



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMIÁRIDO – UFERSA

CENTRO DE ENGENHARIAS

COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

LUIZ RICARDO LEANDRO DE ALBUQUERQUE

**CARACTERIZAÇÃO DE UMA AMOSTRA DE SOLO DA REGIÃO DA BACIA
DE SÃO CRISTÓVÃO (RN)**

Mossoró/RN

2017

LUIZ RICARDO LEANDRO DE ALBUQUERQUE

**CARACTERIZAÇÃO DE UMA AMOSTRA DE SOLO DA REGIÃO DA BACIA DE
SÃO CRISTÓVÃO (RN)**

Monografia apresentada à Universidade
Federal Rural do Semiárido – UFERSA,
Campus Mossoró, para a obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Alves da
Silva Júnior

Mossoró/RN

2017

© 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 tornar-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.

A325c Albuquerque, Luiz Ricardo Leandro de.
Caracterização de uma amostra de solo da região
da bacia de São Cristóvão (RN) / Luiz Ricardo
Leandro de Albuquerque. - 2017.
52 f. : il.

Orientador: Francisco Alves da Silva Júnior.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de , 2017.

1. São Cristóvão. 2. Identificação. 3.
Caracterização. 4. Solo. 5. Parâmetros Físicos. I.
Alves da Silva Júnior, Francisco, 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.

LUIZ RICARDO LEANDRO DE ALBUQUERQUE

**CARACTERIZAÇÃO DE UMA AMOSTRA DE SOLO DA REGIÃO DA BACIA
DE SÃO CRISTÓVÃO (RN)**

Monografia apresentada à Universidade
Federal Rural do Semiárido – UFERSA,
Campus Mossoró, para a obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Alves da
Silva Júnior

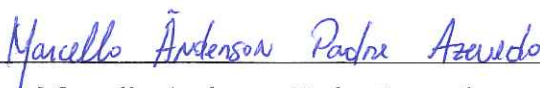
Aprovado pelo Conselho do Curso em: 14 / 05 / 2017



Prof. Dr. Francisco Alves da Silva Júnior
(Presidente da banca)



Prof. Dr. John Eloi Bezerra
(2º Membro da banca)



Marcello Anderson Padre Azevedo
(3º Membro da banca)

Ao meu pai, **Ricardo Correia de Albuquerque** (*in memoriam*), que foi sempre o grande mentor de lições sobre honestidade e ética.

Ao meu amigo e irmão, **Samuell Albuquerque** (*in memoriam*), que me ensinou grandes lições sobre a vida em tempos de extrema turbulência.

À minha mãe, **Sylvia Ricarte Leandro**, onde surgiu toda a essência do meu ser, e à ela devo tudo.

Ao meu irmão, **João Ricardo**, à **Clévia Aline**, e ao meu amado afilhado, **Yure**, de onde aperfeiçoei os meus conceitos sobre amor, fraternidade, união e prosperidade.

Ao meu Orientador, **Francisco Alves**, cujo saber técnico e conhecimento de vida me inspirou na concepção deste trabalho.

Aos meus familiares, de onde tirei (e para sempre tirarei) as maiores e mais importantes lições que um homem pode receber.

Aos meus amigos, cada um deles, de onde eu recebi muita força nos momentos de necessidade e para onde eu retornarei todos os meus esforços quando lhes precisar.

À **Maria Luiza**, em quem eu encontrei a compreensão sobre coisas que antes pareciam não ter sentido algum.

Aos Professores do Centro de Engenharias e aos participantes desta banca.

“Mas eu não estou interessado em nenhuma teoria, em nenhuma fantasia, nem no algo mais...”

Longe o profeta do terror, que a laranja mecânica anuncia, amar e mudar as coisas me interessa mais...”

(Belchior)

RESUMO

O solo é o parâmetro que influencia diretamente na dinâmica das estruturas de fundação das edificações e, conseqüentemente, das estruturas em geral. Prover a identificação e a caracterização de uma amostra de solo da bacia de São Cristóvão, através de ensaios de baixos custo e complexidade, permite estimar os parâmetros físicos da mesma amostra, com o objetivo de otimizar a eficiência das edificações de pequeno porte da região. Geralmente, em obras de grande e médio porte, são utilizadas sondagens de inspeção do subsolo para calcular os parâmetros físicos do solo. Entretanto, estes métodos geralmente acarretam muitos custos que as obras de pequeno porte não têm condições de financiar. Tendo isso em vista, esta pesquisa desenvolve um procedimento preliminar de baixo custo que consiste na avaliação de três ensaios que fornecem resultados que podem ser cruzados com valores estimados em relação ao desempenho mecânico dessa amostra. Esse procedimento foi aplicado na bacia de São Cristóvão, na porção litorânea norte do estado do Rio Grande do Norte, local onde, atualmente, muitas construções de nível residencial unifamiliar estão sendo iniciadas. Os ensaios utilizados são os de Análise Granulométrica, Massa Específica Aparente e Compactação. Através desses ensaios é possível estimar as características do solo baseando-se de tabelas disponibilizadas em livros técnicos. Os resultados obtidos nos ensaios permitem estimar os índices físicos da amostra de solo, que são fundamentais para o dimensionamento preliminar de estruturas de pequeno porte. Além dos índices físicos do solo da amostra extraída da bacia de São Cristóvão, também foi identificada a semelhança dessa amostra de solo com o tipo conhecido como Solo Arenoso Laterítico Fino, cujas propriedades mecânicas se mostram satisfatórias para o uso em fundações de residências, aterro e leitos rodoviários. Esse estudo conclui que a amostra de solo da bacia de São Cristóvão possui propriedades apreciáveis para a construção de edificações de pequeno porte e que há indícios de que o solo da região pode ser utilizado para fins rodoviários e de aterramento com baixo custo.

Palavras-Chave: São Cristóvão; Identificação; Caracterização; Solo; Parâmetros Físicos.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa do Brasil com ênfase no Estado do Rio Grande do Norte.	12
Figura 2 - Rota criada no Google Maps® até o local de estudo.	12
Figura 3 - Vista de satélite da região a ser estudada.	13
Figura 4 - Localização do ponto de coleta dentro da região de abrangência.	14
Figura 5 - Classificação Trilinear dos Solos.	19
Figura 6 – Ábaco de classificação dos solos de acordo com o Sistema Unificado.	20
Figura 7 - Representação esquemática do frasco de areia.	22
Figura 8 - Exemplo de curvas de compactação características dos solos brasileiros.	24
Figura 9 – Da esquerda para a direita: (i) Dispensor de amostras; (ii) Densímetro padrão; e (iii) Série normal de peneiras a ser utilizada no ensaio de peneiramento.	31
Figura 10 - Da esquerda para a direita: (i) Martelo e Talhadeira; (ii) Conjunto Frasco+Funil; (iii) Pá.	32
Figura 11 – Da esquerda para a direita: (i) abertura da cavidade; (ii) retirada do material da cavidade; (iii) execução do ensaio na cavidade.	32
Figura 12 - Da esquerda para a direita: (i) abertura da cavidade na vala de 50 cm de profundidade; (ii) execução do ensaio na cavidade e retirada do material.	33
Figura 13 - Da esquerda para a direita: (i) Molde cilíndrico; (ii) Soquete cilíndrico; (iii) Molde executado.	33
Figura 14 - Curva granulométrica da amostra estudada.	35
Figura 15 - Disposição do resultado da análise granulométrica.	37
Figura 16 - Curva de compactação com linha de tendência simulada pelo Excel®.	42
Figura 17 - Ocorrência de solos lateríticos no Brasil.	46
Figura 18 - Disposição pedológica dos solos lateríticos no Estado de São Paulo.	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação entre o diâmetro e o tipo do grão.....	17
Tabela 2 - Definição da energia de compactação para realização do ensaio.....	24
Tabela 3 -Relação entre Tensão Admissível e o tipo de solo e seu nível de compactação.	25
Tabela 4 - Relação entre o ângulo de atrito e a graduação da areia.	26
Tabela 5 – Relação entre o ângulo de atrito interno efetivo e o índice de plasticidade para solos argilosos.....	26
Tabela 6 - Relação entre o tipo de solo e os limites de consistência.	27
Tabela 7 - Relação entre tipo de solo e o coeficiente de Poisson.	28
Tabela 8 - Resultado do ensaio granulométrico para cada peneira.	34
Tabela 9 - Determinação da massa que preenche o funil e o orifício no rebaixo da bandeja com utilização da ferramenta Microsoft Excel®.	38
Tabela 10 - Determinação da quantidade de areia graduada que preenche o cilindro utilizado.	39
Tabela 11 - Determinação do volume do cilindro utilizado no ensaio.	39
Tabela 12 - Resultado pontual das execuções dos ensaios de compactação do solo coletado.....	42
Tabela 13 - Custos por metro quadrado do processo de pavimentação com agregados variados.....	46

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	11
1.1 – O local de estudo	11
1.2 – Justificativa.....	14
1.3 – Objetivos.....	14
2 – REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1 – Análise Granulométrica.....	17
2.2 – Frasco de Areia.....	21
2.3 – Compactação	22
2.4 – Estimativa dos parâmetros físicos do solo.....	25
3 – METODOLOGIA DA PESQUISA.....	29
3.1 – Ensaio de granulometria	31
3.2 – Ensaio de determinação de massa específica aparente.....	31
3.3 – Ensaio de compactação.....	33
4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
4.1 – Ensaio de granulometria	34
4.2 – Ensaio de determinação de massa específica aparente.....	38
4.3 – Ensaio de compactação.....	41
4.4 – Parâmetros e índices estimados	45
4.5 – Semelhança com SAFL	45
5 – CONCLUSÃO.....	49
REFERÊNCIAS	51

1 – INTRODUÇÃO

A determinação dos parâmetros físicos e químicos dos solos está relacionada com a disciplina de Geotecnia e é fundamental para o dimensionamento das estruturas de fundações de diversos tipos de construção. Estas estruturas são responsáveis por manter a estabilidade da edificação a qual suporta e devem ser estudadas e dimensionadas de acordo com as características do solo em que estão distribuindo suas solicitações.

Usualmente a análise de caracterização física e química dos solos é guiada por um conjunto de ensaios. Os resultados provenientes desses ensaios proporcionam a obtenção de parâmetros que indicam a natureza daquela amostra de solo e podem ser relacionados às propriedades mecânicas através de estudos que estimam os valores médios para cada tipo de solo e de coeficientes específicos.

Outros ensaios deverão ser incorporados futuramente às análises feitas por esta pesquisa, como o de Ensaio de Adensamento, cuja Norma que preconiza este ensaio (NBR-12007) está atualmente cancelada mas pode ser substituída pela DNER-IE 005, que pode revelar dados complementares aos obtidos através da aplicação deste método.

Os procedimentos realizados nos ensaios são preconizados por Normas Brasileiras e obedecem aos fundamentos teóricos de diversas áreas do conhecimento dentro do âmbito da Engenharia Civil.

