



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

AURY PAULINO DE ARAÚJO JÚNIOR

**ANÁLISE DA ESTABILIZAÇÃO DO SOLO COM ADIÇÃO DE PÓ DE PEDRA NA
CONSTRUÇÃO CIVIL EM SÃO JOÃO DO RIO DO PEIXE-PB**

AURY PAULINO DE ARAÚJO JÚNIOR

**ANÁLISE DA ESTABILIZAÇÃO DO SOLO COM ADIÇÃO DE PÓ DE PEDRA NA
CONSTRUÇÃO CIVIL EM SÃO JOÃO DO RIO DO PEIXE-PB**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Conselho do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, como requisito básico para obtenção do grau de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador:

Prof. Esp. Samuel Gadelha Guimarães

© 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.

J927a Júnior, Aury Paulino de Araújo.
Análise da estabilização do solo com adição de pó de pedra na construção civil em São João do Rio do Peixe-PB / Aury Paulino de Araújo Júnior. - 2021.
54 f. : il.

Orientador: Samuel Gadelha Guimarães.
Monografia (graduação) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Curso de , 2021.

1. Pó de Pedra. 2. Melhoramento do Solo. 3. Ensaio de Caracterização. 4. Construção Civil. I. Guimarães, Samuel Gadelha, orient. II. Título.

AURY PAULINO DE ARAÚJO JÚNIOR

**ANÁLISE DA ESTABILIZAÇÃO DO SOLO COM ADIÇÃO DE PÓ DE PEDRA NA
CONSTRUÇÃO CIVIL EM SÃO JOÃO DO RIO DO PEIXE - PB**

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

Defendida em: 01 / 06 / 2021

BANCA EXAMINADORA

SAMUEL GADELHA

GUIMARAES:05771917303

Assinado de forma digital por

SAMUEL GADELHA

GUIMARAES:05771917303

Dados: 2021.06.08 08:35:37 -03'00'

Prof. Esp. Samuel Gadelha Guimarães

UFERSA

MARILIA CAVALCANTI

SANTIAGO:32490097

415

Digitally signed by MARILIA

CAVALCANTI

SANTIAGO:32490097415

Date: 2021.06.08 14:09:56 -03'00'

Profa. Ma. Marília Cavalcanti Santiago

UFERSA

Jesse Wille Gondim Pinto

Prof. Esp. Jesse Wille Gondim Pinto

CISNE – Faculdade Tecnológica de Quixadá

A Deus, arquiteto da vida. À minha família, em especial aos meus pais Auri Paulino e Pedrina Sena, por nunca medirem esforços para que eu conquistasse meus sonhos.

“O rio atinge seus objetivos porque aprendeu a contornar obstáculos.”

Lao-Tsé

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo acerca do solo presente na camada superficial do município de São João do Rio do Peixe-PB, e analisa, de um modo geral, o incremento do pó de pedra no solo, assim como os possíveis métodos de estabilização. Para tanto, foram traçados os seguintes objetivos: identificar, coletar, analisar e compreender as principais propriedades dos solos, de forma a tomar medidas corretivas adequadas que possam propiciar melhorias quanto às propriedades físicas e mecânicas do solo. Foram realizadas coletas de dados fundamentados em estudos de campo e em pesquisas bibliográficas. Por meio de ensaios de caracterização, realizou-se a coleta de amostras indeformadas de solos na cidade de São João do Rio do Peixe-PB para obter as propriedades físicas e mecânicas do solo natural e do pó de pedra. Os ensaios realizados foram: de umidade, granulometria, plasticidade e compactação dos solos amostrados variando teores de adição de pó de pedra. Por meio dos resultados obtidos, em especial, da curva granulométrica e da curva de compactação, foi possível identificar o melhoramento das propriedades físicas e mecânicas em decorrência da estabilização granulométrica e mecânica com adição do pó de pedra, conferindo ao solo: tendência de correção da graduação granulométrica, o aumento do peso específico seco máximo, a diminuição da umidade ótima e, como consequência, melhor resistência à recalques, permeabilidade, bem como o aumento da rigidez e a diminuição do número de vazios. Dessa forma, o estudo do comportamento do solo é algo imprescindível para segurança de projetos, sobretudo na área de engenharia civil.

Palavras-chave: Pó de Pedra. Melhoramento do solo. Ensaio de Caracterização. Construção Civil.

ABSTRACT

This work presents a study about the soil present in the superficial layer of the city of São João do Rio do Peixe - PB, and analyzes, in general, the increase of stone dust in the soil, as well the possible stabilization methods. Therefore, the following objectives were outlined: to identify, collect, analyze, and understand the main soil properties, in order to take appropriate corrective measures that can provide improvements in the physical and mechanical properties of the soil. Data were collected based on field studies and bibliographic research. In addition, through characterization tests, undisturbed soil samples were collected in the city of São João do Rio do Peixe - PB in order to obtain the physical and mechanical properties of the natural soil and stone dust. The tests carried out were moisture test, particle-size distribution, plasticity test and compaction of the sampled soils, varying levels of stone dust addition. Through the results obtained, in particular, the granulometric curve and the compaction curve, it was possible to identify the improvement in physical and mechanical properties due to the granulometric and mechanical stabilization with the addition of stone dust, giving the soil: tendency to correct the granulometric gradation, the increase in maximum dry specific weight, the decrease in optimum humidity and, as a consequence, better resistance to settlement, permeability, as well the increased stiffness and decreased void ratio. Thus, the study of soil behavior is essential for project safety, especially in civil engineering.

Keywords: Stone Dust. Soil improvement. Characterization tests. Civil Construction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação das três fases do solo	20
Figura 2: Classificação das curvas granulométricas.	21
Figura 3: Fluxograma de pesquisa.	31
Figura 4: Mapa de localização do município de São João do Rio do Peixe-PB.	32
Figura 5: Estocagem de pó de pedra.	32
Figura 6: Mapa dos pontos para amostragem de solo em São João do Rio do Peixe-PB.	33
Figura 7: Preparação da superfície de escavação(a); Medição da profundidade do perfil (b).34	
Figura 8: (a) Série de Peneiras; (b) Conjunto de peneiras.....	36
Figura 9: Preparação do solo. (a) Destorroamento; (b) Homogeneização e quarteamento.....	37
Figura 10: Ensaio de Plasticidade. (a) Moldagem da amostra em forma esférica; (b) Moldagem da amostra em forma cilíndrica	38
Figura 11: Aplicação da energia de compactação.....	39
Figura 12: (a) Extração do corpo de prova; (b) Remoção da amostra para ensaio de umidade.	40
Figura 13: Ensaio de Plasticidade. (a) Amostra 01; (b) Amostra 02; (c) Amostra 03; (d) Amostra 04.	44

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Limites de consistência.	23
Gráfico 2: Curva de compactação.	27
Gráfico 3: Curvas de distribuição granulométrica dos solos amostrados.....	43
Gráfico 4: Curvas de compactação pelo ensaio de Proctor Normal (a) Amostra 01 (b) Amostra 03; (c) Amostra 04.....	45
Gráfico 5: (a) Comparação entre as curvas de compactação, (b) Comparação entre as curvas de compactação cotadas.....	48

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Esquema de classificação do solo para o SUCS.	26
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação granulométrica através do CC e CNU.....	22
Tabela 2: Classificação do tamanho dos grãos.....	24
Tabela 3: Termologia do SUCS.	25
Tabela 4: Amostras ensaiadas.	35
Tabela 5: Umidade dos solos amostrados.	41
Tabela 6: Resumo dos ensaios de granulometria.	42
Tabela 7: Umidade versus Peso específico seco.	45
Tabela 8: Valores de peso específico máximo relativo à umidade ótima.	47

LISTA DE ABREVIações E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AESA	Agência Executiva de Gestão das Águas da Paraíba
CC	Coeficiente de Curvatura
CNU	Coeficiente de não uniformidade
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
NBR	Norma Brasileira
PB	Paraíba

LISTA DE SÍMBOLOS

km	Quilômetro
km ²	Quilômetro quadrado
hab/km ²	Habitante por quilômetro quadrado
mm	Milímetros
h	Umidade
h _{ótima}	Umidade ótima
γ _d	Peso específico aparente seco
γ _{dmáx}	Peso específico aparente seco máximo
%	Porcentagem
°C	Graus Celsius
g/cm ³	Grama por centímetro ao cubo

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
2. PROBLEMATIZAÇÃO	17
3. JUSTIFICATIVA.....	17
4. OBJETIVOS.....	18
4.1 Objetivo Geral	18
4.2 Objetivos Específicos	18
5. REFERENCIAL TEÓRICO.....	19
5.1. Origem dos Solos.....	19
5.1.1. Granulometria	20
5.1.2. Umidade	22
5.1.3. Limites de Consistência	22
5.1.3.1. Limite de plasticidade	23
5.1.4. Classificação dos solos.....	24
5.1.4.1. Sistema Unificado de Classificação dos Solos.....	25
5.1.5. Compactação dos solos	26
5.2. Melhoramento das Propriedades do Solo	28
5.2.1. Estabilização mecânica	28
5.2.2. Estabilização química.....	29
5.2.3. Estabilização granulométrica	29
5.3. Pó de Pedra	29
6. METODOLOGIA	31
6.1. Área de Estudo	31
6.2. Usina de Britagem.....	32
6.3. Mapeamento dos Pontos.....	33
6.4. Coleta das Amostras	34
6.5. Ensaios	35

6.5.1. Ensaio de umidade	35
6.5.2. Ensaio de granulometria.....	36
6.5.3. Ensaio de plasticidade	37
6.5.4. Ensaio de compactação	38
7. RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
7.1. Ensaio de Umidade.....	41
7.2. Ensaio de Granulometria	41
7.3. Ensaio de Plasticidade	43
7.4. Ensaio de Compactação.....	45
8. CONCLUSÃO	49
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

1. INTRODUÇÃO

Desde os tempos remotos, sabe-se da necessidade do homem em trabalhar com os solos, podendo-se até afirmar que esta é uma premissa tão antiga quanto a civilização. Tal necessidade surgiu com os problemas de fundações e obras de terra oriundas das grandes construções da antiguidade, destacando-se, as pirâmides do Egito, a grande muralha da China, os templos da Babilônia, os aquedutos e estradas do Império Romano (CAPUTO, 1988).

Atualmente, o conhecimento do solo é algo imprescindível para a segurança em projetos, sobretudo na área da engenharia civil. Para tanto, as normas técnicas brasileiras (NBR), recomendam uma análise detalhada das propriedades físicas e mecânicas do solo para todos os projetos que utilizam o solo como estrutura de suporte (CAMELO, 2018).

Segundo Muñoz (2014) as investigações geotécnicas são essenciais para determinação do comportamento e das características do solo. Este processo permite não só identificar, como analisar áreas, depósitos, camadas superficiais ou profundas em condições adversas, para que medidas de engenharia possam ser tomadas a fim melhorá-los e, dessa forma, seja viável a execução de projetos nesses locais.

Outra situação a ser analisada é a preocupação contínua com a preservação ambiental, no qual tem incentivado a busca de fontes alternativas para substituição dos agregados naturais. Nesse contexto, a utilização da britagem da rocha (pó de pedra) na construção civil é uma alternativa singular (MENOSSEI, 2004). O aproveitamento dos finos advindos do processo de britagem não é algo novo. Segundo Nugent (1979 *apud* MENOSSEI, 2004) este material já era utilizado há séculos na construção civil em países desenvolvidos, como Estados Unidos e Canadá.

Desta forma, este estudo apresenta uma análise acerca do melhoramento do solo, com relação ao comportamento físico e mecânico, com a adição de pó de pedra, na camada superficial da cidade de São João do Rio do Peixe, interior da Paraíba. Ao final, este trabalho apresentará, de um modo geral, as características físicas e mecânicas dos solos amostrados, bem como a eficiência deste processo sob a ótica da geotecnia e ambiental.

2. PROBLEMATIZAÇÃO

Segundo o programa Minha Casa Minha Vida (2009, *apud* ROLNIK; KLINK, 2011), a dificuldade em encontrar terrenos com infraestrutura adequada para edificar se torna cada vez mais trivial. Nesse sentido, Almeida e Trindade (2017) justifica que o processo de urbanização acelerado associado ao crescimento desordenado das cidades, acarreta inúmeros problemas relacionados às ocupações de áreas com solos desfavoráveis.

