental importância, seja ela uma obra de terra, como barragens, taludes, aterros e estradas, ou para edificações com independência de seu porte. Dessa forma, com o levantamento das características *in situ* é possível minimizar patologias e diminuir as incertezas que condicionam o aumento da probabilidade de ruína das obras.

Devido a diversidade e a diferença de comportamento dos diversos solos que são atribuídas a heterogeneidade de suas composições químicas, físicas e mineralógica, é necessário o entendimento sobre seu comportamento e de suas propriedades físicas de campo com a finalidade de tratá-los para a forma mais adequada de sua devida finalidade, seja ela ligada ao contexto da engenharia civil, ambiental ou agrícola.

No contexto da engenharia civil, um solo quando transportado e depositado na construção aterros para o lançamento de pavimentos, por exemplo, fica em estado fofo e, portanto, além de pouco resistente, apresenta-se como muito deformável e suscetível a patologias, sobretudo problemas de infiltração e recalque. Logo, segundo Pinto (2006), a correção dessas características maléficas para as obras que empregas o solo como fundação devem ser realizadas a partir de técnicas apropriadas, como a compactação e o adensamento, que promovem sua melhoria através do aumento da rigidez, aumentando o módulo de deformabilidade.

A compactação dos solos, por sua vez, atua no sentido de diminuir os vazios do solo através do emprego de uma energia de aplicação rápida e repetitiva. A redução de volume é resultado, sobretudo, da expulsão de ar dos vazios do solo sem uma considerável variação do teor de água nem alteração do volume de partículas que compõem o esqueleto sólido. Além disso, esse procedimento conduz o solo a uma redução no seu volume, e, portanto, a uma elevação do peso específico, tornando-o, como o próprio nome sugere, mais compactado, aumento também sua resistência ao cisalhamento e uma diminuição da sua permeabilidade.

Nesse sentido, a resistência ao cisalhamento e a permeabilidade são parâmetros geotécnicos importantíssimo no dimensionamento de fundações e taludes, e de aterros sanitários, núcleos e filtros de barragem, por exemplo. Com isso, torna-se imprescindível a investigação e caracterização para a posterior determinação do grau de compactação dos solos nas obras civis.

Mesmo dada sua relevância no contexto mencionado, Medrado (2009) afirma que em muitas obras a compactação é realizada sem a caracterização correta dos solos de assentamento, isto é, sem a identificação precisa do tipo de solo, do grau de compactação e das características de deformabilidade. Portanto, baseado nesta premissa, o presente trabalho realizou um estudo de caso no município de Pau dos Ferros/RN, criando um conjunto de dados geotécnicos, visto que poucas são as informações geológicas e/ou geotécnicas para a região em questão, que podem auxiliar no conhecimento dos solos e na comparação preliminar dos dados em projetos e pesquisas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GERAL

Realizar o estudo geotécnico de solos superficiais do Município de Pau dos Ferros/RN utilizando como método de análise o ensaio de compactação.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Determinar a curva de umidade ótima e o peso específico seco máximo de cada amostra coletada na localidade, apresentando suas propriedades físicas;
- ✓ Analisar estatisticamente o grau de compactação entre os solos analisados;
- ✓ Comparar os resultados obtidos com trabalhos relacionados com a temática de estudo.

2. REVISÃO TEÓRICA

Nesta seção serão abordados conhecimentos considerados essenciais para o embasamento conceitual da pesquisa e também para as discussões a serem realizadas a partir dos resultados dos ensaios programados na metodologia, como a estrutura do solo, os seus índices físicos, suas classificações, os ensaios mais usuais para a caracterização dos solos. Além disso, é apresentada ainda uma abordagem teórica sobre a compactação de solos superficiais, como definição teórica e empírica, e principais variáveis analisadas; e por fim, uma breve descrição sobre a normalização dos ensaios de compactação e sobre o rompimento dos corpos de prova moldados durante a pesquisa.

2.1 ESTRUTURA DO SOLO

Um dos fatores responsáveis pela formação do solo é o intemperismo em rochas da litosfera, que são expostas à atmosfera e sofrem ação direta do calor do sol, da umidade, da chuva e do desenvolvimento dos demais organismos. Este fenômeno é responsável pela formação do material semiconsolidado que acarreta a criação do solo e resulta em partículas de diversos tamanhos, composições e formas (LEPSCH, 2010).

Segundo Pedron, Dalmolin e Azevedo (2004), os processos de deterioração atuam sobre os materiais que dão origem ao maciço, como as rochas, depósitos orgânicos e sedimentos. De acordo com suas atuações e intensidades estes processos influenciam nas propriedades e características destes solos encontrados na natureza, levando a formação em camadas ou espessura de horizontes, como os perfis de solos.

As discrepâncias mais atenuantes entre perfis ocorrem em regiões de climas mais quente e úmidos, onde a água exerce importante papel de dissolver os minerais presentes na região. Para a formação deste perfil de solo, deve-se levar em conta uma série de fatores que podem alterar suas características, como o clima, a intensidade pluviométrica, o tempo, e os demais organismos que fornecerão matéria orgânica ao solo. Estes, irão causar modificações as características químicas e físicas destes materiais e por consequência sua estrutura, formando novos minerais na composição do solo. (LIMA, 2007).

2.2 TIPOS DE SOLOS

Os solos no Brasil são classificados através do Sistema Brasileiro de Classificação dos solos, elaborado e publicado pela Embrapa, que elabora atualizações a cada novo estudo do solo. Todavia, este também pode ser classificado de acordo com suas características apresentadas por seus perfis (COELHO; FIDALGO; SANTOS, 2013).

Os solos residuais, sedimentares e orgânicos consistem em três grupos principais que são utilizados para classificar os tipos de solos. Os residuais são os que persistem no seu lugar de origem, onde são formados pelo intemperismo atuante nas rochas de formação, onde neste processo obteve uma velocidade de decomposição maior que a de retirada pelos agentes externos (GURGEL, 2015).

Ainda segundo Gurgel (2015), os do tipo sedimentares ou transportados consistem nos solos que ao sofrer ações de agentes transportadores (aluvionares, eólicos, coluvionares e glaciares) mudam de um local para outro.

