

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

JÉSSICA MARIA DE BARROS BEZERRA

**CARACTERIZAÇÃO DA FORMAÇÃO BARREIRAS DA CIDADE DE JOÃO
PESSOA COM BASE EM SONDAgens SPT E ESTUDO GEOTÉCNICO DE UMA
ENCOSTA COM ALTO RISCO DE DESLIZAMENTO**

Recife

2018

JÉSSICA MARIA DE BARROS BEZERRA

**CARACTERIZAÇÃO DA FORMAÇÃO BARREIRAS DA CIDADE DE JOÃO
PESSOA COM BASE EM SONDAgens SPT E ESTUDO GEOTÉCNICO DE UMA
ENCOSTA COM ALTO RISCO DE DESLIZAMENTO**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Engenharia Geotécnica.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Quental Coutinho.

Recife

2018

Catálogo na fonte
Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

B574c Bezerra, Jéssica Maria de Barros.
Caracterização da Formação Barreiras da cidade de João Pessoa com base em sondagens SPT e estudo geotécnico de uma encosta com alto risco de deslizamento / Jéssica Maria de Barros Bezerra. - 2018.
168 folhas, il.; tab., abr. e sigl.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Quental Coutinho.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, 2018.
Inclui Referências e Anexos.

1. Engenharia Civil. 2. Formação Barreiras. 3. SPT. 4. Parâmetros geotécnicos.
I. Coutinho, Roberto Quental (Orientador). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2018-257

JÉSSICA MARIA DE BARROS BEZERRA

**CARACTERIZAÇÃO DA FORMAÇÃO BARREIRAS DA CIDADE DE JOÃO
PESSOA COM BASE EM SONDAGENS SPT E ESTUDO GEOTÉCNICO DE UMA
ENCOSTA COM ALTO RISCO DE DESLIZAMENTO**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Aprovada em: 09/03/2018.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Roberto Quental Coutinho (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Fábio Lopes Soares (Examinador Externo)
Universidade Federal da Paraíba

Prof. Dr. Ricardo Nascimento Flores Severo (Examinador Externo)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

Aos meus maiores exemplos e melhores amigos,
Maria e João, meus pais, pelo amor incondicional
que me dedicam.

AGRADECIMENTOS

À Deus, presença constante em minha vida, por sua infinita misericórdia e bondade que me permitiram chegar até aqui.

Aos meus pais, Maria e João, pela criação que me deram, pela educação que me proporcionaram e pelo apoio incessante.

À João Carlos, meu irmão e sócio, pela compreensão e suporte de sempre.

Ao meu namorado de longa data, Diego Hebert, pelo carinho e cuidado que me dedica, pelo incentivo diário, e pela felicidade que me proporciona.

Aos queridos familiares e amigos que têm me acompanhado ao longo da vida, sempre preocupados e na torcida por mim.

Ao Professor Roberto Quental Coutinho pela orientação, pelos ensinamentos, pelo apoio e pela compreensão durante a realização deste trabalho.

Aos professores Fábio Lopes e Ricardo Severo pela participação na banca examinadora.

Aos funcionários do laboratório de solos e instrumentação da Universidade Federal de Pernambuco, em especial à Francisco e Antônio Brito, pela paciência e ajuda na realização dos ensaios.

Ao GEGEP – Grupo de Engenharia Geotécnica de Encostas, Planícies e Desastres, pela parceria e apoio na elaboração dos mapas, especialmente à Rafael Anjos, pela solicitude e competência.

Ao laboratório de solos da Universidade Federal da Paraíba por ceder seu espaço para a realização de alguns procedimentos.

À empresa Engeobase pela doação da sondagem SPT na encosta estudada. E às empresas Engeobase e Condressolo pela disponibilidade e fornecimento de boletins de sondagem para a composição do banco de dados deste trabalho.

Aos profissionais envolvidos na extração das amostras de campo e realização de sondagens SPT.

À Defesa Civil de João Pessoa, na pessoa de Alberto Sabino, pelo apoio irrestrito e acompanhamento nas visitas à comunidade Santa Clara, e pelo fornecimento de dados.

Aos que me acompanharam nas viagens semanais entre João Pessoa e Recife.

A todos que, indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

João Pessoa tem 67% de seu território recoberto por sedimentos inconsolidados da Formação Barreiras, segundo Barbosa (2015), e esta representatividade lhes confere grande relevância nos cenários geológico e geotécnico da cidade, uma vez que o crescimento dela, nos últimos anos, tem sido em direção à esta unidade geológica, além de estarem associadas a frequentes movimentos de massa. Esta pesquisa objetivou a caracterização da Formação Barreiras de João Pessoa em perfis geotécnicos típicos a partir de dados de sondagem SPT e a determinação de parâmetros geotécnicos de uma encosta localizada sobre esta unidade. Foram apresentados aspectos teóricos sobre Formação Barreiras, sondagens SPT e parâmetros geotécnicos. A metodologia deste trabalho consistiu na coleta de mapas e cartas para a caracterização de João Pessoa e do bairro Castelo Branco; na obtenção de boletins de sondagens em Formação Barreiras para a classificação dos perfis típicos da cidade; na realização de sondagem SPT no topo da encosta para a prospecção do seu perfil geotécnico; e na coleta de amostras deformadas e indeformadas para a definição dos parâmetros geotécnicos da encosta estudada através de ensaios de laboratório de caracterização física, condutividade hidráulica, ensaio edométrico e cisalhamento direto. Uma encosta da comunidade Santa Clara, no Bairro do Castelo Branco, apresentou-se com risco muito alto de deslizamento, conforme mapeamento de Soares et al (2015), sendo, portanto, escolhida para estudo de detalhe. A Formação Barreiras de João Pessoa foi classificada em nove perfis típicos a partir da composição dos solos de cada perfil e do comportamento do gráfico de penetração da sondagem SPT. A sondagem SPT realizada na encosta identificou um perfil com intercalações de solos argilosos e arenosos e gráfico de penetração crescendo e decrescendo em uma faixa de N_{spt} de 7 a 30 ao longo da profundidade, sendo classificado como do tipo PT3A. Com base no SUCS, o solo da base da encosta foi classificado em areia siltosa (SM e SW-SM) e o do topo em areia silto-argilosa (SM-SC). A permeabilidade foi da ordem de 10^{-5} m/s para os solos da base da encosta e 10^{-7} m/s para os do topo, e os índices de vazios iniciais médios destes solos, foram, respectivamente, 0,63 e 0,84, se enquadrando na faixa de valores proposta por Coutinho e Severo (2009) para solos da Formação Barreiras. O solo da base da encosta apresentou maior potencial de colapso (CP) do que o do topo, com valores máximos respectivos de 14,62% e 3,47%. Na base da encosta, os solos se mostraram com ângulo de atrito interno de 36° , coesão de 4,3 kPa e 8,6 kPa na condição de umidade natural e nula na condição inundada, enquanto que no topo apresentaram coesão de 22 kPa na condição natural e 3,4 kPa na inundada, e ângulo de atrito interno de 31° .

Palavras-chave: Formação Barreiras. SPT. Parâmetros geotécnicos.

ABSTRACT

João Pessoa has 67% of its territory covered by unconsolidated sediments of Barreiras Formation, according to Barbosa (2015), and this representativity gives them great relevance in the geological and geotechnical scenarios of the city, since its growth, in recent years, has been directed to this geological unit, besides being associated with frequent mass movements. This paper aimed at characterizing the Barreiras Formation of João Pessoa in typical geotechnical profiles based on SPT test results and the determination of geotechnical parameters of a slope located on this unit. Theoretical aspects on Barreiras Formation, SPTs and geotechnical parameters were presented. This paperwork methodology consisted of collecting maps and charts for the characterization of João Pessoa and Castelo Branco neighbourhood; of obtaining reports of probing of simple recognition carried out in Barreiras Formation to classify the typical profiles of the city; of conducting SPT at the top of the slope for the prospection of its geotechnical profile; and collecting changed and unchanged soil samples for the definition of geotechnical parameters of the analyzed slope through laboratory tests of physical characterization, hydraulic conductivity, edometric test and direct shear. A slope of the Santa Clara community in the Castelo Branco neighbourhood presented a very high risk of landslide, as mapped by Soares et al (2015), and was therefore chosen for a detailed study. The Barreiras Formation of João Pessoa was classified into nine typical profiles based on the soil composition of each profile and on the behaviour of the penetration graph of the SPTs. The Standard Penetration Test on the slope showed a profile with intercalations of clayey and sandy soils and penetration graph growing and decreasing in a N_{spt} range from 7 to 30 along the depth, being classified as type PT3A. Based on the USCS, the slope base soil was classified in silt sand (SM and SW-SM) and the top soil in silt-clay sand (SM-SC). The permeability was around 10^{-5} m/s for the slope base soils and 10^{-7} m/s for the top ones, and the average initial void indices of these soils were, respectively, 0.63 and 0.84, falling within the range of values proposed by Coutinho and Severo (2009) for soils of the Barreiras Formation. At the base of the slope, the soil presented higher collapse potential (CP) than at the top, with respective maximum values of 14.62% and 3.47%. At the base of the slope, the soils were shown to have an internal friction angle of 36° , cohesion of 4.3 kPa and 8.6 kPa in the condition of natural moisture and zero in the flooded condition, while at the top showed cohesion of 22 kPa in the natural condition and 3.4 kPa in the flooded, and internal friction angle of 31° .

Keywords: Barreiras Formation. SPT. Geotechnical parameters.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - (a) ensaio SPT durante a cravação do amostrador padrão, e (b) avanço da perfuração por meio de trépano de lavagem.	38
Figura 2 - Localização do Município de João Pessoa.....	41
Figura 3 - Mapa geológico de João Pessoa.	44
Figura 4 - Solos de João Pessoa.....	46
Figura 5 - Variação de pluviosidade ao longo do ano em João Pessoa.	47
Figura 6 - Bacias Hidrográficas de João Pessoa.....	50
Figura 7 - Mapa de Suscetibilidade de João Pessoa.	54
Figura 8 - Localização do bairro Castelo Branco e da encosta estudada.....	57
Figura 9 - Setorização da Comunidade Santa Clara.	58
Figura 10 - Geomorfologia do bairro do Castelo Branco - João Pessoa - PB.....	60
Figura 11 - Curvas de nível do bairro do Castelo Branco em João Pessoa - PB.....	61
Figura 12 - Imagem aérea da Comunidade Santa Clara.....	61
Figura 13 - Comunidade vista da BR-230.....	62
Figura 14 - Topo da Encosta (rua calçada).	62
Figura 15 - Visão Geral da Topografia da Comunidade.....	62
Figura 16 - Sistema de Drenagem da Comunidade (a Céu Aberto) com Recebimento de Águas Servidas.	63
Figura 17 - Vista Frontal da Encosta Estudada.	63
Figura 18 - Metodologia da pesquisa.....	64
Figura 19 - Locação dos boletins de sondagens sobre o mapa geomorfológico de João Pessoa-PB.....	69
Figura 20 - Distribuição dos Boletins de Sondagem na Área de Estudo.	70
Figura 21 - Localização da sondagem S1 no topo da encosta.....	71
Figura 22 - Escavação do PI1.....	72
Figura 23 - PI1.....	73
Figura 24 - Escavação do PI2.....	73
Figura 25 - Locação das Amostras Indeformadas no Perfil da Encosta.	74
Figura 26 - BL1 Envolto por Papel Alumínio.....	74
Figura 27 - Aplicação de Talagarça e Parafina sobre BL1.	75
Figura 28 - Locação das escavações abandonadas durante a coleta de amostras.....	76
Figura 29 - Ensaio de sedimentação.	77

Figura 30 - Determinação de limites de consistência.	78
Figura 31 - Prensas edométricas do tipo Bishop.	78
Figura 32 - Moldagem dos corpos de prova.	79
Figura 33 - Prensa edométrica carregada.	80
Figura 34 - Tri-flex II.	81
Figura 35 - Corpo de Prova Moldado.	82
Figura 36 - Montagem da Célula de Ensaio.	82
Figura 37 - Encamisamento do Corpo de Prova.	83
Figura 38 - Fixação da Membrana com Ligas de Borracha.	83
Figura 39 - Conexão das Mangueiras de Drenagem ao "Top Cap".	84
Figura 40 - Célula de Ensaio Finalizada.	84
Figura 41 - Prensas de Cisalhamento Ronald Top S/A.	86
Figura 42 - Moldagem dos Corpos de Prova Para Ensaio de Cisalhamento Direto.	87
Figura 43 - Esquema de classificação dos perfis de sondagem.	90
Figura 44 - Grupo de perfis PT1A e perfil geotécnico representativo (Ponto 53).	92
Figura 45 - Grupo de perfis PT1B e perfil geotécnico representativo (Ponto 4).	93
Figura 46 - Grupo de perfis PT1C e perfil geotécnico representativo (Ponto 35).	94
Figura 47 - Grupo de perfis PT1D e perfil geotécnico representativo (Ponto 2).	95
Figura 48 - Grupo de perfis PT2A e perfil geotécnico representativo (Ponto 22).	96
Figura 49 - Grupo de perfis PT2B e perfil geotécnico representativo (Ponto 7).	97
Figura 50 - Grupo de perfis PT3A e perfil geotécnico representativo (Ponto 19).	98
Figura 51 - Grupo de perfis PT3B e perfil geotécnico representativo (Ponto 26).	99
Figura 52 - Grupo de perfis PT3C e perfil geotécnico representativo (Ponto 32).	100
Figura 53 – Distribuição percentual dos pontos de sondagem SPT entre os grupos de perfis típicos.	101
Figura 54 - Distribuição dos grupos de perfis típicos nos bairros João Pessoa - PB.	102
Figura 55 - Distribuição dos grupos de perfis típicos na geomorfologia de João Pessoa - PB./	103
Figura 56 - Distribuição dos pontos de sondagens nos grupos de perfis típicos.	104
Figura 57 – Distribuição percentual dos pontos de sondagem SPT com base na união de grupos de perfis típicos.	105
Figura 58 - Distribuição dos boletins de sondagem em João Pessoa com base na união de grupos.	105