A análise feita em cima de uma amostra de solo não permite a divulgação dos dados como conclusivos, entretanto, se o procedimento for repetido para uma série significativa de amostras, na mesma localidade, é possível obter resultados mais precisos sobre a sua resistência mecânica.

1.1 – O local de estudo

São Cristóvão é um ambiente balneário pertencente à cidade de Areia Branca, localizada na porção norte do estado do Rio Grande do Norte, a uma distância de 57,9 km de Mossoró. Nos últimos anos essa região tem recebido muitas solicitações de construções de residências em propriedades privadas, consequência da saturação imobiliária em outras regiões praianas do estado e da exploração turística na região.



Figura 1 - Mapa do Brasil com ênfase no Estado do Rio Grande do Norte.

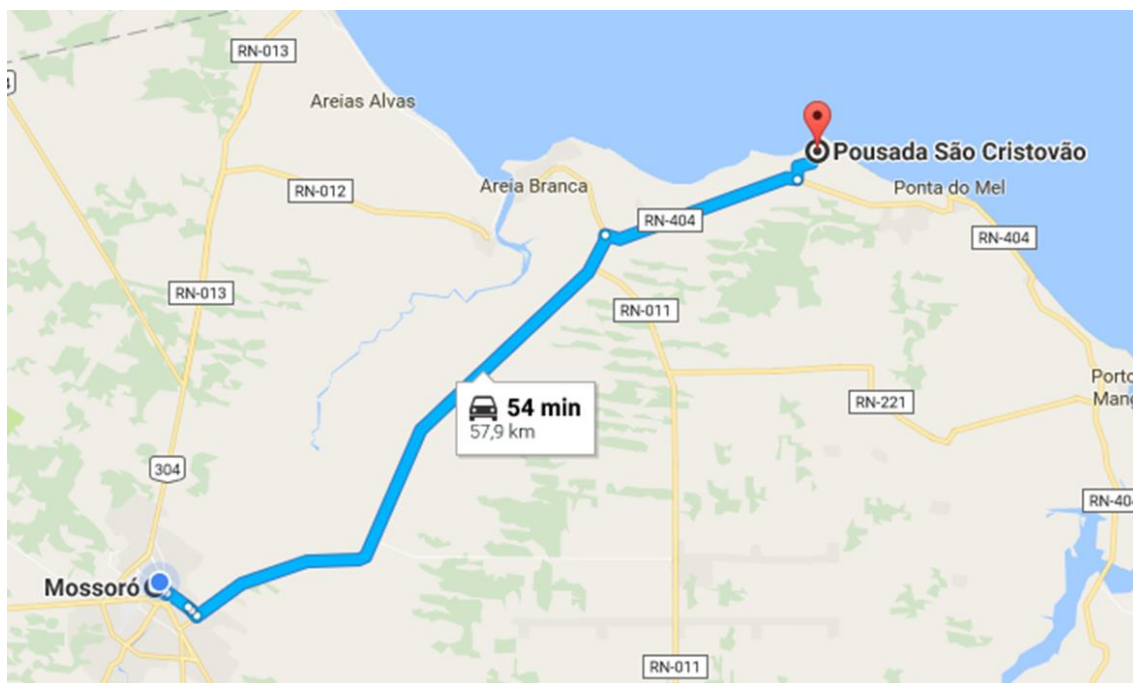


Figura 2 - Rota criada no Google Maps® até o local de estudo.

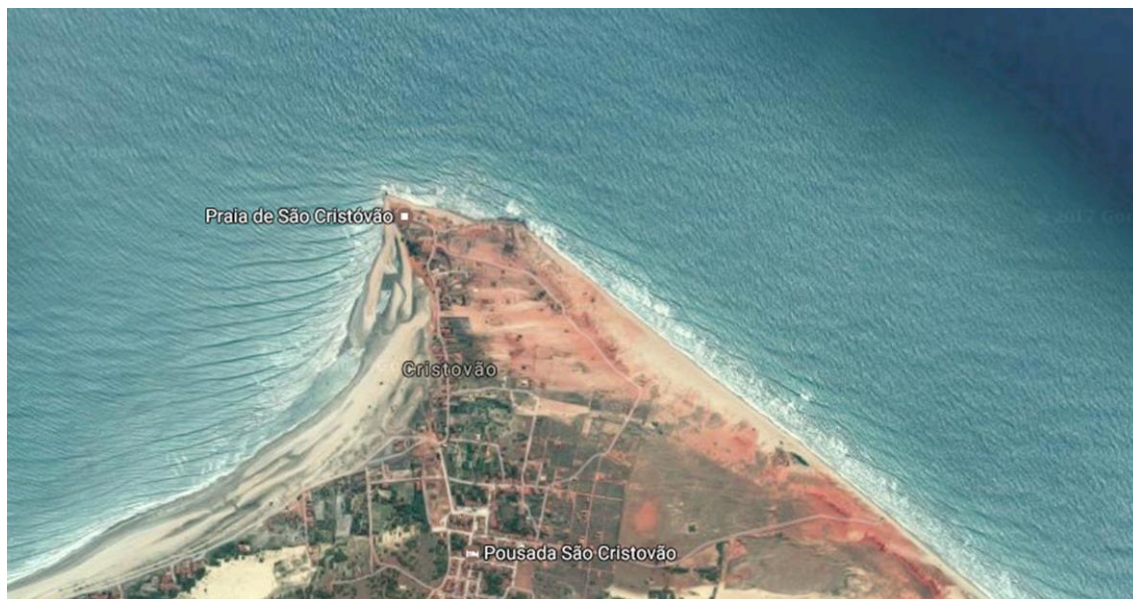


Figura 3 - Vista de satélite da região a ser estudada.

A bacia é composta por diversos tipos de solo, com diferentes parâmetros físicos, e é possível perceber isso analisando-se a vista de satélite da região, na Figura 3. A coleta de uma amostra de um ponto da região, dentro da localidade do estudo, permitirá a estimativa dos parâmetros físicos daquela amostra, através dos ensaios de Análise Granulométrica, Massa Específica Aparente e Compactação.

Os parâmetros físicos analisados através deste procedimento servirão para a execução de fundações superficiais na região, tendo em vista que, atualmente, com a ausência de dados geotécnicos da região, as estruturas instaladas são executadas superdimensionadas, acarretando os aumentos nos custos de produção.

O local de coleta escolhido foi em um lote residencial com dimensões 15,00m x 25,00m localizado na porção Nordeste de São Cristóvão. O lote será utilizado para a construção de uma residência unifamiliar. Para que os dados a serem estimados possuam maior precisão, deverão ser analisadas mais de uma amostra da mesma localidade.



Figura 4 - Localização do ponto de coleta dentro da região de abrangência.

Contudo, a análise de apenas uma amostra de solo gera dados inconclusivos sobre o local analisado, entretanto cria-se fortes indícios da composição mineralógica do solo a nível superficial. Para que o procedimento montado neste estudo seja aplicado praticamente devem ser analisados os resultados de diversas amostras e balizar-se pelos valores médios.

1.2 – Justificativa

Esta pesquisa justifica-se pela necessidade de propor um procedimento com ensaios de baixos custo e complexidade para estimar os parâmetros físicos de uma amostra de solo de um local pré-determinado com o intuito de fornecer informações específicas desta amostra, que sirvam como dados auxiliares nos projetos preliminares de fundações de edificações de pequeno porte.

1.3 – Objetivos

Quais as propriedades físicas da amostra colhida na bacia de São Cristóvão, e como essas propriedades influenciam na dinâmica das fundações das edificações? As estruturas de fundações executadas atualmente na região são satisfatórias? É possível diminuir os custos com as estruturas de fundação dependendo do tipo de solo? Qual a

probabilidade de uso desses solos para execução de obras rodoviárias e edificações convencionais?

O objetivo principal desta pesquisa, além de elucidar as questões acima, é a análise de uma amostra de solo da região de São Cristóvão e determinar o tipo do solo presente na amostra e as suas características físicas, estimando valores para os parâmetros físicos de uma amostra de solo, motivado pela crescente demanda de residências unifamiliares na região.

2 – REFERENCIAL TEÓRICO

De acordo com LODI (2010), o solo, por ser um material natural, cujo processo de formação não depende de forma direta da intervenção humana, o seu estudo e o entendimento de seu comportamento dependem de uma série de conceitos desenvolvidos em ramos afins de conhecimento. A mecânica dos solos é o estudo do comportamento de engenharia do solo quando este é usado ou como material de construção ou como material de fundação, além de ser uma disciplina relativamente jovem da engenharia civil, somente sistematizada e aceita como ciência em 1925, após trabalho publicado por Terzaghi, que é conhecido como o pai da mecânica dos solos.

Para CAPUTO (1996), os solos são misturas complexas de materiais inorgânicos e resíduos orgânicos parcialmente decompostos e a sua formação é um dos mais importantes produtos do intemperismo. Os solos diferem de área para área, não só em quantidade (espessura de camada), mas também em qualidade.

LODI (2010) também afirma que o termo “solo” é aplicado na Engenharia Geotécnica para designar o material granular que cobre a maior parte da superfície terrestre. Seu significado difere daquele empregado na área agrônômica que considera apenas os horizontes superficiais de pequena espessura que podem conter matéria orgânica.

No contexto geotécnico, o solo pode ser definido como o material resultante da desagregação das rochas apresentando um índice de vazios maior que a rocha que o originou. É, portanto, constituído por um conjunto de partículas sólidas, água e gases. Normalmente é a fase sólida que irá caracterizar o solo e esta pode variar em sua forma e tamanho. As demais fases correspondem à porosidade do solo, afirma LODI (2010).

Na Engenharia Geotécnica, principalmente de fundações, a palavra areia é empregada para designar solos em que a fração areia é superior a 50%, como mostram os sistemas de classificação. Areias com 20, 30 ou 40% de finos têm um comportamento muito influenciado pela fração argila e o seu modelo de comportamento é mais semelhante ao das argilas do que ao das areias puras. Na Mecânica dos Solos, areia refere-se a materiais granulares com reduzida porcentagem de finos que não interferem significativamente no comportamento do conjunto, de acordo com PINTO (2013).

A classificação dos solos, de acordo com MELLO E TEIXEIRA (1971), deve ser considerada não tanto como o início do estudo de Mecânica dos Solos, mas mais como o fim dele. Com isto, os autores queriam dizer que a classificação de um solo é, basicamente, a aplicação de todos os parâmetros definidos pela ciência dos solos para um tipo específico e singular de solo.

Os ensaios utilizados para a caracterização de uma amostra de solo são os seguintes:

- a) Umidade Natural;
- b) Umidade Higroscópica;
- c) Limite de Plasticidade;
- d) Limite de Liquidez;
- e) Peso específico real dos grãos;
- f) Análise granulométrica;
- g) Ensaio de compactação; e
- h) Ensaio de adensamento.

Os resultados provenientes dos ensaios são relacionados com os parâmetros físicos do solo e, com a análise significativa de amostras, podem ser utilizados para dimensionamento de fundações de pequeno porte.