E os solos orgânicos são compostos a partir da decomposição de matéria orgânica, sendo esta de origem animal ou vegetal. Para a construção civil, este tipo de solo orgânico não apresenta boa qualidade para o desenvolvimento de edificações devido a sua compressibilidade, sendo mais adequado para obras civis um maciço de solo compactado por possuírem menor índice de vazios na sua composição, dentre outras características.

O mapeamento de solos no Brasil apresenta treze tipos de solos diferentes presentes no território, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos. Conforme Coelho (2013) descreve, a Figura 1 apresenta esta representação, onde exibem os diversos solos caracterizados, e estes possuem diversas características semelhantes como a porosidade, profundidades, permeabilidade, mas diferindo-se nos teores de argila entre os horizontes do solo superficiais e subsuperficiais.

Figura 1 - Mapa de solos do Brasil



Fonte: Embrapa, 2013.

2.3 COMPACTAÇÃO DE SOLOS SUPERFICIAIS

A compactação consiste na aplicação de uma energia mecânica no solo em forma de compressão, ocasionando uma redução da porosidade e um adensamento no mesmo, fazendo com que ocorra uma redução na produtividade biológica do solo, porém elevando sua homogeneidade devido a sua redução dos índices de vazios (REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007).

O processo de compactação de solos, de forma bastante objetiva tem em vista dois aspectos básicos: aumentar o contato entre as partículas ou grãos, e tornar o aterro mais homogêneo. O aumento da densidade ou redução dos índices de vazios é desejável, devido a melhoria de diversas propriedades citadas anteriormente do mesmo (PINTO, 2006).

Em termos gerais, este processo trata-se da densificação do solo por meio da remoção de ar, o que demanda certa energia mecânica. O grau de compactação de um solo é medido com base em seu peso específico seco. Quando adicionada ao solo durante a compactação, a água

atua como um agente de embrandecimento de partículas, fazendo-as deslizar umas sobre as outras e moverem-se para uma posição densamente compactada. Após compactado, o peso específico seco aumenta, em princípio, conforme aumenta o teor de umidade (DAS, 2007).

Segundo Sousa Pinto (2006 p. 77),

O início da técnica de compactação é creditado ao engenheiro norte-americano Proctor que, em 1933, publicou suas aferições sobre a compactação de aterros, mostrando que, ao aplicar-se um certo número de passadas de um determinado equipamento no campo ou um elevado número de golpes de um soquete sobre o solo contido em um molde, a massa específica resultante é função da umidade em que o solo estiver.

Quando se compacta com uma umidade baixa, o atrito entre as partículas é bastante elevado e não se consegue uma significativa redução de vazios, contudo, quanto mais elevada a porção de água entre as partículas, maior o efeito de lubrificação sobre as mesmas, acomodando-se num arranjo mais compacto e resistente (PINTO, 2006).

Nesse sentido, o conhecimento dos parâmetros do solo associado ao terreno da obra pode trazer diversos benefícios para o construtor, como por exemplo, a escolha adequada do tipo de fundação, acarretando um provento significativo na segurança, e em certos casos uma economia de material, pois evita a prática de superdimensionamento de estruturas, além de reduzir a probabilidade de ocorrência de manifestações patológicas na edificação.

2.4 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

No ensaio Proctor normal, o solo é compactado em um molde de volume de 1000 cm³. O diâmetro do molde é de 101,6 mm. Durante o ensaio executado em laboratório, o molde é fixado a uma chapa de apoio no fundo e a uma extensão no topo. Assim, o solo é misturado com diversas concentrações de água e, depois compactado em três camadas iguais por um soquete que golpeia 26 vezes cada camada. A massa do soquete é de 2,5 kg e a altura da queda é de 30,5 cm (DAS, 2014).

Em cada ensaio, o teor de umidade do solo compactado pode ser determinado no laboratório. Depois de este parâmetro conhecido, pode-se calcular o peso específico seco e em seguida, a amostra é destorroada novamente, a umidade aumentada (cerca de 2%) e realizado novamente o ensaio, encontrando um novo par de valores (umidade-densidade seca) para

posteriormente serem plotados em um gráfico, em função destas duas variáveis, para se obter o peso específico máximo e o teor de umidade ótimo do solo (DAS, 2014).

Esta operação é repetida até que se perceba que a densidade seca, depois de ter subido, tenha caído em duas ou três operações sucessivas. Nota-se quando a densidade úmida se mantém constante em duas tentativas sucessivas, a densidade seca já caiu. Se o ensaio se iniciou de fato com esta umidade 5% abaixo da ótima, e os acréscimos foram de 2% a cada tentativa, com 5 determinações o ensaio estará concluído (PINTO, 2006).

3. METODOLOGIA

O procedimento metodológico tem sua caracterização dividida quanto aos objetivos, com base nos procedimentos técnicos empregados e no tratamento dos dados utilizados (GIL, 2008). Em relação a primeira classificação, a presente pesquisa é tipificada como explicativa, pois conforme Gil (2008, p. 41), “sua preocupação central é identificar os fatores que determinam ou que contribuem para a ocorrência dos fenômenos”, tal como ocorre neste trabalho, ao passo em que as variáveis geotécnicas como a umidade e o peso específico aparente seco são analisadas em um viés estatístico a fim de relacionar ou não a totalidade do trecho analisado da BR-226.

Quanto aos procedimentos técnicos, a mesma é classificada como pesquisa experimental, já que as variáveis de estudos foram determinadas e foram observadas suas relações através de procedimentos empíricos a fim de verificar qual a sua influência sobre o objeto da pesquisa.

