



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO

CENTRO MULTIDISCIPLINAR PAU DOS FERROS

BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

CICERO RENATO LIMA

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE UM SOLO COMPACTADO
EM DIFERENTES UMIDADES E SUBMETIDO À VARIAÇÃO DO GRAU DE
SATURAÇÃO**

PAU DOS FERROS/RN

2019

CICERO RENATO LIMA

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO DE UM SOLO COMPACTADO
EM DIFERENTES UMIDADES E SUBMETIDO À VARIAÇÃO DO GRAU DE
SATURAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal Rural do Semi-Árido
como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me. José Daniel Jales Silva

PAU DOS FERROS/RN

2019

CICERO-RENATO LIMA

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO DE UM SOLO COMPACTADO
EM DIFERENTES UMIDADES E SUBMETIDO À VARIAÇÃO DO GRAU DE
SATURAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal Rural do Semi-Árido
como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil.

APROVADA EM: 14/03/2019

BANCA EXAMINADORA

José Daniel Jales Silva

Orientador, Prof. Me. José Daniel Jales Silva (UFERSA)

Presidente

Marília Cavalcanti Santiago

Prof. Me. Marília Cavalcanti Santiago (UFERSA)

Primeiro Membro Examinador

Jennef Carlos Tavares

Prof. Jennef Carlos Tavares (UFERSA)

Segundo Membro Examinador

© 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.

La Lima, Cicero Renato.
 AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO DE UM
 SOLO COMPACTADO EM DIFERENTES UMIDADES E
 SUBMETIDO À VARIAÇÃO DO GRAU DE SATURAÇÃO / Cicero
 Renato Lima. - 2019.
 50 f. : il.

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

 1. Estabilidade. 2. Umidade Ótima. 3.
Compressão Simples. I. Jales Silva , José Daniel
, orient. II. 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.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me dar saúde e forças para superar todas as dificuldades e realizar este trabalho, Foi Ele em que nos dias mais sombrios estava lá ao meu lado para me erguer quando eu não mais tinha forças para me levantar.

Agradeço a meus pais, Maria Margarida e José Patrício, e irmãos, Patrício Filho, Jadson Lima, e Ricardo Lima, que com simples palavras de afeto e muito amor me deram muito incentivo e apoio emocional para que eu fosse em busca de um sonho. Eu amo vocês com todo meu coração.

Agradeço a minha namorada, Larissa Quental, por todas as palavras que me acalmaram nos momentos de estresse, por estar presente em cada etapa dessa longa jornada universitária. Você foi e é meu porto seguro. Eu te amo muito minha pequena.

Agradeço a meu Orientador, Daniel Jales, por todo tempo disponibilizado, pelo companheirismo e paciência em toda a caminhada. Obrigado pelo privilégio de ter tido sua ajuda e total dedicação para a conclusão deste trabalho. Sem dúvida é um espelho de profissional.

Agradeço a todos os professores por me proporcionar o conhecimento não apenas racional, mas a manifestação do caráter e afetividade da educação no processo de formação profissional.

Agradeço ao grupo de pesquisa NAU, na figura do professor Antônio Leite, que me guiou da melhor maneira para enfrentar as adversidades encontradas nessa caminhada.

Agradeço a todos meus amigos que ganhei na universidade e que me apoiaram em todo esse percurso, em especial aqueles que considero parte da família, Alice Costa, Cida Cartaxo e Túlio César, minha equipe. Aos meus irmãos, Sávio Felipe e Léo Fontes, que tantas vezes se dispuseram a me apoiar em todas as horas.

Agradeço a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

“Se cheguei até aqui foi porque me apoiei no ombro dos gigantes.”

Isaac Newton

RESUMO

O estudo correto acerca das características dos solos é de suma importância para a Engenharia quando o assunto é movimento de massa. Deve-se ter ciência de que o maciço é submetido a forças externas que farão com o que o material se comporte das mais diferentes maneiras, dependendo do modo ou situação em que ele é solicitado. Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo estudar e verificar o comportamento de um solo característico do município de Pau dos Ferros/RN quando compactado em diferentes umidades e submetido a uma variação no seu grau de saturação, situação bem comum em obras de engenharia. O percurso metodológico foi desde a coleta do maciço de solo até a confecção dos corpos de provas. A compactação forneceu uma curva de compactação que evidenciou a umidade ótima e deixou aberto a análise de novos corpos de provas em ramos distintos da mesma curva. O estudo comprovou que a saturação de solos compactados tem uma grande influência em se tratando de sua resistência a compressão. A variação de resistência para o ramo seco foi bem relevante, chegando a 70% no ganho de resistência quando se diminuía o grau de saturação pós compactação, enquanto que na umidade ótima esse ganho fora de apenas de 4%. As perdas de resistências chegaram a 60% na umidade ótima após um aumento no seu grau de saturação, enquanto que no ramo seco o corpo perdeu apenas 17%. O ramo úmido se comportou de maneira ainda mais crítica, não apresentando resistência para seus estados iniciais e saturados pós compactação. Porém apresentou resistência maior que a ótima quando reduzindo seu grau de saturação pós saturação.

Palavras chave: Estabilidade; Umidade Ótima; Compressão Simples.

ABSTRACT

The dictionary is about the characteristics of soils of great importance for an engineering when it comes to mass movement. One should be aware of what the massive with the external forces that serve as raw material if the most different ways of subordinating themselves to the situation. Thus, the present work aims to study and verify the behavior of a characteristic soil of the municipality of Pau dos Ferros / RN when compacted in the different humidities and submitted to a variation in its degree of saturation, the situation is common in engineering works . The methodological path was from a collection of the soil mass to the preparation of the specimens. The compaction provided a compaction curve that showed an excellent condition and an analysis of new specimens in the distinct branches of the same curve. The study was proven with a saturation of compact soils with a great influence in the treatment of its resistance to compression. The resistance variation for the dry branch was relevant, reaching 70% in the force gain when the degree of saturation after the compression decreased, whereas, in the larger dose, this gain was only 4%. Already the resistance losses reached 60% last night in an increase in their degree of saturation, whereas in the dry branch the body was found only in 17%. and saturated post-compaction, but at more than a night out from the saturation saturation post saturation.

Keywords: Stability; Optimal Humidity; Simple Compression.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Decomposição da Rocha.....	14
Figura 2 – Perfil de solo residual de decomposição de gnaisse.....	16
Figura 3 – Fases do Solo.....	16
Figura 4 – Terminologia do Sistema Unificado.....	18
Figura 5 – Limites de Atterberg dos solos.....	20
Figura 6 – Compactação para receber um pavimento.....	20
Figura 7 – Curva de Compactação.....	21
Figura 8 – Estrutura do solo compactado.....	22
Figura 9 – Curva de Compactação.....	24
Figura 10 – Resistência ao Cisalhamento.....	24
Figura 11 - Porcentagem de solos colapsíveis encontrados nas regiões do Brasil.....	26
Figura 12 - Trado do tipo escavadeira.....	27
Figura 13 - Locais de coleta do material.....	27
Figura 14 – Destorroamento do Solo.....	28
Figura 15 – Ordem das Peneiras.....	30
Figura 16 - Cápsulas para cálculo do teor de umidade.....	31
Figura 17 – Frasco de Chapman.....	32
Figura 18 – Materiais para compactação.....	33
Figura 19 – Amostras que foram para estufa: Ramo úmido, ramo seco e umidade ótima.....	35
Figura 20 – Saturação do solo compactado.....	35
Figura 21 - Ensaios Tátil-visual.....	37
Figura 22 – Curva Granulométrica.....	38
Figura 23 – Corpo de prova deformado compactado no ramo úmido.....	42
Figura 24 – Ruptura do tipo frágil da amostra.....	43
Figura 25 – Plano de ruptura cisalhante.....	43
Figura 26 - Danos em edificações ocasionados pelo colapso do solo.....	45

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Curva de Compactação e Saturação.....	40
Gráfico 2 – Resistência a Compressão: Umidade Ótima, 2% acima e 2% abaixo.....	41
Gráfico 3 - Resistência a Compressão: Amostras compactadas após 2 horas.....	42
Gráfico 4 - Resistência a Compressão: Amostras compactadas e saturadas em 2%.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Índices Físicos.....	17
Tabela 2 - Classificação dos solos segundo a granulometria.....	19
Tabela 3: Características Inerentes a cada Energia de Compactação.....	32
Tabela 4 – Massas Retidas Acumuladas.....	37
Tabela 5 – Amostras para Compactação.....	39
Tabela 6 – Peso Específico Seco e Saturação.....	40

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	13
2.1 GERAL.....	13
2.2 ESPECÍFICOS	13
3 REVISÃO TEÓRICA	14
3.1 MECÂNICA DOS SOLOS NA ENGENHARIA CIVIL	14
3.2 CLASSIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS	14
3.3 IDENTIFICAÇÃO DOS SOLOS	18
3.4 COMPACTAÇÃO	20
3.5 RESISTÊNCIA DOS SOLOS	22
3.5.1 RESISTÊNCIA DOS SOLOS COMPACTADOS.....	23
3.6 COLAPSIBILIDADE DOS SOLOS	25
4 METODOLOGIA	27
4.1 PESQUISA DOCUMENTAL.....	27
4.2 VISITA IN LOCO	27
4.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA.....	29
4.3.1 Tátil Visual.....	29
4.3.2 Granulométrico.....	30
4.3.3 Massa Específica e Umidade.....	30
4.2.4 Compactação	32
4.4 ENSAIO MECÂNICO	34
5 RESULTADO E DISCUSSÕES	36
5.1 ENSAIOS	36
5.1.1 Tato-Visual.....	36
5.1.2 Granulometria.....	37
5.1.3 Teor de Umidade e Massa Específica	38
5.1.4 Compactação	39
5.1.5 Resistência à Compressão	41
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	47
REFERÊNCIAS	48

1 INTRODUÇÃO

A engenharia civil é uma área profissional com várias especialidades. A Mecânica dos Solos é uma ciência que possui grande relevância nesse cenário uma vez que estuda o comportamento das massas de solos onde as grandes obras da engenharia são assentadas (SOUSA, 2006). É nesse sentido que, o devido estudo sobre a maneira como o local irá reagir às ações aplicadas, por diversas circunstâncias, traz a importância de um aprofundamento nas teorias e análises sobre as variações dessas características.

Na compactação, ocorre uma redução no índice de vazios dos solos, permitindo ganhos na resistência desse material. Porém, estes ganhos são dependentes de variáveis intrínsecas como a umidade utilizada no processo e, ainda, ao grau de saturação nos períodos seguintes.

Dessa maneira, a compreensão sobre a resistência dos solos quando submetidos a ações externas se faz de suma importância para o aprimoramento de técnicas e medidas que possam ser incorporadas ao tradicional uso e ocupação de uma região. O presente trabalho traz um estudo acerca da resposta de um solo oriundo da cidade de Pau dos Ferros – RN, submetido a ensaios de compressão quando compactado em diferentes umidades e submetidos a uma variação no seu grau de saturação. Além disso, temos a possibilidade de avaliar outras características ou comportamentos que se façam presentes e estudar a possibilidade de manuseio desse tipo de solo em obras de engenharia aos quais eles seriam aplicados.