Figura 59 - Distribuição dos boletins de sondagem na Formação Barreiras de João Pessoa com base na união de grupos.	106
Figura 60 - Distribuição dos pontos de sondagem com presença de nível d'água na Formação Barreiras de João Pessoa.	108
Figura 61 – Escala de profundidade dos níveis d’água nos perfis estudados e classificação dos pontos de sondagem.	109
Figura 62 - Ocupação Desordenada, Lançamento de Águas Servidas no Solo e Casas Sobre Taludes Quase Verticais na Comunidade Santa Clara.	110
Figura 63 – Acúmulo de Lixo e Remoção da Vegetação Primitiva do Talude.	110
Figura 64 - Sinais de Recente Movimentação de Massa.	111
Figura 65 - Descrição do Nspt e das Camadas do Solo do Topo da Encosta da Comunidade Santa Clara.	112
Figura 66 - Variação da Umidade ao Longo da Profundidade no Furo S1.	114
Figura 67 – Curva e Composição Granulométrica sem Defloculante da Base da Encosta, amostra PI1A1.	115
Figura 68 - Curva Granulométrica com e sem Defloculante e Composição Granulométrica sem defloculante da Base da Encosta, amostra PI1A1.	115
Figura 69 - Projeção do gráfico “teor de umidade x número de golpes” para a amostra PI1A1.	116
Figura 70 - Curva e Composição Granulométrica sem Defloculante da Base da Encosta, amostra PI1A2.	117
Figura 71 - Curva Granulométrica com e sem Defloculante e Composição Granulométrica sem defloculante da Base da Encosta, amostra PI1A2.	117
Figura 72 - Projeção do gráfico “teor de umidade x número de golpes” para a amostra PI1A1.	118
Figura 73 - Curva e Composição Granulométrica sem Defloculante do Topo da Encosta, amostra PI2A1.	119
Figura 74 - Curva Granulométrica com e sem Defloculante e Composição Granulométrica sem defloculante do Topo da Encosta, amostra PI2A1.	119
Figura 75 - Projeção do gráfico “teor de umidade x número de golpes” para a amostra PI1A1.	120
Figura 76 - Perfil estratigráfico aproximado da encosta da comunidade Santa Clara de João Pessoa – PB.	123

Figura 77 - Ensaio edométrico duplo: a) Variação do índice de vazios x tensão vertical de consolidação; e b) Deformação volumétrica específica x tensão vertical de consolidação das amostras E2N e E2I (base da encosta).	126
Figura 78 - Ensaio edométrico duplo: a) Variação do índice de vazios x tensão vertical de consolidação; e b) Deformação volumétrica específica x tensão vertical de consolidação das amostras E3N e E3I (base da encosta).	127
Figura 79 - Ensaio edométrico duplo: a) Variação do índice de vazios x tensão vertical de consolidação; e b) Deformação volumétrica específica x tensão vertical de consolidação das amostras E4N e E4I (topo da encosta).	127
Figura 80 - Ensaio edométrico duplo: Comparação entre a variação do índice de vazios e a deformação volumétrica específica em função da tensão vertical de consolidação das amostras E2N, E3N e E4N.	128
Figura 81 - Variação do potencial de colapso com a tensão vertical de consolidação.	131
Figura 82 - Variação do coeficiente de adensamento vertical (C_v) com a tensão vertical de consolidação das amostras na condição natural.	134
Figura 83 - Variação do coeficiente de adensamento vertical (C_v) com a tensão vertical de consolidação das amostras na condição inundada.	135
Figura 84 – Bloco 2 na condição natural de umidade: a) variação da tensão cisalhante com a deformação horizontal específica, e b) variação da deformação vertical específica com deformação horizontal específica.	137
Figura 85 - Bloco 2 na condição inundada de umidade: a) variação da tensão cisalhante com a deformação horizontal específica, e b) variação da deformação vertical específica com deformação horizontal específica.	137
Figura 86 - Bloco 3 na condição natural de umidade: a) variação da tensão cisalhante com a deformação horizontal específica, e b) variação da deformação vertical específica com deformação horizontal específica.	138
Figura 87 - Bloco 3 na condição inundada de umidade: a) variação da tensão cisalhante com a deformação horizontal específica, e b) variação da deformação vertical específica com deformação horizontal específica.	138
Figura 88 - Bloco 4 na condição natural de umidade: a) variação da tensão cisalhante com a deformação horizontal específica, e b) variação da deformação vertical específica com deformação horizontal específica.	139

Figura 89 - Bloco 4 na condição inundada de umidade: a) variação da tensão cisalhante com a deformação horizontal específica, e b) variação da deformação vertical específica com deformação horizontal específica.	139
Figura 90 - Envoltória de pico das amostras do BL 2 no ensaio de cisalhamento direto convencional.	141
Figura 91 - Envoltória de pico das amostras do BL 3 no ensaio de cisalhamento direto convencional.	141
Figura 92 - Envoltória de pico das amostras do BL 4 no ensaio de cisalhamento direto convencional.	142
Figura 93 - Curvas tensão-deformação dos ensaios de cisalhamento direto com reversões múltiplas - Amostra do BL 2 (base da encosta).	145
Figura 94 - Curvas tensão-deformação dos ensaios de cisalhamento direto com reversões múltiplas - Amostra do BL 3 (base da encosta).	145
Figura 95 - Curvas tensão-deformação dos ensaios de cisalhamento direto com reversões múltiplas - Amostra do BL 4 (base da encosta).	146
Figura 96 - Envoltória de pico residual das amostras do BL 2 no ensaio de cisalhamento direto com reversões múltiplas.	147
Figura 97 - Envoltória de pico residual das amostras do BL 3 no ensaio de cisalhamento direto com reversões múltiplas.	148
Figura 98 - Envoltória de pico residual das amostras do BL 4 no ensaio de cisalhamento direto com reversões múltiplas.	148
Figura 99 - Resistência residual de colúvios, solos residuais e solos da Formação Barreiras (Skempton, 1985 modificada de Coutinho, 2009).	150

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais fatores de causa de movimentos de massa em encostas da Formação Barreiras - RMR.	26
Tabela 2 - Denudações de relevo de João Pessoa - PB.....	27
Tabela 3 - Resumo da situação estratigráfica das unidades geológicas da área de estudo.	42
Tabela 4 - Caracterização das unidades de sedimentos inconsolidados recentes.....	43
Tabela 5 - Unidades geológicas em km ² e % do município de João Pessoa.....	43
Tabela 6 - Potencial Erosivo da Superfície de João Pessoa.	48
Tabela 7 - Tipos de Fundações em João Pessoa.....	49
Tabela 8 - Áreas degradadas por ocupação irregular - encostas e margens de rios.....	55
Tabela 9 - Designação de Amostras Para Ensaio Edométrico.	79
Tabela 10 - Dimensões dos Corpos de Prova.....	81
Tabela 11 - Pressões dos Ensaios de Permeabilidade.....	85
Tabela 12 - Perfis Típicos de Sondagens SPT.....	91
Tabela 13 - Composição Granulométrica e Limites de Atterberg, amostra PI1A1.....	116
Tabela 14 - Dados e cálculos do ensaio do LL da amostra PI1A1.....	116
Tabela 15 - Composição Granulométrica e Limites de Atterberg, amostra PI1A2.....	118
Tabela 16 - Dados e cálculos do ensaio do LL da amostra PI1A2.....	118
Tabela 17 - Composição Granulométrica e Limites de Atterberg, amostra PI2A1.....	120
Tabela 18 - Dados e cálculos do ensaio do LL da amostra PI2A1.....	120
Tabela 19 - Atividade dos Solos Ensaçados.	121
Tabela 20 - Caracterização de solos da Formação Barreiras de Pernambuco e Paraíba (adaptado de Silva, 2007).....	122
Tabela 21 - Dados Para a Determinação dos Coeficientes de Permeabilidade das Amostras.	123
Tabela 22 - Coeficientes de Permeabilidade (k) dos Solos Ensaçados.	124
Tabela 23 - Condições iniciais e finais das amostras utilizadas nos ensaios endométricos duplos.	125
Tabela 24 - Índice de vazios de alguns solos da Formação Barreiras (modificada de Coutinho e Severo, 2009).	125
Tabela 25 - Tensão de escoamento e parâmetros de compressibilidade obtidos nos ensaios edométricos duplos.	129

Tabela 26 - Tensões de pré-consolidação e classificação de Reginatto e Ferrero (1973) obtidos dos ensaios edométricos duplos.....	130
Tabela 27 - Potencial de colapso no topo e na base da encosta pelo ensaio edométrico duplo.	130
Tabela 28 - Módulos edométricos dos solos na umidade natural e inundada.	133
Tabela 29 - Variação de t_{90} nas amostras de solo estudadas em função da tensão de consolidação.	133
Tabela 30 - Condições iniciais e de ruptura dos corpos de prova dos ensaios de cisalhamento direto.	136
Tabela 31 - Parâmetros de resistência dos solos obtidos a partir do ensaio de cisalhamento direto.	142
Tabela 32 - Parâmetros de resistência de pico de solos provenientes da Formação Barreiras de Pernambuco e da Paraíba (Modificado de Coutinho e Severo, 2009).	144
Tabela 33 - Condições iniciais e residuais dos corpos de prova referentes aos ensaios de cisalhamento direto com reversões múltiplas.....	147
Tabela 34 - Parâmetros de resistência dos solos obtidos a partir do ensaio de cisalhamento direto com reversões múltiplas.	148

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- $\Delta\varepsilon_v$ Variação de Deformação Volumétrica Específica
- $\Delta\varepsilon_v$ Variação de Deformação Vertical
- $\Delta\sigma$ Variação de Tensão Vertical de Consolidação
- ABNT** Associação Brasileira de Normas Técnicas
- A_{cp} Área da Base do Corpo de Prova
- AESA** Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba
- c Intercepto de Coesão
- C** Coeficiente de Colapsibilidade
- C_c Índice de Compressão
- COMDEC** Coordenadoria Municipal de Defesa Civil
- CPRM** Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
- CR** Compacidade Relativa
- C_s Índice de Expansão
- C_v Coeficiente de Adensamento
- DNIT** Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
- DP** Diferença de Potencial
- DR** Densidade Relativa
- e Índice de Vazios
- E** Módulo de Elasticidade
- e_{max} Índice de Vazios Máximo
- e_{min} Índice de Vazios Mínimo
- e_{nat} Índice de Vazios Natural
- E_{OED} Módulo Edométrico
- e_0 Índice de Vazios Inicial
- e_f Índice de Vazios Final
- ha** Hectare
- IBGE** Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- IP** Índice de Plasticidade
- k** Coeficiente de Permeabilidade Saturada
- kg** Quilograma
- km** Quilômetro
- km²** Quilômetros Quadrados

kN Quilonewton
kPa Quilopascal
L Altura do Corpo de Prova
LAPAV Laboratório de Geotecnia e Pavimentação
LL Limite de Liquidez
LP Limite de Plasticidade
m Metro
m_{bs} Massa Bruta Seca
m_{bu} Massa Bruta Úmida
m_{bs} Massa Bruta Seca
mm Milímetro
MPa Megapascal
N Newton
NBR Norma Brasileira
NL Não Líquido
NP Não Plástico
NSPT Índice de Resistência à Penetração do Solo
°C Graus Celsius
PB Paraíba
P_s Peso dos Sólidos
P_t Peso Total
PVC Policloreto de Vinila
P_w Peso da Água
RMR Região Metropolitana de Recife
S Sensitividade da Argila
S₀ Saturação Inicial
SEMAM Secretaria do Meio Ambiente de João Pessoa
SEPLAN Secretaria de Planejamento de João Pessoa
S_f Saturação Final
SIG Sistema de Informação Geográfica
SPT Standard Penetration Test
SUCS Sistema Unificado de Classificação dos Solos
T Tempo de Percolação
UFPE Universidade Federal de Pernambuco