2.1 – Análise Granulométrica

A análise granulométrica é a determinação das dimensões das partículas do solo e das proporções relativas em que elas se encontram e é representada, graficamente, pela curva granulométrica, segundo CAPUTO (1996). As dimensões das partículas do solo estão expressas na tabela a seguir.

Tabela 1 - Relação entre o diâmetro e o tipo do grão.

Parâmetro	Argilas	Siltes	Areia fina	Areia média	Areia grossa	Pedregulho
Diâmetro do grão (mm)	$d \leq 0,002$	$0,002 < d \leq 0,06$	$0,060 < d \leq 0,200$	$0,200 < d \leq 0,600$	$0,600 < d \leq 2,000$	$2,000 < d$
Peneiras (mm)	Passa na N°200	Passa na N°200	Passa na N° 100 e retida na N°200	Passa na N°16 e retida na N°100	Passa na N°10 e retida na N°16	Retida na N°10

A análise granulométrica por peneiramento só abrange a porção arenosa do solo, isto significa que a porção fina (siltes e argilas) deve ser analisada de outra forma. Normalmente o processo utilizado é o método da sedimentação contínua em meio líquido.

CAPUTO (1996) afirma que dentre os diversos métodos de análise por sedimentação, o mais simples é o desenvolvido por Casagrande, sendo frequentemente utilizado nos laboratórios de Mecânica dos Solos. Ele é baseado na lei de Stokes, que estabelece uma relação entre o diâmetro da partícula e sua velocidade de sedimentação em um meio líquido de viscosidade e peso específico conhecidos.

PINTO (2013) afirma que a diversidade e a diferença de comportamento dos diversos tipos de solos perante as solicitações de interesse da engenharia levaram ao seu natural agrupamento em conjuntos distintos, aos quais podem ser atribuídas algumas propriedades peculiares. Dessa tendência racional de organização da experiência acumulada, surgiram os sistemas de classificação dos solos.

2.1.1 – Análise pela Classificação Trilinear

CAPUTO (1996) explica que, pela classificação trilinear do solo, a identificação é feita em função das porcentagens de seus constituintes principais, utilizando-se um diagrama trilinear, tal como o adotado pela Federal Highway Administration, no qual, sobre cada um dos três eixos coordenados se representa uma dessas três frações granulométricas: areia, silte e argila.

Com a distribuição das porcentagens passadas em cada peneira, obtida via análise granulométrica, é possível classificar o solo de acordo com o ábaco de Classificação Trilinear dos Solos mencionado por CAPUTO (1996), que está disposto na figura abaixo.

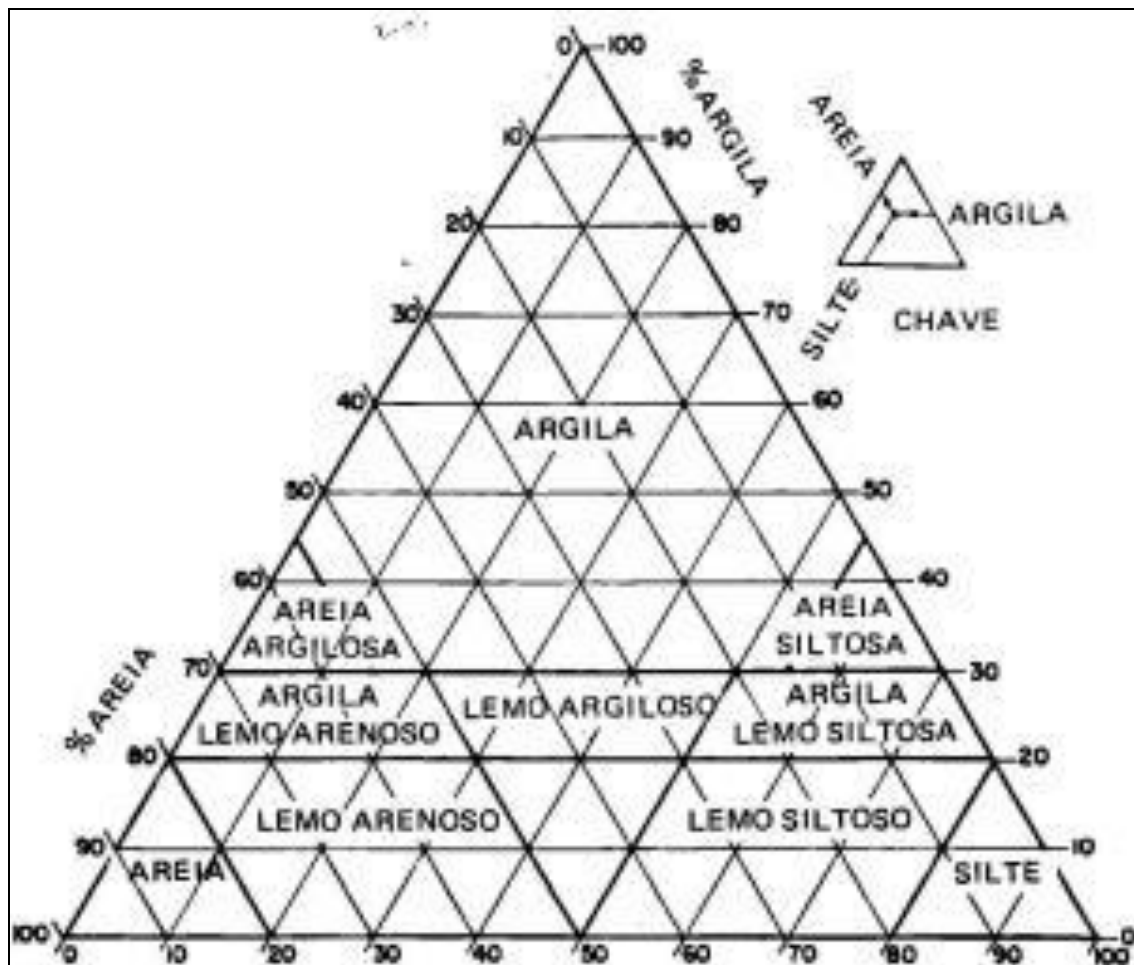


Figura 5 - Classificação Trilinear dos Solos.

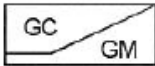
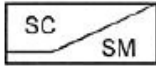
2.1.2 – Análise pelo Sistema Unificado

Ainda com a curva granulométrica é possível identificar o solo de acordo com o Sistema Unificado, que foi elaborado originalmente pelo Prof. Casagrande para obras de aeroportos, e seu emprego foi generalizado e atualmente é utilizado principalmente pelos geotécnicos que trabalham em barragens de terra, segundo PINTO (2013).

PINTO (2013) explica que para classificar o solo por esse sistema, o primeiro aspecto a se considerar é a porcentagem de finos presente no solo, sendo considerado ‘finos’ o material que passa na peneira nº 200 (0,075 mm). Se a porcentagem for inferior a 50, o solo será considerado como granulação grosseira, G (“gravel”, do inglês “pedra”) ou S (“sand”, do inglês “areia”). Se for superior a 50, o solo será considerado de granulação fina, M (“silt”, do inglês “silte”), C (“clay”, do inglês “argila”) ou O (“organic”, do inglês “orgânico”). Outra classificação é a Pt (“peat”, do inglês “turfa”), que representa solos com alto nível de matéria orgânica (maior que o tipo “O”).

O sistema também designa o solo de acordo com a graduação dos grãos, em caso de solos arenosos, dividindo-se em W (“well graded”, do inglês “bem graduado”) ou P (“poorly graded”, do inglês “malgraduado”) e de acordo com o nível de compressibilidade, nos casos de solos argilosos, dividindo-se em H (“high plasticity”, do inglês “alta plasticidade/compressibilidade”) ou L (“low plasticity”, do inglês “baixa plasticidade/compressibilidade”).

PINTO (2013) explica que a expressão “bem graduado” apenas expressa a existência de grãos com diversos diâmetros, o que confere ao solo melhor comportamento sob a ótica da engenharia. Também significa dizer que as partículas menores ocupam os vazios correspondentes às maiores, criando um entrosamento solidário, do qual resulta menor compressibilidade e maior resistência. Essa característica dos solos granulares é expressa pelo coeficiente de não uniformidade.

	G > S : G	% P #200 < 5	GW	(CNU > 4) (1 < CC < 3)
			GP	(CNU < 4) (1 < CC < 3)
		% P #200 > 12	GC	
			GM	
		% P #200 < 50	5 < #200 < 12	GW - GC, GP-GM, etc. -
	S > G : S	% P #200 < 5	SW	(CNU > 2) (1 < CC < 3)
			SP	(CNU < 2) (1 < CC < 3)
		% P #200 > 12	SC	
			SM	
			5 < #200 < 12	SW-SC, SP-SC, etc.

% P #200 > 50	C	CL
		CH
	M	ML
		MH
	O	OL
		OH

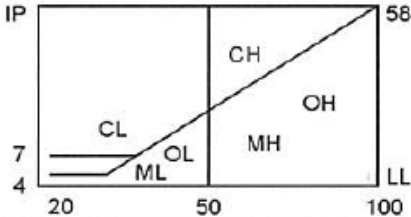


Figura 6 – Ábaco de classificação dos solos de acordo com o Sistema Unificado.

O autor PINTO (2013) afirma que quanto maior é o coeficiente de não uniformidade, mais bem graduada é a areia. Areias com CNU menores que 2 são chamadas de “areias uniformes”.

Ainda segundo PINTO (2013) o coeficiente de não-uniformidade indica a amplitude dos tamanhos de grãos e o coeficiente de curvatura detecta melhor o formato da curva granulométrica, permitindo identificar as eventuais descontinuidades ou

concentração elevada de grãos mais grossos no conjunto. Considera-se que o material é bem graduado quando o CC está entre 1 e 3.

O CNU pode ser calculado pela seguinte equação:

$$CNU = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (1)$$

Em que,

D_{60} = é o diâmetro, na curva granulométrica, abaixo do qual se situam 60% em peso das partículas; e, analogamente,

D_{10} = é o diâmetro, na curva granulométrica, abaixo do qual se situam 10% em peso das partículas.

O CC pode ser calculado pela seguinte equação:

$$CC = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}} \quad (2)$$

Em que,

D_{30} = é o diâmetro, na curva granulométrica, abaixo do qual se situam 30% em peso das partículas.

2.2 – Frasco de Areia

A determinação do grau de compactação, obtido no campo, demanda a determinação do peso específico aparente seco “*in situ*”. Vários processos foram desenvolvidos para efetuar, de maneira rápida e precisa, essa determinação, como os seguintes:

- método do óleo de motor;
- método do frasco de areia;
- método do amostrador; e
- outros processos.

Neste estudo o método do frasco de areia é o mais indicado para determinação do grau de compactação.