Nessa perspectiva, o dimensionamento inadequado de fundações aliado a investigações geotécnicas do subsolo ineficientes, contribui para ocorrência de diversas manifestações patológicas em edificações. Como consequência, Souza e Ripper (1998 *apud* Silva et al., 2017) destacam a incidência de recalques nessas estruturas, que refletem em trincas e fissuras em sistemas estruturais e alvenaria.

Outro fator determinante citado por Formigoni (2006, *apud* INÉIAS, 2017) se refere ao reaproveitamento de resíduos. Na atualidade, esta atividade se torna ecologicamente correta e viavelmente econômica. Hoje, só no Brasil cerca de 240.000 toneladas de rejeitos de rochas são geradas por ano, sem nenhum plano de destinação final.

Segundo Rubin (2015, *apud* INÉIAS, 2017), comumente o pó de pedra é estocado ao ar livre nos pátios de pedreiras sem um destino específico. Ficando assim, sujeitos à ação do tempo, causando danos ambientais, tais como poluição ar, assoreamento, contaminação por lixiviação nas áreas de drenagem entre outros.

3. JUSTIFICATIVA

De acordo com Milititsky (2008, *apud* SANTIAGO, 2014) mais de 80% dos casos de mau desempenho de fundações de obras de pequeno e médio porte são oriundas da ausência de investigação do solo. Tal imprudência tem ocasionado nas estruturas diversas manifestações patológicas e, em casos extremos, a ruína da edificação (CAMELO, 2018).

Segundo Keller (1996, *apud* PEDRON et al., 2006), as investigações geotécnicas de solos nas áreas urbanas e em suas proximidades devem ser retratadas como uma ferramenta fundamental na tomada de decisão para expansão urbana e recuperação de áreas degradadas.

A cidade de São João do Rio do Peixe é referência no fornecimento de produtos derivados da britagem, tanto para atender as necessidades do próprio município como em cidades circunvizinhas. O conhecimento deste fato e a percepção da carência de investigações do solo nos projetos de engenharia, justifica-se a necessidade do estudo prévio do solo na

engenharia civil, bem como o estudo de novas formas de melhoramento do solo. Neste contexto, a adição do pó de pedra surge como uma forma inovadora de melhorar suas propriedades físicas e mecânicas do solo, além de ser alternativa mitigadora para indústria da construção civil, levando em consideração seu possível reuso, economia e a questão ambiental.

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo Geral

Em uma perspectiva geral, o objetivo deste trabalho é caracterizar geotecnicaamente os solos amostrados da cidade de São João do Rio do Peixe-PB e analisar a melhoria diante seu comportamento mecânico com a adição do pó de pedra.

4.2 Objetivos Específicos

- Analisar os parâmetros mecânicos e físicos dos solos amostrados;
- Atestar a eficácia do pó de pedra no melhoramento do solo em estudo, variando os valores de teor de adição.

5. REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo serão abordados os temas que colaboraram para a referida pesquisa, como: estudo das propriedades físicas e mecânicas do solo, do agregado miúdo “pó de pedra” e as medidas de engenharia que podem ser tomadas a fim de obter a estabilização dos solos.

5.1. Origem dos Solos

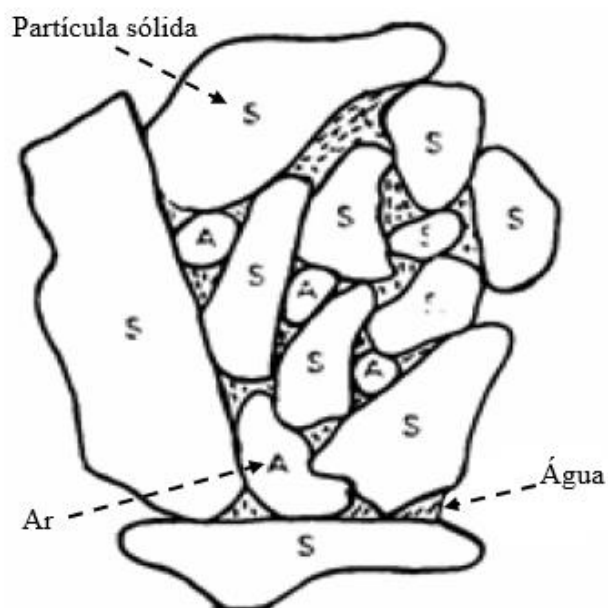
Todos os solos são produtos provenientes da alteração das propriedades físicas e químicas das rochas e de seus minerais, que inicialmente constituíam a crosta terrestre (CAPUTO, 1988; PINTO, 2006). Estes processos, geralmente conhecidos como intemperismo ou meteorização, consiste no desgaste rochoso por meio de processos mecânicos ou químicos.

O desgaste mecânico comumente é ocasionado pela expansão e contração das rochas em virtude da variação de temperatura, e ação das geleiras glaciais, do vento e da água corrente de rios, riachos e ondas do mar são os principais agentes responsáveis por esse desgaste (DAS, 2011). Segundo Caputo (1988), a partir destes processos se originam as areias e pedregulhos (solos de partículas grossas), siltes (partículas intermediárias) e somente em condições especiais, argilas (partículas finas).

No intemperismo químico, ocorre a modificação das rochas originais em novos minerais por meio de reações químicas. O ácido carbônico em contato com os minerais existentes nas rochas, contribuem para formação de novos minerais e sais. Os produtos destas reações resultam na formação de argilas e outros minerais (DAS, 2011; CAPUTO, 1998).

Caputo (1988) ressalta que o solo é um material composto por um conjunto de partículas sólidas, apresentando vazios entre si, que podem estar parcialmente ou totalmente preenchidos pela água. Comumente, este sistema se apresenta em três fases: sólida, líquida e gasosa, conforme está ilustrado na Figura 01.

Figura 1: Representação das três fases do solo



Fonte: Adaptado de Soares; Pinheiro; Tavares, 2006.

Os solos apresentam-se na natureza como uma mistura heterogênea, ou seja, com mais de um composto mineralógico em sua composição. Desse modo, diferentes tipos de comportamentos são promovidos ao longo de seu perfil estrutural. Tal reação pode ser mensurada a partir do desenvolvimento dos agregados, que por sua vez dita a acomodação entre os grãos e possibilita a determinação do índice de vazios, porosidade, expansão, capacidade de absorção de água, densidade aparente e saturação (CAMELO, 2018).

5.1.1. Granulometria

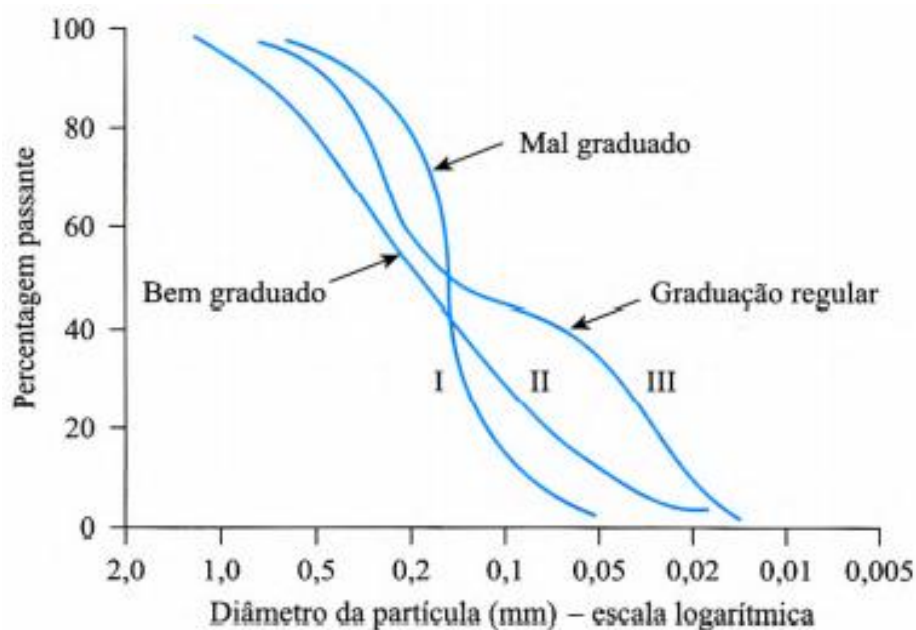
A distribuição granulométrica dos agregados pode ser dividida em dois métodos distintos, normatizados pela ABNT NBR 7181/16, com título “solo - análise granulométrica”, cuja utilização variará de acordo com o tipo do solo e sua finalidade. Esses métodos são: análise granulométrica por peneiramento e análise granulométrica por sedimentação (DAS, 2011).

Os solos granulares (areias e pedregulhos), por possuírem pouca ou nenhuma quantidade de finos, podem ter a sua curva granulométrica inteiramente determinada somente através do processo de peneiramento. Todavia, para siltes e argilas, se utiliza a sedimentação dos sólidos no meio líquido. Quando o solo granular apresenta quantidade significativa de finos, se faz necessário a análise granulométrica conjunta (SOARES, PINHEIRO E TAVARES, 2006).

A análise granulométrica permite, por meio dos pares representativos dos diâmetros das partículas e da porcentagem de ocorrência, a construção da curva de distribuição granulométrica (SOARES, PINHEIRO E TAVARES, 2006). Essa curva possui relevância na caracterização geotécnica do solo, excepcionalmente no caso dos solos granulares.

A forma dessa curva pode distinguir diferentes tipos de granulometria, podendo os solos serem classificados em: mal graduado, bem graduado ou com graduação regular. A presença de partículas com o mesmo diâmetro ao longo de uma curta faixa, forma uma curva íngreme, caracterizando um solo mal graduado ou uniforme (curva I). A curva II, representa um solo onde o tamanho dos grãos é distribuído ao longo de uma ampla faixa contínua, e por isso é denominado de solo bem graduado ou desuniforme. Enquanto solos que apresentam combinação de duas ou mais frações com granulação uniforme (curva III), são chamados de solo de graduação regular ou granulometria descontínua (DAS 2011). Todas essas graduações estão ilustradas na Figura 2.

Figura 2: Classificação das curvas granulométricas.



Fonte: Das, 2011.

Conforme é demonstrado na Tabela 1, as características dos solos são expressas através do coeficiente de não uniformidade (CNU), que indicam a amplitude dos tamanhos dos grãos, ou seja, a falta de uniformidade dos grãos. O coeficiente de curvatura (CC) identifica o formato e a simetria da curva granulométrica (CAPUTO, 1988; SOARES, PINHEIRO E TAVARES, 2006).

Tabela 1: Classificação granulométrica através do CC e CNU.

CC	Curva	CNU	Uniformidade
Menor que 1,0	Descontínua	Menor que 5,0	Muito uniforme
Entre 1,0 e 3,0	Suave	Entre 5,0 e 15,0	Uniformidade média
Maior que 3,0	Muito uniforme na parte central	Maior que 15,0	Desuniforme

Fonte: Adaptado de Das, 2011.

5.1.2. Umidade

De acordo com Caputo (1988), a umidade (h) pode ser definida como a razão entre a massa de água contida num determinado volume de solo e a massa da parte sólida existente neste mesmo volume, expressa em porcentagem.

5.1.3. Limites de Consistência

Os solos cuja textura apresente quantidade significativa de finos, não são caracterizados adequadamente pelo ensaio de granulometria. Nestes casos, se faz necessário a análise da forma das partículas, bem como sua composição química e mineralógica, que estão estreitamente ligadas ao teor de umidade (CAPUTO, 1988).

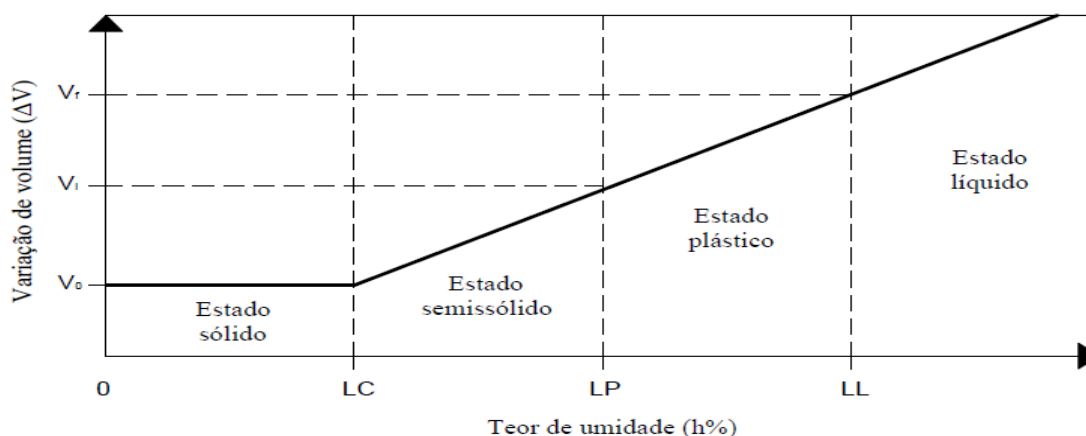
Nos diversos ramos da engenharia, o comportamento plástico dos materiais é fundamentado nas características tensão-deformação. Portanto, considera-se que o material é elástico quando o solo recupera sua forma e volume original, ao retirar as forças externas que o deformava. Sua classificação como plástico se refere ao solo que não retorna ao seu estado original ao cessar forças deformantes (CAPUTO, 1988).