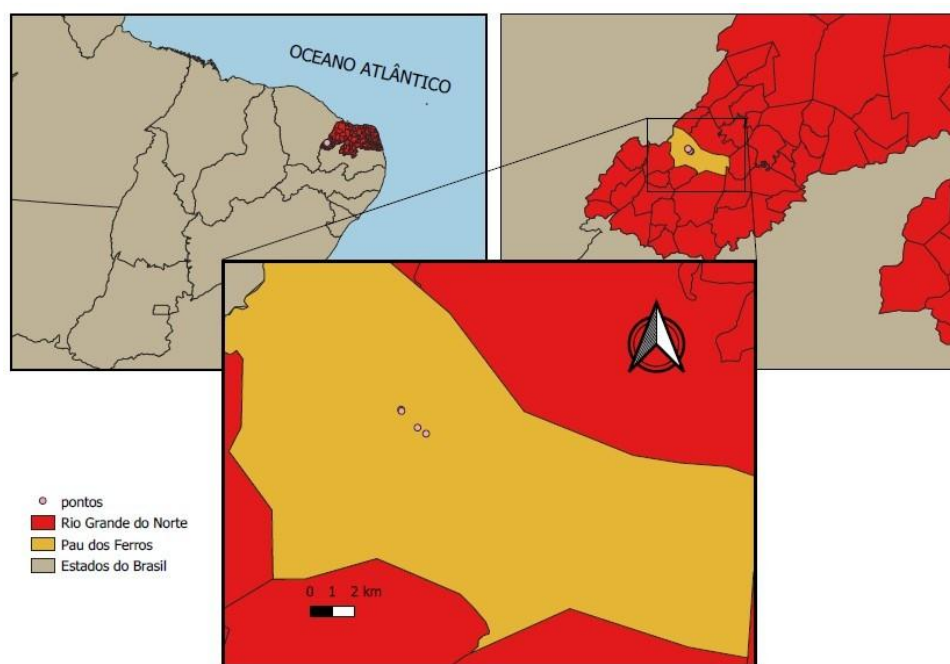
Para realização da mesma, foi necessário fazer uma revisão bibliográfica em livros, artigos, periódicos e dissertações para o enriquecimento teórico acerca da temática, de modo que viesse a possibilitar a identificação das informações julgadas essenciais para as discussões deste trabalho. Para tanto, foram utilizadas as seguintes bases de dados: repositório de dissertações e teses, bibliografias básicas de mecânica dos solos e o Periódicos *Capes* com acesso a textos científicos nacionais como internacionais completos.

Por fim, quanto ao tratamento dos dados esta pesquisa é caracterizada como quantitativa, pois faz uso de informações numéricas para produzir suas hipóteses a fim de resolver o problema de pesquisa. Além disso, essas formulações ao longo do trabalho foram embasadas em métodos estatísticos como regressões lineares, médias, desvios padrões e intervalos de confiança para as amostras analisadas.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO CAMPO DE ESTUDO E PROCEDIMENTO DE AMOSTRAGEM

O estudo ocorreu no município de Pau dos Ferros/RN, considerado o principal município da região do Alto Oeste Potiguar (Figura 2), situando-se a aproximadamente 392 km da capital, Natal. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), ele possui uma área territorial de 259.959 km², densidade demográfica de 106,73 hab/km² e um crescimento populacional de 27.745, em 2010, para 30.452 habitantes em 2017, sendo considerado o décimo oitavo município mais populoso do estado e primeiro de sua microrregião.

Figura 2 - Mapa de Pau dos Ferros/RN

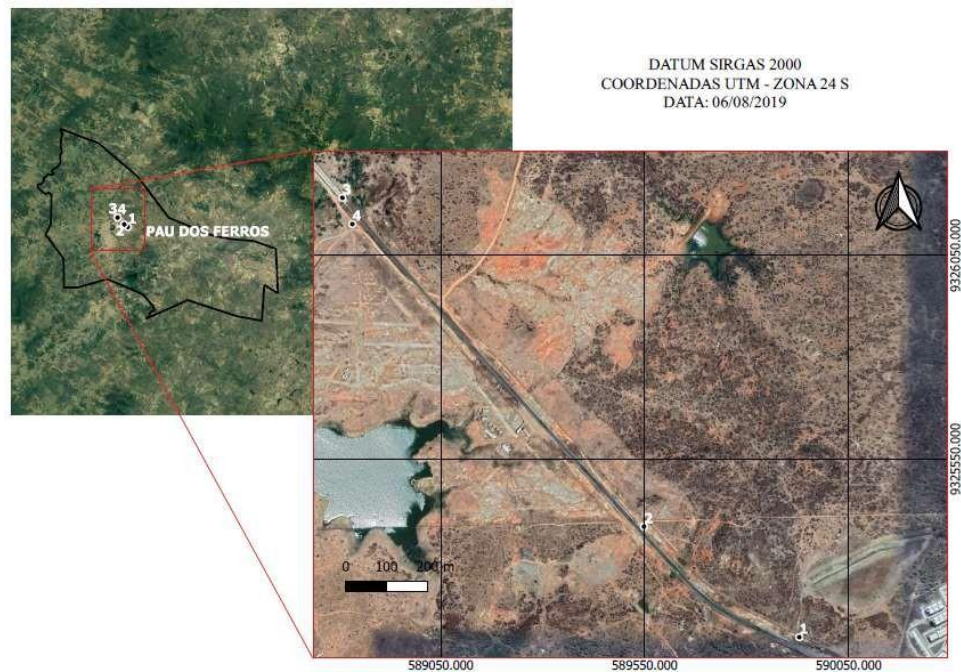


Fonte: AUTOR, 2019.

A Figura 3 apresenta a localização dos pontos de coleta de amostra no município em questão. A escolha desses pontos se deu a partir do alinhamento da BR-226 a fim de obter relações entre as amostras que representassem a totalidade do alinhamento da rodovia, isto é, uma relação amostra-população através de procedimentos estatísticos que assegurassem que os dados geotécnicos estivessem dentro de uma margem de segurança.

No tocante às coletas *in situ* nos pontos escolhidos na cidade, preferiu-se o período da manhã por ser um horário de menor incidência e, conseqüentemente, exposição aos raios solares.

Figura 3 – Localização dos pontos de coleta de amostra ao longo da BR-226



Fonte: AUTOR, 2019.