Cada solo, em razão de suas características, pode se comportar de forma diferenciada. E, devido à crescente urbanização de Pau dos Ferros, bem como largas variações de saturação atrelados à regimes pluviométricos irregulares, torna-se necessário a investigação dessa situação para os solos locais.

Portanto, o estudo justifica a busca por novos parâmetros que nos conduzam a uma avaliação sistêmica do comportamento de um solo usados em toda uma região, e que possa trazer respostas para possíveis problemas encontradas em campo, quando diz respeito a obras de grande porte que se faz uso de uma grande massa de solo.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

- Avaliar o efeito da variação do grau de saturação, pós-compactação, na resistência à compressão de um solo oriundo da cidade de Pau dos Ferros – RN.

2.2 ESPECÍFICOS

- Caracterizar e classificar o solo analisado;
- Determinar a umidade ótima e peso específico máximo no ensaio de compactação;
- Avaliar a resistência do solo compactado em diferentes umidades;
- Estudar a resistência à compressão axial não confinada com alteração do grau de saturação.

3 REVISÃO TEÓRICA

3.1 MECÂNICA DOS SOLOS NA ENGENHARIA CIVIL

Todas as obras de engenharia civil, de uma forma ou de outra, apoiam-se sobre o solo. Portanto, deve-se atentar ao comportamento do terreno em que o empreendimento será assentado ou até mesmo utilizando o próprio solo como elemento de construção, como por exemplo, as barragens e os aterros de estradas. A mecânica dos solos é uma área da engenharia civil que procura prever o comportamento de maciços terrosos quando sujeitos a tensões, como por exemplo, fundações, ou quando são aliviadas, como por exemplo, em escavações (CAPUTO, 1996; SOUSA PINTO, 2006). É uma área em que a preocupação com o desempenho e atuação do material influi diretamente na estabilidade e no comportamento funcional e estético do maciço.

Karl von Terzagh é considerado pela maioria dos autores da área, a exemplo Das (2014), Caputo (1996), Sousa Pinto (2006), como o fundador dessa ciência. Ele realizou trabalhos de bastante representatividade com relação ao adensamento dos solo e papel das pressões da água no estudo nas tensões nos solos e ainda a apresentação da solução matemática para a evolução dos recalques das argilas, um marco para esse novo ramo da engenharia civil. Pode-se citar também, importantes trabalhos oriundos da área que deixaram suas marcas nos séculos passados, dentre eles temos os clássicos de Coulomb, 1773, Rankine, 1856 e Darcy, 1856. (SOUSA PINTO, 2006). Como diria o autor:

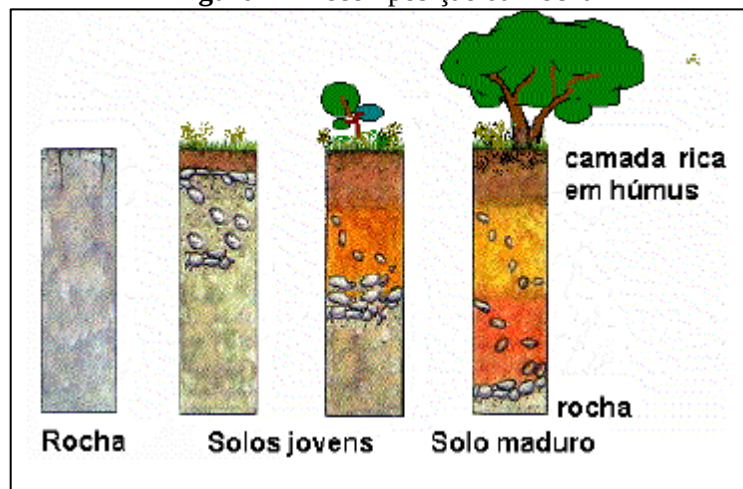
“A Engenharia Geotécnica é uma arte que se aprimora pela experiência, pela observação e análise do comportamento das obras, para o que é imprescindível atentar para as peculiaridades dos solos com base no entendimento dos mecanismos de comportamento, que constituem a essência da Mecânica dos Solos.” (SOUSA PINTO, 2006, p.14)

3.2 CLASSIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS

Os solos são originados a partir das rochas, que constituem a crosta terrestre, sujeitas a intempéries, e consequentemente, a sua decomposição. Esse tipo de transformação é oriunda dos agentes físicos e químicos que atuam em seu maciço.

O ataque químico, através de hidratação, hidrólise, oxidação, lixiviação, troca de cátions, carbonatação que provem dos seres vivos existentes em determinada região contribuem para esse desgaste e consequentemente formação do solo. Na Figura 1 são retratadas as etapas em que o intemperismo age de forma contínua na decomposição da rocha.

Figura 1 - Decomposição da Rocha



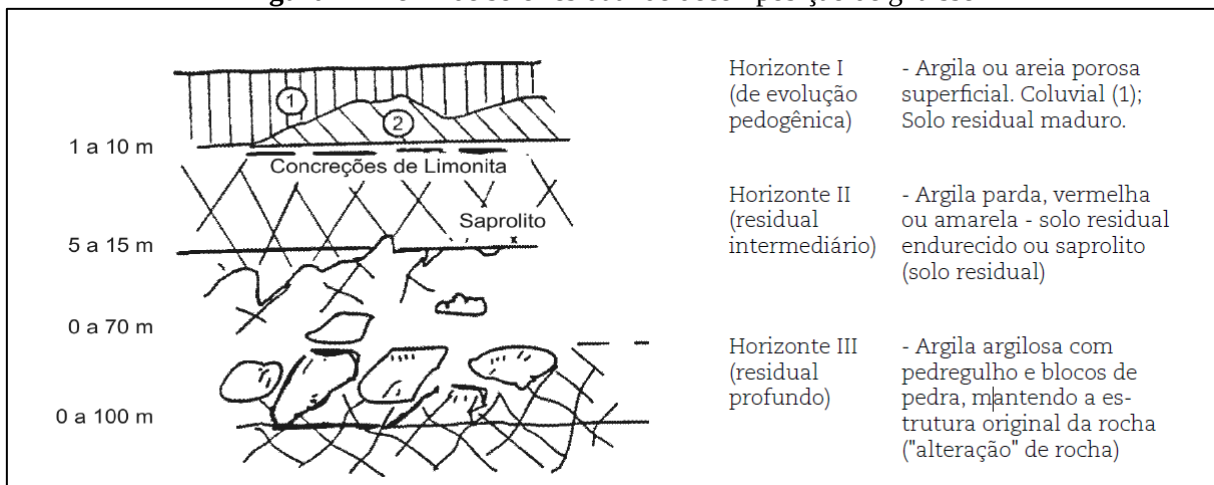
Fonte: Sousa Pinto, 2006.

Os solos podem ainda ser classificados em dois grandes grupos: solos residuais e solos transportados. É mais uma maneira para que se possa identificar o comportamento do material em diversas circunstâncias. Esses grupos se diferenciam apenas pelo local onde ocorreu o desgaste da rocha mãe (rocha que deu origem ao solo). Os solos residuais são aqueles resultantes da decomposição das rochas que se encontram no próprio local em que formaram. Para que eles ocorram, é necessário que a velocidade de decomposição da rocha seja maior do que a velocidade de decomposição por agentes externos. Para Vargas (1981) os solos residuais estão dispostos em horizontes com grau de intemperização decrescente, são eles:

- **Solo residual maduro:** superficial ou posto por baixo a um horizonte “poroso” ou “húmico”, e que perdeu toda a estrutura original da rocha-mãe e tornou-se relativamente homogêneo.
- **Saprolito ou solo saprolítico:** solo que mantém a estrutura original da rocha-mãe, mas perdeu a consistência da rocha. Visualmente pode confundir-se com uma rocha alterada, mas apresenta pequena resistência ao manuseio. É também chamado de solo residual jovem ou solo de alteração de rocha.
- **Rocha alterada:** horizonte em que a alteração progrediu ao longo de fraturas ou zonas de menor resistência, deixando intactos grandes blocos da rocha original.

A Figura 2 apresenta os horizontes de uma forma mais clara e objetiva para facilitar o entendimento desse processo de intemperização.

Figura 2 – Perfil de solo residual de decomposição de gnaiss

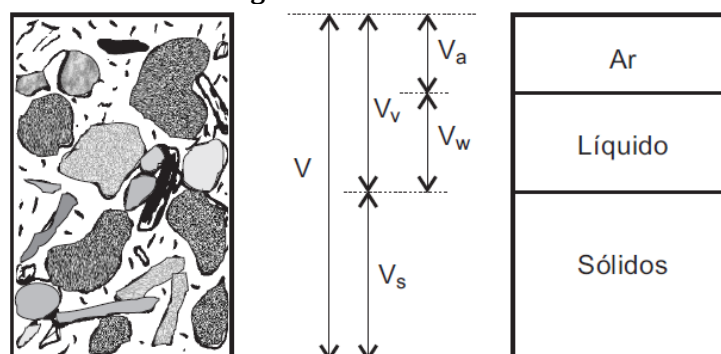


Fonte: Vargas, 1981.

O segundo grande grupo, que diz respeito aos solos transportados, relaciona aquele maciço que foi originado distante do local atual por algum agente transportador. O agente transportador influi na classificação do solo, como por exemplo, solos coluvionares (ação da gravidade), solos aluvionares (ação da água), eólicos (ação do vento), *drifts* (ação das geleiras), dentre outras.

É muito importante entender como o solo se comporta principalmente no que diz respeito a sua estrutura. Dessa forma, todo o maciço é composto por um volume sólido, que representa as partículas de solo existentes na estrutura, e a outra parte denominada volume de vazios, é composta por água e ar. Portanto, sabe-se que o solo é formado por três fases, partículas sólidas, água e ar. Logo, a conduta do maciço depende relativamente da variação dessas três fases, e ainda, é por meio delas que pode-se atribuir novas características a amostra. A Figura 3 retrata de maneira mais explícita essa relação entre volume e peso das três fases existentes.

Figura 3 – Fases do Solo



Fonte: Sousa Pinto, 2006.

Os índices físicos expressam as proporções entre os pesos e volumes em que acontecem as 3 fases citadas anteriormente. Dessa forma, são definidos como grandezas que possibilitam determinar as propriedades físicas do solo para que se tenha controle de amostras que serão ensaiadas em laboratórios além dos cálculos de esforços presentes. (FREIRE; FILHO, 1979).

Dessa maneira, os índices são obtidos baseando-se nas relações entre essas características vistas anteriormente. Para Sousa Pinto (2006), os índices são dados de maneira resumida na Tabela 1:

Tabela 1 - Índices Físicos

Índice	Descrição	Relação
Umidade	Relação entre o peso da água e o peso dos sólidos	$h = \frac{P_a}{P_s} \cdot 100$
Índice de Vazios	Relação entre o volume de vazios e o volume das partículas sólidas	$e = \frac{V_v}{V_s}$
Porosidade	Relação entre o volume de vazios e o total	$n = \frac{V_v}{V_t} \cdot 100$
Grau de Saturação	Relação entre o volume de água e o volume de vazios	$S = \frac{V_a}{V_v} \cdot 100$
Peso Específico Sólido	Relação entre o peso das partículas sólidas e o seu volume	$\gamma_g = \frac{P_s}{V_s}$
Peso Específico Água	Relação entre o peso das partículas de água e o seu volume	Adota-se 10kN/m ³
Peso Específico Natural	Relação entre o peso total do solo e seu volume total	$\gamma_{nat} = \frac{P_t}{V_t}$
Peso Específico Seco	Relação entre o peso dos sólidos e o volume total	$\gamma_s = \frac{P_s}{V_t}$

Peso Específico Saturado	Peso específico do solo se viesse a ficar saturado e se isto ocorresse sem variação de volume	$\gamma_s = \frac{P_s}{V_t}$
Peso Específico Submerso	É o peso específico efetivo do solo quando submerso	$\gamma_{\text{sub}} = \gamma_{\text{nat}} - \gamma_a$

Fonte: Autor, 2018.