O termo consistência está associado ao grau de resistência e plasticidade do solo que depende explicitamente das ligações internas entre suas partículas (SOARES, PINHEIRO E TAVARES, 2006). De acordo com Das (2011), o comportamento dos solos finos varia em função do teor de umidade. Este parâmetro pode acarretar a variação do volume do solo e, conseqüentemente, dividi-lo em quatro estados básicos: sólido, semissólido, plástico e líquido.

Segundo o último autor citado, os limites que caracterizam cada mudança de estado do solo, são denominados de limites de Atterberg ou limites de consistência (de acordo com o Gráfico 1). A variação da umidade na transição entre os estados sólido e semissólido é definida como limite de contração (LC). À medida que o teor de umidade é elevado, verifica-se a

passagem do estado semissólido para o plástico, denominada de limite de plasticidade (LP). Por fim, uma vez que o solo se comporte como um fluido, houve a transição do estado plástico para o líquido, definido como limite de liquidez (LL).

Gráfico 1: Limites de Atterberg.



Fonte: Adaptado de Soares, Pinheiro e Tavares (2006).

5.1.3.1. Limite de plasticidade

O limite de plasticidade corresponde ao teor mínimo de umidade no qual o índice de coesão é relativamente pequeno para impedir a deformação e, ao mesmo tempo, suficientemente alto para garantir a manutenção do solo (SOARES, PINHEIRO E TAVARES, 2006).

Nesse sentido, a ABNT NBR 6484 (2020, p. 2) define plasticidade como “propriedade dos solos finos de sofrerem grandes deformações permanentes, sem separação, fissuramento ou variação de volume apreciável”. Assim, Caputo (1988), ressalta que as partículas que apresentam esses parâmetros são as argilas.

No Brasil, o limite de plasticidade é normatizado pela ABNT NBR 7180/2016, no qual sua determinação ocorre através do cálculo da porcentagem de umidade para a qual o solo começa a se fraturar ao tentar moldar um cilindro de 3 mm de diâmetro e cerca de 10 cm de comprimento. Em síntese, é o menor teor de umidade em que o solo se comporta plasticamente CAPUTO (1988).

5.1.4. Classificação dos solos

A diversidade de solos em conjunto com seus diferentes comportamentos, instigaram organizações no mundo todo quanto a necessidade de classificá-los. Neste sentido, Pinto (2006, p. 63) ressalta que, “o objetivo da classificação dos solos, sob o ponto de vista de engenharia, é poder estimar o provável comportamento do solo ou, pelo menos, orientar o programa de investigação necessário para permitir a adequada análise de um problema”.

Nessa perspectiva, Das (2011) afirma que a característica responsável por diferenciar os solos é o tamanho das partículas que os compõem. A partir deste parâmetro, recebem a denominação de pedregulhos, areia, silte ou argila. Diante disso, diversas instituições desenvolveram sistemas de classificação do solo (Tabela 2), no qual o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) é aceito de maneira universal, sendo adotado pela Sociedade Americana de Testes e Materiais (ASTM).

Tabela 2: Classificação do tamanho dos grãos.

Nome da organização	Tamanho do grão (mm)			
	Pedregulho	Areia	Silte	Argila
Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT)	> 2	2 a 0,06	0,06 a 0,002	< 0,002
Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA)	> 2	2 a 0,05	0,05 a 0,002	< 0,002
Associação Americana de Rodovias Estaduais e Autoridades de Transporte (AASHTO)	76,2 a 2	2 a 0,075	0,075 a 0,002	< 0,002
Sistema Unificado de Classificação dos Solos (Corpo de Engenharia do Exército dos Estados Unidos, Bureau de Reclamações dos Estados Unidos e Sociedade Americana para Testes e Materiais)	76,2 a 4,75	4,75 a 0,075	Grãos finos (Por exemplo, siltes e argilas) < 0,075	

Fonte: Adaptado de Das, 2011.

De acordo com Soares, Pinheiro e Tavares (2006), todos os solos, em sua fase sólida, contêm grãos irregulares em proporções variadas. Neste contexto, o estudo das variações do tamanho das partículas e de suas respectivas porcentagens de ocorrência permitem determinar a distribuição granulométrica dos agregados e representá-la através de uma curva granulométrica.

No Brasil, a ABNT/NBR 6502 - Terminologia - Rochas e Solos (1995, p. 8-9-15), classifica os solos de acordo com a sua granulometria

Bloco de rocha: Fragmentos de rocha transportados ou não, com diâmetro superior a 1 m.

Matacão: fragmento de rocha transportado ou não, comumente arredondado por intemperismo ou abrasão, com uma dimensão compreendida entre 200 mm e 1 m.

Pedregulho: solos formados por minerais ou partículas de rocha, com diâmetro compreendido entre 2,0 e 60,0 mm. Quando arredondados ou semi-arredondados, são denominados de cascalhos ou seixos. Divide-se quanto ao diâmetro em: pedregulho fino (2 a 0,6 mm), pedregulho médio (6 a 20 mm) e pedregulho grosso (0,6 a 2,0 mm).

Areia: solo não coesivo e não plástico formado por minerais ou partículas de rochas com diâmetros compreendidos entre 0,06 mm e 2,0 mm. De acordo com o tamanho dos grãos, as areias se classificam em: areia fina (0,06 mm a 0,2 mm), areia média (0,2 mm a 0,60 mm) e areia grossa (0,60 mm a 2,0 mm).

Silte: solo que apresenta baixo ou nenhuma plasticidade, baixa resistência quando seco ao ar. Suas propriedades dominantes são devidas à parte constituída pela fração de silte. É formado por partículas com diâmetros compreendidos entre 0,002 mm e 0,06 mm.

Argila: solo de graduação fina constituída por partículas com dimensões menores que 0,002 mm, apresentando coesão e plasticidade.

5.1.4.1. Sistema Unificado de Classificação dos Solos

Diante as necessidades de construções de campos de aviação durante a segunda guerra mundial, surgiu a forma original do sistema de classificação dos solos, proposto pelo engenheiro civil Arthur Casagrande, na década de 40. Atualmente, o SUCS é normatizado pela norma D-2487 da ASTM e amplamente utilizado por engenheiros geotécnicos (DAS, 2011).

Segundo Soares, Pinheiro e Tavares (2006), este sistema classifica os solos em grossos, finos e altamente orgânicos. No qual, para a fração grossa, mantém as características granulométricas dos agregados, enquanto para porção fina, Casagrande optou pelos limites de consistências.

Nesta perspectiva, Pinto (2006) ressalta que a identificação dos solos ocorre por meio de um par de letras. No qual o prefixo define o tipo de solo, enquanto o sufixo se refere as características granulométricas, conforme é mostrado na Tabela 3.

Tabela 3: Termologia do SUCS.

Simbologia	Tipo de solo	Simbologia	Dados complementares
G	Pedregulho	W	Bem graduado
S	Areia	P	Mal graduado
M	Silte	H	Alta compressibilidade
C	Argila	L	Baixa Compressibilidade
O	Solo orgânico		

Fonte: Adaptado de Pinto, 2006.

Segundo Pinto (2006), o primeiro aspecto a considerar neste sistema é a porcentagem em massa das partículas presente no solo. Considera-se solos grosseiros as partículas que ficam

retidas na peneira de 0,075 mm (nº 200). Portanto, se a porcentagem for inferior a 50%, o solo será considerado com granulação grosseira, G ou S. Caso seja superior a 50%, o solo será considerado de granulação fina, M, C ou O.

Ainda de acordo com Pinto, solos grosseiros tem suas informações complementares (W ou P) determinadas por meio dos coeficientes CC e CNU. Enquanto solos com granulação fina, podem ser classificados através dos limites de consistência (LL e LP), com a simbologia L ou H. O Quadro 1 dispõe de todas as informações necessárias para classificação dos solos conforme recomenda o Sistema Unificado.

Quadro 1: Esquema de classificação do solo para o SUCS.

% P #200 < 50	G > S : G		% P #200 < 5	GW CNU > 4 e 1 < CC < 3	
			% P #200 > 12	GP CNU < 4 e 1 > CC > 3	
			5 < #200 < 12	GC	
				GM	
	S > G : S		5 < #200 < 12	GW-GC, GP-GM, etc.	
			% P #200 < 5	SW CNU > 6 e 1 < CC < 3	
			% P #200 > 12	SP CNU < 6 e 1 > CC > 3	
				SC	
% P #200 > 50	C	CL		SM	
		CH			
	M	ML			
		MH			
	O	OL			
		OH			
			5 < #200 < 12	SW-SC, SP-SC, etc.	

Fonte: Adaptado de Pinto, 2006.

5.1.5. Compactação dos solos

A compactação de solos comumente é empregue nas diversas obras de engenharia com a finalidade de reduzir do número de vazios, ou seja, aumentar o contato entre as partículas e, conseqüentemente, torná-lo mais homogêneo. Seu efeito confere melhorias não só quanto a redução de futuros recalques e da permeabilidade, mas, também, no aumento da rigidez e resistências do solo (PINTO, 2006).

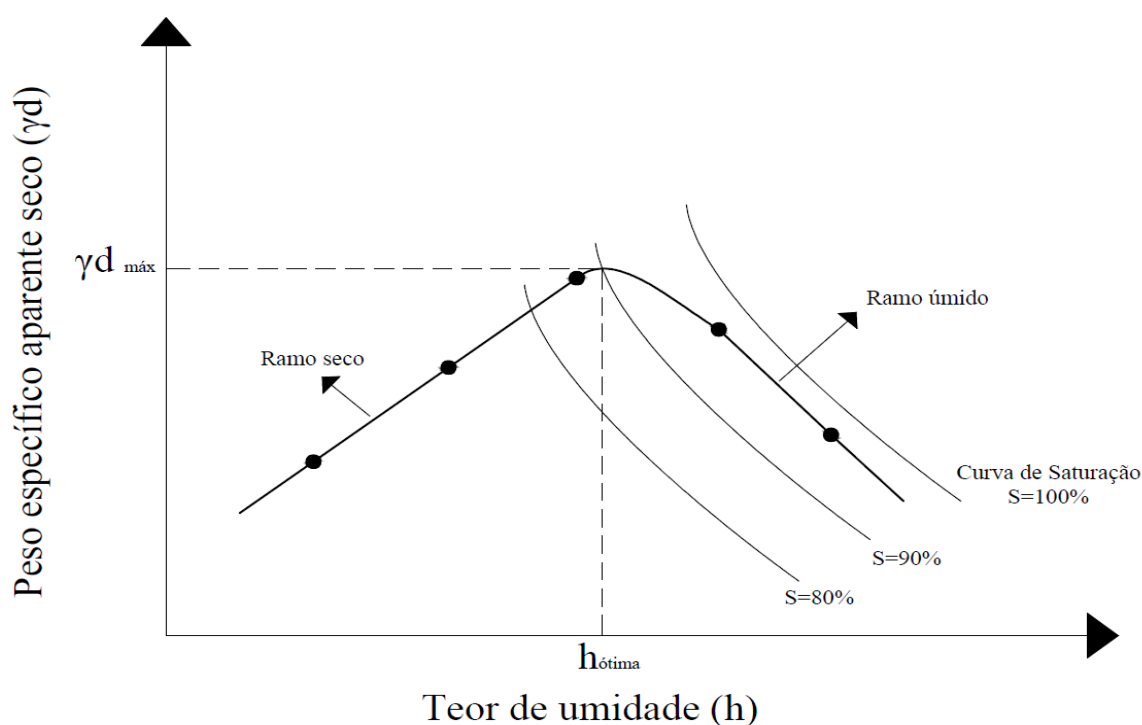
Ainda em consonância com Pinto (2006), essa técnica consiste no procedimento de melhorar as propriedades do solo através de processos manuais ou mecânicos que ocorrem por meio da aplicação de alguma forma de energia, seja ela por impacto, vibração, compressão estática ou dinâmica.