V_p Volume Percolado
 V_s Volume de Partículas Sólidas
 V_t Volume Total
 V_v Volume de Vazios
 w Umidade
 W_0 Umidade Inicial
 W_f Umidade Final
 γ_{sub} Peso Específico Submerso
 γ_d Peso Específico Aparente Seco
 γ_n Peso Específico Natural
 γ_s Peso Específico das Partículas Sólidas
 γ_{sat} Peso Específico Aparente Saturado
 Δp Variação de Pressão
 $\epsilon_{longitudinal}$ Deformação Longitudinal
 $\epsilon_{transversal}$ Deformação Transversal
 ϵ_{vinun} Deformação Vertical Inundado
 ϵ_{vnat} Deformação Vertical Natural
 ϵ_z Deformação
 ν Coeficiente de Poisson
 σ_{v0} Tensão Vertical Devido ao Peso Próprio do Solo “in situ”
 σ_{vpn} Tensão de Escoamento do Solo na Umidade Natural
 σ_{vps} Tensão de Escoamento do Solo Inundado
 σ_z Tensão Normal
 ϕ Ângulo de Atrito
 e_h Deformação Horizontal Específica
 f_r Ângulo de Atrito Residual
 t_{rup} Tensão Cisalhante de Ruptura
 t Tensão Cisalhante

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	Justificativa	21
1.2	Objetivos	22
1.2.1	Objetivo Geral.....	22
1.2.2	Objetivos Específicos.....	22
1.3	Apresentação dos capítulos da dissertação	23
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	25
2.1	Formação Barreiras	25
2.2	Parâmetros de ensaios	28
2.2.1	Parâmetros Índices	29
2.2.2	Parâmetros de Deformabilidade.....	32
2.2.3	Parâmetros de Resistência	33
2.3	Ensaio SPT	34
3	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EM ESTUDO	41
3.1	João Pessoa	41
3.1.1	Localização	41
3.1.2	Caracterização Geológico-geomorfológica	42
3.1.3	Pedologia	45
3.1.4	Clima e Aspectos Morfoclimáticos.....	46
3.1.5	Aspectos Geotécnicos.....	48
3.1.6	Recursos Hídricos	49
3.1.7	Vegetação	52
3.1.8	Urbanização	52
3.1.9	Áreas de Risco	53
3.2	Bairro Castelo Branco	56
3.2.1	Localização	56
3.2.2	Características Gerais.....	57
3.2.3	Características Fisiográficas	59
3.2.4	Registros Fotográficos.....	61
4	METODOLOGIA E EQUIPAMENTOS	63
4.1	Estrutura da pesquisa	64
4.2	Planejamento e fundamentos teóricos	65
4.3	Coleta e tratamento de dados	66
4.3.1	Mapas e Cartas.....	66
4.3.2	Captação, Seleção e Organização de Boletins de Sondagem em Formações Barreiras 66	
4.3.3	Estruturação e Alimentação das Planilhas do Banco de Dados das Sondagens	67
4.3.4	Exportação do Banco de Dados Para o Software de Geoprocessamento;.....	70
4.3.5	Investigação Geotécnica de Campo	70
4.3.5.1	<i>Sondagem de Simples Reconhecimento</i>	71
4.3.5.2	<i>Retirada de Amostras</i>	72
4.3.6	Investigação Geotécnica de Laboratório	76
4.3.6.1	<i>Caracterização Física do Solo</i>	77
4.3.6.2	<i>Ensaio Edométrico</i>	78
4.3.6.3	<i>Permeabilidade – TRI-FLEX II</i>	81
4.3.6.4	<i>Cisalhamento Direto</i>	86
4.3.7	Estruturação das Planilhas dos Ensaios de Campo e Laboratório e Entrada dos Dados 88	

5	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	89
5.1	Boletins de sondagem SPT	89
5.1.1	Exame e Agrupamento dos Boletins de Sondagem	89
5.1.2	Análise dos Resultados.....	101
5.2	Resultados dos ensaios de campo e laboratório.....	109
5.2.1	Visitas Técnicas	110
5.2.2	Sondagem de Simples Reconhecimento.....	111
5.2.3	Análise Granulométrica, Limites de Consistência e Atividade do Solo	114
5.2.4	Perfil Estratigráfico da Encosta da Comunidade Santa Clara	122
5.2.5	Permeabilidade.....	123
5.2.6	Ensaio Edométrico	124
5.2.7	Resistência ao Cisalhamento	135
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	151
6.1	Conclusões	151
6.2	Recomendações para futuras pesquisas	154
	REFERÊNCIAS	155
	Anexo A - perfil 53 – representativo PT1A	159
	Anexo B - perfil 4 – representativo PT1B.....	160
	Anexo C - perfil 35 – representativo PT1C	160
	Anexo D - perfil 2 – representativo PT1D	162
	Anexo E - perfil 22 – representativo PT1B.....	163
	Anexo F - perfil 7 – representativo PT2B.....	164
	Anexo G - perfil 19 – representativo PT3A	165
	Anexo H - perfil 26 – representativo PT3B	166
	Anexo I - perfil 32 – representativo PT3C.....	168

1 INTRODUÇÃO

Depósitos sedimentares da Formação Barreiras constituem a unidade geológica de maior ocorrência ao longo da costa brasileira, aflorando, em alguns pontos, do Estado do Amapá ao Rio de Janeiro.

João Pessoa, capital do estado da Paraíba, é uma cidade litorânea do nordeste brasileiro. Apresentando uma extensão territorial aproximada de 200 km², ela é limitada ao norte com o município de Cabedelo, ao sul com o município do Conde, a oeste com os municípios de Bayeux e Santa Rita, e a leste com o Oceano Atlântico.

Sedimentos inconsolidados da Formação Barreiras recobrem 67% do território deste município, segundo Barbosa (2015), representatividade que lhes confere grande relevância nos cenários geológico e geotécnico da cidade, tornando-os frequentes matérias de estudo no meio acadêmico.

Conhecer os parâmetros geotécnicos e as características dos solos locais, especialmente os relacionados à deformabilidade e resistência destes, possibilita a otimização dos mais diversos projetos geotécnicos (pavimentação, fundação de edifícios e estruturas de contenção, por exemplo).

Sendo a sondagem à percussão com Standard Penetration Test (SPT) o recurso experimental mais utilizado no Brasil para sondagens geotécnicas, suas potencialidades têm sido exploradas no conhecimento dos solos do país, aprimorando os processos de concepção e projeto geotécnico, e influenciando diretamente nos padrões de segurança, qualidade e economia deste.

Atualmente, ferramentas como o SIG têm sido utilizadas para a locação de sondagens SPT em mapas, gerando bancos de dados que facilitam a análise da distribuição espacial destas, possibilitando, por exemplo, a melhor representação dos terrenos (em superfície e em profundidade) e visualização dos relevos, e o estabelecimento de correlações entre os tipos de solos e geologias nos quais as sondagens foram realizadas e as características indicadas nos boletins de sondagem.

Uma base de dados em ambiente SIG com resultados de sondagens SPT se configura como um elemento de grande valia na tomada de decisão, servindo como instrumento em atividades do meio acadêmico, facilitando o planejamento e a gestão urbana de municípios, e direcionando o planejamento, a elaboração e a execução dos projetos geotécnicos – sem eliminar, no entanto, a necessidade de execução de sondagens e/ou outros estudos de subsolo específicos para cada projeto.

Diante do exposto, este trabalho propõe, a partir da criação de um banco de dados das informações obtidas em sondagens SPT, em ambiente SIG, em vários pontos da Formação Barreiras da cidade de João Pessoa, o agrupamento de perfis de sondagem, com características semelhantes, para a definição de “perfis típicos” que caracterizem estas formações, bem como a apresentação da distribuição espacial desses perfis. É proposto, ainda, um estudo de detalhe em uma encosta com um grau de risco de deslizamento muito alto, localizada sobre essa unidade geológica, a partir da realização de sondagem SPT no local e ensaios de laboratório com amostras de solo deformadas e indeformadas, apresentando, finalmente, parâmetros geotécnicos que colaborem com o conhecimento do comportamento da encosta, e direcionando a atuação do poder público na área.

1.1 Justificativa

A caracterização da Formação Barreiras, em João Pessoa, neste trabalho, é motivada pela necessidade de conhecimento do comportamento dessas formações para a melhor administração de duas situações: frequentes movimentos de massa em áreas de risco com ocupação irregular situadas sobre esta unidade geológica e a intensa e atual expansão urbana direcionada a ela.

Assim como a Paraíba, estados como Pernambuco, Alagoas, Bahia, Rio de Janeiro, Espírito Santo e Amapá registram, frequentemente, movimentos de massa com grandes prejuízos humanos e materiais. Em João Pessoa, segundo Furrier e Vital (2011), a ocupação de áreas impróprias, como encostas do tipo tabuleiro da formação Barreiras, foi intensificada a partir da década de 1960, no apogeu da expansão urbana, que aconteceu de forma bastante acelerada, na maior parte das capitais brasileiras, sem uma política adequada de planejamento urbano, trazendo, segundo Bandeira et al. (2009), problemas urbanos e socioambientais com o surgimento de diversos bairros com infraestrutura deficiente, ocupação de áreas de risco e alteração nos sistemas naturais. Esta falta de planejamento e critério técnico na ocupação de encostas e de outras áreas, como planícies de inundação dos cursos d’água, segundo Brasil (2013a), tem sido o principal causador de perdas humanas e materiais em todo o Brasil.

Sabendo que, em João Pessoa, nas áreas onde ocorrem os movimentos de massa há a predominância geológica dos sedimentos da Formação Barreiras, enxerga-se a necessidade de estudá-la, uma vez que, segundo Bandeira et al. (2009), o avanço do conhecimento geológico-geotécnico dos solos das encostas é necessário ao entendimento dos mecanismos e processos atuantes nos movimentos de massa, e, conseqüentemente, ao gerenciamento das áreas de risco,

norteando a elaboração de planos preventivos e direcionando o investimento em tecnologias específicas.

A encosta estudada localiza-se no bairro Castelo Branco, e foi escolhida por estar inserida, segundo Soares et al (2015), em um setor de risco muito alto, e apresentar movimentos de massa frequentes, expondo a população local a uma condição permanente de insegurança e medo.

Sobre o atual crescimento em direção à Formação Barreiras, tem-se, nos últimos anos, observado a expansão intensiva do bairro do Altiplano, com a construção de uma obra suntuosa arquitetada por Oscar Niemeyer, a Estação Cabo Branco, e de habitações luxuosas (casas em condomínios horizontais e apartamentos em condomínios verticais de grande porte, com o envolvimento de grandes escavações e fundações profundas) atraídas pela excelente qualidade de vida, prometida pelo setor imobiliário, devida à bela paisagem litorânea proporcionada pela topografia local e à vegetação ainda mantida em vários pontos do bairro.

Além do Altiplano, vários outros bairros da cidade, com expansão menos acentuada, repousam sobre a Formação Barreiras, são eles: Mangabeira, Jardim Cidade Universitária, Bancários, Água Fria, Cuiá, Ernesto Geisel, Valentina, Portal do Sol, Barra de Gramame, Costa do Sol, Distrito Industrial, Funcionários, Costa e Silva, Ernani Sátiro, Torre, Estados, Mandacaru, Treze de Maio, Tambiá, Jaguaribe, Cruz das Armas, Mussuré, Mumbaba, Indústrias, Brisamar e João Agripino.

Assim, reconhecendo a expressividade, em termos de área, da cobertura dos sedimentos da Formação Barreiras, entende-se a importância de sua caracterização para a indústria da construção civil de João Pessoa, principalmente no que diz respeito ao aprimoramento das práticas de fundação e de contenção em escavação.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Caracterizar a Formação Barreiras de João Pessoa em perfis geotécnicos típicos, através de dados obtidos em sondagens SPT, distribuindo-os espacialmente, e estudar parâmetros geotécnicos de uma encosta localizada em uma área de risco muito alto sobre essas formações.

1.2.2 Objetivos Específicos

Entre os objetivos específicos, destacam-se:

- Agrupar e analisar boletins de sondagens SPT da Formação Barreiras de João Pessoa, distribuindo espacialmente grupos de perfis geotécnicos típicos sobre o território de João Pessoa – PB;
- Contribuir para o conhecimento e previsão do comportamento geotécnico da Formação Barreiras em João Pessoa;
- Apresentar informações que subsidiem estudos preliminares e de viabilidade de projetos da construção civil;
- Realizar sondagem e ensaios de laboratório para caracterizar geotecnicamente a encosta em estudo;
- Divulgar dados e parâmetros que contribuam para a elaboração de projetos de contenção para a encosta estudada, e contribuir na ação do poder público nesta área.

1.3 Apresentação dos capítulos da dissertação

Essa dissertação está subdividida em capítulos, da seguinte forma:

O Capítulo 1 apresenta uma breve introdução para a contextualização do trabalho, e expõe a justificativa de escolha do tema de estudo, bem como os objetivos gerais e específicos a serem alcançados.