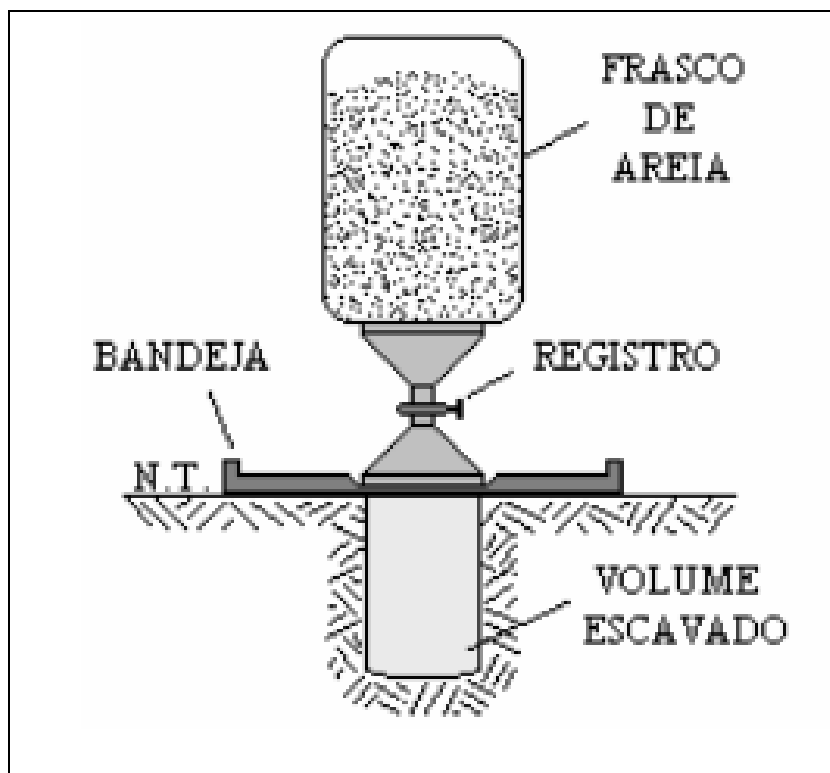


Figura 7 - Representação esquemática do frasco de areia.

O peso específico dos grãos dos solos varia pouco entre os tipos de solo e não permite identificar o solo em questão, mas é necessário para cálculo de outros índices, diz PINTO (2013). Os valores geralmente situam-se em torno de 27 kN/m^3 , valor adotado quando não se dispõe do valor específico para o solo em estudo. Grãos de quartzo (areia) costumam apresentar pesos específicos de $26,5 \text{ kN/m}^3$ e argilas lateríticas, em virtude da deposição de sais de ferro, valores até 30 kN/m^3 , ainda de acordo com PINTO (2013).

No laboratório, determinam-se massas, e as normas existentes indicam como obter massas específicas. Entretanto, na prática de Engenharia, é mais conveniente trabalhar com pesos específicos, razão pela qual se optou por apresentar os índices físicos nesses termos. O ensaio do frasco de areia torna-se uma avaliação importante do grau de compactação, que é o ensaio a seguir.

2.3 – Compactação

O autor PINTO (2013) afirma que o processo de compactação é empregado em diversas obras de engenharia, como os aterros para diversas utilidades, as camadas constituintes dos pavimentos, a construção de barragens de terra, preenchimento com

terra do espaço atrás de muros de arrimo e reenchimento de inúmeras valeras que se abrem diariamente nas ruas da cidade.

O tipo de obra e de solo disponíveis são os fatores limitantes no processo de compactação a ser empregado, a umidade em que o solo está na ocasião e o peso específico a ser atingido, com o objetivo de reduzir futuros recalques, aumentar a rigidez e a resistência do solo e reduzir a permeabilidade.

Na compactação, as quantidades de partículas e de água permanecem constantes e o aumento da massa específica corresponde à eliminação de ar dos vazios. A saída do ar é facilitada porque, quando a umidade não é muito elevada, o ar encontra-se em forma de canalículos intercomunicados, afirma PINTO (2013).

Os canalículos de ar e o atrito reduzido permitem uma massa específica maior quando o teor de umidade é maior, de acordo com PINTO (2013), e a partir de certo teor de umidade, a compactação não consegue mais expulsar o ar dos vazios, pois o grau de saturação já é elevado e o ar está ocluso. Há, para cada nível de energia aplicada, certo teor de umidade, denominado umidade ótima, que conduz a uma massa específica seca máxima.

A compactação de um solo visa melhorar suas características, não só quanto à resistência, mas também nos aspectos de permeabilidade, compressibilidade e absorção de água.

De acordo com CAPUTO (1996), no estado atual de conhecimento sobre o assunto, sabe-se que o aumento do peso específico de um solo, produzido pela compactação, depende fundamentalmente da energia dispendida e do teor de umidade do solo. Observe-se que na compactação há expulsão de ar, e no adensamento a expulsão é da água.

Acompanhando-se a evolução da massa específica do solo em função do aumento da umidade pode-se traçar a curva de compactação, cuja função é evidenciar o ponto ótimo de umidade e, conseqüentemente, o ponto ótimo para a compactação em relação à energia de compactação, que pode ser definida através da NBR 7182.

Esta curva nos mostra que há um determinado ponto, para o qual a massa específica é máxima. A umidade correspondente a este ponto de peso específico aparente máximo é denominada umidade ótima. Para cada solo, sob uma dada energia

de compactação, existem, então, uma umidade ótima e um peso específico aparente máximo.

Tabela 2 - Definição da energia de compactação para realização do ensaio.

Cilindro	Características	Energia dispendida		
		Normal	Intermediária	Modificada
Pequeno	Soquete	Pequeno	Grande	Grande
	Nº de Camadas	3	3	5
	Nº de Golpes por Camada	26	21	27
Grande	Soquete	Grande	Grande	Grande
	Nº de Camadas	5	5	5
	Nº de Golpes por Camada	12	26	55
	Altura do Disco (mm)	63,5	63,5	63,5

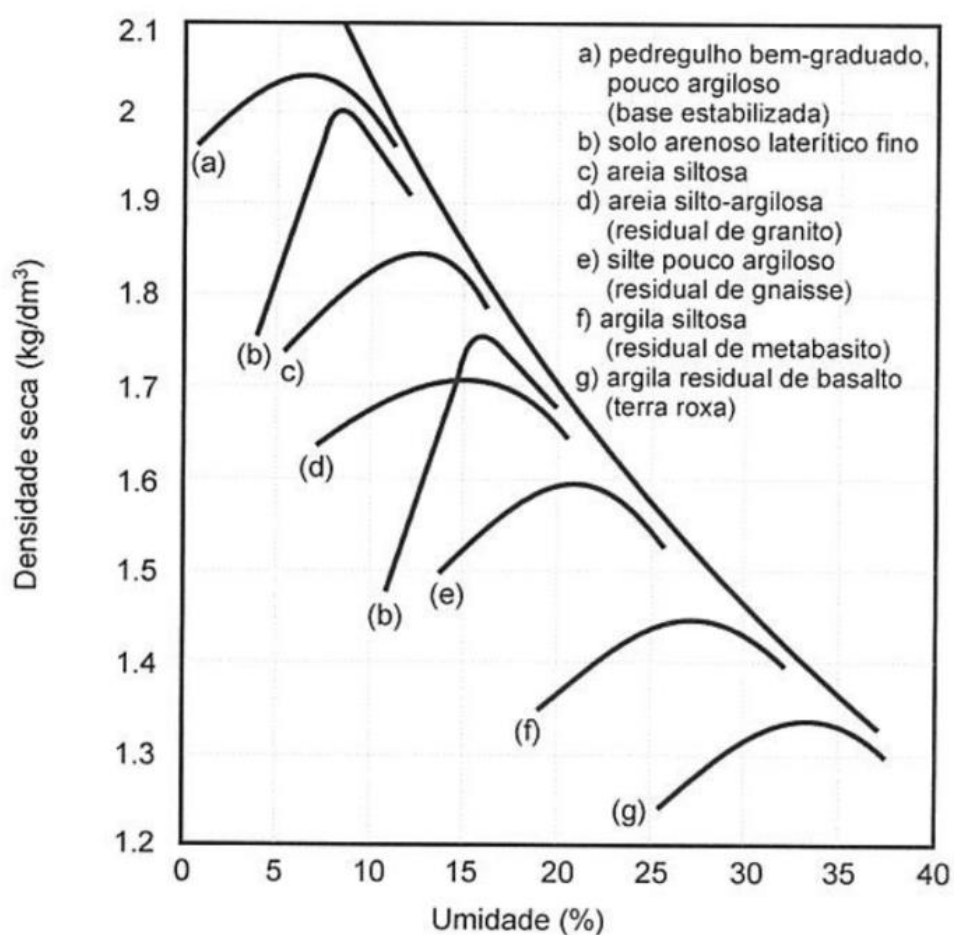


Figura 8 - Exemplo de curvas de compactação características dos solos brasileiros.

2.4 – Estimativa dos parâmetros físicos do solo

2.4.1 – Tensão admissível

A tensão admissível de um solo é a máxima pressão que pode ser exercida em determinada porção superficial sem que haja ruptura. A resistência diminui proporcionalmente à granulometria do solo em estudo. Granulometrias mais grosseiras (rochas e pedregulhos) suportam grandes cargas, enquanto os componentes mais finos (siltes e argilas) se comportam de forma contrária. As areias puras e os solos majoritariamente arenosos representam a porção intermediária e, portanto, possuem uma resistência moderada à admissão de cargas.

Tabela 3 -Relação entre Tensão Admissível e o tipo de solo e seu nível de compactação.

Classe	Solo	Valores Básicos (MPa - kg/cm²)
1	Rocha sã, maciça, sem laminações ou sinal de decomposição	5,0 - 50
2	Rochas laminadas, com pequenas fissuras, estratificadas	3,5 - 35
3	Pedregulhos e solos pedregulhosos, mal graduados, compactos	0,8 - 8
4	Pedregulhos e solos pedregulhosos, mal graduados, fofos	0,5 - 5
5	Areias grossas e areias pedregulhosas, bem graduadas, compactadas	0,8 - 8
6	Areias grossas e areias pedregulhosas, bem graduadas, fofas	0,4 - 4
7	Areias finas e médias:	-
	Muito compactadas	0,6 - 6
	Compactadas	0,4 - 4
	Medianamente compactadas	0,2 - 2
8	Argilas e solos argilosos	-
	Consistência dura	0,4 - 4
	Consistência rija	0,2 - 2
	Consistência média	0,1 - 1
9	Siltes e solos siltosos	-
	Muito compactados	0,4 - 4
	Compactados	0,2 - 2
	Medianamente compactados	0,1 - 1

Segundo a tabela 3, é possível perceber que as classificações também são relacionadas com o nível de compactação do solo. De acordo com o grau de

compactação obtido para um tipo de solo é possível afirmar a sua resistência mecânica, tendo em vista que solos mais compactos possuem, por via de regra, maior resistência quando comparados à solos com alto índice de vazios.