3.3 IDENTIFICAÇÃO DOS SOLOS

A partir das partículas que os constituem, pode-se identificar os solos através da análise granulométrica e por meio dos índices de consistência. O primeiro ensaio, segundo Sousa Pinto (2006), consiste em basicamente duas etapas, o peneiramento, e a sedimentação.

Outras formas de classificar o solo é a elaborada pelo professor. Ele consiste em identificar o maciço por meio de duas letras, onde a primeira letra representa o tipo principal do solo e a segunda letra corresponde a um dado complementar. A Figura 4 identifica os conjuntos. Os solos podem ter características granulares, podendo nesse caso serem tidos como “bem-graduado”, conferindo ao solo uma característica melhor. (SOUSA PINTO, 2006).

Figura 4 – Terminologia do Sistema Unificado

G	pedregulho
S	areia
M	silte
C	argila
O	solo orgânico
W	bem graduado
P	mal graduado
H	alta compressibilidade
L	baixa compressibilidade
Pt	turfas

Fonte: Sousa Pinto, 2006.

De acordo com Massad (2014), os ensaios de granulometria são realizados com a finalidade de quantificar o percentual de argila e silte existentes entre os grãos de areia, por exemplo. Os dados obtidos orientam eventuais processamentos que devem ser feitos através de peneiramentos e lavagens para que se obtenha um material granular para o uso na obra.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) classifica desde blocos de pedra até os solos. Os principais tipos de solo apresentados, e que também são os mais utilizados em obras civis, como a construção de barragens, são areia, argila e silte. Essa classificação é atribuída em função das dimensões do grão, como mostrado na Tabela 2.

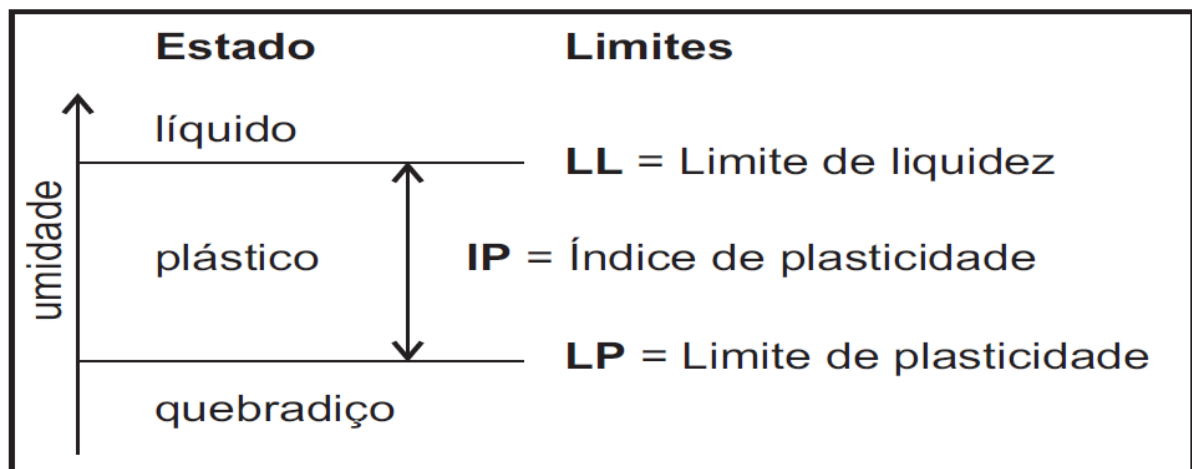
Tabela 2 - Classificação dos solos segundo a granulometria

Rocha	
Bloco de rocha	Acima de 1,0 m
Matacão	25 cm – 1,0 m
Pedra	7,6 cm – 25 cm
Solo	
Pedregulho	4,8 mm – 76 mm
Areia Grossa	2,0 mm – 4,8 mm
Areia Média	0,42 mm – 2,0 mm
Areia Fina	0,05 mm – 0,42 mm
Silte	0,002 mm – 0,05 mm
Argila	Inferior a 0,002 mm

Fonte: ABNT, 1995

O segundo ensaio foi proposto pelo engenheiro químico Atterberg, pesquisador do comportamento dos solos sob o aspecto agrônômico, adaptados e padronizados pelo professor de Mecânica dos Solos, Arthur Casagrande. Quando são verificados grãos de dimensões inferiores a 0,002mm, temos uma grande variação no comportamento do solo. Para isso, Atterberg propôs ensaios com índices que avaliam o comportamento dos solos argilosos na medida que se varia seu teor de umidade. Quando muito úmido, eles se comportam como um líquido; quando perdem parte de sua água, ficam plásticos; e quando mais secos, tornam-se quebradiços. A Figura 5, relaciona os três limites distintos, de acordo com a umidade: Limite de Liquidez (LL) e Limite de Plasticidade (LP) dos solos.

Figura 5– Limites de Atterberg dos solos



Fonte: Sousa Pinto, 2006.

3.4 COMPACTAÇÃO

O entendimento acerca da relação tensão deformação dos solos compactados é de suma importância para a compreensão de instabilidades em estruturas, como por exemplo barragens. Para se ter a percepção dessa reação deve-se estudar os processos que ocorrem nos maciços, como é o caso da compactação. (WIN, 2006).

Quando uma pressão externa é aplicada a um solo não saturado, descrevendo o decréscimo do volume de vazios com expulsão do ar, caracteriza-se o termo compactação (LIMA, 2004). A Pedologia trata a compactação como uma alteração do arranjo das partículas constituintes do maciço (CAMARGO; ALLEONI, 1997). Quando se reduz o volume de vazios existentes no solo, altera-se algumas características físicas do material, como resistência, deformabilidade e permeabilidade além de aumentar o contato entre os grãos e gerar um material mais homogêneo o qual pode ser utilizado em obras de pavimentação, barragens de terra e aterro. A Figura 6 retrata aplicações da compactação em algumas obras civis.

Figura 6 – Compactação para receber um pavimento

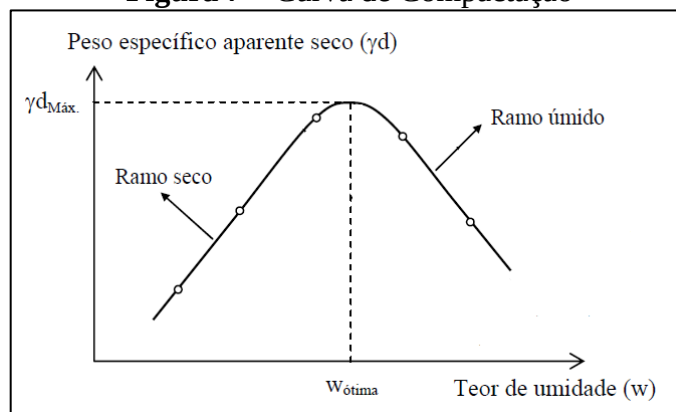


Fonte: Google Imagens.

As técnicas de ensaio para estudo da compactação estão atribuídas a Ralph R. Proctor, engenheiro norte-americano, especialista em construções de barragens. Em 1993 ele observou, ao analisar uma compactação de um aterro que, ao aplicar uma determinada energia, representada pelo número de passadas de um caminhão, a massa específica final está relacionada com a umidade em que o solo se encontra. Surgiu então o Ensaio de Proctor, que foi padronizado no Brasil pela ABNT (NBR 7182/86).

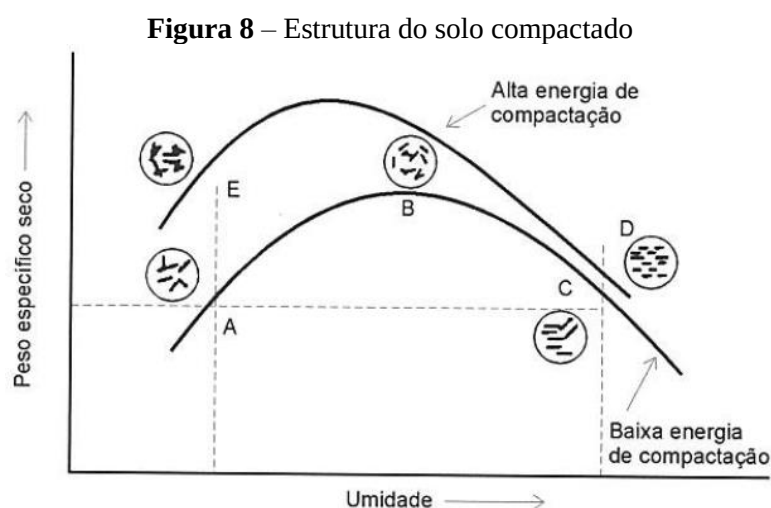
Ao realizar-se a compactação de um solo, sob diferentes condições de umidade e para uma determinada energia de compactação, obtém-se uma curva de variação dos pesos específicos aparentes seco (γ_s) em função do teor de umidade (h). Essa curva é chamada de Curva de Compactação, e nela, é de suma importância conhecer duas regiões bem específicas: ramo seco e ramo úmido. Além disso, existe um ponto de máximo onde obtém-se um peso específico seco máximo para uma determinada umidade, denominado de umidade ótima. É nessa umidade onde otimizam-se algumas características físicas do solo, principalmente a resistência. A Figura 7 demonstra a curva e identifica as características citadas anteriormente.

Figura 7 – Curva de Compactação



Fonte: Sousa Pinto, 2006.

Com relação à estrutura, os solos compactados no ramo seco apresentam uma estrutura mais floculada que se pronuncia mais com a diminuição da energia. As forças de atração entre as partículas geram flocos resistentes. Já no ramo úmido, a estrutura se apresenta mais dispersa, sendo que esta característica é mais presente quanto maior é a energia de compactação. Com o aumento da umidade as forças de atração são desfeitas e os grãos começam a atuar como partículas dispersas em água. A Figura 8 traduz essa variação na estrutura dos solos.



Fonte: Sousa Pinto, 2006.

3.5 RESISTÊNCIA DOS SOLOS

A resistência do solo está associada ao quanto ele pode contrapor-se sem que ocorra ruptura de seu maciço. Na maioria dos casos, o fenômeno de ruína está associado ao fenômeno do cisalhamento. Em condições especiais ocorrem rupturas por tensões de tração. A resistência ao cisalhamento de um solo pode ser definida como a máxima tensão de cisalhamento que o solo pode suportar sem sofrer ruptura, ou tensão de cisalhamento do solo no plano em que a ruptura estiver ocorrendo. (SOUSA PINTO, 2006)

Para Braja (2014), a resistência ao cisalhamento de uma massa é definida como a resistência interna por área específica do maciço, de tal maneira que essa massa possa vencer qualquer tensão que ocorra ao longo em qualquer plano de ruptura no seu interior.