A etapa de campo consistiu na escavação manual e acondicionamento com o auxílio de equipamentos como picareta, enxada (Figura 4 (a)), pá, espátula, luvas, caixote de plástico e colher de pedreiro, percorrendo as três camadas características do solo de cada ponto escolhido. Estas três camadas encontram-se respectivamente as profundidades de 0 m a 0,3 m, 0,3 m a 0,6 m e 0,6 m a 1,0 m (Figura 4 (b)). Para estes ensaios foram utilizados os das camadas intermediárias, entre 0,3 m e 0,6 m.

Figura 4 – (a) utilização da enxada para preparação da superfície de escavação; (b) medição da profundidade da cava.



Fonte: AUTOR, 2019.

Com isto, para a realização do ensaio de compactação foi necessário em torno de 3,5 kg de solo de cada camada característica, totalizando 10,5 kg de material que foram embalados em sacos plásticos e armazenados em laboratório para a execução da etapa de ensaios de caracterização. Após a coleta das amostras, georreferenciou-se os pontos e deu-se início então as atividades do ensaio de compactação em laboratório, onde através da execução dos mesmos, conforme as informações apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Descrição das características e coordenadas dos pontos de coleta de amostras

Localização	Nomenclatura	Coordenadas Geográficas	Tipo de amostragem selecionada	Ensaio Realizado
BR-226	Ponto 01	S 06°06'18,2" W 038°11'14,2"	Deformada	Compactação
BR-226	Ponto 02	S 06°06'9,4" W 038°11'26,5"	Deformada	Compactação
BR-226	Ponto 03	S 06°05'43,2" W 038°11'50,7"	Deformada	Compactação
BR-226	Ponto 04	S 06°05'45,3" W 038°11'49,9"	Deformada	Compactação

Fonte: AUTOR, 2019.

3.2 PROCEDIMENTO DO ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

O ensaio de compactação deu-se com a escolha da energia de compactação normal, também denominado de Ensaio de Proctor Normal, conforme normalizado pela ABNT NBR 7182:2016 – Ensaio de Compactação. Para a realização do mesmo foram realizados alguns procedimentos, tais como: destorroamento, peneiramento, determinação da umidade e, por fim, a compactação com a determinação dos índices físicos convenientes.

Após a coleta das amostras e seu encaminhamento para laboratório, as amostras devem passar por um processamento inicial. Este consistiu no encaminhamento do solo para um almofariz a fim de proporcionar o destorroamento com o uso do pistilo e, logo após, a amostra resultante foi submetida ao peneiramento na peneira de 4#, isto é, uma abertura de 4,8 mm (Figura 5), com o intuito de diminuir a granulometria da parcela que será submetida ao processo de compactação, conforme as orientações da ABNT NBR 7182:2016.

Figura 5 – Peneiramento da amostra antes do processo de compactação



Fonte: AUTOR, 2019.

Depois de seu processamento inicial para a compactação mediu-se posteriormente a umidade gravimétrica, isto é, o percentual de água aderido ao solo em relação à massa total de solo seco (Equação 1).

$$h = \frac{m_w}{m_s} = \frac{m_n - m_s}{m_s} \quad (1)$$

Dessa forma, a amostra úmida foi colocada em uma cápsula metálica e o conjunto foi submetido a secagem de 24 horas em estufa a uma temperatura de 110°C. Sendo assim, comparou-se o peso antes e depois desse procedimento com a utilização de uma balança de resolução de 0,01 g e o valor resultante foi adotado como sendo a massa de água no solo. Os dados da umidade das 4 amostras analisadas estão apresentados nos Apêndices A, B, C e D. A figura 6 ilustra esta retirada da amostra para a realização do ensaio.

Figura 6 – Retirada da amostra úmida do solo compactado



Fonte: AUTOR, 2019.

No que tange o ensaio de compactação, realizou-se a caracterização quanto a umidade ótima e massa específica aparente seca para as 4 amostras analisadas. Para tanto, como procedimento individual, adicionou-se água até o solo adquirir consistência a fim de homogeneizar a amostra. Logo após, esta é transferida para o cilindro que serve como molde para a compactação do solo. Neste, a compactação é dividida em três camadas de espessuras iguais e em cada uma são aplicadas um total de 26 golpes de um soquete que cai de uma altura aproximada de 0,305 m, conforme as prescrições da ABNT NBR 7182:2016. A figura 7 exhibe o momento da aplicação dos golpes durante a realização do ensaio.

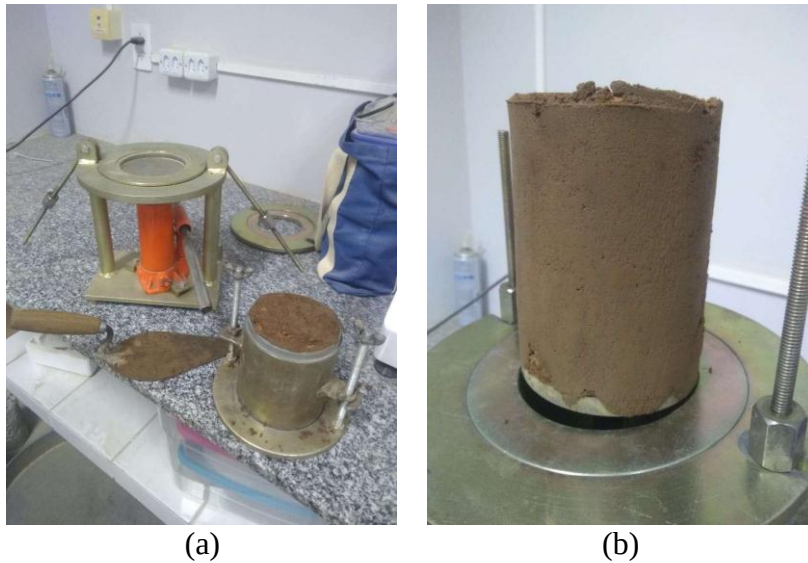
Figura 7 – Aplicação da energia de compactação durante o ensaio



Fonte: AUTOR, 2019.