No Capítulo 2 apresenta-se uma fundamentação teórica sobre Formação Barreiras, destacando aspectos gerais de formação, distribuição e comportamento; sobre ensaios SPT, com informações sobre utilização, normatização e método de ensaio; e sobre os parâmetros dos solos, utilizados nas caracterizações destes.

O Capítulo 3 apresenta as características gerais da área de estudo, como localização, geologia, geomorfologia, pedologia, clima, geotecnia, hidrografia, vegetação e ocupação, apontando, além de informações sobre João Pessoa, características mais específicas do bairro do Castelo Branco, onde está localizada a encosta estudada em detalhe.

No Capítulo 4 estão descritos os materiais, equipamentos, métodos e normatizações utilizados durante a campanha de investigação geotécnica de campo e laboratório desta pesquisa.

O Capítulo 5 apresenta e comenta a caracterização dos perfis típicos da Formação Barreiras de João Pessoa com base em sondagens SPT, e apresenta os resultados e análises dos ensaios de laboratório e da sondagem SPT realizados na encosta estudada em detalhe.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões obtidas no estudo realizado e as recomendações para próximas pesquisas a serem realizadas na Formação Barreiras de João Pessoa – PB. Por fim são apresentadas as referências bibliográficas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta a base teórica desta dissertação, com informações sobre a Formação Barreiras – destacando seus aspectos gerais de formação, distribuição e comportamento –, sobre os parâmetros dos solos determináveis através de ensaios de campo e laboratório – e utilizados nas caracterizações destes –, e sobre os ensaios SPT, com foco na utilização, na normatização, no método de ensaio, nas limitações e nas correlações possíveis a partir destes ensaios.

2.1 Formação Barreiras

A Formação Barreiras é constituída por sedimentos clásticos fluviais mal consolidados, de procedência continental, pobres em conteúdo fossilífero, possuindo, segundo Coutinho e Severo (2009), tonalidades com coloração viva e variada (vermelhas, amarelas e até brancas – dependendo da intensidade da oxidação do ferro), ocorrendo, segundo Furrier (2007), quase ininterruptamente, desde o Amapá até o norte do Estado do Rio de Janeiro, aflorando, segundo Coutinho e Severo (2009) nas falésias erodidas ao longo das praias e nas vertentes íngremes dos vales, tendo, segundo o mesmo autor, litologicamente, as areias quartzosas, as argilas e os siltes como sedimentos.

Esta unidade teve sua deposição associada aos eventos cenozóicos de natureza climática e/ou tectônica, que permitiram, durante o final do Terciário (Plioceno), há cerca de 2 milhões de anos, o extenso recobrimento das superfícies expostas do embasamento, colmatando um relevo bastante movimentado (ALHEIROS, 1988 apud FURRIER, 2007).

Segundo Alheiros et al. (1988), apud Furrier (2007), a deposição dos sedimentos da Formação Barreiras se deu através de sistemas fluviais entrelaçados desenvolvidos sobre leques aluviais, representando a evolução de um sistema fluvial desenvolvido sob fortes gradientes e clima predominantemente árido e sujeito a variações.

A fácies de sistemas fluviais entrelaçados apresenta depósitos de granulometria variada com cascalhos e areias grossas a finas, de coloração creme amarelado, com intercalações de microclastos de argila siltica, indicativo de ambientes de sedimentação calmo como, por exemplo, de planície aluvial. A fácies de leques é constituída por conglomerados polimíticos de coloração creme-avermelhada, com seixos e grânulos subangulosos de quartzo e blocos de argila retrabalhada, em corpos tabulares e lenticulares de até um metro de espessura, intercalados com camada siltico-argilosa menos espessa. (ALHEIROS, 1988 apud FURRIER, 2007)

Essa alternância argila/areia cria situações peculiares quanto à estabilidade das encostas: se o talude cortado tiver como camada de topo a argila, esta segurar o relevo, reduzindo a erosão da camada subjacente; quando a camada de topo é a areia,

a alta infiltração em superfície favorecerá a saturação, a erosão na crista e possíveis escorregamentos associados no talude. (COUTINHO E SEVERO, 2009)

As características litológicas e estruturais da Formação Barreiras tornam-na bem susceptíveis à erosão, segundo Fernandes e Amaral (1996). Os autores afirmam que o território estará protegido contra processos erosivos naturais quando recoberto pela Mata Atlântica, e que, quando da remoção da cobertura vegetal ou cortes sem as precauções necessárias, é favorecido o desenvolvimento de ravinas de erosão que ligeiramente evoluem para voçorocas, devido à associação de uma granulação predominantemente arenosa e inconsolidada com um clima de elevados índices de precipitação, característicos da Formação Barreiras.

Relacionados à estabilidade de encostas, estão os movimentos de massa. Na experiência da Região Metropolitana do Recife, segundo Coutinho e Severo (2009), os movimentos de massa na Formação Barreiras estão geralmente relacionados a ocupação antrópica desordenada, que também atua aumentando a probabilidade de ocorrência de processos erosivos. As principais causas de movimentos de massa nessa unidade geológica estão ilustradas na Tabela 1.

Tabela 1 - Principais fatores de causa de movimentos de massa em encostas da Formação Barreiras - RMR.

Antrópicos	Cortes na encosta
	Aumento de carga no topo
	Vazamento de tubulações
	Infiltração de águas servidas
	Retirada da vegetação superficial
	Colocação de grandes árvores
Naturais	Geologia da área (heterogeneidade, contraste de permeabilidade / resistência, contato de diferentes depósitos, etc.)
	Infiltração devido às chuvas

Fonte: Coutinho e Severo (2009).

Sobre a exploração de minerais na Formação Barreiras, Barreto et al (2002) apud Machado Filho et al. (2011) afirma que não há registro de que seja possível, pois as crostas lateríticas não apresentam suporte explorador, acontecendo, apenas, a extração de argila e caulim.

No Estado da Paraíba, a Formação Barreiras repousa, de forma discordante, de oeste para leste, sobre o embasamento cristalino e sobre as rochas sedimentares do Grupo Paraíba, dispostas na Bacia Sedimentar Marginal Pernambuco-Paraíba.

A unidade litoestratigráfica basal da Bacia Sedimentar Pernambuco-Paraíba é denominada de Formação Beberibe, [...] representada por um espesso pacote de arenitos com

granulação variável e com espessuras médias de 230 a 280 m, e máxima de 360 m (Leal e Sá, 1998 apud Furrier, Araújo e Meneses, 2006).

Superposta à Formação Beberibe, repousa de forma concordante a Formação Gramame. Essa unidade carbonática, de ambiente marinho raso, possui espessura média inferior a 55 m, dos quais mais de dois terços são representados por calcários argilosos cinzentos (Leal e Sá, 1998). Segundo Almeida (2000), a espessura máxima encontrada para essa formação é de 70 m. A Formação Maria Farinha representa a continuação da sequência calcária da Formação Gramame, sendo diferenciada apenas pelo seu conteúdo fossilífero, que é considerada de idade paleocênica-eocênica inferior (Mabesoone, 1994). Apresenta espessura máxima de 35 m, provavelmente erodida em parte pela exposição subaérea anterior à deposição dos sedimentos continentais da Formação Barreiras (Leal e Sá, 1998), que recobrem as unidades anteriores. (FURRIER, ARAÚJO E MENESES, 2006)

Na direção leste-oeste, segundo o mapa geológico do Estado da Paraíba (Brasil, 2002), a Formação Barreiras alcança extensões variáveis, entre 30 a 50 km, enquanto que sua espessura bastante variável, atingindo, segundo (LEAL E SÁ, 1998 apud FURRIER, 2007) espessuras máximas entre 70 e 80 m.

Os sedimentos da Formação Barreiras provêm basicamente dos produtos resultantes da ação do intemperismo sobre o embasamento cristalino, localizado mais para o interior do continente que, no Estado da Paraíba, seriam as rochas cristalinas do Planalto da Borborema. Gopinath, Costa e Júnior (1993), em análises sedimentológicas realizadas na Formação Barreiras, no Estado da Paraíba, constataram que as fontes dos sedimentos seriam granitos, gnaisses e xistos, que são litologias predominantes no Planalto da Borborema. (FURRIER, 2007)

Na cidade de João Pessoa, segundo Furrier (2007), é muito comum a precipitação e concentração de oxi-hidróxido de ferro e alumínio nos sedimentos da Formação Barreiras, frequentemente observados nas falésias, formando níveis de ferricretes duros em vários patamares e, principalmente, na base das mesmas.

No mapa geomorfológico de João Pessoa gerado por Barbosa (2015) a área correspondente à cobertura sedimentar de plataforma, composta pela Formação Barreiras, foi compartimentada, a partir dos padrões e tipos de formas de relevo, em três denudações, descritas na Tabela 2.

Tabela 2 - Denudações de relevo de João Pessoa - PB.

Dt 31
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dissecação tabular com entalhamento médio do vale de intensidade média (40 – 80 m); ▪ Dimensão interfluvial média muito grande (> 1500 m); ▪ Ocupa 73 km² e 35% da área do município; ▪ Possui as maiores altitudes do município; ▪ Apresenta tabuleiros mais amplos com uma rede hidrográfica menos densa;

<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bairros integrantes: Torre, Estados, Mandacaru, Treze de Maio, Tambiá, Jaguaribe, Cruz das Armas, Mussuré, Mumbaba e o bairro das Indústrias, Brisamar e João Agripino. ▪ Exploração: minerações de calcário e argila para a fabricação de cimento (legal e ilegal) e a extração de calcário para fundações na construção civil.
Dt 21
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dissecação em topos tabulares com entalhamento médio do vale fraco (20 – 40 m); ▪ Dimensão interfluvial média muito grande (> 1500 m); ▪ Ocupa 78 km² e 38% da área do município; ▪ Bairros integrantes: Mangabeira, Jardim Cidade Universitária, Bancários, Água Fria, Cuiá, Ernesto Geisel, Valentina, Portal do Sol, Barra do Gramame, Costa do Sol, Altiplano; ▪ Apresenta pontos de risco geológico por possuir rede hidrográfica mais densa, com vales de elevadas declividades.
Dc 31
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Disposição do relevo forma superfícies de topos convexos; ▪ Ocupa 12,7 km² e 6% da área do município; ▪ Bairros integrantes: Distrito Industrial, Funcionários, Costa e Silva e Ernani Sátiro.

Fonte: Adaptado de Barbosa (2015).

2.2 Parâmetros de ensaios

Ensaio de campo e de laboratório são fundamentais na investigação do subsolo, que objetiva a definição do perfil geotécnico do subsolo, com a identificação das camadas, espessuras e tipos de solo, da posição do nível d'água, e dos parâmetros mecânicos e hidráulicos dos solos do perfil.

O procedimento mais adequado é a utilização de um método de ensaio que possibilite uma perfilagem do subsolo e a estimativa dos parâmetros mecânicos de cada camada, identificando as camadas críticas para que ensaios mais específicos sejam realizados, conforme seja necessário, para a obtenção dos demais parâmetros de interesse.

A primeira etapa da investigação, no Brasil, é comumente, a realização de ensaios SPT, que determinarão o programa complementar de ensaios (de campo e/ou de laboratório), a partir das condições geotécnicas e estruturais do projeto.

Desta forma, solos de comportamento especial (colapsíveis, expansivos, em processo de adensamento), por exemplo, podem ter sua ocorrência prevista ainda em fase preliminar,

definindo os ensaios especiais necessários a caracterização de seu comportamento e sua influência nas fundações.

Os principais parâmetros obtidos através dos ensaios geotécnicos, são os parâmetros índices, de resistência e de deformabilidade.

2.2.1 Parâmetros Índices

a) Granulometria

Encontra-se, em um solo, partículas de diversos tamanhos, que nem sempre são de fácil identificação porque, por exemplo, grãos de areia podem estar envoltos por uma grande quantidade de partículas argilosas, apresentando o mesmo aspecto de uma aglomeração formada exclusivamente por essas partículas argilosas.

Para o reconhecimento do tamanho dos grãos de um solo, realiza-se a análise granulométrica, que consiste em duas fases: peneiramento (limitada pela abertura da malha da peneira de nº 200 – 0,075 mm) e sedimentação (baseada da Lei de Stokes, e utilizada quando há interesse no conhecimento da distribuição granulométrica da porção mais fina do solo).

Neste ensaio, é importante a separação de todas as partículas com um produto químico chamado defloculante, para que sejam determinados os diâmetros das partículas isoladas de solo e não dos flocos de solo.

Para diversas faixas de tamanhos de grãos, existem denominações específicas, na medida em que crescem os grãos: argila, silte, areia fina, areia média, areia grossa, pedregulho.

b) Índices de consistência

Na engenharia, a distribuição granulométrica do solo não é suficiente para a caracterização do seu comportamento, uma vez que a fração e a composição mineralógica de finos dos solos têm grande influência neste aspecto.