Para que fosse possível mensurar as tensões necessárias para romper uma massa de solo, Coulomb (1776), aproximou a tensão de cisalhamento no plano de ruptura como uma função

linear da tensão normal, baseado na teoria de ruptura dos materiais proposta por Mohr (1900). Essa teoria afirmava que um material rompe devido à combinação das tensões de cisalhamento e normal e não devido as tensões máximas normal e cisalhante, isoladamente. Dessa forma tem-se uma função linear, chamada de critério de ruptura de Mohr-Coulomb que pode ser escrita como:

$$\tau_f = c + \sigma \tan \varphi$$

Onde,

c é a coesão;

φ é o ângulo de atrito interno;

σ é a tensão normal do plano de ruptura;

τ_f é a resistência ao cisalhamento;

Existem varias formas para determinar os parâmetros necessários para o cálculo da resistência ao cisalhamento de um solo. Dentre eles, segundo Braja (2014), podemos citar:

- Ensaio de cisalhamento direto;
- Ensaio triaxial;
- Ensaio de cisalhamento simples;
- Ensaio triaxial de deformação plana;
- Ensaio de cisalhamento anular ou *ring shear*;

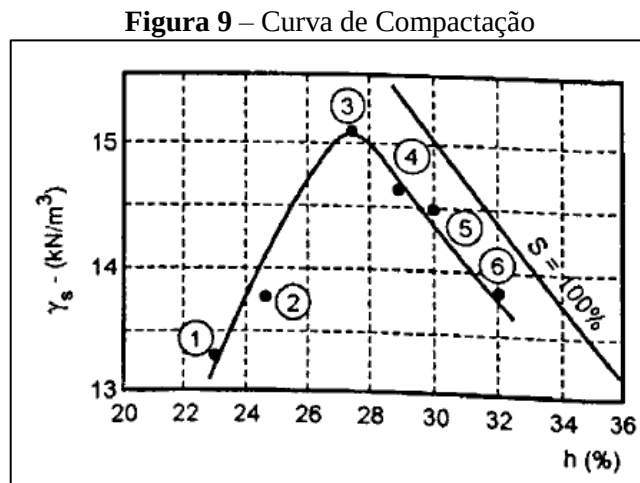
3.5.1 RESISTÊNCIA DOS SOLOS COMPACTADOS

De acordo com Massad (2014), quando o solo é compactado ele acaba se comportando como um solo insaturado, ou seja, sobreadensado por um rolo compactador a tensões entre 35 e 50 kPa. O autor também comenta que a permeabilidade do solo que foi compactado com uma mesma energia de compactação possui uma variação quando se altera o valor da umidade de modelagem. O mesmo fato ocorre em termos de compressibilidade, onde para o mesmo peso específico seco e a mesma energia de compactação percebe-se que no ramo seco os solos são menos compressíveis do que no ramo úmido.

Para a resistência ao cisalhamento, Massad (2014) afirma que:

“Solos compactados no ramo seco apresentam maiores resistências de pico, quando comparados com o ramo úmido. Além disso, a ruptura é do tipo "frágil" para os primeiros, e "plástica" para os segundos, confirmando as diferenças quanto à deformabilidade.” (Massad, 2014, p. 164).

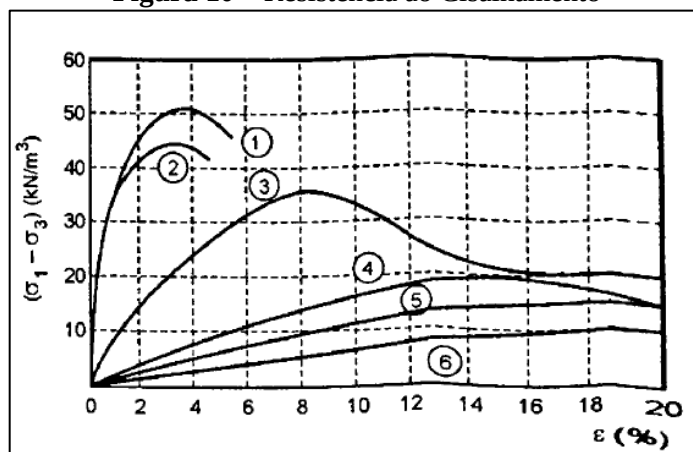
A ruptura do tipo “frágil” é considerada como inesperada, sem aviso prévio para que se possa realizar algum tipo de prevenção e impedir a ruína do maciço de solo. A ruptura do tipo “plástica” é considerada como a ideal, pois ela possui uma deformabilidade bem superior até chegar ao ponto de colapso, facilitando assim, a tomada de medidas preventivas. As Figuras 9 e 10 retratam, respectivamente, a curva de compactação e a resistência ao cisalhamento dos solos nos dois ramos distintos e na umidade ótima.



Fonte: Massad (2014) apud Lambe e Whitman (1969)

Tem-se pela Figura 9 que o ramo seco é caracterizado pelos solos 1 e 2, a umidade ótima pelo solo 3 e o ramo úmido, os solos 4, 5 e 6.

Figura 10 – Resistência ao Cisalhamento



Fonte: Massad (2014) apud Lambe e Whitman (1969)

Pela Figura 10, tem-se que os solos 1 e 2 apresentam ruptura frágil, enquanto os solos 4, 5 e 6 uma ruptura plástica, representada por uma curva bem mais suave. Enquanto isso, o solo 3 está localizado em uma zona intermediária.

Para Win (2006):

“A compactação seca do ótimo resultou em um aumento na força. A compactação úmida do ótimo mostrou uma diminuição na força e pequeno aumento na deformação na falha. Um maior esforço de compactação resultou em maior resistência à tração, rigidez à tração e comportamento frágil de tensão-deformação. (Win, 2006, p. 02).

A compactação do solo em meio seco aumenta a força. A compactação molhada resultou em uma diminuição da mesma. Porém, no estado de ótimo o solo apresentou uma maior compactação e o esforço resultou em maior resistência à tração, rigidez e comportamento dúctil tensão-deformação. (WIN, 2006). Solos compactados no ramo seco ao contrario, apresentam uma ruptura frágil.

3.6 COLAPSIBILIDADE DOS SOLOS

Quando se aplica uma carga e posteriormente aumenta a umidade de um solo, e este sofre algum colapso ou expansão, variando assim o seu volume de forma repentina, tem-se então o que chamamos de solo colapsível. Ou seja, o número de vazios é reduzido e ocorre claramente uma variação no seu estado tensão-deformação. De acordo com alguns autores, dentre eles, Cintra (1998), Lutenegeger e Saber (1988), o solo colapsível é aquele que quando se aumenta o volume de água em seus vazios, ou carregado e posteriormente umedecido acabam se rearranjando estruturalmente. Além disso, podem ser ainda considerados como recalques de acordo com a sua magnitude.

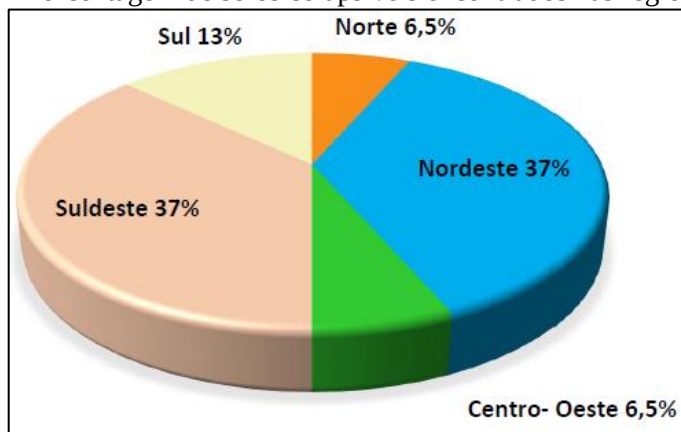
A fim de caracterizar de maneira numérica quando um solo é colapsível ou não, Abelev (1931) realizou ensaios edométricos em amostras, submetendo-as a uma tensão vertical de 300 kPa. Percebeu-se que no momento de inundação havia um decréscimo brusco de volume. Dessa maneira, o autor introduziu um índice que media o Potencial de Colapso (CP), descrito na equação a seguir, propondo que com $CP > 2\%$ é considerado um maciço colapsível.

$$CP(\%) = \frac{\Delta H}{H_0} 100$$

Onde, ΔH é a variação da altura do corpo de prova devido à inundação- e H_0 é a altura do corpo de prova antes da inundação.

Esse tipo de solo é normalmente encontrado em regiões de climas áridos e semiáridos. Porém, ainda é possível encontra-los em vários lugares do mundo que possuem outra tipologia climática. Segundo Veríssimo (2016), regiões com clima tropical têm bastante potencial para o desenvolvimento de solos colapsíveis, tanto pelo processo de lixiviação quanto pela deficiência de umidade dos solos encontrados nessas regiões. A Figura 11 apresenta as regiões do Brasil que possuem esse tipo de solo.

Figura 11 - Porcentagem de solos colapsíveis encontrados nas regiões do Brasil



Fonte: Ferreira, 2008

A maior concentração de solos colapsíveis, já investigados no país, encontra-se nas regiões do Nordeste e Sudeste. Motta (2006) identificou essa ocorrência em obras de grande porte da engenharia, como por exemplo, barragens, conjuntos habitacionais, projetos de irrigação.

4 METODOLOGIA

4.1 PESQUISA DOCUMENTAL

O percurso metodológico da pesquisa compreende um estudo acerca da resistência de um solo compactado localizado na cidade de Pau dos Ferro/RN quando sua saturação era alterada. Para subsidiar os trabalhos de análise e principais resultados foram utilizados ensaios laboratoriais em consonância com uma rigorosa pesquisa bibliográfica de fontes primárias e secundárias para construção do arcabouço teórico no campo da mecânica dos solos com vistas ao alcance dos objetivos e resultados esperados. A natureza do trabalho teve como técnicas de pesquisa o método dedutivo e indutivo com uma abordagem de caráter qualitativa e quantitativa.