Após a compactação das três camadas removeu-se o colarinho e a base, aplainando a superfície do material à altura do molde e pesando posteriormente o conjunto do cilindro com o solo úmido compactado. Realizado o procedimento descrito, retirou-se a amostra do molde com auxílio do extrator. As figuras 8 (a) e (b) explicitam estas etapas do ensaio e as ferramentas utilizadas para o desenvolvimento.

Figura 8 – (a) Molde, extrator e colher de pedreiro; (b) Amostra de solo compactada removida



Fonte: AUTOR, 2019.

Por fim, desmanchou-se o material compactado até que o mesmo possa ser passado pela peneira 4# (4,8mm), misturando-o em seguida ao restante da amostra inicial, para o caso de reuso do material, adicionando água à amostra homogeneizada numa proporção de um aumento de 2% da umidade aproximadamente, da situação anterior. Repete-se o processo por mais quatro vezes para conseguir os dados necessários para a curva.

Após este processo, os parâmetros da curva de compactação foram obtidos a partir dos índices físicos da amostra, de modo que, o peso específico natural (Equação 2) foi obtido a partir dos dados da massa do solo e do volume do cilindro. O peso do cilindro é padronizado e possui valor de 2380 g. Esses valores estão contidos no Apêndice E do presente trabalho. Por fim, o peso específico aparente seco foi obtido através da relação entre o natural e a umidade gravimétrica calculada anteriormente (Equação 3).

$$\gamma_n = \frac{P_{cilindro+ solo} - P_{cilindro}}{V_{cilindro}} \quad (2)$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_n}{1 + h} \quad (3)$$

Após a obtenção do peso específico aparente seco e de sua umidade correspondente, traçou-se a curva característica de cada amostra de solo pelo *software* Origin 8.0 para os 5 pontos analisados, sendo 3 deles no ramo seco e 2 no ramo úmido, além de identificar o ponto de umidade ótima e peso específico máximo por análise gráfica.

Na análise estatística realizou-se um intervalo de confiança através do teste de hipótese de uma distribuição de probabilidade *t-student* a fim de definir a faixa de variação provável com uma confiabilidade de 95% para o trecho analisado da BR-226. Além disso, uma correlação linear foi empregada para verificação dos ajustes dos dados à reta de regressão e os dados foram analisados a partir da variação em torno da média, isto é, o desvio padrão.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ANÁLISE DAS CURVAS DE COMPACTAÇÃO

A partir do ensaio de compactação e de umidade dos corpos de prova moldados obteve-se, portanto, os resultados de pontos apresentados na Tabela 2 para as quatro amostras retiradas ao longo da BR-226, em Pau dos Ferros/RN.

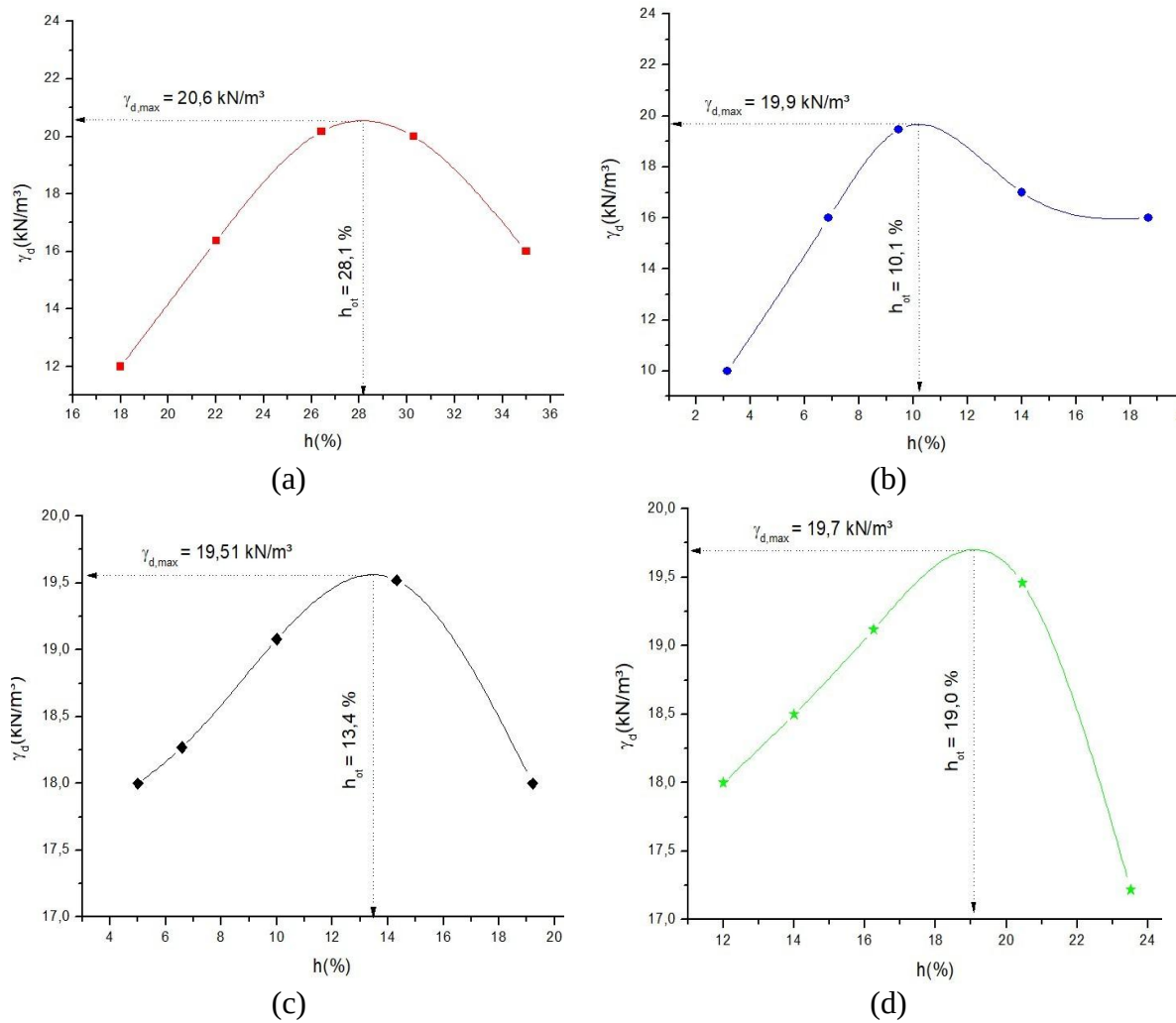
Tabela 2 – Valores de Umidade versus Peso específico seco para cinco pontos da curva de compactação relativos às quatro amostras analisadas