2.4.2 – Ângulo de atrito

De acordo com PINTO (2013), o ângulo de atrito é o ângulo máximo que a força transmitida pelo corpo à superfície pode fazer com a normal ao plano de contato sem que ocorra deslizamento. Atingido esse ângulo, a componente tangencial é maior do que a resistência ao deslizamento, que depende do componente normal.

Tabela 4 - Relação entre o ângulo de atrito e a graduação da areia.

Graduação da areia	Compacidade
	"fofo" a "compacto"
Areias bem graduadas	-
de grãos angulares	37° a 47°
de grãos arredondados	30° a 40°
Areias mal graduadas	-
de grãos angulares	35° a 43°
de grãos arredondados	28° a 35°

Analisando-se os dados contidos na Tabela 4, é possível perceber que o ângulo de atrito para solos arenosos depende diretamente do formato dos grãos e se os mesmos são bem graduados ou mal graduados. O formato dos grãos é relacionado à composição mineralógica do grão em questão. A graduação da areia é obtida de acordo com a curva granulométrica.

No caso de solos predominantemente argilosos, PINTO (2013) também considera o ângulo de atrito interno dos grãos, mas desta vez relacionado ao Índice de Plasticidade, especificado na Tabela 5.

Tabela 5 – Relação entre o ângulo de atrito interno efetivo e o índice de plasticidade para solos argilosos.

Índice de Plasticidade	Ângulo de atrito interno efetivo
10	30° a 38°
20	26° a 34°
40	20° a 29°
60	18° a 25°

Na ocorrência de solos predominantemente argilosos se faz necessário calcular o índice de plasticidade através dos limites de consistência (Limites de Atterberg). O cálculo desses limites é feito de acordo com as prerrogativas impostas nas Normas:

- **NBR-6459/ABNT** - Determinação do Limite de Liquidez de Solos; e
- **NBR-7180/ABNT** - Determinação do Limite de Plasticidade de Solos.

Já o índice de plasticidade (IP) é calculado através da diferença entre o LL (limite de liquidez) e o LP (limite de plasticidade). Na tabela 6 são colocados valores típicos de LL e IP para alguns tipos de solos brasileiros.

Tabela 6 - Relação entre o tipo de solo e os limites de consistência.

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

Para os solos argilosos é fundamental que sejam calculados os seus próprios limites de consistência, sabendo-se que a composição mineralógica das argilas varia de uma região para outra. Nestes casos, o cálculo dos limites de consistência entra como um complemento ao ensaio de análise granulométrica.

2.4.3 – Coeficiente de Poisson

O coeficiente de Poisson relaciona a deformação nos sentidos transversais ao sentido de aplicação de uma carga em um determinado corpo físico. No caso do corpo físico ser um solo, o coeficiente de Poisson pode ser atribuído aos vários tipos de solo existentes. Os autores TEIXEIRA E GODOY (1996) relacionaram o tipo de solo ao seu respectivo coeficiente após uma série de estudos de sondagens SPT em diversos tipos de solo, chegando a uma série padrão de repetições e resultados.

Tabela 7 - Relação entre tipo de solo e o coeficiente de Poisson.

Tipo de solo	Coeficiente de Poisson
Areia pouco compacta	0,2
Areia compacta	0,4
Silte	0,3 - 0,5
Argila saturada	0,4 - 0,5
Argila não saturada	0,1 - 0,3

3 – METODOLOGIA DA PESQUISA

A metodologia da pesquisa é baseada nas instruções normativas para cada ensaio de caracterização tendo em vista que cada tipo de ensaio é regido por uma Norma Brasileira (NBR) e que deve ser seguida para a obtenção do resultado mais próximo da realidade.

Neste estudo serão abordados três ensaios para iniciar o processo de caracterização dos solos da bacia de São Cristóvão. Os ensaios escolhidos são:

- a) Ensaio de granulometria (por peneiramento e sedimentação);
- b) Ensaio do frasco de areia; e
- c) Ensaio de compactação.

O ensaio de granulometria consiste em uma análise sobre a distribuição de diâmetro médio das partículas do solo analisado através de peneiramento utilizando-se a série normal de peneiras. Para a obtenção do diâmetro das partículas do solo, as peneiras devem ser previamente graduadas.

Este procedimento possibilita avaliar grãos com diâmetros superiores a 0,075 mm (que é a menor abertura de peneira disponível na série). Para grãos inferiores a esse diâmetro, é utilizado o processo de sedimentação. A norma que padroniza o ensaio de granulometria com a série de peneiras é a norma brasileira NBR – 7181 (Solo – Análise granulométrica). O ensaio de sedimentação é a continuação do processo de análise granulométrica e também é regida pela NBR 7181.

O ensaio de determinação de massa específica aparente consiste no uso do frasco de areia para determinar a massa específica aparente, “in situ”, de um solo. Este procedimento é regido pela norma NBR 7185.

Esta Norma aplica-se a solos de qualquer granulação, contendo ou não pedregulhos, que possam ser escavados com ferramentas de mão e cujos vazios naturais sejam suficientemente pequenos, de forma a evitar que a areia usada no ensaio penetre nos mesmos. O material que está sendo ensaiado deve ser suficientemente coesivo e firme, de modo que as paredes da cavidade a ser averta permaneçam estáveis e as operações a serem realizadas não provoquem deformações na mesma.

O ensaio de compactação, regido pela norma NBR-7182, avalia o método para determinar a relação entre o teor de umidade e a massa específica aparente seca de solos quando compactados, de acordo com os processos especificados.

Após a execução dos ensaios é possível estimar os parâmetros físicos do solo em questão, tendo em vista que o objetivo principal deste trabalho é dimensionar a estrutura de fundação de uma residência unifamiliar com dois pisos, um térreo e um superior, na região de São Cristóvão (RN).

Os ensaios de granulometria e sedimentação serão responsáveis por identificar o tipo de solo de acordo com o Sistema Unificado e o Diagrama Trilinear, tendo por objetivo alcançar o Coeficiente de Não Uniformidade e o Coeficiente de Curvatura, para concluir acerca da graduação e da compressibilidade do solo analisado.

O ensaio de massa específica aparente irá avaliar a massa específica aparente seca do solo, tanto na superfície como a 50 centímetros abaixo da superfície. Este segundo ensaio é necessário para avaliar o grau de adensamento do solo no nível em que será escavada a fundação superficial, seja sapata ou bloco.

O ensaio de compactação terá o objetivo de relacionar a massa específica seca da amostra de solo em função da umidade. O valor obtido para a massa específica aparente seca máxima a partir deste ensaio será comparado com o valor obtido no ensaio do frasco de areia, com o intuito de relacionar, proporcionalmente o grau de compactação com o grau de adensamento do solo.

3.1 – Ensaio de granulometria

3.1.1 – Procedimento

3.1.3.1 – Preparação da amostra

Para preparar a amostra é preciso seguir as indicações que constam na norma NBR 6457, na seção 5, que dispõe das assertivas a serem seguidas para os Ensaio de Caracterização.

3.1.3.2 – Execução do ensaio

Ensaio executado de acordo com os procedimentos preconizados na NBR 7181.

3.1.2 – Cálculos

Utilizar as fórmulas dispostas na NBR 7181 para calcular as porcentagens acumuladas com o intuito de desenvolver a curva granulométrica.

Analisar a quantidade de finos para avaliar a necessidade de realizar os cálculos do ensaio de sedimentação.



Figura 9 – Da esquerda para a direita: (i) Dispensor de amostras; (ii) Densímetro padrão; e (iii) Série normal de peneiras a ser utilizada no ensaio de peneiramento.

3.2 – Ensaio de determinação de massa específica aparente

3.2.1 – Procedimento

Ensaio executado de acordo com os procedimentos preconizados na NBR 7185.

3.2.2– Cálculos

Calcular a massa específica aparente seca do solo “in situ”, utilizando a expressão:

$$\gamma_{\text{seca}} = \gamma_{\text{areia}} \times \frac{M_h}{M_{10}} \times \frac{100}{100 + h} \quad (3)$$



Figura 10 - Da esquerda para a direita: (i) Martelo e Talhadeira; (ii) Conjunto Frasco+Funil; (iii) Pá.



Figura 11 – Da esquerda para a direita: (i) abertura da cavidade; (ii) retirada do material da cavidade; (iii) execução do ensaio na cavidade.



Figura 12 - Da esquerda para a direita: (i) abertura da cavidade na vala de 50 cm de profundidade; (ii) execução do ensaio na cavidade e retirada do material.

3.3 – Ensaio de compactação

3.3.1 – Procedimento

Ensaio executado de acordo com os procedimentos preconizados na NBR 7182.

3.3.2 – Cálculos

A massa específica aparente seca deve ser calculada segundo a fórmula disponibilizada na NBR 7182, que é mostrada a seguir:

$$\gamma_{\text{sec } a} = \frac{P_h}{V(100 + h)} \times 100 \quad (4)$$



Figura 13 - Da esquerda para a direita: (i) Molde cilíndrico; (ii) Soquete cilíndrico; (iii) Molde executado.

4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados a seguir foram obtidos em concordância com os procedimentos preconizados nas normas brasileiras, excetuando-se os ensaios de Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade, que não foram executados por não existir a coesão necessária entre os grãos para permitir a realização do ensaio.

4.1 – Ensaio de granulometria

4.1.1 – Execução do ensaio

A tabela 8 mostra os resultados dos ensaios de granulometria, obtidos através dos processos de peneiramento fino e grosso. A amostra para o peneiramento grosso contempla os resultados das peneiras 9,500, 4,800 e 2,000. A parcela de solo que passa na peneira 2,000 é analisada pelo peneiramento fino.

Tabela 8 - Resultado do ensaio granulométrico para cada peneira.

Peneira (ISO)	Massa retida (g)	Massa retida (%)	% retida acumulada	% passada acumulada
9,500	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
4,800	3,57	1,19%	1,19%	98,81%
2,000	19,89	6,63%	7,82%	92,18%
1,180	9,58	7,98%	15,80%	84,20%
0,600	13,91	11,59%	27,39%	72,61%
0,420	14,26	11,88%	39,27%	60,73%
0,300	36,53	30,44%	69,71%	30,29%
0,150	21,50	17,92%	87,63%	12,37%
0,075	11,59	9,66%	97,29%	2,71%
Fundo	3,25	2,71%	100,00%	0,00%

De acordo com os dados expressos na tabela 8, pôde-se observar que apenas 2,71% do material passou na peneira #200 (0,075 mm), configurando-se como a parcela de Finos do material, o que leva à classificação como material grosseiro. Essa parcela foi identificada devido ao processo de sedimentação.

A porção de material que passou na peneira #2 (4,800 mm) e ficou retido na peneira #200 (0,075 mm) é igual a 96,10% do material total. Essa porção é considerada como Arenosa, segundo os diâmetros de grãos expressos na tabela 1. Essa parcela foi

identificada devido aos processos de peneiramento fino e peneiramento pós-sedimentação.