O método dedutivo pensa as ações em um movimento descendente, onde considera uma premissa verdadeira, que pode ser uma lei ou teoria. Em seguida submete-se a uma segunda menor, para por meio da lógica chegar a conclusão desses fenômenos particulares. O método indutivo parte de um raciocínio ascendente, onde a observação experimental é a principal ferramenta, portanto, a trajetória do pensamento vai de casos particulares a leis gerais sobre os fenômenos investigados. (DINIZ e SILVA, 2008)

4.2 VISITA IN LOCO

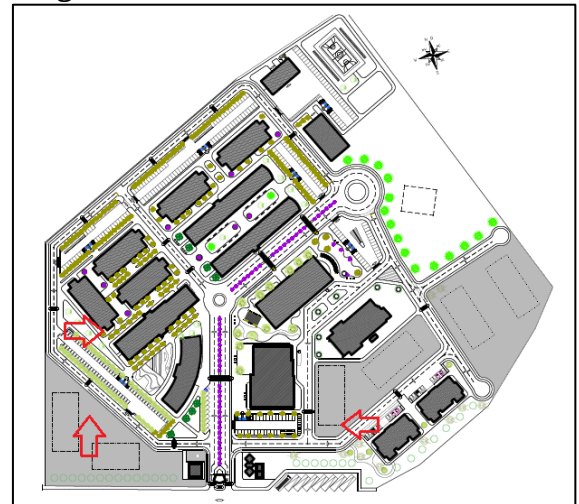
A gleba escolhida para a análise localiza-se na cidade de Pau dos Ferros – RN, mais precisamente no domínio do Campus da Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFERSA. Decidiu-se recolher 20 amostras em diferentes pontos do campus para que houvesse um padrão desejável de caracterização do solo. Para a retirada das amostras foi utilizado um trado do tipo escavadeira. A Figura 12 mostra o modelo do trato utilizado bem como um dos locais de onde foram retiradas as amostras. A Figura 13 identifica em planta os pontos onde foram feitos os furos com o trado, a uma cota fixa de 20 centímetros. Vale ressaltar que o local foi inicialmente limpo para que não fosse retirado nenhum material oriundo de despejos locais. O solo recolhido foi armazenado em um saco plástico onde foi devidamente identificado, vedado e levado para laboratório onde foram realizados os ensaios.

Figura 12 - Trado do tipo escavadeira



Fonte: Comag Equipamentos

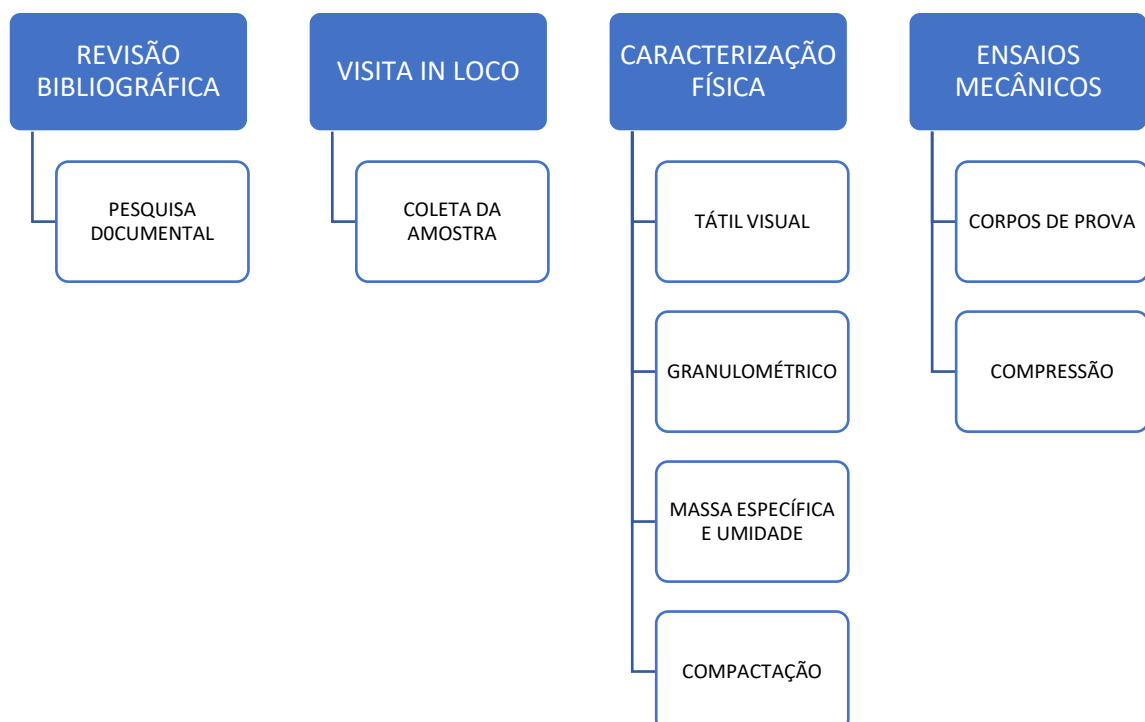
Figura 13 - Locais de coleta do material



Fonte: UFERSA – Modificado, 2018.

Como dito anteriormente, foram realizados ensaios de caracterização da amostra, como o tátil visual, granulométrico bem como seus índices físicos. Em um segundo momento foram realizados ensaios de compactação com a finalidade de obter a curva de compactação, objeto de suma importância para a análise. Por fim, com a curva elaborada foram ensaiados corpos de prova, verificando a resistência a compressão dos mesmos quando se variar sua saturação.

Para que os resultados almejados fossem alcançados de forma satisfatória, alguns procedimentos foram seguidos, obedecendo uma sequência organizacional que favorecer o



desenvolvimento da pesquisa. O fluxograma a seguir apresenta detalhadamente cada fase da pesquisa:

4.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

Após a coleta *in loco*, todo material foi levado para o laboratório para as análises iniciais quanto a caracterização do substrato. Como descrito nos métodos utilizados, realizou-se inicialmente as análises táteis e visuais do material. Porém, fez-se necessário realizar o destorroamento do material (Figura 14) para que pudesse ser trabalhado de maneira adequada.

Figura 14 – Destorroamento do Solo



Fonte: Autor, 2019

4.3.1 Tátil Visual

O experimento tátil visual, que está contido na NBR 7250 - identificação e descrição de amostras de solo, foi dividido em 5 partes: Tato, plasticidade, dispersão em água, corte e dilatância. Para o teste de tato, esfregasse o solo nas mãos. Solos arenosos tem características ásperas, solos argilosos tem aspecto de pó quando seco e “sabão” quando úmido. O teste de plasticidade é realizado moldando-se bolinhas de solo úmido. A moldagem só acontece em solos argilosos. Caso contrário tem-se um solo arenoso. A dispersão em água é feito agitando uma mistura de solo seco e água em um recipiente. Quando a água apresenta aspecto turvo e demora a sedimentar, tem-se um solo argiloso. Porém quando tem-se uma rápida sedimentação o solo é arenoso. O teste de corte é feito em um molde de solo úmido onde é feito uma fissura e verificado a situação da superfície, que estando lisa caracteriza um solo argiloso. Por fim, o ensaio de dilatância consiste em sacudir uma amostra de solo vigorosamente na palma das mãos. Argilas apresentam aspecto brilhante com exsudação da água, desaparecendo com o reamassamento.

4.3.2 Granulométrico

O ensaio de granulometria prescrito na NBR 7181 - Análise Granulométrica em conjunto com a NBR 5734 e 6457 são respectivamente acerca das peneiras para ensaio e preparação da amostra para ensaio de caracterização. Esse ensaio verifica a porcentagem de solo retido em cada uma das peneiras da série. Ao todo foram sete malhas, iniciando pela de 9,5mm e concluindo com a de 0,15mm. Na Figura 15 tem-se a ordem de peneiras para o ensaio. Inicialmente foram alocadas todas as sete malhas em ordem decrescente e de um fundo ao final. Colocou-se 1000 gramas de solo na primeira peneira (9,5mm) e iniciou-se o processo de vibração.

Figura 15 – Ordem das Peneiras



Fonte: Barbosa, 2018.

A partir disso, foi possível elaborar o gráfico da curva granulométrica e encontrar as porcentagens de cada fração, bem como calcular índices de qualidade da granulometria. Nesse caso, deve-se verificar a massa de material retido em cada malha e cruzar com o diâmetro da malha em que foi detido.

4.3.3 Massa Específica e Umidade

Para a determinação do teor de umidade e massa específica foram usadas as NBRs 6457 e 6508, respectivamente. Para a umidade é necessário recolher uma amostra em função da dimensão dos maiores grãos retidos na amostra do ensaio granulométrico, e acomoda-los em

cápsulas metálicas adequadas. Para a massa específica utiliza-se o método do picnômetro, onde é colocado uma massa conhecida de solo seco e completando-o com água. Em seguida é medida o peso total (solo e picnômetro). Após isto calcula-se a massa do picnômetro com água apenas, soma-se à massa do solo seco, subtrai-se a massa encontrada do conjunto solo mais picnômetro. O resultado será a água deslocada.

Para obter-se o teor de umidade em porcentagem tem-se que ter uma relação entre a massa de água e massa de sólidos da amostra (Tabela 1):

$$h = \frac{M_a}{M_s} \cdot 100$$

Sabendo-se que a massa de água é a relação entre a massa do solo úmido menos a massa do solo seco, tem-se a nova relação:

$$h = \frac{M_w - M_s}{M_s} \cdot 100$$

Então, para encontrar o teor de umidade, pesou-se inicialmente uma cápsula (Figura 16) onde foi colocada uma amostra do solo natural, também foi pesado. Em seguida o conjunto cápsula mais massa úmida foi colocada na estufa a 105° durante 24 horas. Após as 24 horas pesou-se novamente o conjunto e obteve-se agora a massa do conjunto cápsula mais solo seco.

Figura 16 – Cápsulas para cálculo do teor de umidade



Fonte: Autor, 2019.

Para o cálculo da massa específica foi utilizado o no frasco Chapman (Figura 17) onde colocou-se inicialmente 390 ml de água. Em seguida foram adicionadas 50 gramas de solo. Foi verificado o volume final após o acréscimo do solo. Em seguida encontrou-se a diferença entre volumes:

$$V = V_f - V_i$$

Sendo assim, a massa específica é dada por:

$$\rho = \frac{M_s}{V}$$

Figura 17 – Frasco de Chapman



Fonte: Autor, 2019.

4.2.4 COMPACTAÇÃO

O ensaio de compactação, descrito na NBR 7182 - Ensaio de compactação, necessita observar na Tabela 3 quais as características da energia de compactação utilizada. Adiciona-se uma quantidade de solo dividida em camadas no cilindro, sempre pesando as massas do conjunto e de cada material utilizado. Após, realiza-se a retirada de uma amostra para análise da umidade. Dessa forma, o ensaio se dá diversas vezes variando a quantidade de água acrescida do solo para que posteriormente possa ser realizada a curva de compactação e também a de saturação.

Tabela 3: Características Inerentes a cada Energia 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: Compilada da NBR 7182/1986

Vale ressaltar que foi utilizado uma amostra de 5 quilogramas de solo passante na peneira 4,8mm para a realização dos seis ensaios. A Figura 18 identifica os materiais utilizados para montar o corpo de prova.

Figura 18 – Materiais para compactação



Fonte: Barbosa, 2018

O procedimento foi realizado seis vezes seguindo o método exposto anteriormente, onde ao final de cada etapa era recolhida uma amostra de solo para verificação da umidade.