Ralph Proctor, engenheiro responsável por iniciar técnicas de compactação na década de 30, concluiu através de seus ensaios, que o teor de umidade tem correlação direta nos resultados de compressibilidade (CAPUTO, 1988). Diante disso, Pinto (2006) destaca que a partir dos trabalhos dirigidos por Proctor, surgiu o ensaio de compactação, no qual foi universalmente padronizado, inclusive pela ABNT como NBR 7182/86 intitulada Ensaio de Compactação Proctor.

Pinto (2006) ressalta que o aumento da massa específica corresponde à eliminação de ar dos vazios presentes no solo. Neste contexto, o autor ressalta que a partir de um determinado teor de umidade, a compactação não é mais capaz de expulsar o ar desses vazios, pois o grau de saturação está elevado e o ar ocluído por água.

Trindade et al. (2003), considera que todos os solos, diante a aplicação de uma energia compactação constate, possuem um determinado teor de umidade, denominado de umidade ótima ($h_{ótima}$) no qual conduz a um peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{d\text{máx}}$). Esta premissa pode ser nitidamente evidenciada no Gráfico 2, em que o ramo ascendente da curva de compactação se refere ao ramo seco e, o descendente, ao ramo úmido.

Gráfico 2: Curva de compactação.



Fonte: Adaptado de Soares, Pinheiro e Tavares (2006).

5.2. Melhoramento das Propriedades do Solo

Segundo Guérrios (2013), a escassez de recursos naturais, aliada à necessidade de estabilização de solos, tem corroborado intensamente na produção de diversas pesquisas neste âmbito, para desenvolver mecanismos eficientes que melhorem os solos na construção civil. Nesse sentido, Corte (2013) propõe como possíveis medidas corretivas a remoção e substituição do solo por outro de qualidade superior, alteração do local da obra, adaptação do projeto à obra e, por fim, o melhoramento do solo.

Entende-se por melhoria ou reforço dos solos conferir, por meio processos atribuídos às propriedades físicas e mecânicas, maior resistência à aplicação de cargas, ao desgaste ou à erosão (SPECHT, 2000; WALLAU, 2004). Diante disso, os autores pontuam que as técnicas de melhoramento do solo são empregadas comumente em obras de engenharia devido à diversidade de condições geográficas e geológicas, destacando os processos de estabilização mecânica, química e granulométrica.

Brito e Paranhos (2017) comentam que não existe um sistema universal para estabilização do solo. A adoção de um ou outro sistema depende da análise de diversos fatores, tais como: propriedades do solo disponível, finalidade de utilização do solo, exigências de projeto e viabilidade técnica e econômica.

5.2.1. Estabilização mecânica

Segundo Vargas (1977, *apud* WALLAU, 2004) o conceito de estabilização mecânica não difere da concepção de compactação dos solos, consistindo no processo de densificação do solo por meio da aplicação de pressão, impacto ou vibração. Arrivabeni et al. (2018) comenta que esta é uma técnica complementar a outros métodos de estabilização, isto é, a compactação por si só não constitui um processo de estabilização, e sim um artifício integrante das técnicas que utilizam aditivo como agente estabilizante.

Os ensaios de compactação dos solos buscam resultados semelhantes a estabilização mecânica no campo. Nesse sentido, Caputo (1988, p. 359) ressalta: “Os resultados dos ensaios de compactação Proctor obtidos em laboratório são utilizados, basicamente, para determinar se o uso de rolos compactadores em campo é suficiente.”

5.2.2. Estabilização química

A estabilização química consiste no processo de adição de algum componente químico, seja ele cimentante ou não, para melhorias em suas propriedades na ótica da engenharia (ARRIVABENI et al. 2018). Nesse contexto, Vargas (1977, *apud* WALLAU, 2004) ressalta que misturas solo-cimento são comumente utilizadas em obras de engenharia civil por promover uma alta resistência, baixa deformabilidade e durabilidade a agentes agressivos como água e a temperatura.

5.2.3. Estabilização granulométrica

Segundo Vargas (1914, *apud* BONAFÉ, 2004), os solos naturais cujas propriedades apresentem resultados insatisfatórios para utilização, podem ser corrigidos por meio da combinação e manipulação adequada de determinadas quantidade de frações constituintes, de forma a obter um produto final de estabilidade superior ao solo de origem. Este processo é denominado de estabilização granulométrica.

Para Wallau (2004), o solo é considerado naturalmente estabilizado quando suas partículas constituintes apresentam diversos diâmetros ao longo de uma ampla faixa contínua, caracterizando um solo bem graduado, isto é, pertencente aos grupos GW ou SW de Casagrande.

Nessa perspectiva, Vargas (1977, *apud* WALLAU, 2004) ressalta que pesquisas acerca da disponibilidade de agregados grossos, intermediários e finos nas proximidades se torna indispensável, considerando o viés econômico. O autor ainda destaca que é interessante que se alcance a estabilidade necessária do solo utilizando apenas dois tipos de materiais.

5.3. Pó de Pedra

A associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT NBR 9935 (2011, p.2) caracteriza o agregado como “(...) material granular, geralmente inerte, com dimensões e propriedades adequadas para a preparação da argamassa ou concreto”.

Segundo a NBR NM 66/1988, as rochas são classificadas em três grupos, sendo elas ígneas, metamórficas e sedimentares. Dentro destas classificações existem subdivisões que estão acondicionadas a textura, composição química e arranjo mineralógico.

De acordo com Farias (2007 *apud* ENÉIAS, 2017) a profundidade que a rocha ígnea é resfriada determinará sua resistência. Sabendo que estas rochas se formaram há milhares de anos nas regiões mais profundas da crosta terrestre e que, o processo de resfriamento ocorre de forma lenta, favorecendo o processo de cristalização desses agregados, os tornando agregados ideais para construção civil.

Sá (2006 *apud* ENÉIA, 2017) ressalva que o pó de basalto recebe diferentes denominações, sendo elas: areia artificial, finos de pedra britada, areia entre outros que são encontrados nas bibliografias. Outra situação conflitante é que os autores divergem opiniões sobre a granulometria que caracteriza o pó de brita e sua origem.

6. METODOLOGIA

O presente trabalho trata de um estudo descritivo com caráter qualitativo (OLIVEIRA, 2011). Com a finalidade de explanar da melhor forma possível a temática estudada, foram realizadas pesquisas bibliográficas, a partir de monografias, artigos, revistas e em periódicos na internet. Além disso, foi realizado um estudo de campo com o objetivo de coletar amostras de solos, para realizar ensaios de prospecção do solo, bem como suas respectivas análises. O fluxograma de todas as etapas do processo metodológico está representado na Figura 3.

Figura 3: Fluxograma de pesquisa.

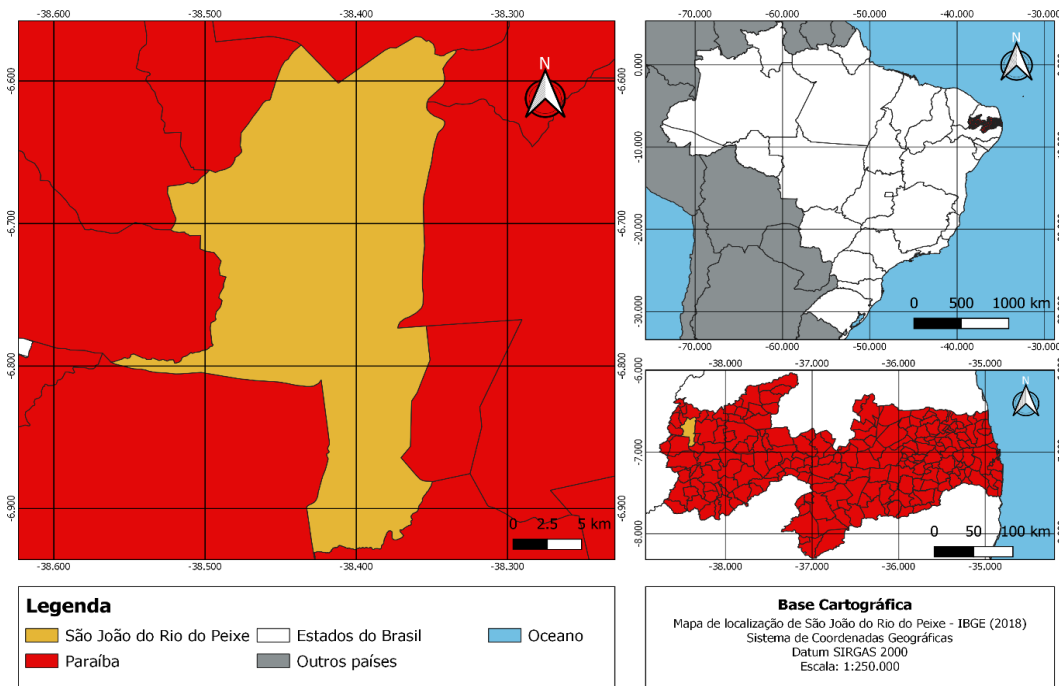


Fonte: Próprio autor, 2021.

6.1. Área de Estudo

O cenário do estudo foi no município de São João do Rio do Peixe-PB, localizado a uma distância aproximada de 399 km da capital João Pessoa, tendo como microrregião as cidades de Cajazeiras e Sousa e mesorregião o Sertão Paraibano. De acordo com o censo realizado pelo IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2010), o município possui uma área territorial de 476,238 km², densidade demográfica de 38,38 hab/km² e uma população de 18.201 habitantes (IBGE, 2010). Com o auxílio do *software QGIS*®, sendo este o programa utilizado para desenvolvimento de todos os mapas desse trabalho, foi elaborado o mapa de localização de São João do Rio do Peixe-PB, ilustrado na Figura 4.

Figura 4: Mapa de localização do município de São João do Rio do Peixe-PB.



Fonte: Próprio autor, 2021.

6.2. Usina de Britagem

O material empregado como agente estabilizante para o solo em estudo foi o pó de pedra advindo da usina de britagem BRITAJA. Esta usina é referência no fornecimento de produtos derivados de britagem tanto no próprio Município em estudo, quanto em cidades circunvizinhas. No que tange os produtos ofertados pela empresa, destacam-se a brita $\frac{3}{4}$ " (19,1 mm), brita $\frac{3}{8}$ " (9,8 mm) e pó de pedra. As Figuras 5 (a) e (b) exibem a entrada principal da usina e a estocagem do pó de pedra ao ar livre, respectivamente.

Figura 5: Usina BRITAJA. (a) Entrada principal da Usina; (b) Estocagem do pó de pedra.



(a)



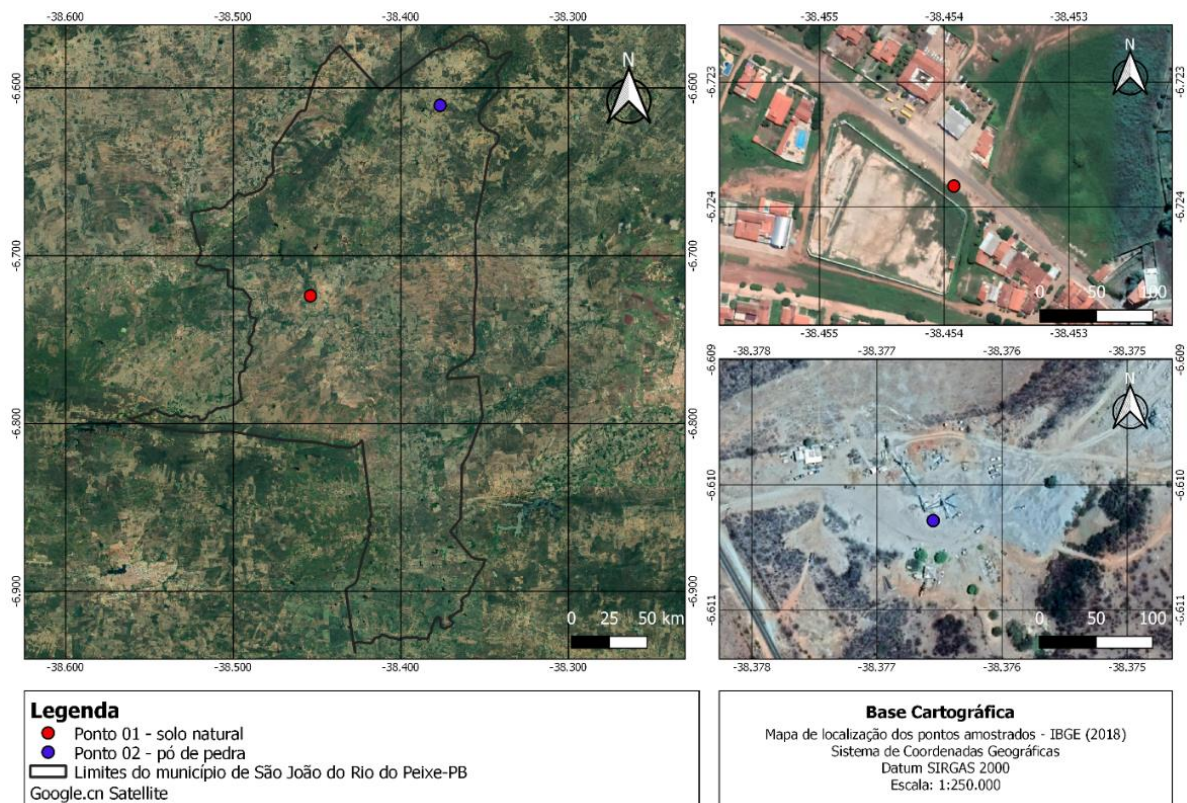
(b)

Fonte: Próprio autor, 2021.