A porção que ficou retida na peneira #2 (4,800 mm) é igual a 1,19% e representa o percentual de Pedregulho, tendo sido identificada no peneiramento grosso.

A figura 13 expressa, graficamente, a curva granulométrica em escala logarítmica, segundo os resultados da tabela 8.

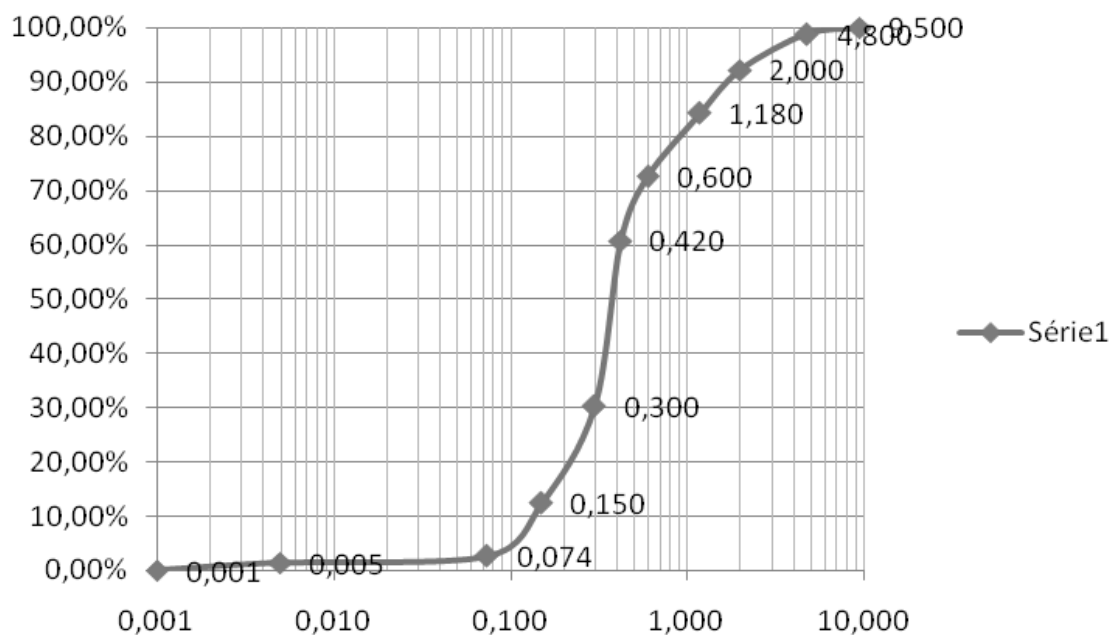


Figura 14 - Curva granulométrica da amostra estudada.

Em que,

$D_{60} = 0,420$ mm;

$D_{30} = 0,300$ mm; e

$D_{10} = 0,150$ mm.

4.1.2 - Cálculos

De acordo com os sistemas Unificado e Trilinear o solo é considerado “arenoso com baixo teor de finos” e “arenoso puro”, respectivamente, segundo as constatações feitas a partir da análise granulométrica, visto que a porcentagem de finos é muito pequena e a quantidade de pedregulhos também. Os solos arenosos (puros ou com baixo teor de finos e pedregulhos) têm propriedades que conferem alta resistência e baixa compressibilidade ao solo.

Aplicando-se as fórmulas para a obtenção do Coeficiente de Não-Uniformidade (CNU) e do Coeficiente de Curvatura (CC), com o intuito de definir a granulometria do solo em “bem-graduado” ou “mal-graduado”.

$$CNU = \frac{0,420mm}{0,150mm} = 2,800 \geq 2,000 \text{ (Bem graduada)}$$

$$CC = \frac{0,300^2}{0,420 \cdot 0,150} = 1,428 \text{ (} 1 \leq CC \leq 3 \rightarrow \text{Bem graduada)}$$

De acordo com os resultados obtidos nos coeficientes acima pode-se considerar o solo estudado “como arenoso bem graduado e de baixa compressibilidade”, baseando-se pelo Sistema Unificado (nomenclatura SW). Esse tipo de solo é típico da costa nordeste do Brasil e pode ser considerado, na perspectiva geotécnica, um solo com boas propriedades mecânicas.

MARANGON (2006), da Universidade Federal de Juiz de Fora (Minas Gerais), estipulou valores de Tensão Admissível que são divididos de acordo com a composição mineralógica e o grau de compactação do solo *in situ*. Estes valores estão especificados na Tabela 3 e seu uso é limitado aos estudos preliminares de obras de pequeno porte, servindo apenas como base para a identificação e a estimativa de dimensionamento.

A tensão admissível para o solo classificado como “arenoso com baixo teor de finos, bem graduado e com baixa compressibilidade” foi relacionada com o tipo de solo “Areias finas e médias – Compactadas”, que converge para um valor de tensão admissível $T_{adm} = 0,4 \text{ MPa}$ (ou $4,0 \text{ kg/cm}^2$).

O ângulo de atrito pode ser estimado de acordo com a tabela elaborada por PINTO (2013), em que as “areias bem graduadas com grãos arredondados” (considera-se grãos arredondados pelo fato de que os mesmos possuem origem sedimentar e são transportados pelo vento e pela água, sendo arredondados pelo fato de “rolarem” até o local a que se destinam) têm, corriqueiramente, ângulos de atrito entre 30° e 40° , sendo permitida a adoção de valores dentro desta faixa, de acordo com a Tabela 4.

O coeficiente de Poisson, estudado por Teixeira e Godoy (1996), pode ser fixado em $\nu = 0,40$, tendo em vista de que o solo se trata de uma Areia Compacta, de acordo com a Tabela 7.

Esses valores que foram estimados são os principais parâmetros para o pré-dimensionamento de fundações de estruturas de pequeno porte sobre solo arenoso puro, que é o solo em questão. Portanto, para o nível de dimensionamento preliminar de pequenas estruturas, estes valores podem ser utilizados. Ainda para estruturas pequenas, com pequenas cargas, os parâmetros podem ser utilizados de forma efetiva se forem analisadas diversas amostras, sabendo-se que os resultados de apenas uma amostra não permite ter resultados conclusivos.



Figura 15 - Disposição do resultado da análise granulométrica.

4.2 – Ensaio de determinação de massa específica aparente

4.2.1 – Execução do ensaio

Tabela 9 - Determinação da massa que preenche o funil e o orifício no rebaixo da bandeja com utilização da ferramenta Microsoft Excel®.

Quantidade de determinações	1	2	3
M1	4397,10 g	4394,80 g	4390,30 g
M2	3868,90 g	3866,00 g	3863,20 g
M3	528,20 g	528,80 g	527,10 g

Em que,

M1 = Massa do conjunto frasco+funil antes de abrir o registro;

M2 = Massa do conjunto frasco+funil após o fechamento do registro; e

M3 = Massa da areia que preenche o funil e o orifício.

M3_{médio} = 528,03 ± 5,28 g (nenhum valor difere em mais de 1% do valor da média)

Para graduar a areia, os resultados foram obtidos da seguinte forma:

- Posicionar o cilindro em uma bandeja de plástico que estejam previamente tarados na balança de resolução de 1g;
- Derramar, de forma contínua a areia bem graduada no cilindro de altura aproximada à do registro do conjunto frasco + funil;
- Extravasar o cilindro até que a areia comece a derramar pelas bordas do mesmo;
- Biselar o topo de forma a planificar o cone de areia que é formado acima da estrutura do cilindro;
- Retirar o excesso de areia com auxílio de um pincel;
- Pesar o conjunto formado pelo cilindro e pela bandeja (que estarão previamente tarados na balança) com a areia e anotar o valor;
- Determinar o volume do cilindro com o auxílio de um paquímetro;
- Calcular a massa específica da areia de acordo com a expressão dada pela Norma.

Foram feitas sete determinações de graduação da areia por que o procedimento utilizado difere do regido em Norma, apesar de serem resguardados os princípios. A

média do valor obtido para a massa é expresso na Tabela 10. Na Tabela 11 são expressos os valores para o cálculo do volume do cilindro utilizado.

Tabela 10 - Determinação da quantidade de areia graduada que preenche o cilindro utilizado.

Repetições	Massa
1	1005,70 g
2	986,80 g
3	998,70 g
4	991,60 g
5	992,70 g
6	998,50 g
7	997,90 g
Média	995,99 g

Tabela 11 - Determinação do volume do cilindro utilizado no ensaio.

Dimensão	1	2	3	Média
Diâmetro (mm)	101,40	101,42	101,43	10,14
Raio (mm)	50,70	50,71	50,72	5,07
Altura (mm)	91,17	91,24	90,99	9,11
Volume médio				735,81 cm³

Portanto, de acordo com os valores obtidos nas tabelas 10 e 11, é possível afirmar que a massa específica da areia graduada é resultado da seguinte expressão:

$$\gamma_{areia} = \frac{M_{areia}}{V_{cilindro}} = 1,35 \text{ g/cm}^3$$

4.2.2 – Cálculos

A – Ensaio superficial

Antes de despejar o conteúdo do frasco na cavidade do terreno, a massa do conjunto era 4392,0 gramas. Após a finalização do ensaio, a massa do conjunto era igual a 2076,0 gramas. Esses valores têm uma variação de 2316,0 gramas.

A massa de areia contida no funil ($M_{3\text{médio}}$) deve ser subtraída desta variação, restando o valor de 1788,0 gramas. Com esse valor é possível calcular o volume da cavidade que foi escavada no terreno, que é de 1320,91 cm³, usando-se como referência a massa específica da areia graduada.

A massa de areia que foi retirada do terreno foi pesada e foi registrado um valor de 2250,0 gramas.

A umidade calculada pelo método da estufa na massa que foi retirada do terreno é igual a 0,15%, um valor muito baixo mas que pode ser explicado pelo fato de que a areia foi coletada no nível superficial do solo.

De acordo com os cálculos dispostos na norma, calculou-se a massa específica aparente ($\gamma_{aparente}$) e a massa específica aparente seca ($\gamma_{aparente,seca}$) na superfície do solo estudado:

$$\gamma_{aparente} = 1,70 \text{ g/cm}^3$$

$$\gamma_{aparente,seca} = 1,70 \text{ g/cm}^3$$

B – Ensaio a 50 cm da superfície

Antes de despejar o conteúdo do frasco na cavidade do terreno, a massa do conjunto era de 3650,0 gramas. Após a finalização do ensaio, a massa do conjunto era igual a 1250,0 gramas. Esses valores apontam para uma variação de 2400,0 gramas.

A massa de areia contida no funil deve ser subtraída desta variação, restando o valor de 1872,0 gramas. Com esse valor é possível calcular o volume da cavidade que foi escavada no terreno, que é de 1382,96 cm³, usando-se como referência a massa específica da areia graduada.

A massa de areia que foi retirada do terreno foi pesada e foi registrado um valor de 2750,0 gramas.