Para o cálculo do peso específico natural tem-se que:

$$\gamma_{natural} = \frac{M_{conjunto} - M_{cilindro}}{V_{cilindro}}$$

A massa do cilindro é de 5353,7 gramas e o volume do cilindro é dado pela área de sua seção transversal e sua altura. O cilindro possui um diâmetro de 10 cm e uma altura de 12,7 cm resultando em um volume de 996,96 cm³. Dessa forma, tem-se que o peso específico natural é:

$$\gamma_{natural} = \frac{M_{conjunto} - 5353,7}{996,96}$$

Para calcularmos o valor do peso específico seco a expressão é dada por:

$$\gamma_{seco} = \frac{\gamma_{natural}}{1 + \frac{h}{100}}$$

A umidade é a mesma encontrada nas amostras dos corpos de prova. Além disso, encontra-se a curva de saturação, dado por:

$$\gamma_{seco} = \frac{S}{\frac{h}{\delta_w} + \frac{S}{\delta}}$$

Onde:

γ_{seco} : Massa específica aparente seca, em g/cm³;

S : grau de saturação, igual a 100%;

h : teor de umidade, arbitrada na faixa de interesse, em %;

δ_w : Massa específica da água, em g/cm³ (considerar 1,00 g/cm³)

δ : Massa específica dos grãos do solo, determinada g/cm³;

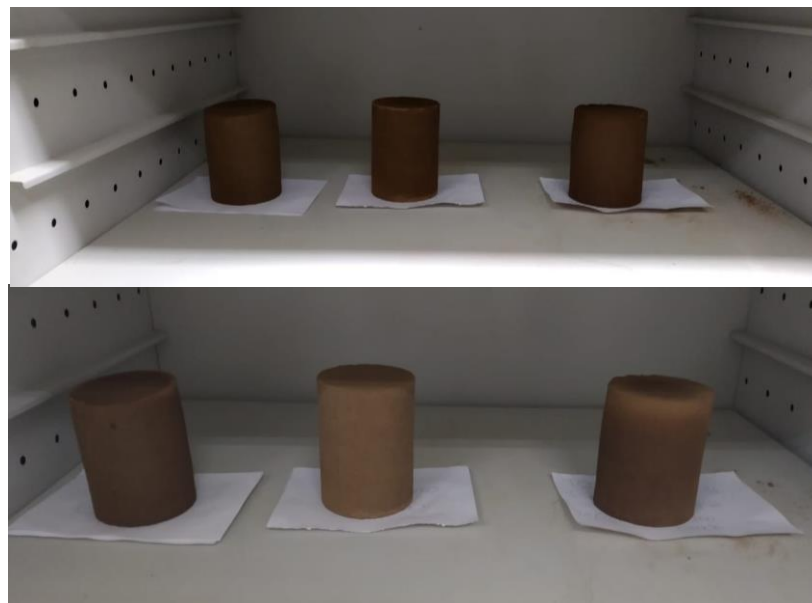
4.4 ENSAIO MECÂNICO

O ensaio para medirmos a resistência a compressão é descrito na NBR 12770 – Solo coesivo – determinação da resistência à compressão não confinada, onde montam-se um corpo de prova cilíndrico com diâmetro mínimo de 35 mm. Deve-se anotar todas as medidas do corpo de prova. Com isso, utiliza-se um equipamento de compressão de modo que a carga aplicada

esteja centrada no corpo de prova. Após aplicar o carregamento, deve-se verificar a velocidade de deformação axial específica da peça. O solo em questão para esse tipo de análise foi trabalhado de acordo com a curva de compactação formulada com o ensaio de compactação, de modo que foi realizada a variação de saturação do corpo com a ajuda de um *becker* afim de avaliar a variação da sua resistência a compressão nesses casos. Foi arbitrado uma umidade 2% para mais e para menos em relação a umidade ótima.

Nesse caso, usou-se uma umidade de 6,37%, ramo seco, e de 10,37% para o ramo úmido. Para cada valor escolhido, foram produzidos três corpos de prova de modo que, uma das amostras será rompida em sua umidade de compactação, outra com uma umidade 2% superior, nesse caso já compactado, e outro após 2 horas depois de ficar descansando na estufa. A Figura 19 mostra os três corpos de prova enviados para a estufa.

Figura 19 - Amostras que foram para estufa: Ramo úmido, ramo seco e umidade ótima



Fonte: Autor, 2019.

A Figura 20 exibe a saturação realizada após a compactação do solo. Vale ressaltar que o procedimento durou em torno de 20 minutos para que toda água estivesse abrangendo todo o corpo de prova.

Figura 20 – Saturação do solo compactado



Fonte: Autor, 2019.

5 RESULTADO E DISCUSSÕES

Os resultados a seguir referem-se aos ensaios realizados no laboratório para obtenção dos dados necessários para a interpretação do comportamento dos solos que foram sujeitos a diferentes situações, dentre elas a variação no seu teor de umidade sendo compactado e realizado a saturação após a sua compactação. Além disso, a caracterização inicial do material é de suma importância para se obter os parâmetros primordiais para a definição do tipo de maciço em análise.

5.1 ENSAIOS

5.1.1 Tato-Visual

A Figura 21 mostra os resultados das análises táteis visuais (tato, plasticidade, dispersão em água, corte e dilatância) que caracteriza de maneira simples o solo existente. Para o ensaio do tato, o material estava um pouco áspero como também uma variação um pouco “sabão” caracterizando um solo argiloso. Nesse caso pode-se classificar o solo como areno-argiloso. Enquanto o ensaio de plasticidade apresentou boa maleabilidade porém não mantinha uma singularidade na sua forma. A dispersão em água caracterizou um solo argiloso uma vez que se manteve turvo por um grande período demonstrando baixa sedimentação. O teste de corte mostrou que a superfície não se manteve totalmente lisa. Por fim, o teste de dilatância mostrou

um aspecto brilhante com uma exsudação em toda sua superfície, caracterizando um solo argiloso.

Como análise final para esses ensaios pode-se caracterizar o solo como intermediário entre arenoso e argiloso na medida que o material apresentou nos ensaios características oriundas desses dois tipos de solos.

Figura 21 - Ensaio Tátil-visual



Fonte: Autor, 2019.

5.1.2 Granulometria

Após o processo de vibração da amostra foram levantados os pesos retidos de material em cada malha e anotou-se os mesmos na Tabela 4.

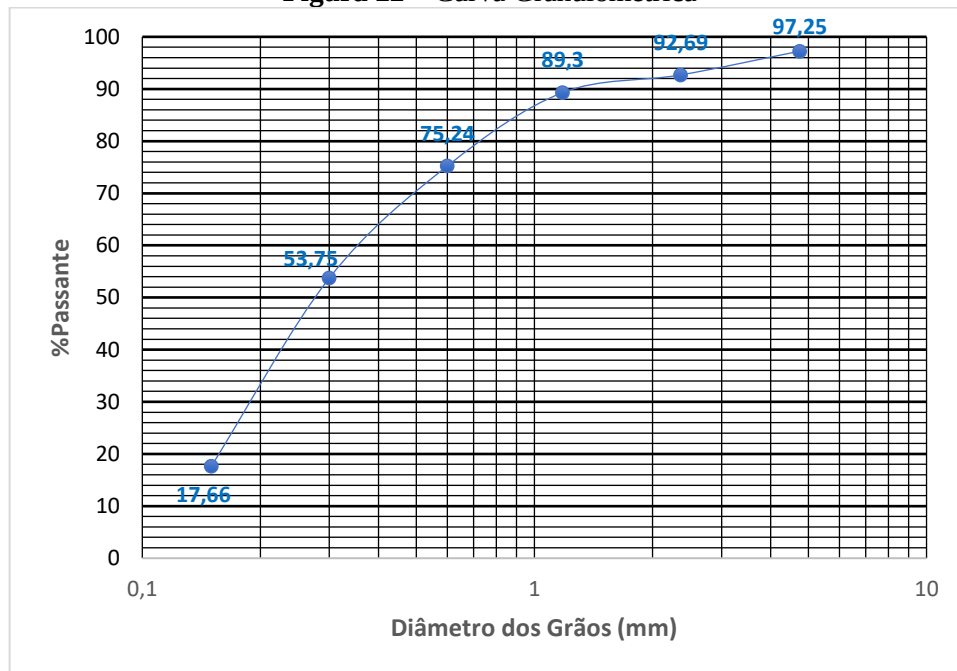
Tabela 4 – Massas Retidas Acumuladas

Malhas (mm)	Massa Retida (g)	%Retida	%Acumulada
9,5	0	0	0
4,75	27,5	2,75	2,75
2,36	45,6	4,56	7,31
1,18	33,9	3,39	10,7
0,6	140,6	14,06	24,76
0,3	214,9	21,49	46,25
0,15	360,9	36,09	82,34
Fundo	176,6	17,66	100

Fonte: Autor, 2019.

Analisando apenas a tabela, percebe-se que todo o material foi passante na peneira de 9,5mm. Também houve uma maior quantidade de solo acumulado, cerca de 82,34%, na peneira 0,15mm, caracterizando uma maior quantidade de solo arenoso. Cerca de 7,31% da amostra ficou acumulada na peneira de 2,36mm, e a menor quantidade de material ficou retida. Ainda com os valores da Tabela 4, foi possível formar a curva granulométrica, mais uma ferramenta para se analisar as dimensões dos grãos do material. A Figura 22 mostra a curva, onde no eixo das abscissas estão os diâmetros dos grãos e nas ordenadas a porcentagem passante do material.

Figura 22 – Curva Granulométrica



Fonte: Autor, 2019.

Comparando com a classificação unificada proposta por Casagrande, como cita Sousa Pinto (2006), tem-se para o solo analisado uma classificação SW, onde o S representa uma areia e o W bem graduado, portanto, um solo arenoso bem graduado.

5.1.3 Teor de Umidade e Massa Específica

Com os dados obtidos da estufa e referente a massa do solo úmido coletado antes de levar a amostra para a estufa pode-se agora descontar o valor da cápsula o qual foi medida inicialmente e encontrar o teor de umidade substituindo na fórmula, a seguir:

$$h = \frac{M_w - M_s}{M_s} \times 100 = \frac{56,825 - 50,771}{50,771} \times 100 = 11,92\%$$

Essa umidade refere-se a encontrada no ambiente em que o material foi coletado. Ele apresenta uma elevada porcentagem, porém, vale ressaltar que a região passa por um período de chuvas intensas e consequentemente o maciço encontrado no local estará com sua umidade elevada em comparação com seus valores em outras épocas do ano.

Para o cálculo da massa específica foi necessário que encontrar o valor final do volume do frasco de Champman, obtendo-se:

$$V = V_f - V_i = 410 - 390 = 20ml$$

Sendo assim, a massa específica é dada por:

$$\rho = \frac{M_s}{V} = \frac{50}{20} = 2,5 \text{ g/cm}^3$$

De acordo com Barbosa (2018), solos encontrados na região onde se encontra as amostras da pesquisa estão em torno de 2 a 3 gramas por centímetro cúbico, o que revela que se trabalha de fato com um solo característico da região.

5.1.4 Compactação

Através da Tabela 3 verifica-se que para uma energia de compactação intermediária e para um cilindro pequeno teve-se que utilizar um soquete grande para 3 camadas, onde foram dados 21 golpes por camada.

A Tabela 5 mostra os valores de água acrescidos em cada amostra bem como as respectivas massas referentes ao solo úmido e ao solo seco que foram utilizados para verificação da umidade.

Tabela 5 – Amostras para Compactação

Amostra	Quant. Água (ml)	Peso Cápsula (g)	Peso Cápsula + Solo Úmido (g)	Peso Cápsula + Solo Seco (g)	Peso Solo Úmido (g)	Peso Solo Seco (g)	Umidade (%)
1	400	18,148	68,255	64,926	50,107	46,778	7,12
2	450	17,37	61,624	58,646	44,254	41,276	7,21
3	500	17,936	69,627	65,636	51,691	47,700	8,37
4	600	17,253	69,612	65,214	52,359	47,961	9,17
5	700	18,028	77,993	71,782	59,965	53,754	11,55
6	800	17,37	60,647	55,643	43,277	38,273	13,07

Fonte: Autor, 2019.