Dada a complexidade de estudo dos minerais-argilas, utilizam-se, para identificar a influência das partículas argilosas nos solos, análises diretas que se baseiam no comportamento do solo na presença de água, empregando os ensaios e índices propostos por Atterberg, adaptados e padronizados por Casagrande.

“Os limites de baseiam na constatação de que um solo argiloso ocorre com aspectos bem distintos, conforme o seu teor de umidade. Quando muito úmido, ele se comporta

como um líquido; quando perde parte de sua água, fica plástico; e quanto mais seco, torna-se quebradiço”. (PINTO, 2006)

Os teores de umidade correspondentes às mudanças de estado (líquido, plástico e quebradiço) são os limites de liquidez (LL) e de plasticidade (LP), sendo a diferença entre eles, o índice de plasticidade do solo (IP), que indica a faixa de valores em que o solo se apresenta plástico.

Define-se limite de liquidez como o teor de umidade do solo com o qual uma ranhura nele feita requer 25 golpes para se fechar, em uma concha, enquanto que o limite de plasticidade é definido como o menor teor de umidade com o qual se consegue moldar, rolando-se com a palma da mão, um cilindro com 3 mm de diâmetro.

c) Umidade

Segundo Pinto (2006) só parte do volume total de um solo é ocupado por partículas sólidas, que se acomodam formando uma estrutura. O volume restante é denominado, costumeiramente, de “vazios”, embora esteja ocupado por água ou ar.

Reconhecendo que o solo é constituído de três fases (partículas sólidas, água e ar), sua umidade pode ser determinada pela pesagem do solo no seu estado natural, procedendo sua secagem em estufa a 105°C até constância de peso, e sua posterior pesagem. Conhecendo o peso dos sólidos (solo seco) – P_s – e o peso da água (diferença entre os pesos do solo natural e seco) – P_w – a umidade (w) é calculada pela relação entre eles.

$$w = \frac{P_s}{P_w} \quad (\text{Equação 2.1})$$

d) Índices de vazios

O índice de vazios de um solo (e) consiste da relação entre o volume de vazios (V_v) e o volume das partículas sólidas (V_s). Não pode ser determinado diretamente, mas pode ser determinado a partir de outros índices.

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (\text{Equação 2.2})$$

e) Peso específico

Os pesos específicos são relações entre pesos e volumes.

O peso específico dos sólidos (ou dos grãos) – (γ_s) – é definido por Pinto (2006) pela relação entre o peso das partículas sólidas (P_s) e o seu volume (V_s), sendo determinado em laboratório para cada solo, colocando-se um peso seco conhecido do solo em um picnômetro e, completando-se com água, determina-se o peso total.

“O peso do picnômetro completado só com água, mais o peso do solo, menos o peso do picnômetro com solo e água, é o peso da água que foi substituída pelo solo. Deste peso calcula-se o volume de água que foi substituído pelo solo e que é o volume do solo. Com o peso e o volume, tem-se o peso específico.” (PINTO, 2006)

$$\gamma_s = \frac{P_s}{V_s} \quad (\text{Equação 2.3})$$

Pinto (2006) define peso específico natural – (γ_n) – como a relação entre o peso total do solo (P_t) e seu volume total (V_t), sendo determinado através da moldagem de um cilindro do solo com volume conhecido. O peso total dividido pelo volume é o peso específico natural. O autor afirma que este parâmetro também pode ser determinado a partir de corpos irregulares, determinando-se o volume por meio do peso imerso n'água.

$$\gamma_n = \frac{P_t}{V_t} \quad (\text{Equação 2.4})$$

Outros pesos específicos, como o aparente seco – (γ_d) –, o aparente saturado – (γ_{sat}) – e o submerso – (γ_{sub}) –, são determinados através de correlações com os já citados.

$$\gamma_d = \frac{\gamma_n}{1 + w} \quad (\text{Equação 2.5})$$

$$\gamma_{sat} = \frac{\gamma_s + e\gamma_w}{1 + e} \quad (\text{Equação 2.6})$$

$$e = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} - 1 \quad (\text{Equação 2.7})$$

$$\gamma_{sub} = \gamma_n - \gamma_w \quad (\text{Equação 2.8})$$

f) Densidade relativa ou Compacidade relativa

O índice de vazios pode expressar o estado em que se encontra uma areia, fornecendo, no entanto, pouca informação sobre seu comportamento, uma vez que, com o mesmo índice de vazios, uma areia pode estar compacta e outra fofa. É necessário, então, confrontar o índice de vazios natural com os índices de vazios máximo e mínimo em que a areia pode se encontrar.

Desta forma, Terzaghi sugeriu o índice de Compacidade Relativa (CR) ou Densidade Relativa (DR), a partir do qual as areias são classificadas em “muito fofas”, “fofas”, “de compacidade média”, “compactas” e “muito compactas”, na medida em que o índice aumenta.

$$DR = \frac{e_{max} - e_{nat}}{e_{max} - e_{min}} \quad (\text{Equação 2.9})$$

“Em geral, areias compactas apresentam maior resistência e menor deformabilidade. Estas características, entre as diversas areias, dependem também de outros fatores, como como a distribuição granulométrica e do formato dos grãos. Entretanto, a compacidade é um fator importante”. (PINTO, 2006).

g) Consistência e Sensitividade

Manuseando uma argila, é possível perceber certa consistência desse material, diferentemente das áreas, que são desmanchadas facilmente. Desta forma, o estado de uma argila é determinado pela resistência apresentada por ela.

A quantificação da consistência das argilas pode ser feita por meio de ensaio de compressão simples, que consiste na ruptura de um corpo de prova, geralmente cilíndrico, por compressão. Dividindo-se a carga que leva o corpo de prova à ruptura pela área deste, obtém-se a resistência à compressão simples deste solo, a partir da qual se classificam os solos, em termos de consistência, em: muito mole, mole, média, rija, muito rija, e dura.

A resistência das argilas depende, além do índice de vazios em que ela se encontra, do arranjo entre os grãos, uma vez que certas argilas, quando submetidas ao manuseio, ainda que sem variação do índice de vazios, têm sua resistência diminuída. Este fenômeno é denominado de “sensitividade da argila”.

A sensitividade da argila (S) foi denominada pela relação entre a resistência no estado natural e no estado amolgado.

$$S = \frac{\text{Resistência no estado indeformado}}{\text{Resistência no estado amolgado}} \quad (\text{Equação 2.10})$$

Com o aumento da sensibilidade, as argilas são classificadas em: “insensitiva”, “baixa sensitividade”, “média sensitividade”, “sensitiva” e “ultra-sensitiva”.

“A sensitividade das argilas é uma característica de grande importância, pois indica que, se a argila vier a sofrer uma ruptura, sua resistência após esta ocorrência é bem menor”. (PINTO,2006).

2.2.2 Parâmetros de Deformabilidade

“No âmbito da teoria da Elasticidade Linear, deformabilidade dos solos é definida pelos parâmetros básicos: o módulo de elasticidade (E) e o coeficiente de Poisson (ν). As deformações causadas no solo dependem de sua composição, índice de vazios,

histórico de tensões e maneira de aplicação da tensão” (LAMBE e WHITMAN, 1969).

O solo não tem comportamento elástico linear, o que significa que os valores de E e ν não são constantes e que parte das deformações é irreversível (plástica). Sendo, as análises não lineares-elastoplásticas, bastante complexas, simplifica-se o problema aproximando-se para trechos lineares na faixa de tensões em estudo, desde que as deformações sejam pequenas e que o carregamento seja monotônico.

a) Módulo de elasticidade

Também conhecido como módulo de Young, este parâmetro estabelece a relação entre a tensão normal e a deformação proveniente dessa tensão em sua direção.

$$E = \frac{\sigma_z}{\varepsilon_z} \quad (\text{Equação 2.11})$$

b) Coeficiente de Poisson

Este coeficiente mede a deformação transversal para a aplicação de uma carga longitudinal através da relação entre deformações ortogonais.

$$\nu = -\frac{\varepsilon_{transversal}}{\varepsilon_{longitudinal}} \quad (\text{Equação 2.12})$$

O sinal negativo da equação se deve à diferença de sinais entre as deformações transversais e longitudinais

Para as deformações iniciais, onde é aproximadamente válida a teoria da elasticidade, o coeficiente de Poisson varia com a deformação. Na areia, ele fica constante somente para grandes deformações (ruptura do solo), sendo um valor maior que 0,5; o que ocorre quando há expansão do material. O coeficiente de Poisson será menor que 0,5 somente durante os primeiros estágios de tensão, onde há a redução de volume do material.

2.2.3 Parâmetros de Resistência

A partir do critério de resistência de Mohr-Coulomb, a resistência dos solos é definida pelos parâmetros ângulo de atrito (φ) e intercepto de coesão (c). O atrito está vinculado à tensão normal aplicada ao solo.

a) Ângulo de atrito

A resistência do solo por atrito entre as partículas pode ser definida como a força tangencial necessária ao deslizamento de um plano em outro paralelo a este, variando em função do coeficiente de atrito, sendo proporcional à força normal ao plano. O ângulo formado entre a força normal e a resultante das forças tangencial e normal, é o ângulo de atrito, sendo este o ângulo máximo que a força cisalhante pode ter com a normal ao plano sem que haja deslizamento.

As forças transmitidas nos contatos entre grãos de areia diferem daquelas entre as partículas de argila, pois, na areia, a força de contato é maior, expulsando a água da superfície e permitindo o contato diretamente entre os grãos, enquanto que nas argilas, o número de partículas é muito superior, sendo menor a força entre os contatos, e insuficiente para a expulsão da água adsorvida pelas partículas, ficando, a água, responsável pela transmissão das forças.

b) Coesão

O atrito entre os grãos do solo determina, essencialmente, sua resistência ao cisalhamento, no entanto, em determinados tipos de solos, independente da força normal, a atração química entre partículas possui parcela significativa de resistência, denominada coesão real.

Além da coesão real, existe a aparente, presente principalmente em solos argilosos úmidos não saturados, determinada pela pressão capilar da água, e desaparecendo à medida em que o solo é saturado.

2.3 Ensaio SPT

Investigação geotécnica de ampla utilização no Brasil, a sondagem a percussão de simples reconhecimento (SPT) é, segundo Schnaid (2012), a mais popular, rotineira e econômica ferramenta de investigação em todo o mundo, e constitui-se em uma medida de resistência dinâmica, conjugada a uma sondagem de simples reconhecimento.

O ensaio SPT permite classificar preliminarmente as camadas do subsolo atravessadas (espessura, cor, textura e compactade/consistência), determinar o índice de resistência à penetração (N_{SPT}) e o nível do lençol freático; auxiliando ainda, na obtenção da topografia do terreno (levantamento da cota da boca do furo), da umidade natural do solo (em amostras

coletadas durante o ensaio), e na criação de perfis estratigráficos ou mapas com as curvas de isoespessuras, disponibilizando, assim, parâmetros essenciais à concepção, dimensionamento, análise e monitoramento de diversas obras civis. Ao final do ensaio também é possível determinar o torque necessário para a rotação do amostrador-padrão cravado e aproveitar a perfuração para realizar outros ensaios.

No Brasil, o ensaio SPT é normatizado pela ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, através da NBR 6484 (2001) em termos de equipamento e procedimentos, permitindo uma ampla exploração comparativa dos resultados.

Para a realização da sondagem SPT, a aparelhagem padrão compõe-se de: torre com roldana, tubos de revestimento, composição de perfuração ou cravação, trado-concha ou cavadeira, trado helicoidal, trépano de lavagem, amostrador-padrão, cabeças de bateria, martelo padronizado para a cravação do amostrador, baldinho para esgotar o furo; medidor de nível d'água, metro de balcão, recipientes para amostras, bomba d'água centrífuga motorizada, caixa d'água ou tambor com divisória interna para decantação, e ferramentas gerais necessárias à operação da aparelhagem. Os componentes estão descritos a seguir, conforme NBR 6484 (ABNT, 2001).

- a) *Torre*: é formada por quatro tubos de aço de 5 m de comprimento cada, e possui dispositivos para manobras durante a montagem das hastes e dos tubos de revestimento, podendo, opcionalmente, apresentar guincho motorizado ou sarrilho para auxiliar nas manobras;
- b) *Tubos de revestimento*: tubos de aço com diâmetro nominal interno 63,5 (Dexterno= 76.1 \pm 5 mm e Dinterno = 68.8 \pm 5 mm) e comprimentos de 1 m ou 2 m, que podem ser emendados por meio de luvas e roscas;
- c) *Composição de perfuração*: é constituída por hastes de aço com comprimentos de 1 m ou 2 m, diâmetro nominal interno 25 (Dexterno= 33,4 \pm 2,5 mm e Dinterno= 24,3 \pm 5 mm) e peso teórico de 32 N/m, que são acopladas entre si por roscas e luvas, devidamente atarraxadas, formando um conjunto retilíneo;
- d) *Trado-concha*: diâmetro de 100 \pm 10 mm;
- e) *Trado helicoidal*: sendo utilizado para a abertura dos furos de sondagem de, no mínimo, 56 mm, seu diâmetro deve ser de 5 a 7 mm menor que o diâmetro interno do tubo de revestimento, permitindo sua operação dentro deste, e liberando o caminho para que o amostrador-padrão desça livremente.
- f) *Trépano ou peça de lavagem*: é uma peça de aço com extremidades biseladas, duas saídas laterais para a água (afastadas de 200 a 300 mm da extremidade), e diâmetro nominal 25.