Amostra 1		Amostra 2		Amostra 3		Amostra 4	
h (%)	γ_d (kN/m ³)	h (%)	γ_d (kN/m ³)	h (%)	γ_d (kN/m ³)	h (%)	γ_d (kN/m ³)
18,00	12,00	3,14	10,00	5,00	18,00	12,00	18,00
22,00	16,37	6,87	16,00	6,58	18,27	14,00	18,50
26,42	20,17	9,45	19,47	10,00	19,08	16,25	19,12
30,27	20,00	14,00	17,00	14,31	19,52	20,45	19,46
35,00	16,00	18,67	16,00	19,21	18,00	23,52	17,22

Fonte: AUTOR, 2019.

Dessa forma, ao plotar as curvas de compactação para as quatro amostras, tais como apresentados nas Figuras 4 (a), (b), (c) e (d) para as Amostras 1, 2, 3 e 4, respectivamente, obteve-se como umidades ótimas e pesos específicos máximos os valores apresentados na Tabela 2 a partir do ensaio de Proctor Normal.

Figura 9 – Curvas de compactação para o ensaio de Proctor Normal. (a) Amostra 1; (b) Amostra 2; (c) Amostra 3; (d) Amostra 4.



Fonte: AUTOR, 2019.

Tabela 3 – Valores de umidade ótima e peso específico máximo para as quatro amostras analisadas, bem como a média e o desvio padrão dos valores

Amostra	$h_{ot} (\%)$	$\gamma_{d,max} (\text{kN/m}^3)$
1	28,10	20,60
2	10,10	19,90
3	13,40	19,51
4	19,00	19,70
Média	17,65	19,93
Desvio Padrão	7,88	0,48

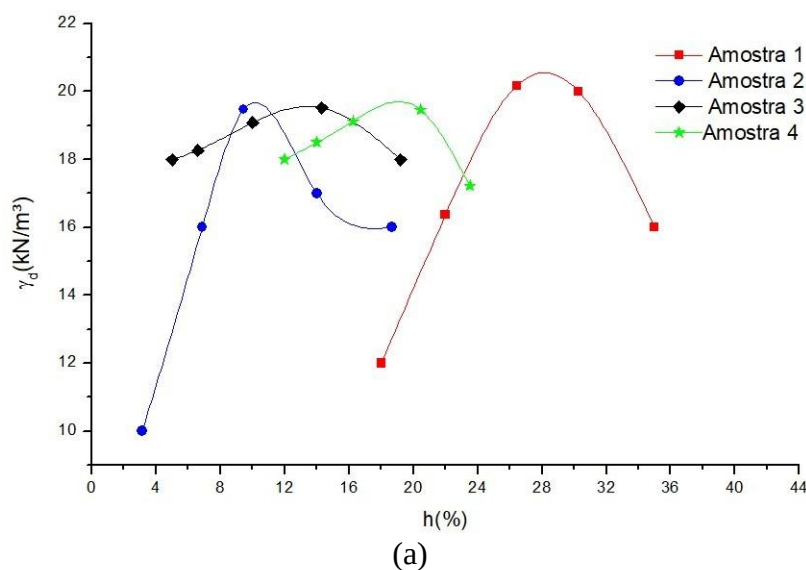
Fonte: AUTOR, 2019.

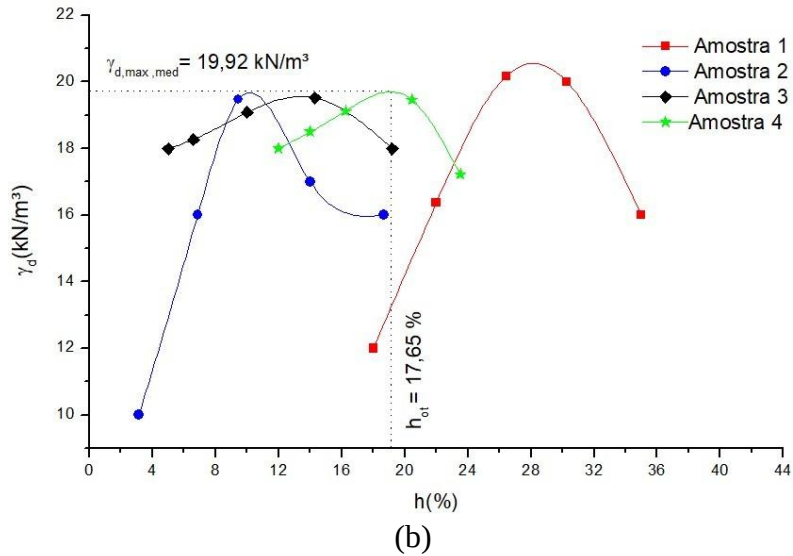
Percebe-se a partir da Tabela 3 que os valores de umidade variaram muito em torno da média, pois apresentam um desvio padrão de 7,88%. Por outro lado, os valores de umidade ótima se comportaram bem em torno da média, havendo um desvio padrão de apenas 0,48 kN/m³.

Essas variações ficam ainda mais explícitas a partir da análise das Figura 10, onde os picos de cada curva possuem valores próximos à média, isto é, 19,93 kN/m³, comprovados pelo baixo desvio padrão entre os dados. Dessa forma, infere-se que o valor de $\gamma_{d,max}$ ao longo do trecho da BR-226 analisada segue um padrão quanto ao valor do peso específico aparente seco.

Além disso, segundo Das (2014), a curva da Amostra 2, isto é, que forma um pico e meio, é típica de solos com limites de liquidez menor que 30, enquanto as demais que possuem forma sino possuem LL de 30 a 70. Percebe-se, além disso, que o valor de peso específico aparente seco e umidade médias recaem aproximadamente no pico da curva de compactação da Amostra 4, sendo esta, portanto, a que mais representa o comportamento das amostras ao longo do trecho de análise (Figura 10 (b)).