A umidade calculada pelo método da estufa na massa que foi retirada do terreno deu um valor de 1,50%, sendo uma taxa já elevada de umidade, mas que pode ser explicada pelo ambiente praiano.

De acordo com os cálculos dispostos na norma, calculou-se a massa específica aparente ($\gamma_{aparente}$) e a massa específica aparente seca ($\gamma_{aparente,seca}$) a 50 centímetros de profundidade em relação ao nível do solo estudado:

$$\gamma_{aparente} = 1,99 \text{ g/cm}^3$$

$$\gamma_{aparente,seca} = 1,96 \text{ g/cm}^3$$

De acordo com a comparação dos resultados obtidos nesta análise, nota-se que há um incremento positivo na massa específica aparente do solo, devido a um adensamento natural do solo. O incremento de massa específica aparente seca foi de aproximadamente 15,29% e isso pode levar ao entendimento de que a resistência do solo também aumentou proporcionalmente.

O resultado da análise, tanto na superfície como na cota de fundações, indica um solo resistente, pouco compressível que se mostra satisfatório para a execução de fundações de edificações de pequeno porte, comumente encontradas na região de São Cristóvão.

4.3 – Ensaio de compactação

4.3.1 – Execução do ensaio

O ensaio de compactação foi realizado no Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal Rural do Semiárido (UFERSA) na manhã do dia 15 de Março de 2017. As amostras foram preparadas para serem executadas com reuso de material e secadas à umidade higroscópica. Para iniciar o procedimento, o solo coletado recebeu umidade o suficiente para parar de soltar poeira, marcando o pontapé inicial do ensaio.

O cilindro utilizado para a compactação é o cilindro de CBR com uma energia de compactação normal, resultando em um corpo de prova feito com 5 camadas e com aplicação de 12 golpes por camada. Essa energia de compactação foi escolhida com o intuito de fornecer uma simulação do mesmo nível de compactação feito por uma máquina pequena ou até mesmo manual, geralmente utilizados em construções de pequenas residências.

Outros ensaios, com energias maiores, podem simular maiores cargas sobre o solo, a fim de, posteriormente, realizar ensaios de resistência do solo.

4.3.2 - Cálculos

Tabela 12 - Resultado pontual das execuções dos ensaios de compactação do solo coletado.

Pontos	Massa Molde (g)	Massa Conjunto (g)	Massa Corpo de Prova (g)	Umidade (%)	Volume (cm³)	γ_s (g/cm³)
1	4850,00	8650,00	3800,00	2,81	2308,51	1,65
2	4850,00	8950,00	4100,00	4,48	2308,51	1,78
3	4850,00	9450,00	4600,00	6,31	2308,51	1,99
4	4850,00	9550,00	4700,00	7,52	2308,51	2,03
5	4850,00	9400,00	4550,00	9,88	2308,51	1,97

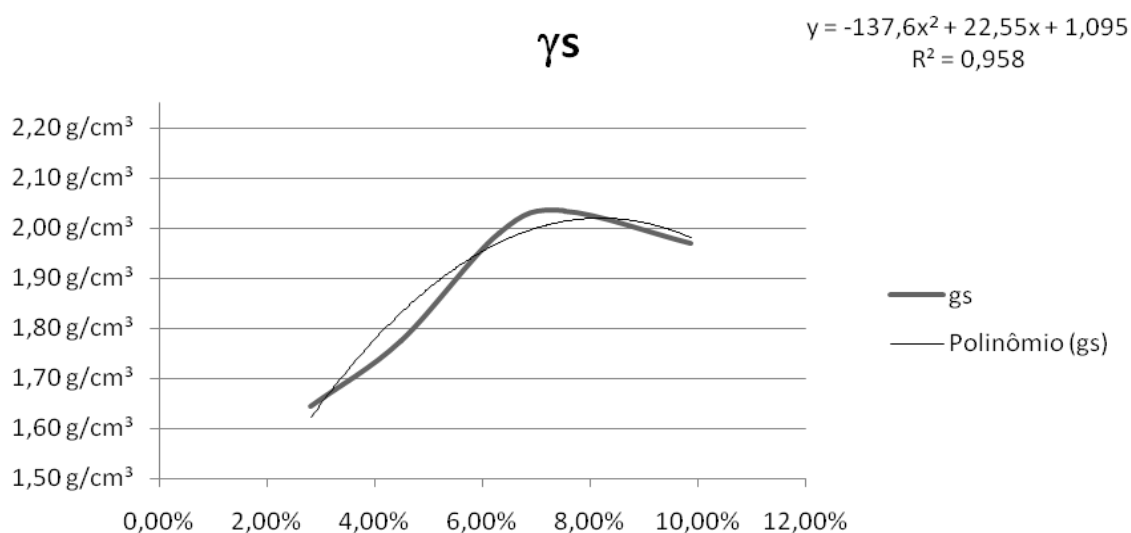


Figura 16 - Curva de compactação com linha de tendência simulada pelo Excel®.

Em que

$$X_{\text{vértice}} = 8,20\%; \text{ e}$$

$$Y_{\text{vértice}} = 2,02 \text{ g/cm}^3.$$

Analisando-se a curva de compactação obtida acima é possível perceber que a linha de tendência tem uma confiança de 95%, representando um valor aceitável de fator R^2 . Foram calculados os vértices da função quadrática gerada e foi constatado que o ponto de umidade ótima da curva é igual a 8,20% e o valor para massa específica aparente seca máxima é igual a 2,02 g/cm³.

Comparando-se aos valores de massa específica obtidos no ensaio anterior é possível perceber que, naturalmente, o solo a 50 cm de profundidade já quase se encontra no ponto de compactação ótima, com uma diferença percentual de 3,06%, visto que a massa específica aparente seca do solo nesta profundidade é igual a 1,96 g/cm³.

O ensaio de Compactação demonstrou valores satisfatórios quando analisado em conjunto com o ensaio de Massa Específica Aparente, tendo em vista que, a 50 cm de profundidade, a massa específica aparente seca in situ calculada (1,96 g/cm³) é muito próximo do ponto ótimo de compactação (2,05 g/cm³). Constatados esses dados, é possível afirmar que o processo natural de adensamento já confere as características que se espera do processo de compactação. Sabendo-se disto, existem indícios de que se possa reduzir custos com mão de obra e com beneficiamento do solo.

Esse acontecimento expressa o fato de que o adensamento natural do solo confere níveis de resistência comparáveis ao processo de compactação. PINTO (2013) afirmou que a experiência tem mostrado que uma areia que se encontra no seu estado natural por muitos anos ou séculos apresenta uma deformabilidade muito menor do que quando revolvida e recolocada no mesmo índice de vazios. Tendo isso em vista é possível afirmar que o adensamento do solo acontece naturalmente e provoca, lentamente, a união dos grãos, comprimido levemente as camadas inferiores através das superiores ao longo de muitos anos. Já a compactação insere energia de forma brusca na estrutura, podendo existir falhas no processo e ter como consequência a perda de resistência.

Outro motivo pelo qual o solo da bacia de São Cristóvão deve ser estudado de maneira mais aprofundada é o indício de que este solo pode ser considerado um “solo laterítico”, de acordo com as avaliações feitas a partir da sua curva de compactação e das considerações feitas por PINTO (2013), como a seguinte afirmação:

O autor PINTO (2013) afirma que de particular interesse para o Brasil é o estudo e a identificação dos solos lateríticos, típicos da evolução de solos em clima quente, com regime de chuvas moderadas a intensas. A denominação ‘solos lateríticos’ incorporou-se à terminologia dos engenheiros, embora não seja mais usada nas classificações pedológicas. Os solos lateríticos têm sua fração argilosa constituída predominantemente de minerais cauliníticos e apresentam elevada concentração de ferro

e alumínio na forma de óxidos e hidróxidos, donde sua peculiar coloração avermelhada. Esses sais encontram-se, geralmente, recobrendo agregações de partículas argilosas.

A aparência do solo descrita por PINTO (2013) na figura se assemelha à encontrada na bacia de São Cristóvão, principalmente em relação à coloração avermelhada. O clima presente na bacia estudada também é quente e possui regime de chuvas moderadas a intensas, clima típico das bacias costeiras nordestinas, principalmente.

NOGAMI (1995) afirma que as bases de Solo Arenoso Fino Laterítico (SAFL), apresentam peculiaridades no comportamento estrutural e na deterioração do pavimento, que as diferenciam dos demais tipos de base. Isto se deve à coesão natural que atua na base de SAFL ao longo de toda a sua vida útil. Essa propriedade está relacionada, principalmente, ao comportamento laterítico dos finos do solo, ao processo de compactação e ao fenômeno de capilaridade desenvolvido pela estrutura da base. Estas características, por exemplo, são muito diferentes da cimentação química que ocorre no caso de solocimento.

Sobre a resistência de solos lateríticos, PINTO (2013) explica que, na natureza, os solos lateríticos apresentam-se geralmente, não saturados, com índice de vazios elevado, daí sua pequena capacidade de suporte e quando compactados, sua capacidade de suporte é elevada e, por isto, são muito empregados em pavimentação e em aterros.

Com esta afirmação, percebe-se que a identificação de solos lateríticos é importante para os estudos em geotecnia, devido à sua alta aplicabilidade, descrita anteriormente por PINTO (2013) e reforçado por NOGAMI (1995).

4.4 – Parâmetros e índices estimados

O dimensionamento preliminar de fundações para edificações de pequeno porte e para este tipo de solo (arenoso puro com baixo teor de finos e pedregulhos), requer, os seguintes valores de entrada a serem utilizados baseado no modelo de Terzaghi:

- a) **Geometria da sapata:** definida pela disposição do terreno, podendo ser otimizada pelo uso de planilhas eletrônicas;
- b) **Carregamento na sapata:** definido em projeto;
- c) **Profundidade:** definida pela altura abaixo da superfície à qual será locada a estrutura de fundação;
- d) **Coesão:** considerado nulo em solos arenosos;
- e) **Tensão admissível:** definido de acordo com a tabela disponibilizada por MARANGON (2006).
- f) **Ângulo de atrito:** definido de acordo com a tabela disponibilizada por PINTO (2013);
- g) **Peso específico do solo:** definido de acordo com as análises de massa específica aparente e de granulometria;
- h) **Coefficiente de Poisson:** definido de acordo com o tipo de solo, podendo ser estimado pelos estudos dos autores TEIXEIRA E GODOY (1996).

4.5 – Semelhança com SAFL

Segundo VILLIBOR (2001), conceitua-se, tecnologicamente, como SAFL aquele tipo de solo que pertença à classe de solo de comportamento laterítico e a um dos grupos LA, LA' e LG', segundo a classificação geotécnica MCT (Nogami e Villibor) e que contenha pelo menos 50% de material passando na peneira 0,075mm (Nº200) e no mínimo 90% passando na peneira 2,00mm (Nº10), sendo esta fração predominantemente constituída por grãos de quartzo. A classificação MCT é normatizada no método de ensaio do DER/SP M 197-88 e pelo DNER-CLA-259/94.