A largura de sua lâmina de aço deve ser de 3 a 5 mm menor que o diâmetro interno do tubo de revestimento.

- g) *Amostrador-padrão*: possuindo diâmetro externo de $50,8 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$ e diâmetro interno de $34,9 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$, é constituído por cabeça, corpo e sapata ou bico. A cabeça possui dois orifícios laterais para a saída de água e do ar, e uma válvula interna constituída por esfera de aço recoberta de material inoxidável. O corpo do amostrador é retilíneo, sem amassamentos, ondulações, denteamentos, estriamentos, rebordos ou qualquer deformação, podendo ou não ser bipartido longitudinalmente. A sapata do amostrador é de aço temperado, para melhor suporte dos esforços ao qual é submetida, e deve estar isenta de trincas, amassamentos, denteações, rebordos, ou qualquer deformação.
- h) *Cabeça de bater*: elemento que recebe o impacto direto do martelo, é constituído de um tarugo de aço com diâmetro de $83 \pm 5 \text{ mm}$, altura de $90 \pm 5 \text{ mm}$ e massa nominal entre 3,5 kg e 4,5 kg;
- i) *Martelo padronizado*: utilizado para a cravação dos tubos de revestimento e da composição de hastes com amostrador, consiste de uma massa de ferro prismática ou cilíndrica de 65 kg, com um coxim de madeira dura encaixado na parte inferior para sua proteção. Podendo ser maciço ou vazado, o martelo maciço possui haste-guia de 1,20 m de comprimento fixada à sua face inferior, ao longo do eixo de simetria longitudinal do martelo, com uma marca visível a 0,75 m da base do coxim de madeira, enquanto que o martelo vazado tem um furo central com diâmetro de 44 mm e na parte superior da cabeça de bater tem uma haste-guia com diâmetro de 33,4 mm e comprimento de 1,20 m, com uma marca a 0,75 m do topo da cabeça de bater. A haste-guia do martelo é sempre retilínea e perpendicular à superfície que receberá o impacto do martelo.
- j) *Sistema de circulação de água*: é constituído pela bomba d'água centrífuga motorizada, pela caixa d'água para decantação e mangueiras de engate rápido.

O ensaio SPT é executado em três fases diferentes que se repetem, segundo Cintra e Aoki (2008b) apud Lukiantchuki (2012) para cada metro de profundidade: perfuração, ensaio de penetração dinâmica e amostragem do solo.

A perfuração consiste na abertura do furo com um trado concha até o primeiro metro, com um trado helicoidal para as profundidades subsequentes, e com o auxílio de um trépano e com circulação de água abaixo do nível d'água, segundo a norma brasileira NBR 6484 (ABNT, 2001).

Após a perfuração do primeiro metro de subsolo, durante a interrupção da sondagem e após a limpeza do fundo do furo, tem início o ensaio de penetração, no qual o índice de

resistência à penetração do solo (NSPT) será determinado. O amostrador padrão é inserido no furo e cravado no solo através de golpes do martelo padronizado de 65 kg que cai livremente de uma altura de 0,75 m que são aplicados até que 0,45 m do amostrador tenham penetrado no solo. Fernandes (2014) divide o ensaio de penetração em duas fases: os primeiros 0,15 m, no qual o número de golpes do martelo é ignorado, servindo apenas para travessia do terreno mais perturbado pela execução do furo; e os segundos e terceiros 0,15 m, cujos números de golpes somados são representados por “N”, e será o resultado do ensaio para cada camada.

A amostragem, por sua vez, é realizada, após a penetração do amostrador no solo, retirando-o do terreno e abrindo-o para que o solo contido no interior do amostrador seja identificado. Ainda em campo, o sondador realiza uma análise táctil visual para identificação de frações granulométricas predominantes, e posteriormente, em laboratório, o geólogo ou engenheiro geotécnico confirma o teste feito em campo e identifica as feições, caracterizando geologicamente o material.

Posteriormente à retirada das amostras, a perfuração por tradagem ou lavagem continua por mais 0,55 m até o início do próximo metro, onde o procedimento é repetido, persistindo até o limite de sondagem especificado por norma ou dado pelo impenetrável no substrato rochoso. Atingido o nível do lençol freático, ou um nível impenetrável ao trado, o avanço da escavação passa a ser realizado com o trépano de lavagem com circulação de água, conforme critérios da NBR 6484, fazendo-se, obrigatoriamente, uso dos tubos de revestimentos e, em situações de instabilidade das paredes da escavação, de lamas de estabilização.

A Figura 1 ilustra o procedimento.

Após a realização do ensaio SPT, é elaborado o relatório técnico da sondagem, no qual os resultados do ensaio serão representados em perfil gráfico, que será anexado ao croqui do local do ensaio.

O relatório apresenta, com as respectivas convenções, segundo Anjos (2014), informações como: local e tipo de obra, procedimento executivo (materiais, equipamentos e normas de referência), localização dos furos e da referência de nível (RN) adotada, origem das medidas das cotas de boca de furo, e os perfis de cada furo de sondagem graduados de metro a metro. Cada perfil de sondagem mostra as camadas ou horizontes de solo atravessados com suas devidas profundidades, identificação, classificação e convenção gráfica – conforme NBR 6484 (ABNT, 2001) e NBR 13441 (ABNT, 1995) –, as posições do nível d’água, o número de golpes necessários à cravação dos últimos 0,30 m do amostrador (N_{SPT}), a profundidade do limite de sondagem, o número do furo de sondagem, a cota da boca do furo, as datas de início

e término do ensaio, e os processos de perfuração empregados e profundidades atingidas: TH para trado helicoidal, CA para circulação de água; cota da boca do tubo de revestimento.

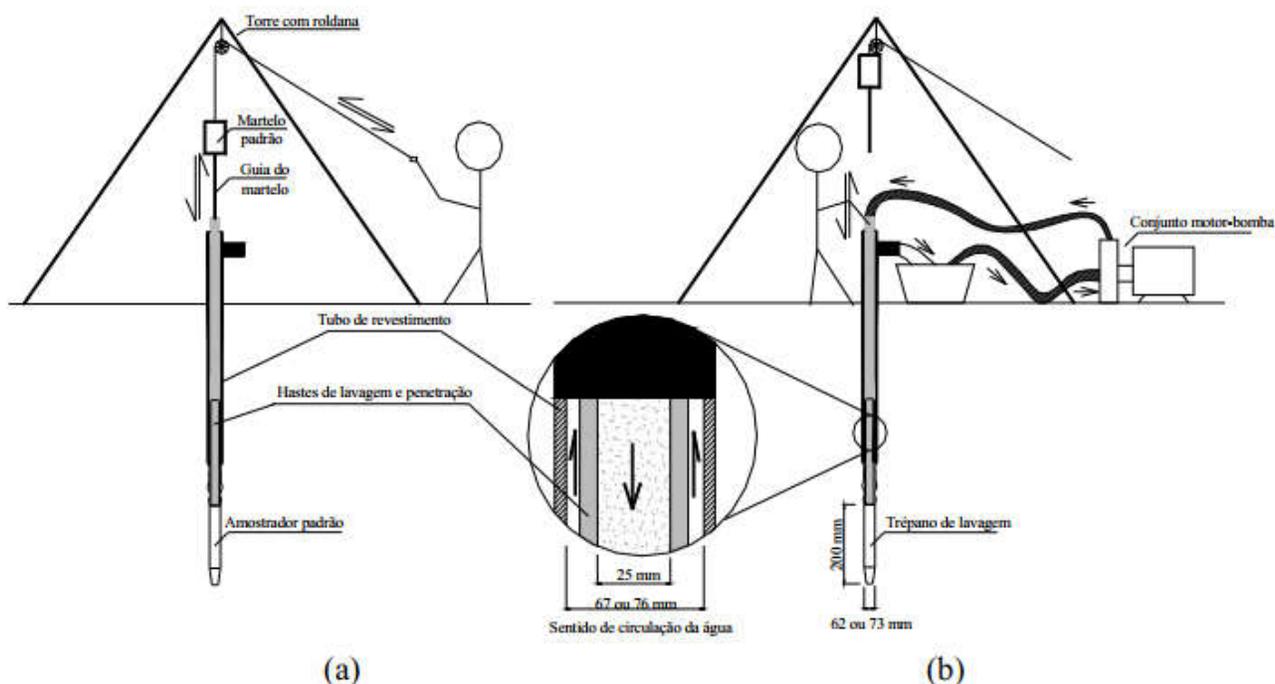


Figura 1 - (a) ensaio SPT durante a cravação do amostrador padrão, e (b) avanço da perfuração por meio de trépano de lavagem.
Fonte: Ruver (2005).

O valor de N_{SPT} varia de acordo com os equipamentos utilizados, desta forma, a padronização estabelecida pela NBR 6484 (ABNT, 2001) visa garantir que a energia fornecida ao sistema seja a energia padrão (0,48 kN.m).

Técnicas de perfuração, equipamentos e procedimentos de ensaio, segundo Rodriguez (2013), variam de um país para o outro, em função de fatores regionais e do grau de desenvolvimento tecnológico no setor, resultando em uma falta de uniformidade de significado dos resultados obtidos. O autor afirma que as principais diferenças estão no método de perfuração, no fluido estabilizante utilizado, no diâmetro do furo escavado, no mecanismo de levantamento e liberação de queda do martelo, na rigidez das hastas, na geometria do amostrador e no método de cravação.

Décourt (1989) citado por Rodriguez (2013), especifica, ainda, outros fatores intervenientes nos valores de N_{spt} : o uso de cabo inadequado; lubrificação insuficiente da roldana; excentricidade da cabeça de bater; a não utilização da guia para a haste; falta de atenção na contagem dos golpes; limpeza inadequada do furo; falha na manutenção da carga hidráulica; uso de bomba de alta capacidade; comprimento da composição de hastas; amostrador

deformado; peso da cabeça de bater; obstrução do amostrador por pedregulhos; martelo sem coxim de madeira; velocidade dos golpes; variações nos intervalos de penetração; aumento do diâmetro do furo sem usar o revestimento; registro inadequado dos solos, entre outros.

Sabendo que o índice NSPT está diretamente relacionado com a parcela de energia que é efetivamente transmitida ao amostrador durante a queda do martelo, Rodriguez (2013) afirma ser possível minimizar, ou até eliminar, a maioria dos fatores intervenientes apresentados, fazendo a leitura da energia entregue ao amostrador e padronizando seu valor, através de correções. O autor cita Skempton (1986), que apresentou e consolidou a recomendação da padronização da energia em 60% da energia média padrão, média mundial dos equipamentos mais utilizados, e Décourt (1989), que sugeriu uma padronização de energia em 72% para a experiência brasileira, a partir da observação de que o percentual de 60% ficava muito abaixo da média dos equipamentos utilizados no Brasil.

Dentre os trabalhos mais importantes sobre a metodologia do ensaio de SPT, com base na determinação da energia transferida ao amostrador, destacam-se, conforme Rodriguez (2013): Palacios (1977), Schmertmann e Palacios (1979), Kovacs et al (1977, 1981, 1982), Kovacs (1979) e Skempton (1986). Soares (2011) também cita alguns autores que vêm estudando a influência da energia de ensaio nos resultados do SPT: Belincanta (1998), Aoki e Cintra (2000), Cavalcante (2002), Howie et. al. (2003), Neves (2004), Odebrecht et. al. (2005), Aoki et al. (2007 e 2004), Schnaid et al. (2009a), e, mais recentemente, Lukiantchuki, Oliveira e Esquivel (2011) e Lukiantchuki, Esquivel e Bernardes (2011).

A metodologia desenvolvida para a estimativa da energia fornecida representou um grande avanço na interpretação mais racional, possibilitando a comparação entre as experiências adquiridas ao redor do globo. (RODRIGUEZ, 2013)

Segundo Schnaid (2000), são possíveis diversas aplicações dos ensaios de penetração dinâmica (SPT) na engenharia geotécnica, partindo do simples reconhecimento e amostragem do subsolo até a sua correlação com propriedades geotécnicas de seus materiais constituintes. O autor apresenta, ainda, duas abordagens na interpretação dos resultados do SPT: métodos diretos - aplicação dos resultados em expressões empíricas e/ou semi-empíricas de previsão de capacidade de carga ou recalques em elementos de fundação, sem a utilização de parâmetros intermediários - e métodos indiretos - aplicação dos resultados para a previsão de parâmetros geotécnicos por meio de correlações com resultados de ensaios de laboratório e/ou de campo.