A Tabela 6 exibe as massas encontradas em cada amostra e os valores encontrados por amostra para seu peso específico natural, que foi utilizado para o cálculo do peso específico seco, este último de suma importância para se elaborar a curva de compactação.

Tabela 6 – Peso Específico Seco e Saturação

Ponto	Massa da conjunto	Peso específico natural	Peso específico seco	Umidade	Saturação
N.º	g	g/cm ³	g/cm ³	%	100%
1	7293,4	1,95	1,82	7,11	2,22
2	7464,3	2,12	1,97	7,21	2,21
3	7579,3	2,23	2,06	8,37	2,16
4	7530,2	2,18	2,00	9,17	2,12
5	7445,6	2,10	1,88	11,55	2,02
6	7429,4	2,08	1,84	13,07	1,96

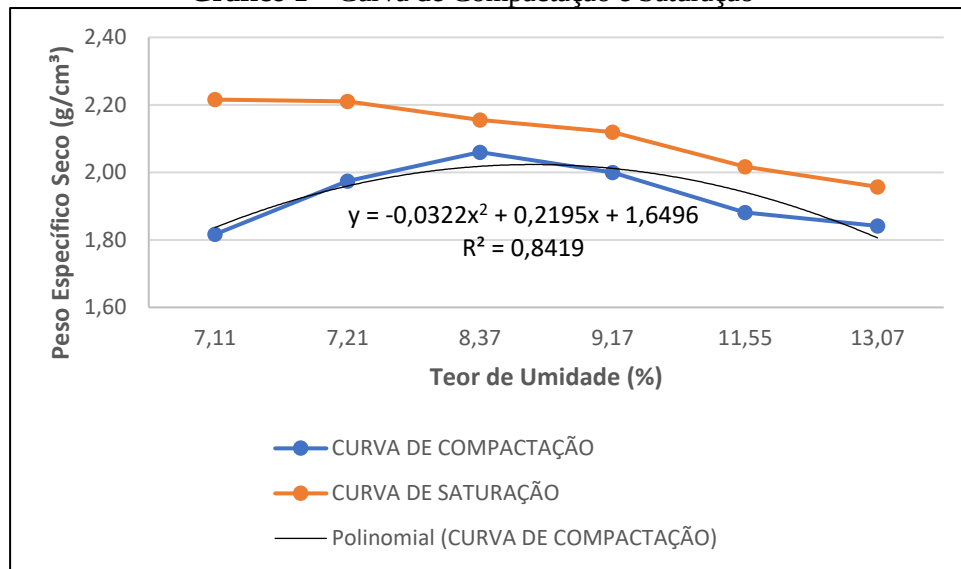
Fonte: Autor, 2019

A Tabela 6 nos fornece ainda o valor para uma saturação de 100%, um dado muito importante para o cálculo da curva de saturação.

Até a amostra número 4 o solo mantinha uma maior facilidade de compactação bem e seu nível de compactação, comprovando a literatura de que a com o aumento do teor de umidade tem-se um melhor grau de compactação. A partir da amostra 5 percebe-se que o solo apresentou inconsistência para a compactação.

O Gráfico 1 representa a curva de compactação além da curva de saturação, objeto de grande importância deste trabalho.

Gráfico 1 – Curva de Compactação e Saturação



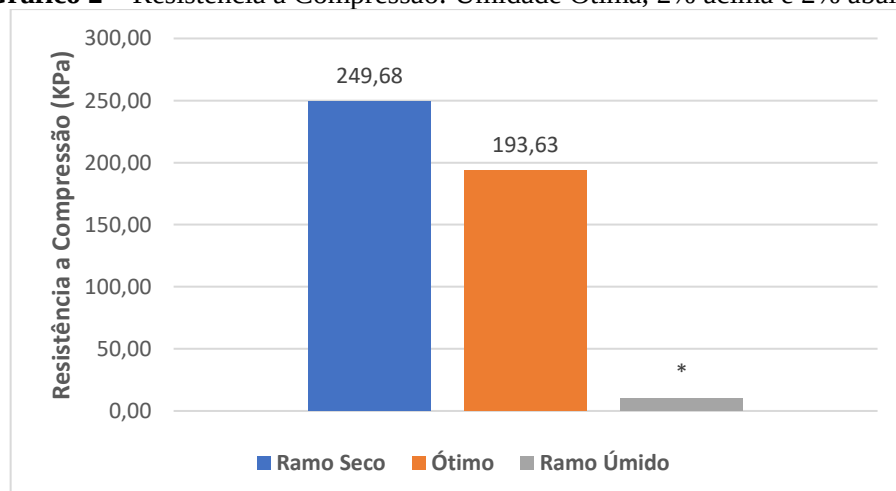
Fonte: Autor, 2019.

Através da curva de compactação pode-se identificar a umidade ótima onde ela atinge o maior valor de peso específico seco através da fórmula da linha de tendência. Dessa forma, tem-se que para uma umidade de aproximadamente 8,5% obteve-se um peso específico seco de 2,0 g/cm³. A curva de saturação é usada como um parâmetro de segurança, fornecendo um critério ótimo em relação as amostras compactadas. Os valores encontrados estão dentro da média regional, que são 6 e 9% para umidade e 2 e 3 g/cm³. (BARBOSA, 2018).

5.1.5 Resistência à Compressão

O Gráfico 2 exibe os resultados de resistência a compressão para as amostras compactadas na umidade ótima e 2% para mais e para menos da ótima. É importante frisar que a energia de compactação foi a mesma para as 3 amostras.

Gráfico 2 – Resistência a Compressão: Umidade Ótima, 2% acima e 2% abaixo.



Fonte: Autor, 2019.

Percebe-se pelo Gráfico 2 que o ramo seco atingiu um valor de resistência superior ao compactado na umidade ótima. A amostra compactada no ramo úmido não obteve resistência a compressão devido a sua falta de vigor à medida que a prensa aplicava a força vertical. A Figura 23 mostra o corpo totalmente deformado.

Figura 23 – Corpo de prova deformado compactado no ramo úmido

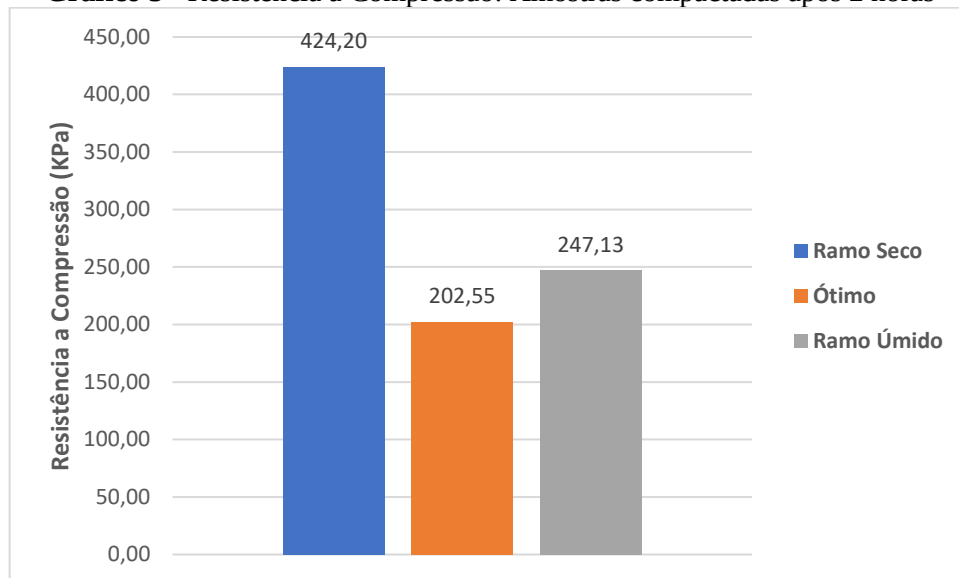


Fonte: Autor, 2019.

Para Massad (2014) e Wid (2006) o solo apresentou características plásticas, justamente por ter sido compactado no ramo úmido, o que evidencia um fator primordial para essa classe.

O Gráfico 3 exibe as resistências para as amostras mostradas na Figura 19, ou seja, aquelas que ficaram na estufa durante 2 horas.

Gráfico 3 - Resistência a Compressão: Amostras compactadas após 2 horas



Fonte: Autor, 2019.

Assim como na análise anterior, obteve-se uma maior resistência no ramo seco. Além disso, conseguiu-se registrar uma resistência para o ramo úmido. Um detalhe importante para esta análise foi a ruptura evidenciada no ensaio para o ramo seco, que aconteceu de maneira frágil, sem aviso prévio. A Figura 24 traduz essa ruptura.

Figura 24 – Ruptura do tipo frágil da amostra



Fonte: Autor, 2019.

Além disso, percebe-se que o modelo cisalhante de ruptura que se pode encontrar nos corpos de prova. Nota-se uma superfície de ruptura bem definida, que deve possuir inclinação compatível com o plano da teoria de Mohr-Coulomb e relacionado com o ângulo de atrito

interno do solo compactado. Verifica-se esse modelo, melhor evidenciado, na Figura 25 a seguir:

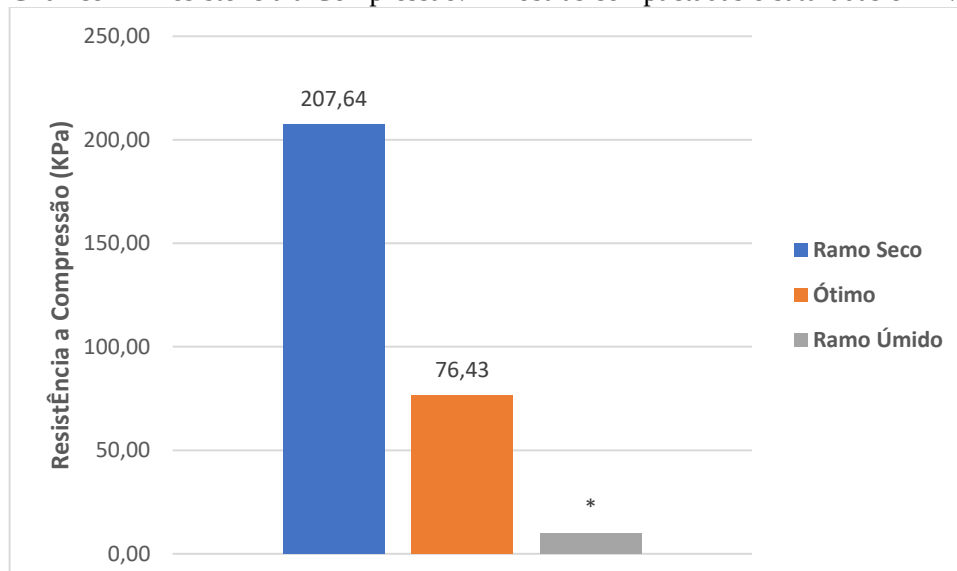
Figura 25 – Plano de ruptura cisalhante



Fonte: Autor, 2019.