Figura 10 – (a) Comparação entre as curvas de compactação

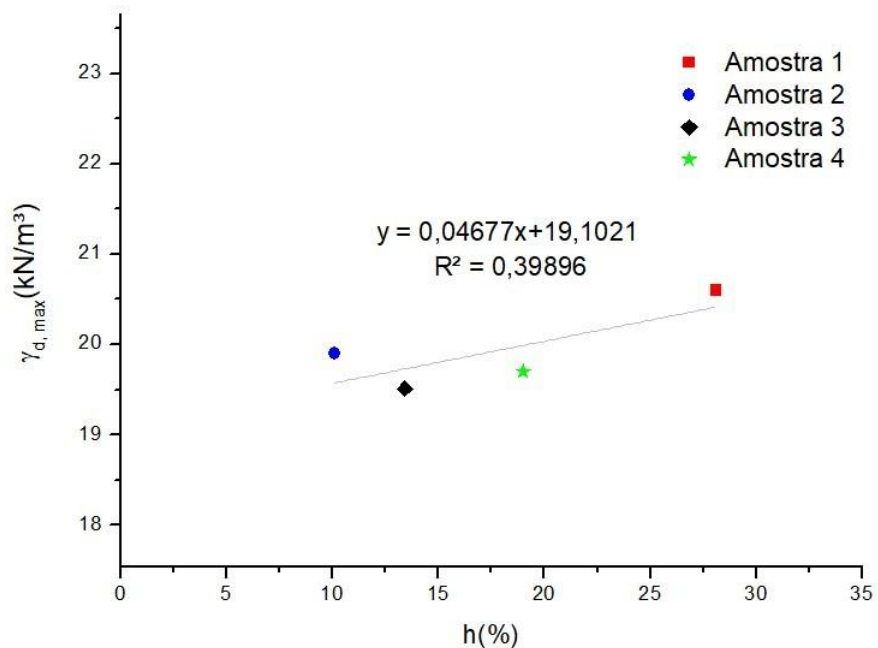




Fonte: AUTOR, 2019.

Além dos fatos citados, verificou-se também que embora nas Amostras 1, 3 e 4 o aumento da umidade tenha elevado o valor de $\gamma_{d,max}$, não há uma correlação linear entre a umidade e o peso específico aparente seco, pois o coeficiente de correlação entre os dados obtidos *in situ* foi de 0,39896, conforme ilustrado na Figura 11, logo não há como prever o valor de $\gamma_{d,max}$ a partir de h , ou *vice versa*, ao longo do trecho analisado.

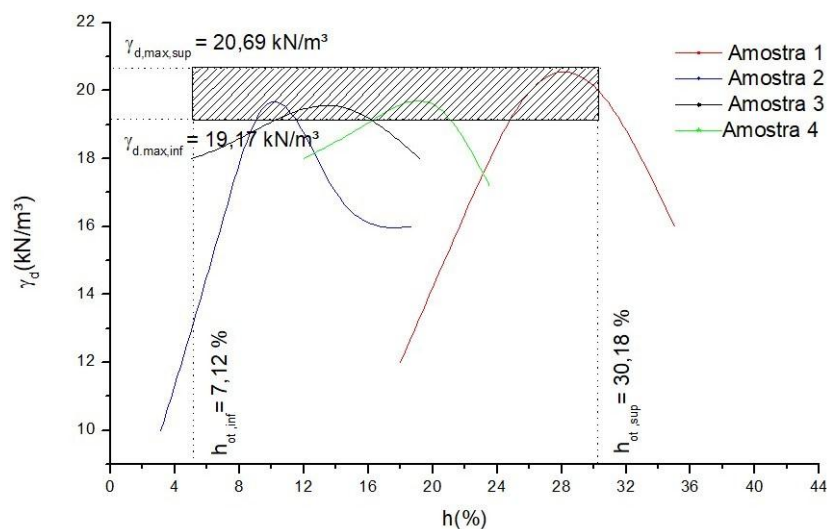
Figura 11 – Dispersão dos dados e tentativa de correlação linear



Embora não seja possível determinar uma relação de previsão de $\gamma_{d,max}$ versus h , pode-se determinar uma faixa de variação para esses parâmetros com a determinação estatística do intervalo de confiança ou tolerância. Neste caso, para uma confiabilidade de 5% na distribuição t-student obteve-se uma tolerância de 12,53% e 0,76 kN/m³ para a umidade e peso específico aparente seco, respectivamente.

A partir disso, marcou-se a região de probabilidade de encontrar os picos das curvas de compactação, conforme a Figura 12, onde para h o intervalo de confiança foi de $17,65 \pm 12,53\%$ e para $\gamma_{d,max}$ teve o valor de $19,93 \pm 0,76$ kN/m³. Ressalta-se que a pequena tolerância para o peso específico aparente seco é atribuída ao baixo desvio padrão entre os dados que compõem sua média, enquanto a situação contrária é atribuída para explicar a ampla faixa de variação para a umidade.

Figura 12 – Região de probabilidade de encontrar um pico da curva de compactação da região analisada



Fonte: AUTOR, 2019.

É notório que é possível determinar uma região de maior probabilidade de encontrar os picos das curvas de compactação, mas para condições de campo analisada as Figuras 4(a) e 4(b) nada sugerem sobre um dado mais assertivo de umidade para conseguir um melhor grau de compactação do solo para o recorte espacial analisado dada a ampla faixa de variação desse parâmetro geotécnico.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Embora a sondagem do subsolo e a caracterização desses sejam procedimentos normalmente negligenciados, compreender o comportamento dos solos é de extrema importância para a elaboração de um projeto geotécnico que apresente um custo menor e uma maior segurança independente de qual seja o tipo ou o porte da obra.

Dentre os vários ensaios empregados no sentido da caracterização das propriedades do solo, a compactação se destaca por fornecer informações suficientes, como energia necessária a ser empregada, umidade ótima e qual a redução nos vazios do solo através realização desse procedimento.