Dentre as correlações possíveis a partir do SPT para a estimativa de parâmetros geotécnicos, se destacam, segundo Fernandes (2014), o índice de compacidade de areias

(SKEMPTON, 1986) e o ângulo de resistência ao corte (DÉCOURT, 1989; US ARMY CORPS OF ENGINEERS, 1993; HATANAKA e UCHIDA, 1996).

Soares (2011) apresenta outras correlações propostas para estimativa de parâmetros de comportamento do solo: correlações com o módulo de deformabilidade em função da resistência de ponta do ensaio de cone (SCHMERTMANN, 1970), correlações utilizadas em cálculos de tensão admissível (MILITITSKY; SCHNAID, 1995), de capacidade de carga (DÉCOURT; QUARESMA, 1978), de carga admissível em elemento isolado de fundação com uso de correlações com CPT (AOKI; VELLOSO, 1975), correlações para a determinação da compactidade dos solos grossos e os estados de consistência dos solos finos (NBR 6484/2001), para a obtenção do módulo de deformabilidade de um terreno melhorado com estacas de compactação (ALVES; LOPES; ARAGÃO, 2000), para a estimativa da tensão admissível em fundações diretas por sapatas (CINTRA; AOKI; ALBIERO, 2003), e para a estimativa da tensão admissível de solos argilosos e arenosos (TEIXEIRA, 1996).

Foram sugeridas, ainda, outras correlações com o N_{spt} para a caracterização dos solos para: determinação da densidade relativa (GIBBS; HOLTZ, 1975) e (SKEMPTON, 1986); conversão da densidade relativa em ângulo de atrito interno do solo (DE MELLO, 1971) e (BOLTON, 1986); determinação de ângulo de atrito interno do solo (TEIXEIRA, 1996), (HATANAKA E UCHIDA, 1996), (PECK ET AL., 1974), (MITCHELL ET AL., 1978) e (DÉCOURT, 1991); obtenção da coesão não drenada (TEIXEIRA E GODOY, 1996) e (ALONSO, 2010); e determinação do módulo de elasticidade (DÉCOURT, 1995); determinação do peso específico (GODOY, 1972) e da tensão admissível (MILITITSKY E SCHNAID, 1995).

Outra possível aplicação dos resultados das sondagens SPT é a criação de banco de dados eletrônicos, que têm se mostrado importantes instrumentos de gestão, permitindo o armazenamento e o tratamento geoestatístico de informações, além da modelagem digital, e da elaboração de mapas temáticos, simplificando o acesso a informação.

Segundo Augusto Filho (2005a), citado por Soares (2011), a utilização de banco de dados eletrônicos na gestão urbana vem se ampliando e consolidando em paralelo ao desenvolvimento e disseminação das ferramentas computacionais, no entanto, Soares (2011) afirma que o emprego específico de bancos de dados geotécnicos como instrumento de gestão urbana ainda não conta com muitas experiências consolidadas nos municípios brasileiros.

Finalmente, apesar das críticas continuamente feitas à diversidade de procedimentos, técnicas, e materiais utilizados na execução do ensaio SPT, este ainda é, segundo Rodriguez (2013), o processo dominante na prática de Engenharia de Fundações, principalmente no Brasil.

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EM ESTUDO

Neste capítulo são apresentadas diversas características da área estudada, como localização, geologia, geomorfologia, pedologia, clima, geotecnia, hidrografia, vegetação e ocupação.

3.1 João Pessoa

Será apresentada, na sequência, a caracterização da cidade de João Pessoa, área de estudo deste trabalho.

3.1.1 Localização

O município de João Pessoa, capital da Paraíba, localiza-se na zona costeira do estado, nas coordenadas 8°07' S e 24°52' W, limitando-se, ao norte, com o município de Cabedelo, ao sul com o município do Conde, a oeste com os municípios de Bayeux e Santa Rita, e a leste com o Oceano Atlântico (Figura 2).

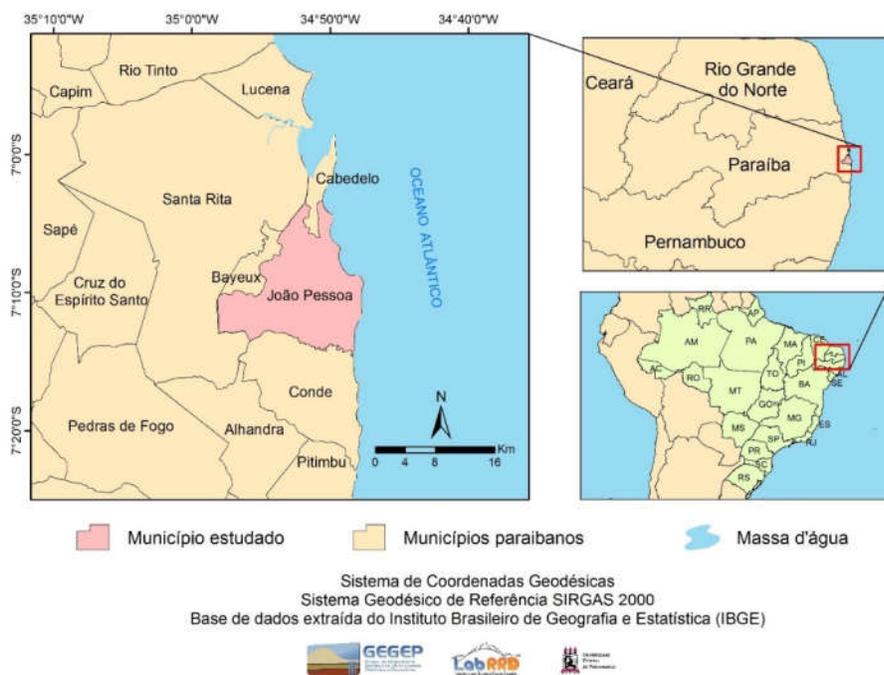


Figura 2 - Localização do Município de João Pessoa.
Fonte: o autor (2017).

A cidade encontra-se na mesorregião da Zona da Mata Paraibana e Microrregião de João Pessoa, apresentando-se com área total de 211,475 km² (IBGE, 2015).

3.1.2 Caracterização Geológico-geomorfológica

Segundo Brasil (2002) mais de 80% do substrato geológico paraibano é composto por rochas pré-cambrianas, complementadas por bacias sedimentares, rochas vulcânicas cretáceas, coberturas plataformais paleógenas/neógenas e formações superficiais quaternárias.

João Pessoa está inserida no domínio geológico da Bacia Sedimentar Pernambuco-Paraíba, que ocupa uma extensa faixa ao longo do litoral dos estados de Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte, estendendo-se, segundo Feijó (1994 apud Brasil, 2002), desde a cidade de Recife (PE), na qual é limitada pelo Lineamento Pernambuco, até o vale do rio Camaratuba, norte de João Pessoa (PB), separando-se da Bacia Potiguar a norte, pelo Alto de Touros, e da Bacia de Alagoas a sul, pelo Alto de Maragogi.

No estado da Paraíba, a Bacia Sedimentar Pernambuco-Paraíba é preenchida por sedimentos de fácies continentais e marinhas reunidas sob a denominação de Grupo Paraíba. Brasil (2002) subdivide esse grupo em três formações: a Beberibe, a Gramame e a Maria Farinha. Capeando o Grupo Paraíba, porém não fazendo parte dele, está a Formação Barreiras, que é uma unidade litoestratigráfica de idade miocênica, que se encontra localizada em faixa que vai desde o estado do Amapá até o norte do Rio de Janeiro (ARAI, 2006 apud BARBOSA, 2015).

A situação estratigráfica das principais unidades geológicas presentes em João Pessoa foi resumida por Soares (2011) na tabela abaixo:

Tabela 3 - Resumo da situação estratigráfica das unidades geológicas da área de estudo.

IDADES		UNIDADES GEOLÓGICAS
ERA	PERÍODO	
CENOZÓICA	QUATERNÁRIO	Sedimentos inconsolidados de origem aluvio-coluvionar.
		Sedimentos inconsolidados de origem marinha com contribuição fluvial.
		Sedimentos arenosos inconsolidados (dunas).
MESOZÓICA	TERCIÁRIO	Argilitos, siltitos e arenitos brandos das Formações Riacho Morno (superior) e Guararapes (inferior) do Grupo Barreiras.
	CRETÁCEO	Calcários, calcários argilosos e calcoarenitos da Formação Gramame do Grupo Paraíba.

Fonte: Soares (2011).

Na tabela acima observam-se três grandes unidades de sedimentos inconsolidados recentes, do quaternário: os depósitos aluvionares, os depósitos marinhos com contribuição fluvial e os depósitos arenosos de origem predominantemente eólica. Soares (2011) caracteriza essas unidades, e suas características estão organizadas no quadro a seguir.

Tabela 4 - Caracterização das unidades de sedimentos inconsolidados recentes.

DEPÓSITOS ALUVIOARES	<ul style="list-style-type: none"> • Sedimentos predominantemente arenosos com lentes de material silto e argilosos e níveis de cascalho variegado; • Encontrados também em áreas de sedimentos argilo-siltosos ricos em matéria orgânica; • Ocorrem nos vales das principais drenagens presentes na área de estudo (Rios Paraíba, Gramame, Jaguaribe).
DEPOSITOS MARINHOS	<ul style="list-style-type: none"> • Estreita faixa costeira (maior expressão no extremo nordeste da área estudada); • Constituídas de areias bem classificadas, de granulação fina a média e contendo restos de animais marinhos (conchas); • Constituem as praias e restingas atuais; • Recebem contribuição de material mais fino (silte e argila) e matéria orgânica nos estuários das principais drenagens, podendo ocorrer áreas de mangues.
DEPÓSITOS ARENOSOS	<ul style="list-style-type: none"> • Origem eólica e marinha (material retrabalhado); • Constituídos por areias; • Ocorrem na forma de bolsões restritos nas porções central e leste de área, sobre os platôs, cerca de 40 metros acima do nível de costa atual.

Fonte: Adaptado de Soares (2011).

João Pessoa está localizada, em maior parte, sobre a unidade geológica Formação Barreiras. Essa unidade ocorre sob as formações quaternárias, e, conforme Barbosa (2015), ocupa 67% da área total do município. Outras unidades do grupo Paraíba, com exceção da Formação Maria Farinha, também afloram modestamente no município, como pode-se observar na Tabela 5 e na Figura 3.

Tabela 5 - Unidades geológicas em km² e % do município de João Pessoa.

Classes	Área em km ²	Área em %
Aluviões e sedimentos de praia	71,79	32
Formação Barreiras	136,57	67
Formação Gramame	1,89	0,9
Formação Beberibe	1,22	0,1
Total	211,47	100

Fonte: Barbosa (2015).

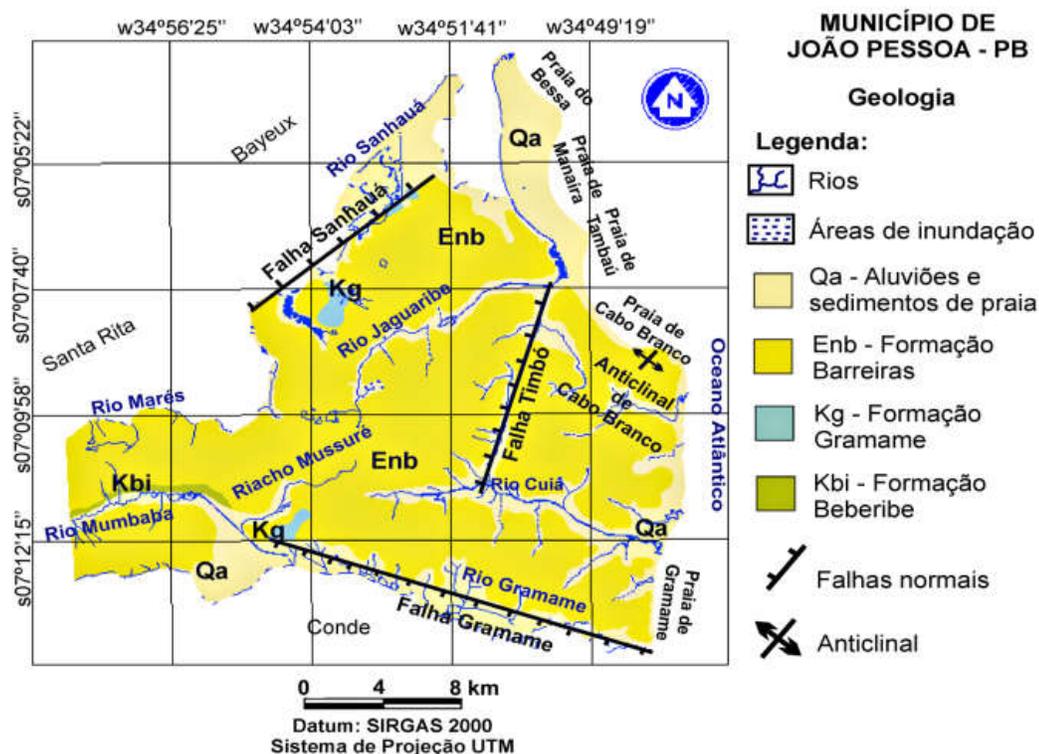


Figura 3 - Mapa geológico de João Pessoa.
Fonte: Adaptado de Brasil (2002) por Barbosa (2015).