6.3. Mapeamento dos Pontos

O início das atividades ocorreu com a identificação e mapeamento dos pontos para a coleta das amostras de solo. Desse modo, foram coletadas as coordenadas de dois pontos para amostragem por meio de um aparelho receptor GPS Garmin 64x. A localização de cada ponto pode ser observada no mapa disposto na Figura 6.

Figura 6: Mapa dos pontos para amostragem de solo em São João do Rio do Peixe-PB.



Fonte: Próprio autor, 2021.

6.4. Coleta das Amostras

No tocante às coletas *in situ*, foram realizadas com base nas coordenadas dos pontos elencados, transcorrida no dia 10 de maio de 2021, no período da manhã devido a menor incidência de raios solares. Esta etapa foi realizada manualmente, utilizando ferramentas para escavação de solo no estado deformado como enxada, chibanca, alavanca, pá, colher de pedreiro e trena para avaliar a profundidade do perfil do solo (Figura 7b). O procedimento consistiu em limpar previamente o local, removendo a primeira camada mais superficial onde eventualmente estava coberta por vegetação (Figura 7a).

Figura 7: (a) Preparação da superfície de escavação; (b) Medição da profundidade do perfil.



Fonte: Próprio autor, 2021.

Em seguida, executou-se a abertura do perfil de amostragem com aproximadamente 20cm de profundidade, com o auxílio da chibanca e da alavanca, sendo utilizada a pá e a colher de pedreiro para a coleta de cerca de 15 kg de amostra deformada. A amostra foi acondicionada em saco plástico fechado para reduzir as perdas de umidade. Concluída a coleta, as amostras foram transportadas para o laboratório de mecânica dos solos da Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFERSA, Campus Pau dos Ferros, para acondicionamento e por fim serem realizados os ensaios de caracterização.

6.5. Ensaio

No que tange o conhecimento acerca das propriedades físicas e mecânicas do solo, fez-se necessário a realização de ensaios de prospecção para análise de suas respectivas caracterizações. Nos dias 12, 13 e 14 de maio de 2021, foram realizados na UFERSA, Campus Pau dos Ferros, os ensaios de umidade, granulometria, plasticidade e compactação, de amostras com porcentagens previamente estabelecidas, evidenciadas na Tabela 4.

Tabela 4: Amostras ensaiadas.

AMOSTRAS	SOLOS	ENSAIOS REALIZADOS
Amostra 01	Solo natural	Granulometria, plasticidade, compactação e umidade
Amostra 02	Pó de pedra	Granulometria, plasticidade e umidade
Amostra 03	Solo (85%) Pó de pedra (15%)	Granulometria, plasticidade e compactação
Amostra 04	Solo (75%) + Pó de pedra (25%)	Granulometria, plasticidade e compactação

Fonte: Próprio autor, 2021.

6.5.1. Ensaio de umidade

Para determinação do teor de umidade presente numa amostra de solo, utilizou-se o método da estufa. Seguindo as recomendações da ABNT NBR 6457/2016, intitulada “Amostra de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização”, destorroou-se a amostra evitando a quebra dos grãos e, por meio da análise visual, constatou-se que a dimensão dos grãos estava compreendida entre 2 e 20 mm. Desse modo, em conformidade com a Tabela A.1 da referida norma (ABNT, 2016), retirou-se uma quantidade de material da amostra, superior a 30 g e inferior a 300 g.

Para realizar o ensaio, além da amostra de solo coletada em seu estado natural, foram utilizados os seguintes equipamentos: estufa com temperatura determinada entre 105°C e 110°C, balança com capacidade máxima de 220 g e precisão de 0,01 g e cápsulas metálicas com tampa para armazenamento da amostra.

O procedimento se dividiu em três etapas. A primeira etapa consistiu em pesar as cápsulas vazias com tampa, denominadas de M₃, como prescrito na norma referente a esse ensaio. Na segunda foi adicionada uma determinada quantidade de amostra de solo nessas

cápsulas e pesadas novamente, recebendo o nome de M_1 . Após isso, foram levadas para a estufa, onde permaneceram durante 24 horas a uma temperatura entre 105 e 110 °C, tempo suficiente para que a constância de massa fosse alcançada. O último passo se deu com a pesagem da amostra seca; passadas as 24 horas, as cápsulas foram retiradas da estufa e pesadas novamente, suas massas foram anotadas e intituladas de M_2 . Este ensaio foi realizado para as amostras de solo natural e de pó de pedra. Com esses dados, foi possível determinar o teor de umidade das amostras analisadas.

6.5.2. Ensaio de granulometria

A caracterização dos solos granulares, quanto aos seus parâmetros físicos, foi obtida a partir dos diâmetros das partículas e da sua porcentagem de ocorrência, por meio do ensaio granulométrico (ABNT NBR 7181, 2016). Para a realização desse ensaio, faz-se necessário o uso dos seguintes equipamentos: estufa com temperatura determinada entre 105°C e 110°C, bandeja metálica, almofariz de porcelana, mão de gral, escovas, concha, balança com capacidade de 16 kg e precisão de 0,1g, balança com capacidade de 220 g e precisão de 0,01g e jogo de peneiras, sendo estas representadas nas Figuras 8(a) e (b).

Figura 8: (a) Série de Peneiras; (b) Conjunto de peneiras.

Nº da peneira	Abertura (mm)
3/4"	19,00
3/8"	9,50
4	4,75
8	2,36
16	1,18
30	0,600
40	0,425
50	0,300
100	0,150
200	0,075

(a)



(b)

Fonte: Próprio autor, 2021.

Quanto aos procedimentos, inicialmente foi realizada uma secagem de aproximadamente 8 kg do solo coletado na estufa. A amostra foi preparada pelas operações de destorroamento,

homogeneização e quarteamento conforme especificado na NBR 6457/2016 e mostrado nas Figuras 9 (a) e (b).

Figura 9: Preparação do solo. (a) Destorroamento; (b) Homogeneização e quarteamento.



Fonte: Próprio autor, 2021.

Em seguida, coletou-se 1 kg de cada material preparado para a realização do ensaio de granulometria, em porcentagens de massa pré-estabelecidas, de acordo com a Tabela 5. O peneiramento se iniciou na peneira de 19 mm e foi até a 0,075 mm. Durante o processo, foi pesada a quantidade de solo retida em cada peneira e, posteriormente, foi traçado a curva granulométrica de cada ponto amostrado.

6.5.3. Ensaio de plasticidade

A determinação quanto ao comportamento plástico do solo foi obtida através do ensaio de plasticidade (ABNT NBR 7180, 2016). Para realização deste ensaio, fez-se necessário o uso dos equipamentos: estufa com temperatura determinada entre 105°C e 110°C, balança com capacidade máxima de 220 g e precisão de 0,01 g, almofariz de porcelana, mão de gral, peneira nº 40, cápsulas metálicas com tampa, espátula metálica, pisseta, placa de vidro esmerilhada e gabarito cilíndrico com diâmetro de 3mm e comprimento de 100 mm.

Este ensaio consistiu em destorroar o solo previamente seco em estufa à temperatura entre 105°C e 110°C e pesar amostras de 200 g de cada material passante na peneira de abertura 0,42 mm, em porcentagens de massas pré-estabelecidas na Tabela 5. Em seguida, o material foi acomodado em um almofariz de porcelana e, com auxílio de uma espátula, revolveu-se o solo

na medida que era adicionada água destilada, a fim de obter uma pasta homogênea, de consistência plástica. O processo de homogeneização foi de 20 minutos, estando compreendido entre 15 e 30 minutos, conforme recomenda a NBR 7180:2016.

Após o processo de homogeneização, tomou-se cerca de 10 gramas da amostra preparada e formou-se uma pequena bola na palma da mão, que ao ser rolada sobre a placa de vidro de superfície esmerilhada tinha o intuito de obter um cilindro de 3 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento, aproximadamente. Em virtude do cilindro se fragmentar antes de atingir o diâmetro e comprimentos estabelecido, fez-se necessário repetir o ensaio com tempo de homogeneização de no mínimo 3 minutos, conforme recomenda a norma (ABNT NBR 7180, 2016). Os procedimentos realizados, bem como a placa de vidro esmerilhada e o gabarito cilíndrico utilizado para comparação das medidas podem ser evidenciados nas Figuras 10 (a) e (b).

Figura 10: Ensaio de Plasticidade. (a) Moldagem da amostra em forma esférica; (b) Moldagem da amostra em forma cilíndrica



Fonte: Próprio autor, 2021.

6.5.4. Ensaio de compactação

O ensaio de compactação foi determinado através da energia de compactação normal, também denominado de Ensaio de Proctor Normal (ABNT NBR 7182/2016). Para consumação desse ensaio, utilizou-se: estufa com temperatura determinada entre 105°C e 110°C, balança com capacidade de 16 kg e precisão de 0,1g, balança com capacidade de 220 g e precisão de 0,01g, almofariz de porcelana, mão de gral, régua, peneira nº 4, cápsulas metálicas com tampa, proveta de vidro, soquete cilíndrico, extrator de amostras e molde cilíndrico, com base e colarinho.

No que tange o ensaio de compactação, optou-se pela preparação das amostras com reuso do material. Nesse sentido, conforme recomenda a ABNT NBR 6457/2016, após o processo de destorroamento, homogeneização e quarteamento, tomou-se 3 kg de amostra seca passante na peneira de abertura 4,8 mm para cada uma das 3 amostras.

Após o processo de preparação, foi adicionada 180 ml de água a amostra seca de solo, ou seja, 6% do seu volume total. Em seguida, a amostra foi novamente homogeneizada e transportada para o molde cilíndrico para compactação do solo. O processo de compactação foi dividido em três camadas iguais, de modo que cada uma camada cobrisse um terço do molde. Desse modo, foram aplicados 26 golpes distribuídos uniformemente sobre a superfície de camada, com um soquete cilíndrico que cai de uma altura aproximada de 0,305m conforme prescreve a ABNT NBR 7182/2016. A aplicação da energia compactação pode ser evidenciada na Figura 11.

Figura 11: Aplicação da energia de compactação.