O Gráfico 4 mostra as resistências a compressão das amostras que foram saturadas após serem compactadas, com 2% a mais no seu teor de umidade.

Gráfico 4 - Resistência a Compressão: Amostras compactadas e saturadas em 2%



Fonte: Autor, 2019.

O valor da resistência para o ramo seco mais uma vez se mostrou superior, mesmo que apresentando um valor bem abaixo do observado em outras análises. Não foi amostrado um

corpo de prova para o ramo úmido visto que, para a análise ilustrada no Gráfico 2, o corpo de prova dessa região não apresentou resistência alguma.

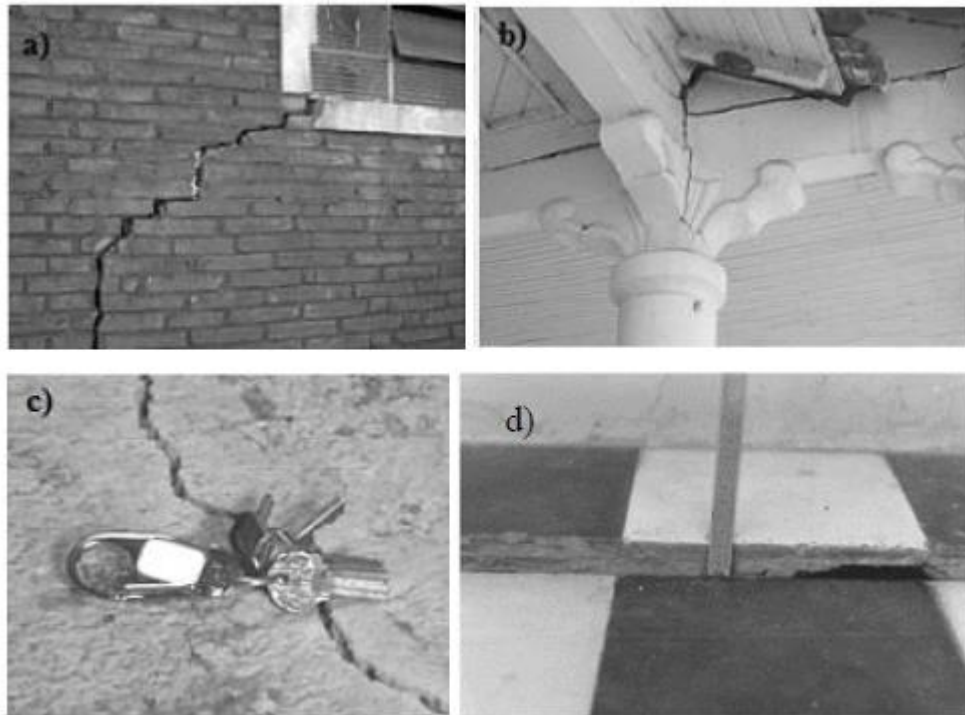
De modo geral, observou-se que a variação do grau de saturação tem uma grande influência na resistência a compressão dos solos. Percebe-se que no ramo seco a perda de resistência ficou na faixa de 17% em relação a amostra compactada sem saturação pós compactação. O ramo úmido apresentou uma inconsistência ainda maior, se mostrando totalmente inutilizável quando se tratando de resistência a compressão. A umidade ótima teve uma perda ainda maior de resistência em comparação com o ramo seco, na faixa de aproximadamente 60% do valor obtido na compactação exatamente na umidade ótima.

Para os corpos de tiveram uma redução no grau de saturação pós compactação, os percentuais não seguiram a mesma proporção anterior. Para o ramo seco o aumento de resistência foi de aproximadamente 70% do valor inicial, ou seja, em comparação com a saturação do mesmo corpo de prova a variação da resistência foi bem maior quando houve perda de saturação e não seu aumento. Para o ramo úmido o aumento de também foi considerado. Porém observou-se que ele obteve um valor maior que o da amostra nas mesmas condições, no ramo ótimo. Nesse caso, obteve-se uma resistência ótima superior a inicial na escala de 4%, uma variação mínima em comparação com os dados obtidos no ramo seco.

O trabalho condiz com referência aos resultados expostos a compactação em estradas, em que se busca a obtenção de umidades ótimas para a compactação, visto que ela apresenta um meio termo entre a resistência e ao modelo de ruptura. Dessa forma, a atividade aqui exposto reflete situações corriqueiras de projetos rodoviários em que as condições climáticas acabam interferindo diretamente no projeto de execução, seja a saturação extra após a compactação, demonstrada em ensaio, através de chuvas locais, ou até mesmo de temperaturas elevadas com fortes ventos que podem levar a perda de saturação do maciço como demonstrado nas amostras levadas para a estufa.

Além disso, problemas corriqueiros em edificações atrelados aos estados de compactação do solo são reflexo nas manifestações patológicas encontradas em obras, como observadas segundo Rodrigues e Lollo (2008) a seguir:

Figura 26 - Danos em edificações ocasionados pelo colapso do solo



Fonte: Rodrigues e Lollo, 2008.

Quando não verificadas as resistências máximas dos solos usados em edificações e sua devida compactação para ir de encontro a resistência a compressão necessária, verificamos as diversas consequências.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa demonstrou a importância de um estudo aprofundado acerca da compactação dos solos, bem como sua devida caracterização uma vez que foi possível interpretar a variação dos resultados obtidos. Verificou-se que uma simples caracterização do solo já demonstra muitas informações importantes acerca do solo para a forma como devemos proceder com as análises.

Um dado bastante relevante para se enfatizar é o voltado as resistências a compressão. Percebeu-se que a depender do ramo em que esteja ocorrendo a compactação o modo como o maciço se comporta é diferente do outro. Vale ressaltar que se comprovou que a umidade ótima apesar de não representar a maior resistência a compressão nos levou a um meio termo que nos dá segurança no processo construtivo para termo uma ruptura mais dúctil e uma resistência acima da média. A variação percentual dos ganhos e perdas das resistências em cada um dos ramos é um condicionante também, muito importante para atentar-se, na medida que o aumento e perda no ramo seco fico na faixa de 17 e 60 por cento, respectivamente, quando que no ramo úmido teve um aumento considerável já que não se obteve valores para as análises iniciais.

A pesquisa revelou ainda um condicionante comum na vida de muitos engenheiros, a relação voltada com o meio ambiente uma vez que o projeto de execução pode ser completamente ou bastante arruinado por intempéries ao qual não se pode controlar. Uma vez observados os dados da pesquisa, temos o conhecimento que a análise acerca da melhor umidade de compactação é fundamental para obter o melhor resultado.

A sugestão para trabalhos futuros seria a análise de solos acrescidos de novos materiais para evitar que o grau de saturação do maciço se eleve no moemento em que se esteja executando o projeto. Além disso, poderia se evitar a perda de resistência com uma nova abordagem no que diz respeito aos métodos de compactação. Outra sugestão seria utilizar novos mecanismos de compressão para uma melhor análise de novos parâmetros, exemplo seria um ensaio tri axial.

REFERÊNCIAS

- ABELEV, Y. M. **Provisional Instruction for the Design and Construction of Structure on Loessial Soils**. Stroitel Naya Prorrysshemost. vol. 7, pp.368-370, 1931.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182/1986 Ensaio de compactação**. Rio de Janeiro, Ago. 1986.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7250/1982. Identificação e descrição de amostras de solos obtidas em sondagens de simples reconhecimento dos solos**. Rio de Janeiro/RJ, Ou. 1982.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180/1984. Determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro/RJ, Ou. 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5734/1989. Peneiras para ensaio Especificação**. Rio de Janeiro/RJ, 1989.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457/2016. Amostras de solo Preparação para ensaios de compactação ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro/RJ, Mar. 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508 - Grãos de solo que passam na peneira 4,8mm Determinação de massa específica**. Rio de Janeiro/RJ, Out. 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12770/1992. Solo coesivo - Determinação da resistência à compressão não confinada**. Rio de Janeiro/RJ, Ou. 1992.
- BARBOSA, Sávio Felipe Pereira. **Estudo Técnico e Ambiental de Barragem de Terra na Zona Rural de Água Nova/RN**. / Sávio Felipe Pereira Barbosa. - 2018.
- CAMARGO, O.A.; ALLEONI, L.R.F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. Piracicaba, SP: ESALQ, 1997. 132p.
- CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos Solos e suas Aplicações**. Rio de Janeiro: LTC, 6ª edição, 1996.
- CINTRA, J. C. A. **Fundações em Solos Colapsíveis**. Escola de Engenharia de São Carlos – SP, 106p, 1998.
- COULOMB, C.A. **Essai sur une application des regles de maximis et minimis quelques problemes de statique, relatits a l'architecture**. Memoires de Mathematique de l'Academie Royale de Science 7, Paris. v. p.3,38, 1776

DAS, Braja M. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. São Paulo: Ceagage Learning, 8ª edição, 2014.

DINIZ, Célia Regina; SILVA, Iolanda Barbosa da. **Metodologia Científica I**. Campina Grande; Natal: UEPB/UFRN - EDUEP, 2008.

FERREIRA, S. R. M. **Solos Colapsíveis e Expansivos: Uma Visão Panorâmica no Brasil**. In: VI Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados. Salvador. EDUFBA, v.2. p. 593-619, 2008.

FREIRE, Wesley Jorge; FILHO, Justo Moretti. **Condicionantes Químicos do Solo e seus Efeitos sobre os Índices Físicos**. In: REVISTA, 1979, Botucatu. Atas [...]. FCA/UNESP, Borucatu: Scielo, 1979.

LIMA, C.L.R. **Compressibilidade de solos versus intensidade de tráfego em um pomar de laranja e pisoteio animal em pastagem irrigada**. 2004. 70p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Departamento de Solos e Nutrição de Plantas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP.

LUTENEGGER, A. J. e SABER, R. T. **Determination of Collapse Potencial of Soils**. Geotechnical Testing Journal, ASTM, vol. 11, nº 3, Setembro, pp. 173-178. 1988.

MASSAD, Façal. **Obras de terra: Curso básico de geotecnia**. São Paulo/SP: Editora Oficina de Textos, 2ª.Ed. 2014.

MOHR, O. **Welche Umstände bedingen die Elastizitätsgrenze und den Bruch eines Materials** Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure, V. 44, p. 1524-1530, p.1572-1577, 1900.

MOTTA, E. Q. **Análise do colapso de um solo compactado devido à inundação e à interação solo-líquido contaminante**. Dissertação de Mestrado, Recife, UFPE, 114p. 2006.

RODRIGUES, R. A. & LOLLO, J. A. Características dos Solos Colapsíveis. In: **Solos Colapsíveis: identificação, comportamento, impactos, riscos e soluções tecnológicas**. UNESP, São Paulo, Cap. 2, p.59-67, 2008.

SOUZA PINTO, C., 2006, **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3ª ed. Oficina de Textos, São Paulo.

VARGAS, M. **Introdução a Mecânica dos Solos**. McGraw-HILL do Brasil. São Paulo, 1981.

WIN, San San. **Tensile Strength Of Compacted Soils Subject To Wetting And Drying.** A thesis submitted in partial fulfilment of the requirements for the degree of Master of Engineering. School of Civil and Environmental Engineering The University of New South Wales Sydney, Australia September 2006