Um estudo realizado pelo Instituto Federal de São Paulo (IFSP) concluiu que a utilização de Solos Arenosos Finos Lateríticos reduz os custos quando comparados a outros tipos de agregados. Essa relação de custo é expressa na Tabela 13.

Tabela 13 - Custos por metro quadrado do processo de pavimentação com agregados variados.

TIPO DE BASE	BASE (R\$/m ²)	EXECUÇÃO (R\$/m ²)	PREÇO TOTAL (R\$/m ²)
SAFL	3,95	14,13	18,08
Solo Brita	13,59	14,13	27,72
Solo Cimento	13,73	14,13	27,87
Brita Grad.	20,38	14,13	34,51

Os SAFL abrangem uma área de, aproximadamente, 65% do território nacional, sendo este o principal motivo para que seja analisada sua utilização em bases de pavimentos econômicos. Portanto sua utilização é caracterizada pelo aproveitamento dos recursos naturais, por ser uma solução de baixo custo e devido à necessidade de viabilização das rodovias. Este tipo de solo pode ser encontrado em abundância no Brasil e VILLIBOR (2001) elaborou um mapa temático que aborda a ocorrência desse tipo de solo.



Figura 17 - Ocorrência de solos lateríticos no Brasil.

Na Figura 16 é possível notar a ocorrência de Solos Arenosos de comportamento laterítico na região de estudo, na costa Norte e Nordeste do Estado do Rio Grande do Norte, aumentando a probabilidade de que a amostra de solo estudada seja, de fato, um SAFL.

Além da identificação do solo prover novas perspectivas de uso para o solo da bacia de São Cristóvão, estes dados coletados também podem ser utilizados, com o aperfeiçoamento dos métodos de caracterização, para confeccionar databases de solos (ou mapas pedológicos), como foi feito pelo Prof. Nogami sobre os solos do Estado de São Paulo, como visto na Figura 17.

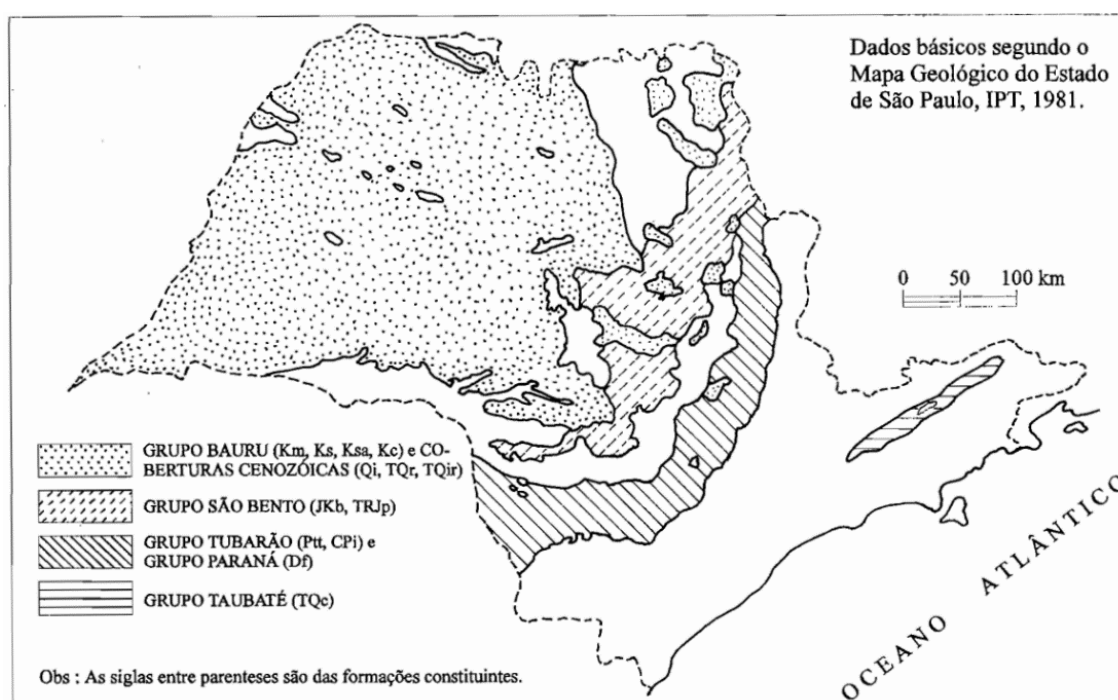


Figura 18 - Disposição pedológica dos solos lateríticos no Estado de São Paulo.

No Brasil ainda não existe alta especificidade nas informações encontradas nos mapas pedológicos e geotécnicos existentes e estes mapas são fundamentais para o desenvolvimento de projetos de engenharia dos mais variados tipos.

Em relação aos ensaios utilizados para a identificação dos Solos Arenosos Finos Lateríticos, VILLIBOR (2001) afirma que através da sua granulometria e de propriedades tecnológicas mecânicas e hídricas, obtidas pelo critério de metodologia MCT é possível identificar um SAFL. O solo deve ter granulometria tal que lhe seja aplicável a metodologia MCT, ou seja, deve passar integralmente na peneira de 2,00 mm de abertura ou possuir uma porcentagem de até 10% retida nessa peneira. Além da

granulometria são aconselhados os ensaios de Índice de Suporte Mini-CBR, Expansão, Contração de Solos Compactados, e Infiltrabilidade de Solos Compactados.

Nesta pesquisa, utilizou-se métodos menos complexos para identificação do solo, entretanto os resultados obtidos foram satisfatórios para serem observados indícios de origem laterítica e que, geralmente, esses solos apresentam boas propriedades mecânicas, endossados pelos ensaios de Compactação e Massa Específica Aparente.

5 – CONCLUSÃO

De acordo com as análises dos resultados, é possível identificar um solo, de maneira preliminar, com estudos simples e de baixo custo, com a finalidade de estimar as propriedades físicas em solos ainda não estudados. Esta pesquisa também trouxe consigo a perspectiva de se aprofundar nos estudos bacia de São Cristóvão na área de obras em terra, visto que o solo estudado apresentou resultados que permitem assumir, de forma preliminar, que o mesmo pode ser aplicado também em obras rodoviárias.

A amostra de solo analisada proveniente da bacia de São Cristóvão, no Rio Grande do Norte apresenta propriedades estimadas satisfatórias para o pré-dimensionamento de estruturas de pequeno porte (que foram listados anteriormente), com o intuito de redução de custo.

Para as edificações de pequeno porte, como as residências unifamiliares a serem construídas naquela região, com baixa solicitação sobre o solo, os parâmetros encontrados nesta pesquisa podem ser utilizados caso seja analisado, por este método e outros citados no estudo, um número significativo de amostras. Para obras de maior porte, recomenda-se que outros estudos, mais complexos, de sondagem e investigação do subsolo sejam executados.

A identificação dos solos da bacia de São Cristóvão se configura como uma pesquisa importante para a compreensão do uso do solo para diversos fins. O estudo poderá ser continuado da seguinte forma:

- a) Aperfeiçoamento do método aplicado com o intuito de incorporar outros ensaios que sirvam de complemento aos ensaios atuais, como ensaios de adensamento, de resistência ao cisalhamento e ensaios específicos para o caso de solos peculiares;
- b) Aplicação do método MCT com o intuito de identificar, conclusivamente, a ocorrência de Solos Arenosos Finos Lateríticos
- c) Estimativa da resistência do solo com o auxílio de sondagens SPT, para que se possa compreender os projetos de médio e grande portes; e
- d) Confecção de mapas temáticos com a finalidade de dispor de informações geotécnicas sobre solos de diversas regiões do estado.

Conclui-se que as propriedades físicas apresentadas pela amostra de solo coletada em São Cristóvão conferem propriedades mecânicas satisfatórias para suportar pequenas cargas aplicadas. As estruturas de fundação que são executadas na região não possuem controle tecnológico nem dimensionamento prévio, sendo geralmente superdimensionadas, agregando custos desnecessários. Caso sejam analisadas amostras suficientes, é possível apresentar um relatório definitivo e conclusivo sobre a resistência do solo e sobre a relação de semelhança com os solos lateríticos.

Os resultados obtidos na análise da amostra permitem afirmar que é possível reduzir custos com compactação do solo para fundação, tendo em vista que, naturalmente, o solo já apresenta 97% da massa específica aparente máxima apenas devido ao processo de adensamento.

A semelhança observada entre a amostra e os Solos Arenosos Finos Lateríticos, de acordo com a curva de compactação, cria indícios de que este tipo de solo pode ser utilizado para pavimentação de baixo custo, segundo os estudos de NOGAMI (1995) e VILLIBOR (2001). Os pavimentos de baixo custo representam redução significativa nos custos originais de projetos feitos com agregado solo-cimento.

Com a análise significativa de amostras de solos na região de São Cristóvão e a aplicação da metodologia MCT nessas amostras será possível afirmar, de forma definitiva, a ocorrência de SAFL na região de São Cristóvão.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2016). NBR 7181 – **Análise Granulométrica**. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2016). NBR 7182 – **Ensaio de Compactação**. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2016). NBR 7185 – **Determinação da massa específica aparente, “in situ”, com emprego do frasco de areia**. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2016). NBR 6457 – **Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2016). NBR 6508 – **Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro.
- CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos Solos e Suas Aplicações**. Rio de Janeiro: LTC, 6ª edição, 1996.
- DAS, Braja. M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. São Paulo: Thomson, 2007.
- EMBRAPA, **Manual de Métodos e Análises de Solo**. SNLCS, 1979.
- LODI, P. C.. **Mecânica dos Solos - Volume 1**. 1. ed. Ilha Solteira: , 2010. v. 1. 47p .
- LODI, P. C.. **Mecânica dos Solos - Volume 2**. 1. ed. Ilha Solteira: , 2010. v. 1. 30p .
- MELLO, V. F. B.; TEIXEIRA, A. N. **Mecânica dos solos**. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos – USP, 1971. 1ª edição. 205 p.
- MARANGON, M. **Tópicos em Geotecnia e Obras de Terra**. Minas Gerais: UFJF – Universidade Federal de Juiz de Fora, 2006. NUGEO. 1ª edição.
- NOGAMI, S. J.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. São Paulo: Editora Vilibor, 1ª edição, 1995.

NOGAMI, S. J.; VILLIBOR, D. F. **Aspectos fundamentais para uso adequado de SAFL em bases de pavimentos de baixo custo**. São Paulo: Editora Vilibor, 1ª edição, 2001.

FERREIRA, R. M.; PINTO, I. E. **Solo arenoso fino laterítico (SAFL) para uso em bases de pavimentos econômicos**. São Paulo: Editora Vilibor, 1ª edição, 2001.

PINTO, C.S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 5ªed São Paulo: Oficina de Textos, 2013. 353 p.il.

TEIXEIRA, A. H.; GODOY, N. S. **Capacidade de carga de fundações rasas**. PINI. 3ªed. São Paulo, 1996. 386p.