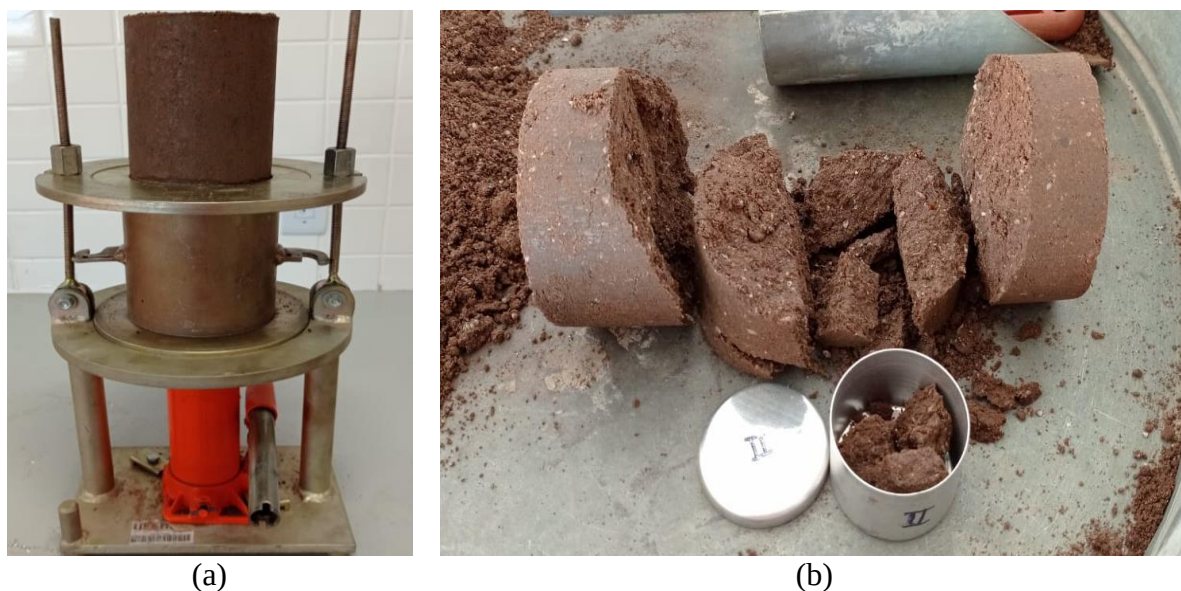


Fonte: Próprio autor, 2021

Após a compactação das três camadas, foi removido o colarinho e a base do cilindro e, com uma régua, aplainou-se a superfície do material à altura do molde. Em seguida, pesou-se o conjunto cilindro com o solo úmido compactado e, com auxílio de um extrator foi removido o corpo de prova do molde (Figura 12a). Após isso, em conformidade com a (ABNT NBR

7182/2016), retirou-se uma amostra da parte central do corpo de prova para realização do ensaio de umidade, conforme é explícito na Figura 12 (b).

Figura 12: (a) Extração do corpo de prova; (b) Remoção da amostra para ensaio de umidade.



Fonte: Próprio autor, 2021.

Por fim, com auxílio de uma espátula, destorroou-se o material compactado de modo que suas partículas passassem integralmente na peneira de abertura 4,8 mm e o revolveu com o material remanescente da bandeja de forma a obter um material homogêneo. Em seguida, conforme prescreve a norma (ABNT NBR 7182/2016), adicionou-se água à amostra numa proporção de 2%, isto é, 60 ml. O processo foi repetido mais 4 vezes para obtenção dos dados necessários para traçar a curva de compactação

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

7.1. Ensaio de Umidade

A partir do ensaio de umidade, obteve-se a média dos valores do teor de umidade do solo natural (amostra 01) e do pó de pedra (amostra 02), representados na Tabela 5.

Tabela 5: Umidade dos solos amostrados.

AMOSTRAS		M ₁ (g)	M ₂ (g)	M ₃ (g)	h%	h _{média} %
Amostra 01	CÁPSULA 1	50,325	48,748	17,635	5,069	5,034
	CÁPSULA 2	50,425	48,831	17,87	5,148	
	CÁPSULA 3	50,503	48,983	17,874	4,886	
Amostra 02	CÁPSULA 1	50,377	50,219	16,934	0,475	0,478
	CÁPSULA 2	50,424	50,273	18,138	0,470	
	CÁPSULA 3	50,248	50,088	17,308	0,488	

Fonte: Próprio autor, 2021.

Segundo Souza (2005), as precipitações pluviométricas alteram a umidade do solo e, conseqüentemente, seu grau de saturação. Portanto, o teor de umidade encontrado na amostra 01 pode estar relacionado às precipitações ocorridas na semana das coletas, conforme informa o boletim Meteorológico da Agência Executiva de Gestão das Águas da Paraíba (AESAs, 2021).

Enquanto a variabilidade do teor de umidade das amostras 01 e 02 pode ser explicada a partir do modo em que a amostra 02 foi estocada no ambiente e da sua baixa capacidade reter de água. Nesse contexto, Souza (2005) explica que, por solos rochosos comumente apresentarem em suas estruturas baixa porosidade, estes ostentam um teor de umidade baixo em relação ao solo em estudo (amostra 01).

7.2. Ensaio de Granulometria

A partir do ensaio granulométrico foi possível determinar o tamanho das partículas em cada amostra de solo ensaiado, bem como suas respectivas porcentagens de ocorrência na composição mineralógica do solo. Este ensaio também permitiu encontrar os diâmetros D₁₀, D₃₀ e D₆₀ e, conseqüentemente, obter os índices dos coeficientes de não uniformidade (CNU) e de curvatura (CC). Então, foi possível classificar o solo quanto a falta de uniformidade dos grãos e do formato da curva granulométrica.

Desse modo, compreendendo a relevância do Sistema Unificado de Classificação dos solos para o mundo e da ABNT NBR 6502:1955 para o Brasil, pautou-se nestes para classificar os solos amostrados. Os resultados obtidos do ensaio granulométrico e dos coeficientes estão dispostos na Tabela 6.

Tabela 6: Resumo dos ensaios de granulometria.

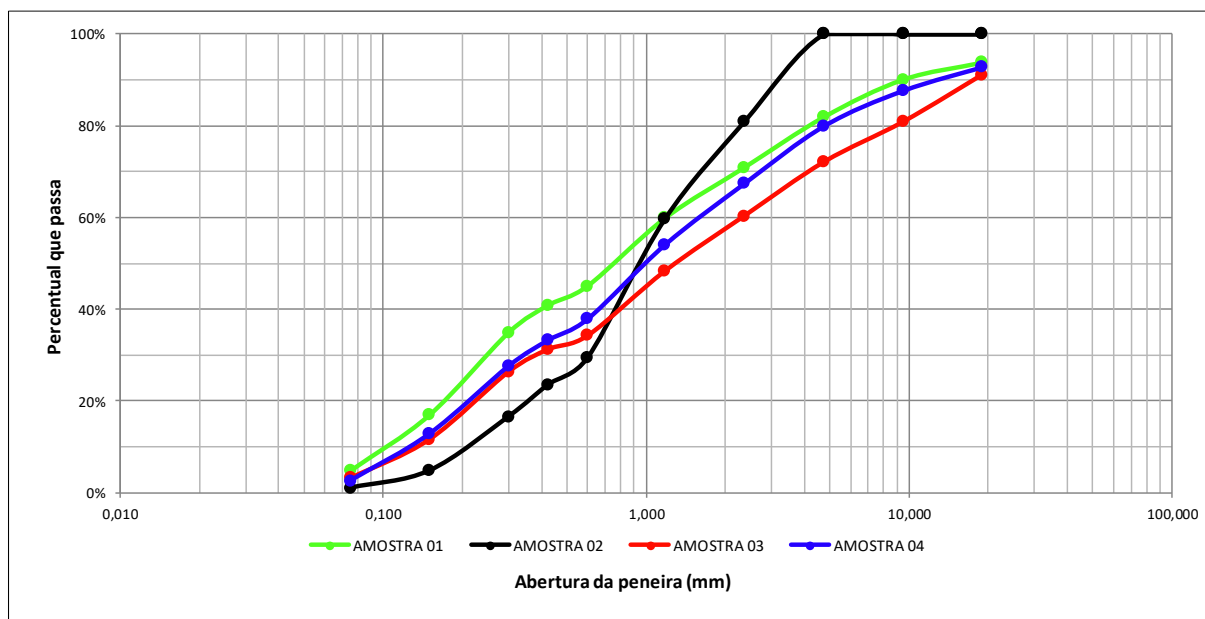
	SUCS		ABNT NBR 6502		COEFICIENTES	
AMOSTRA 01	Pedregulho (76 - 4,75mm)	18,10%	Pedregulho (60 - 2,0mm)	29,13%	D 10 (mm)	0,10
			Areia Grossa (2,0 - 0,6mm)	25,79%	D 30 (mm)	0,25
	Areia (4,75 - 0,075mm)	77,20%	Areia Média (0,6 - 0,2mm)	20,84%	D 60 (mm)	1,21
			Areia Fina (0,2 - 0,06mm)	19,51%	C.C	0,52
	Silte+Argila (<0,075mm)	4,73%	Silte+Argila (<0,06mm)	4,73%	C.N.U	12,03
AMOSTRA 02	Pedregulho (76 - 4,75mm)	0,00%	Pedregulho (60 - 2,0mm)	19,14%	D 10 (mm)	0,20
			Areia Grossa (2,0 - 0,6mm)	51,43%	D 30 (mm)	0,61
	Areia (4,75 - 0,075mm)	99,00%	Areia Média (0,6 - 0,2mm)	19,77%	D 60 (mm)	1,21
			Areia Fina (0,2 - 0,06mm)	8,68%	C.C	1,50
	Silte+Argila (<0,075mm)	0,99%	Silte+Argila (<0,06mm)	0,99%	C.N.U	5,93
AMOSTRA 03	Pedregulho (76 - 4,75mm)	27,00%	Pedregulho (60 - 2,0mm)	38,79%	D 10 (mm)	0,13
			Areia Grossa (2,0 - 0,6mm)	26,02%	D 30 (mm)	0,40
	Areia (4,75 - 0,075mm)	69,70%	Areia Média (0,6 - 0,2mm)	17,39%	D 60 (mm)	1,90
			Areia Fina (0,2 - 0,06mm)	14,55%	C.C	0,64
	Silte+Argila (<0,075mm)	3,25%	Silte+Argila (<0,06mm)	3,25%	C.N.U	14,59
AMOSTRA 04	Pedregulho (76 - 4,75mm)	20,00%	Pedregulho (60 - 2,0mm)	32,62%	D 10 (mm)	0,12
			Areia Grossa (2,0 - 0,6mm)	29,52%	D 30 (mm)	0,35
	Areia (4,75 - 0,075mm)	77,40%	Areia Média (0,6 - 0,2mm)	18,92%	D 60 (mm)	1,51
			Areia Fina (0,2 - 0,06mm)	16,38%	C.C	0,67
	Silte+Argila (<0,075mm)	2,57%	Silte+Argila (<0,06mm)	2,57%	C.N.U	12,20

Fonte: Próprio autor, 2021.

A partir da análise dos dados obtidos no Tabela 2 (sobre classificação das partículas quanto à textura), constatou-se que os solos amostrados apresentam predominância de areia e pedregulho, com um baixo teor de argila. Corroborando com tal análise, os parâmetros do SUCS classificam a amostra 02 (pó de pedra) como areia mal graduada (SP), enquanto as demais amostras classificam-se em areia bem graduada (SW).

Por meio da correlação do “tamanho dos grãos *versus* porcentagem de ocorrência”, traçou-se as curvas granulométricas dos solos amostrados, com auxílio do programa *Excel®*, conforme pode ser evidenciado no Gráfico 3.

Gráfico 3: Curvas de distribuição granulométrica dos solos amostrados.



Fonte: Próprio autor, 2021.