Nos quatro ensaios realizados, verificou-se que todos os dados apresentaram peso específico aparente seco próximos, apresentando uma pequena variação em torno da média. Entretanto, no que se refere a melhor umidade de compactação dos solos analisados foi comprovado que não há uma recomendação em torno de um único valor, pois os dados nesse sentido mostraram-se muito dispersos.

Logo, para um maior entendimento sobre a região de onde as amostras foram retiradas, recomenda-se o emprego de mais pontos para que a estatística dos dados se aproxime mais da população das amostras. Somente assim é possível refinar a análise e inferir com mais propriedade se a faixa de variação proposta é realmente confiável.

Em trabalhos futuros recomenda-se que sejam realizados vários pontos de coleta ao longo do município. Dessa forma é possível criar um mapa de como esses parâmetros variam ao longo das feições espaciais de Pau dos Ferros de modo a corroborar em pesquisas futuras ou até mesmo na gestão da região em questão.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182:2016**: Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 10 p.

COELHO, M. R.; FIDALGO, E. C.; SANTOS, H. G. dos. Solos: tipos, suas funções no ambiente, como se formam e sua relação com o crescimento das plantas. **Embrapa Solos**, Lavras, Mg, p.1-18, dez. 2013.

DAS, B. M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. 8 ed. Tradução All Tasks. São Paulo. Cengage Learning. 2014.

GURGEL, J. **Apostila de Solos**. Mossoró - Rn: Ifrn, 2015. 52 p.

GIL, A.C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6º ed. São Paulo: Atlas, 2008.

LEPSCH, I. F. **Formação e conservação dos solos**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. 216 p.

LIMA, V. C.; LIMA, M. R. Formação do solo. UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ. DEPARTAMENTO DE SOLOS E ENGENHARIA AGRÍCOLA. **O solo no meio ambiente: abordagens para professores do ensino fundamental e médio e alunos do ensino médio**. Curitiba: Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, p. 1-10, 2007.

MEDRADO, Wallen Alexandre. **Caracterização Geotécnica de Solo da região norte de Minas Gerais para aplicação em obras rodoviárias**. Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Ouro Preto. CTG. Engenharia Geotécnica, 2009.

PEDRON, F. de. A.; DALMOLIN, R. S. D.; AZEVEDO, A. C. de. Solos Urbanos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 5, p.1647-1653, set. 2004

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

SANTOS, Jorge Hélio Ferreira dos. **O Estudo do Subsolo**. 2012. 30 f. Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF, Juiz de Fora, 2012. Cap. 2. Disponível em: <<https://www.passeidireto.com/arquivo/32644838/2-o-estudo-do-subsolo>>. Acesso em: 30 abr. 2019.

REICHERT, José Miguel; SUZUKI, Luis Eduardo Akiyoshi Sanches; REINERT, Dalvan José. **Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Santa Maria, p.50-121, jan. 2007.

SOUZA, V. C. M., RIPPER, T. **Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto**. São Paulo: Pini, 1998.

APÊNCICE

Apêndice A – Dados do ensaio de umidade gravimétrica para a Amostra 1

	AMOSTRA 1			
	CAPSULA + SOLO ÚMIDO (g)	CÁPSULA + SOLO SECO (g)	PESO DA ÁGUA (g)	PESO DO SOLO SECO (g)
PONTO 1	51,8	39,3	12,5	28,3
PONTO 2	67,7	55,5	12,2	44,5
PONTO 3	64,8	52,3	12,5	41,3
PONTO 4	64,9	53,3	11,6	42,3
PONTO 5	80,1	68,2	11,9	57,2

Apêndice B – Dados do ensaio de umidade gravimétrica para a Amostra 2

	AMOSTRA 2			
	CAPSULA + SOLO ÚMIDO (g)	CÁPSULA + SOLO SECO (g)	PESO DA ÁGUA (g)	PESO DO SOLO SECO (g)
PONTO 1	52,5	49,4	3,1	38,4
PONTO 2	55	51,2	3,8	40,2
PONTO 3	60,2	58,7	1,5	47,7
PONTO 4	64,3	56,9	7,4	45,9
PONTO 5	76,8	67,5	9,3	56,5

Apêndice C – Dados do ensaio de umidade gravimétrica para a Amostra 3

	AMOSTRA 3			
	CAPSULA + SOLO ÚMIDO (g)	CÁPSULA + SOLO SECO (g)	PESO DA ÁGUA (g)	PESO DO SOLO SECO (g)
PONTO 1	67,7	64,2	3,5	53,2
PONTO 2	68,5	61,3	7,2	50,3
PONTO 3	61,3	58,2	3,1	47,2
PONTO 4	61,3	57,2	4,1	46,2
PONTO 5	68,7	59,4	9,3	48,4

Apêndice D – Dados do ensaio de umidade gravimétrica para a Amostra 4

	AMOSTRA 4			
	CAPSULA + SOLO ÚMIDO (g)	CÁPSULA + SOLO SECO (g)	PESO DA ÁGUA (g)	PESO DO SOLO SECO (g)
PONTO 1	43,9	39,3	4,6	28,3
PONTO 2	60	55,5	4,5	44,5
PONTO 3	48,7	42,3	6,4	31,3
PONTO 4	71,4	63,3	8,1	52,3
PONTO 5	65,1	54,8	10,3	43,8

Apêndice E – Dados do ensaio de compactação para as Amostras

	AMOSTRA 1	AMOSTRA 2	AMOSTRA 3	AMOSTRA 4
PESO CILINDRO + PONTO 1 (g)	4229,8	4270,9	4116,8	4150,8
PESO CILINDRO + PONTO 2 (g)	4299,5	4381,1	4385,8	4384,3
PESO CILINDRO + PONTO 3 (g)	4347,5	4577,3	4335,7	4386,2
PESO CILINDRO + PONTO 4 (g)	4452,9	4495,8	4340,9	4380,2
PESO CILINDRO + PONTO 5 (g)	4395,9	4460,9	4369,7	4345,2