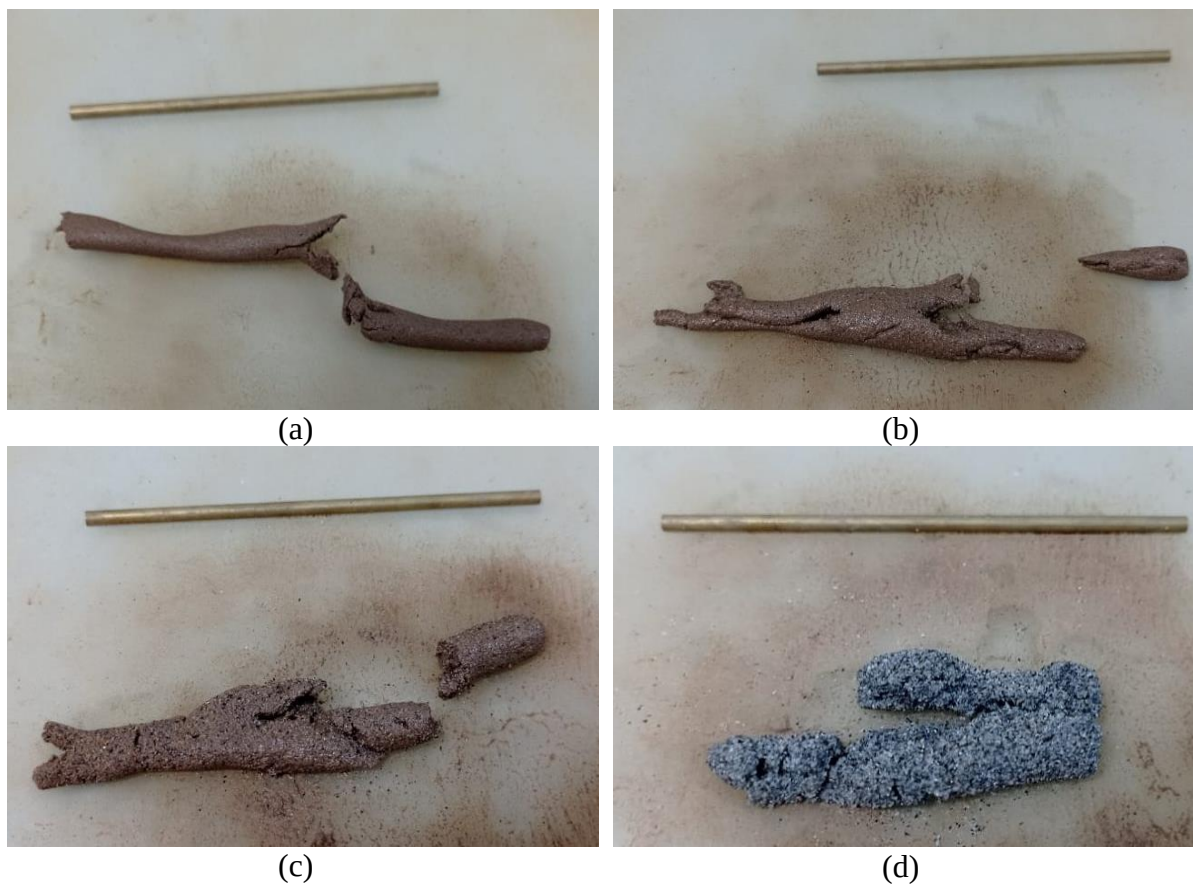
A curva de granulométrica permite distinguir diferentes tipos de solos, bem como identificar as características geotécnicas do solo. Analisando essa curva, evidenciou-se que os solos amostrados, apresentaram uma granulometria com uniformidade média, ou seja, com o CNU variando entre 5 e 15.

Quanto ao coeficiente de curvatura, a amostra 02 foi o único solo cuja curva apresentou aspectos suaves, ou seja, CC variando entre 1 e 3. As demais amostras apresentaram uma curva descontínua, tal fato se dá devido à ausência de grãos com um determinado diâmetro.

7.3. Ensaio de Plasticidade

Diante do ensaio realizado, não foi possível obter um cilindro com diâmetro de 3 mm e 100 mm comprimento (dimensões do cilindro-padrão). Os resultados desse ensaio podem ser evidenciados nas Figuras 10 (a), (b), (c) e (d).

Figura 13: Ensaio de Plasticidade. (a) Amostra 01; (b) Amostra 02; (c) Amostra 03; (d) Amostra 04.



Fonte: Próprio autor, 2021.

Levando em consideração que não foi possível moldar o cilindro das amostras ensaiadas, a ABNT NBR 7180/2016 classifica este solo como não plástico (NP), ou seja, não apresenta limite de plasticidade. Para tanto, vários fatores podem ter contribuído para tal resultado, podendo destacar a elevada quantidade de areia e baixa quantidade de argila e silte encontrada em cada amostra, conforme foi observado nos ensaios de granulometria. Nesse sentido, Caputo (1988) afirma que os solos que apresentam grandes deformações permanentes, sem separação ou fissuramento, são as partículas de argila, as quais não foram encontradas nas amostras analisadas. Por isso, as amostras não apresentam características de um material plástico e não sofrem grandes deformações diante tensões solicitantes.

Desse modo, observa-se nas Figuras 10 (a), (b), (c) e (d) que, à medida que for introduzido o pó de pedra nas amostras, os solos apresentam maior fissuração, ou seja, perdem suas características plásticas.

7.4. Ensaio de Compactação

Após a realização do ensaio de compactação, obteve-se os valores correspondentes de umidade e de peso específico seco para cinco pontos da curva de compactação relativo às três amostras analisadas. Tal correlação é descrita na Tabela 7.

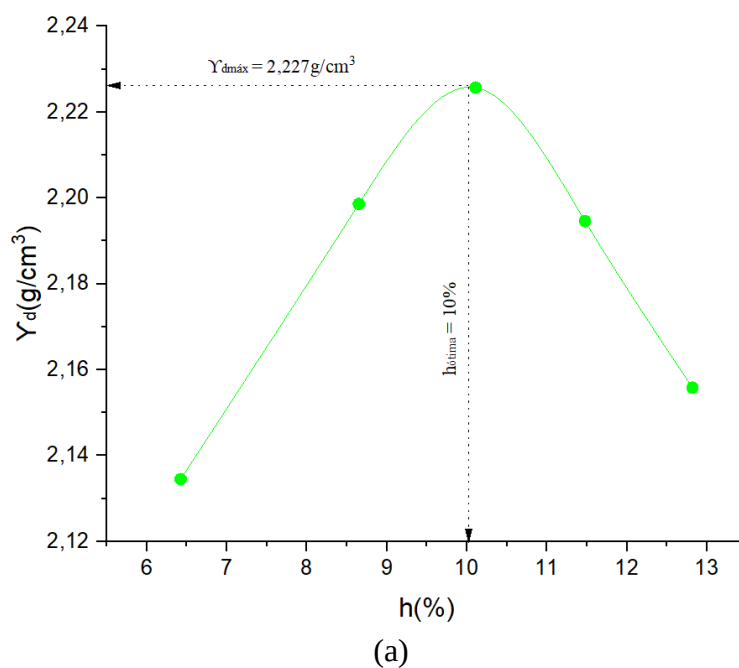
Tabela 7: Umidade *versus* Peso específico seco.

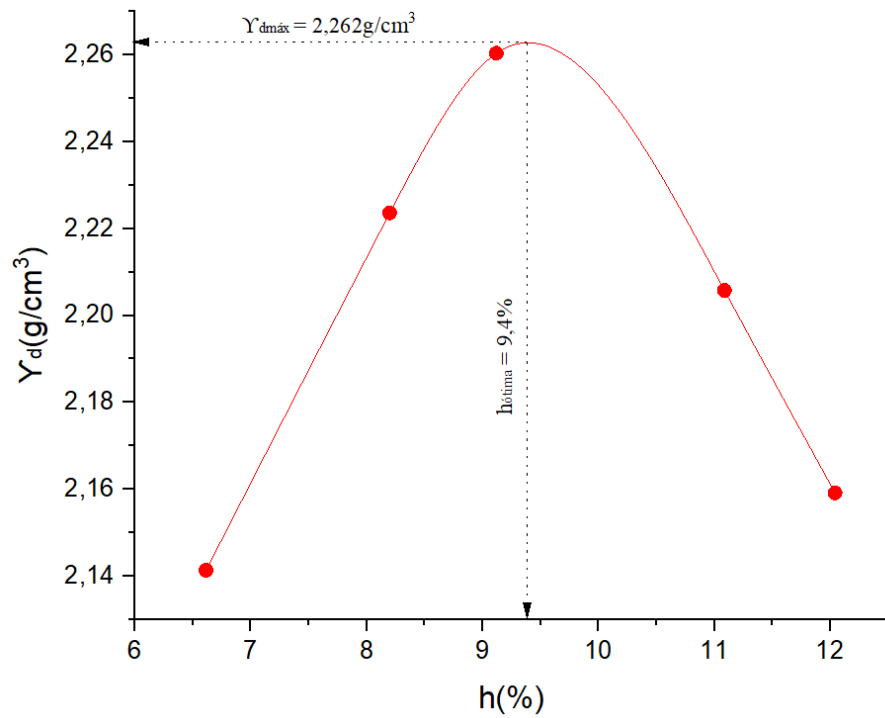
AMOSTRA 01		AMOSTRA 03		AMOSTRA 04	
h (%)	γ_d (g/cm ³)	h (%)	γ_d (g/cm ³)	h (%)	γ_d (g/cm ³)
6,423	2,135	6,614	2,141	6,112	2,144
8,650	2,199	8,199	2,224	7,755	2,214
10,110	2,226	9,120	2,260	9,468	2,283
11,478	2,195	11,087	2,206	10,573	2,221
12,820	2,156	12,042	2,159	12,739	2,170

Fonte: Próprio autor, 2021.

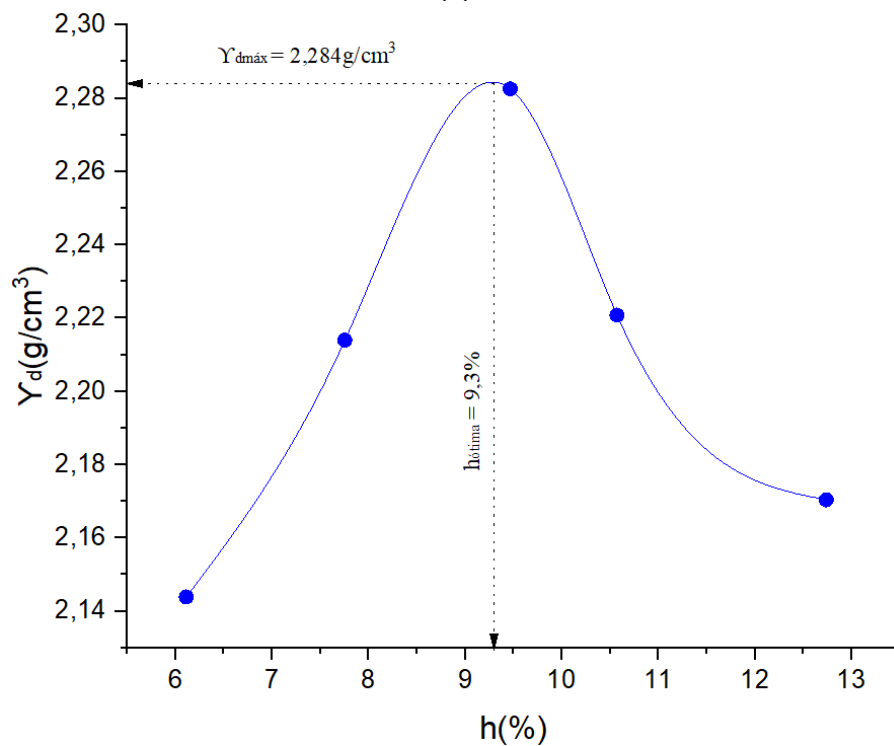
Dessa forma, a partir dos valores obtidos de peso específico aparente seco e de sua umidade correspondente, traçou-se a curva característica de compactação de cada amostra através do *software Origin 8.0*. Além disso, foram identificados, por meio de análise gráfica, o ponto de umidade ótima e peso específico máximo de cada uma das amostras analisadas, conforme é exibido nos Gráficos 4 (a), (b) e (c).

Gráfico 4: Curvas de compactação pelo ensaio de Proctor Normal (a) Amostra 01 (b) Amostra 03; (c) Amostra 04.





(b)



(c)

Fonte: Próprio autor, 2021.

Ainda por meio da análise gráfica, verificou que os 5 pontos identificados da curva de compactação correspondem a 2 pontos no ramo seco, 2 pontos no ramo úmido e um ponto próximo à umidade ótima, conforme recomenda a norma ABNT NBR 7182/2016 .

Segundo Pinto (2006), as argilas apresentam peso específico seco máximo baixo e umidade ótima elevada em relação às areias. Em contrapartida, o mesmo autor ressalta que densidade seca elevado e umidade ótima baixa, na ordem 9% a 10%, são características intrínsecas de areias e pedregulhos bem graduados.

Nesse sentido, à medida que a porcentagem de pó de pedra é aumentada, nota-se um aumento no peso específico seco e, conseqüentemente, uma diminuição da umidade ótima. Em consônança com Pinto (2006), tal fato ocorre devido a diminuição da quantidade de argila observada nos ensaios de granulometria e ao aumento da porcentagem de areia e produtos rochosos.

A Tabela 8 dispõe dos valores de peso específico máximo relativo à umidade ótima de cada amostra analisada, bem como as suas respectivas médias e o desvio padrão dos valores obtidos da curva de compactação.

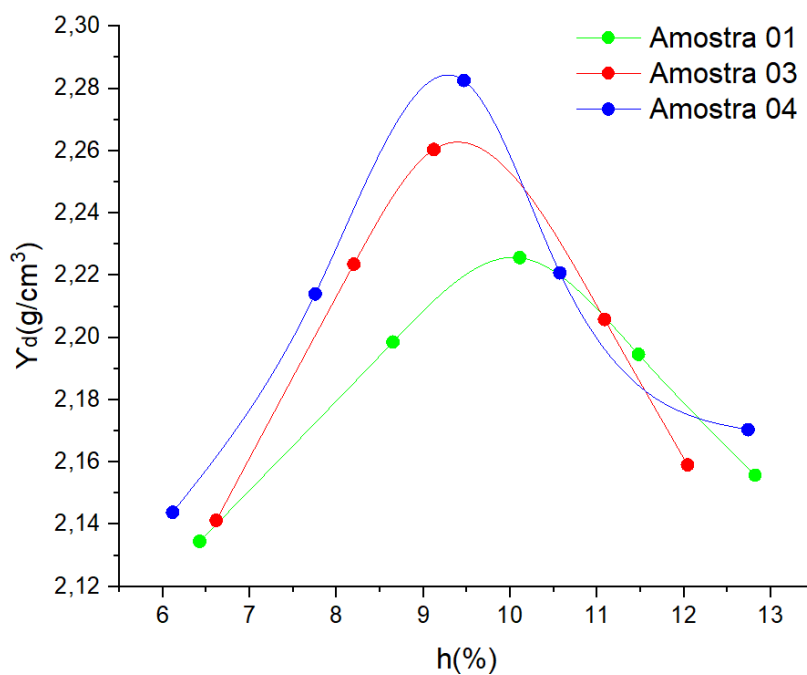
Tabela 8: Valores de peso específico máximo relativo à umidade ótima.

AMOSTRAS	h_{ótima} (%)	γ_{dmáx} (g/cm³)
01	10	2,227
03	9,4	2,262
04	9,3	2,284
Média	9,6	2,258
Desvio Padrão	0,31	0,0235

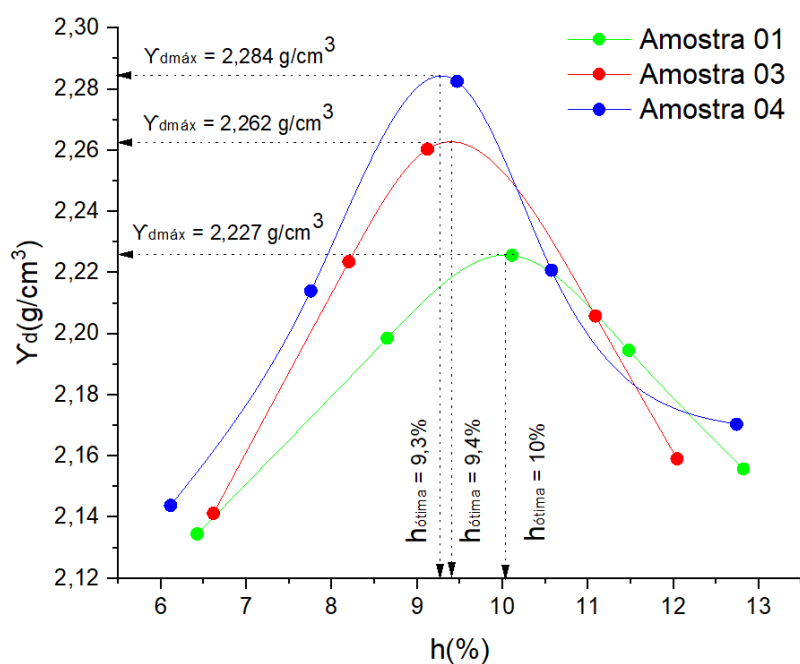
Fonte: Próprio autor, 2021.

Evidencia-se que os valores encontrados para umidade, bem como para a densidade seca máxima variam em torno das médias, tendo em vista que o desvio padrão é de apenas 0,31% e 0,0235 g/cm³, respectivamente. Desse modo, o Gráfico 5 permite ver a ocorrência dessas variações bem como compará-las.

Gráfico 5: (a) Comparação entre as curvas de compactação, (b) Comparação entre as curvas de compactação cotadas.



(a)



(b)

Fonte: Próprio autor, 2021.

Dessa forma, analisando as curvas dos solos amostrados, fica ainda mais nítido que, a adição do produto da britagem no solo ocasiona o aumento da densidade aparente seca máxima à medida que a umidade ótima diminui.

8. CONCLUSÃO

Embora ensaios de prospecção e caracterização do subsolo ainda sejam procedimentos que nem sempre são realizados, pôde-se notar que o conhecimento do comportamento do solo e das suas características é algo imprescindível para a segurança das obras de engenharia civil. Desse modo, os métodos de investigação adotados neste trabalho permitiram compreender a distribuição espacial das tipologias dos solos analisados, bem como propor medidas de engenharia que promovam a sua estabilização.

A escassez de recursos naturais, aliada à necessidade de melhoramento do solo, incentivou a realização do estudo de técnicas de estabilização do solo no município de São João do Rio do Peixe-PB, quanto às suas propriedades físicas e mecânicas. Para tanto, foram utilizadas como medidas corretivas os métodos de estabilização granulométrica e de compactação, por meio da adição de pó de pedra.

Com os dados obtidos dos ensaios de umidade, evidenciou-se que o alto teor de umidade da amostra 01 (5,03%) ocorreu devido as precipitações ocorridas na semana das coletas. O baixo teor de umidade da amostra 02 (0,48%) reflete-se na baixa porosidade desse tipo de solo, bem como na sua baixa capacidade de retenção de água e método de estocagem.

Por meio do ensaio granulométrico, constatou-se que os solos amostrados apresentaram características areno-pedregulhosos, com baixo teor de argila. Ainda através da sua granulometria, classificou-se a amostra 02 como areia mal graduada (SP), enquanto os demais solos foram classificados em areia bem graduada (SW). Segundo essa análise, observou-se, por meio da curva granulométrica e dos coeficientes de não uniformidade que os solos amostrados apresentaram uma granulometria média.

Quanto ao coeficiente de curvatura, a amostra 02 foi o único solo cuja curva apresentou aspectos suaves. As demais amostras apresentaram uma curva descontínua. Entretanto, observa-se que os valores de CC crescem à medida que é adicionado o pó de pedra, se aproximando assim, da curva desejada para um solo bem graduado.

De acordo com o ensaio de plasticidade, o solo apresentou características não plásticas, impossibilitando o índice de plasticidade e, conseqüentemente, o ensaio de limite de liquidez. Constatou-se também que à medida que era introduzido pó de pedra nas amostras, os solos apresentavam maior fissuração, ou seja, perdiam suas características plásticas.

A compactação do solo forneceu valores de umidade ótima e peso específico máximo variando de 9,3 a 10% e 2,227 a 2,284 g/cm³, respectivamente. Por meio desses dados, verificou-se a ocorrência da estabilização mecânica, uma vez que os resultados obtidos em

relação a umidade ótima decrescem, enquanto o peso específico seco máximo cresce à medida que é adicionado o pó de pedra.

Como consequência dos resultados obtidos, evidencia-se a melhoramento do solo quanto às suas propriedades físicas e mecânicas, uma vez que se verifica a efetividade da estabilização granulométrica por meio da suavização da curva granulométrica à medida que foi introduzido o pó de pedra.

Em decorrência da correção granulométrica, notou-se por meio do ensaio de compactação, o melhoramento das propriedades do solo, conferindo ao solo: diminuição do número de vazios e aumento de rigidez, corroborando no aumento da sua resistência mecânica, na resistência à recalques e permeabilidade.

Desse modo, por meio desse referido estudo, foi possível obter informações relevantes de caracterização da camada superficial de São João do Rio do Peixe, mostrando, de um modo geral, as características físicas e mecânicas dos solos amostrados, assim como métodos de estabilização sugeridos para o solo em estudo.

Além de fornecer importantes parâmetros para futuros pesquisadores, este estudo abre um leque de sugestões quanto ao uso de novas metodologias para estabilização de solos e outros ensaios, bem como testes de outros valores de teores de adição de pó de pedra.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AESA- **Agência Executiva de Gestão das Águas da Paraíba (org.)**. Disponível em: <http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/meteorologia-chuvas-grafico/?id_municipio=9&date_chart=2021-05-27&period=year>. Acesso em 23 mai. 2021.

ALMEIDA, Matheus Pinheiro de; TRINDADE, Fernanda Cota. **Crescimento urbano x área não edificantes: uma análise das ocupações irregulares da cidade de Manhauçu**. Anais do Seminário Científico do UNIFACIG, [s. l], n. 3, p. 1-12, nov. 2017. Anual. Disponível em: <<http://pensaracademico.unifacig.edu.br/index.php/semiariocientifico/article/view/456>>. Acesso em: 05 maio 2021.

ARRIVABENI, B. S. et al. **Estabilização Granulométrica e Química de Solo de Estradas Florestais Através do Uso de Cimento**. Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ. [S.I]. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.11137/2018_2_410_415>. Acesso em: 06 maio 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9935:2011 – Agregado e terminologia**. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181:2016 Solo – Análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502:1995 Termologia – Rochas e Solos**. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7484:2020 – Solo – Sondagem de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio**. 2ª edição, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180:2016 Solo – Determinação do limite de plasticidade**. 22ª edição, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457:2016 amostras de solo-preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182:2016 “solo – ensaio de compactação”**. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR/NM 66:1998 Agregados – constituintes mineralógicos dos agregados naturais – Terminologia**. Rio de Janeiro, 1998.

BRITO, Laís Costa; PARANHOS, Haroldo da Silva. **Estabilização de Solos**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Edição 06. Ano 02, Vol. 01. pp 425-438, setembro de 2017. ISSN:2448-0959.

BONAFÉ, Leandro. **Estudo da Resistência de um Solo Residual de Basalto Estabilizado e Reforçado**. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUI. Ijuí, 2004.

CAMELO, G. G. A. **Melhoramento de solo com resíduos da construção civil para pavimentação**. Centro Universitário Luterano de Palmas. Palmas, 2018.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 6.Ed. Rio de Janeiro, Brasil. LTC, 1987-1988. 244 p.

DAS, B. M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. 7. ed. São Paulo: Centage Learning, 2011.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (Org.). Cidades. 2010. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pb/sao-joao-do-rio-do-peixe/panorama>> Acesso em 07 mar. 2021.

INÉIA, A. **Viabilização da substituição da areia Natural pelo pó de pedra basáltica na argamassa autonivelante**. Centro Universitário UNIVATES. Lajeado, 2017.

MENOSSEI, Rômulo Tadeu. **Utilização do pó de pedra basáltica em substituição à areia natural do concreto**. 2004. vi, 97 p. Dissertação (mestrado) -- Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2004. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/90740>>. Acesso em 10 mar. 2021.

MUÑOZ, C. C. E. **Avaliação numérica da técnica de bulbos de compactação em um depósito de areia fofa**. Dissertação (mestrado) -- Pontífica Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <[1021819_2014_pretextual.pdf](#) (puc-rio.br)>. Acesso em 04 mar. 2021.

OLIVEIRA, M. F. DE. **Metodologia científica: um manual para a realização de pesquisas em Administração**. <São Carlos: Serviço de Biblioteca e Informação. p. 73, 2011. Disponível

em: <https://adm.catalao.ufg.br/up/567/o/Manual_de_metodologia_cientifica_-_Prof_Maxwell.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2021.

SANTIAGO, J. E. D. **Acidentes estruturais na construção civil**. Universidade Federal de Minas Gerais. Minas Gerais – UFMG, 2014.

SILVA, D. J. S et al. **Caracterização Geotécnica dos Solos Superficiais da Cidade de Pau dos Ferros/RN**. Universidade Federal Rural do Semi-Árido –UFERSA. Rio Grande do Norte, 2021.

SOARES, J. M. D; PINHEIRO, R. J. B; TAVARES, I. S. **Notas de aula mecânica dos solos**. Universidade Federal de Santa Maria, 2006. Disponível em: <<https://www.passeidireto.com/arquivo/29041119/apostila-ufsm>>. Acesso em 23 de janeiro de 2020.

SPECHT, Luciano Pivoto. **Comportamento de misturas solo-cimento-fibra submetidas a carregamentos estáticos e dinâmicos visando a pavimentação**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRS. Porto Alegre, 2000.

ROLNIK, Raquel; KLINK, Jeroen. **Crescimento econômico e desenvolvimento urbano: por que nossas cidades continuam tão precárias?**. Novos Estudos -- Cebrap, [S.L.], n. 89, p. 89-109, mar. 2011. UNIFESP (SciELO). Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/s0101-33002011000100006>>. Acesso em: 05 maio 2021.

WALLAU, Juliano Reis. **Avaliação da técnica de estabilização granulométrica como revestimento primário de rodovias não pavimentadas**. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUI. Ijuí, 2004.