Quanto à espessura, a Formação Barreiras apresenta-se com maior expressividade na faixa litorânea, variando de 40 a 70 metros, podendo existir setores com espessuras maiores que 80 metros. Essas formações, segundo Mabesoone et al. (1972) e Bigarella (1975) apud Soares (2011) são predominantemente constituídas por arenitos silticos-argilosos, argilas-siltosas e leitos conglomeráticos, sem a presença de fósseis; seus sedimentos são, comumente, mal selecionados, com predominância de areia e argila; e suas cores variam entre avermelhadas, variegadas e esbranquiçadas (associadas a ocorrência de intercalações caulínicas).

Quanto a geomorfologia, pode-se dividir o município de João Pessoa em dois grupos de morfoesculturas: os Baixos Planaltos Costeiros (inseridos na macrocompactação dos Tabuleiros Litorâneos), esculpidos sobre os sedimentos areno-argilosos mal consolidados da Formação Barreiras, e a Baixada Litorânea, formados sobre cobertura aluvial.

Barbosa (2015) afirma que os Baixos Planaltos Costeiros, superfícies tabulares que acompanham todo o litoral do nordestino brasileiro, cobrem a maior parte do município (79% da área total), formando superfícies aplainadas a suavemente convexas, enquanto que a Baixada Litorânea, comumente áreas planas de acumulação ou deposição de sedimentos de baixa altitude, representa área menos expressiva (21% da área total), sendo composta pelas planícies

fluviais, marinhas e intermareais, terraços e rampas de colúvio, compõem as regiões adjacentes aos rios, riachos, praias e suas retaguardas.

Segundo Soares (2011), os limites entre os Baixos Planaltos Costeiros e a planície marinha são assinalados por uma linha de falésias ativas, atualmente esculpidas por processos marinhos, ou por uma linha de falésias inativas, nas quais os processos marinhos cessaram.

3.1.3 Pedologia

Referindo-se aos aspectos pedológicos de João Pessoa, João Pessoa (2012) afirma que os solos apresentam características gerais que os resumem em solos de aporte bruto marinho e flúvio-marinho, muito profundos, ácidos e com pouca ou nenhuma vocação agrícola. Essas características, segundo Barbosa (2015), estão associadas ao tipo de relevo e clima da cidade, “sobretudo pela presença de microrelevos, pela proximidade do mar, pelo nível do lençol freático e pela influência flúvio-marinha” João Pessoa (2012).

A partir do Mapa Pedológico do Estado da Paraíba (2004) e do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 1999 e 2006), Nascimento (2008) apud Soares (2011) caracterizou os solos de João Pessoa, confirmando a predominância de Argilossolos Vermelho-Amarelos sobre os Tabuleiros Litorâneos da Formação Barreiras, frequentemente associados aos Latossolos Vermelho-Amarelos e aos Espodossolos – arenosos e argilosos de baixa fertilidade e lixiviados sobre os sedimentos terciários. Já nas planícies fluviais, segundo o autor, os Neossolos Flúvicos e os Gleissolos (de várzea aluviais e hidromórficos) se desenvolvem, enquanto que nas planícies flúvio-marinhas ocorrem os Solos Indiscriminados de Mangue e nas marinhas são encontrados os Neossolos Quartzarênicos (arenosos de praia, restingas e cordões litorâneos). O mapa da Figura 4 apresenta a configuração pedológica da cidade.



Figura 4 - Solos de João Pessoa.
 Fonte: o autor (2017).

3.1.4 Clima e Aspectos Morfoclimáticos

Conforme classificação climática de Köppen, o município de João Pessoa encontra-se sob o domínio do clima Tropical Chuvoso, com estação seca de verão (As'). O

clima é quente e úmido, com chuvas concentradas entre março e agosto, e períodos secos entre setembro e dezembro, conforme observa-se na Figura 5.

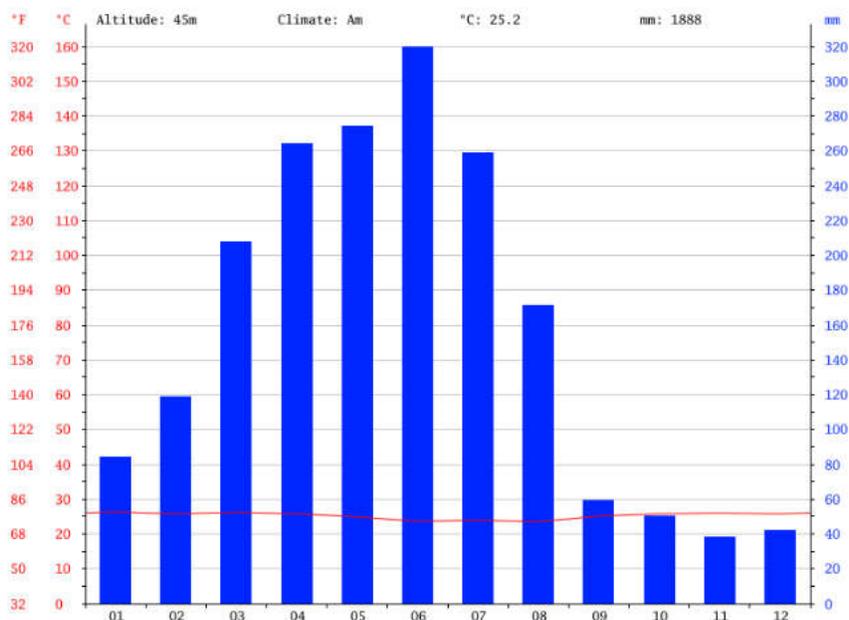


Figura 5 - Variação de pluviosidade ao longo do ano em João Pessoa.

Fonte: modificado de <http://pt.climate-data.org/> (Acessado em 07 de março de 2017).

A pluviosidade média anual varia entre 1400 e 1800 mm por ano, conforme Barbosa (2015).

Segundo João Pessoa (2012), a área de estudo, pela proximidade do oceano e pela latitude, apresenta grande homogeneidade sazonal e espacial de temperatura (que é elevada durante quase todo ano). A média das temperaturas mínimas anuais é de 23°C e das máximas é de 28°C, configurando uma amplitude térmica anual de cerca de 5°C (característica de climas tropicais oceânicos).

No clima de João Pessoa, quente e úmido, predomina, segundo Barbosa (2015), o intemperismo químico, favorecendo a formação de solos mais profundos, principalmente no tipo de relevo deste município, que é tabular, e o processo de infiltração predomina sobre o de escoamento (exceto em áreas impermeabilizadas, tomadas pela urbanização, nas quais o índice de escoamento pode ser superior ao de infiltração). Assim, pela ação do clima, as áreas de maior declividade de João Pessoa, compostas por materiais sedimentares e solos espessos, sofrem a ação do intemperismo químico e a erosão do solo, aumentando o risco de ocorrência de movimentos de massa, inclusive em relevos modificados pelo homem.

A abundância de chuvas atrelada à impermeabilização do solo pelo homem também resulta na rápida elevação do nível da água dos rios. Desta forma, em períodos de chuvas

intensas, os rios podem ocupar e/ou ultrapassar suas planícies de inundação (margeadas por habitações populares ribeirinhas, na maioria das vezes), potencializando o risco de ocorrência de enchentes.

Há, portanto, forte relação entre os fenômenos climáticos e o relevo de João Pessoa, evidenciada pelo intemperismo e erosão resultantes dos processos de escoamento e infiltração de águas pluviais, que se configuram como fortes agentes esculpidores do relevo.

3.1.5 Aspectos Geotécnicos

Tuma (2004) apud Soares (2011) aponta os principais usos e ocupações do solo em João Pessoa: habitacionais, instalações industriais, pecuária, agricultura e mineração.

Sobre potencial a erosão, Tuma e Soares (2001) apud Soares (2011), apresenta as considerações resumidas na Tabela 6.

Tabela 6 - Potencial Erosivo da Superfície de João Pessoa.

Potencial Erosivo	Localização / Observação
Alto	<ul style="list-style-type: none"> • 19% da superfície total; • Margens dos rios (a partir do trabalho progressivo das águas correntes nos materiais de cobertura onde os declives passam de 10%); • Beira-mar (erosão marinha atua na destruição das saliências e reentrâncias do relevo representado pelas falésias abruptas da Formação Barreiras, na porção sudeste da cidade).
Médio	<ul style="list-style-type: none"> • 76% da área total • Terrenos com solos residuais (comportamento mecânico variável em função da inclinação natural do terreno, proteção da cobertura vegetal e o desenvolvimento de processos antrópicos); • Sulcos e ravinamentos (processos erosivos) mais visíveis nos horizontes superficiais do solo em áreas de desmatamento clandestino, de empréstimo abandonadas, cortes de barrancos em vias de acesso e ocupações urbanas em áreas inadequadas.
Baixo	<ul style="list-style-type: none"> • 5% da superfície total; • Terrenos de baixas altitudes e baixas declividades; • Ao longo do litoral ou onde afloram litologias calcárias caracterizadas por certa resistência mecânica.

Fonte: Adaptado de Soares (2011).

Segundo Soares (2011), no tocante a quantidade e variedade de materiais empregados na construção civil, João Pessoa apresenta um grande potencial geológico, representado por extensos depósitos de areia, de argilas e importantes jazidas de calcário. Grandes depósitos de areia, argila e cascalho ocorrem às margens do rio Paraíba do Norte, resultantes do processo erosivo desencadeado pelo rio nos tabuleiros da Formação Barreiras, sendo, os materiais argilosos usados para cerâmica comum (telhas e tijolos), e a areia e a brita como argamassas,

concretos, etc. Nessas áreas são visíveis os impactos ambientais gerados pela execução irregular das atividades de mineração. Camadas de calcário afloram apenas em áreas topograficamente arrasadas do terreno – uma vez que a posição estratigráfica da Formação Gramame é abaixo do pacote sedimentar do Grupo Barreiras –, sendo, esse material, destinado, principalmente, a fabricação de cimento. Apesar de parte da lavra deste material ser conduzida por empresas legalizadas, também ocorre a extração por grupos de garimpeiros que operam na ilegalidade.

Sobre fundações, Soares (2005) apud Soares (2011) lista, em ordem de frequência, os tipos de estacas mais utilizadas pela construção civil em João Pessoa: estacas de compactação (Tripé ou torre); estacas escavadas (perfuratriz sobre caminhão); estacas Franki (Franki); estacas metálicas (torre); estacas pré-moldadas de concreto (torre). A determinação do tipo de estaca a ser utilizada é dependente do orçamento e dos equipamentos disponíveis. A Tabela 7 resume o relato de fundações em João Pessoa citado por Soares (2011) a partir de Soares (2005), que dividiu a cidade em duas áreas: parte alta (em relação ao nível do mar) e região litorânea.

Tabela 7 - Tipos de Fundações em João Pessoa.

Área	Características	Solução de Fundação
Parte Alta	<ul style="list-style-type: none"> • Predominância do Grupo Barreiras; • O perfil geotécnico comumente apresenta solos coesivos (siltes argilosos); • Inexistência de lençol freático em perfis geotécnicos até profundidades mais resistentes 	<ul style="list-style-type: none"> • Estacas escavadas (perfuratriz sobre caminhão) – geralmente a 12 metros de profundidade na região da formação barreiras ao norte do Rio Jaguaribe; • Tubulões a céu aberto; • Fundações diretas (superficiais) com profundidade entre 1 e 1,5 metros, ao sul do Rio Jaguaribe (Bairros do Castelo Branco, Bancários, etc.).
Região Litorânea	<ul style="list-style-type: none"> • O perfil geotécnico é constituído por solos granulares (areias, areias siltosas); • Lençol freático presente nos perfis geotécnicos; • Ocorrência de camada intermediária compressível de 7,0m a 12,0m de profundidade (ora silte arenoso, ora silte argiloso, ou argila siltosa mole); • Ocorrência esporádica de argila orgânica mole, de 13,5m a 23,0m de profundidade. 	<ul style="list-style-type: none"> • Estacas escavadas e tubulões a céu aberto são inadequados para essa área • Fundação direta com estacas de compactação (Tripé ou torre); • Estacas metálicas (torre); • Estacas pré-moldadas de concreto (torre); • Estaca hélice-contínua; • Radier estaqueado.

Fonte: Modificado de Soares (2011) apud Soares (2005).

3.1.6 Recursos Hídricos

Os recursos hídricos de superfície do município de João Pessoa-PB são representados pelas bacias hidrográficas do Paraíba e Gramame, além de outras sub-bacias, sendo, segundo

João Pessoa (2012), os rios Marés, Sanhauá, Jaguaribe e Mumbaba-Gramame os grandes provedores de água da cidade. A Figura 6 apresenta as bacias hidrográficas da cidade.

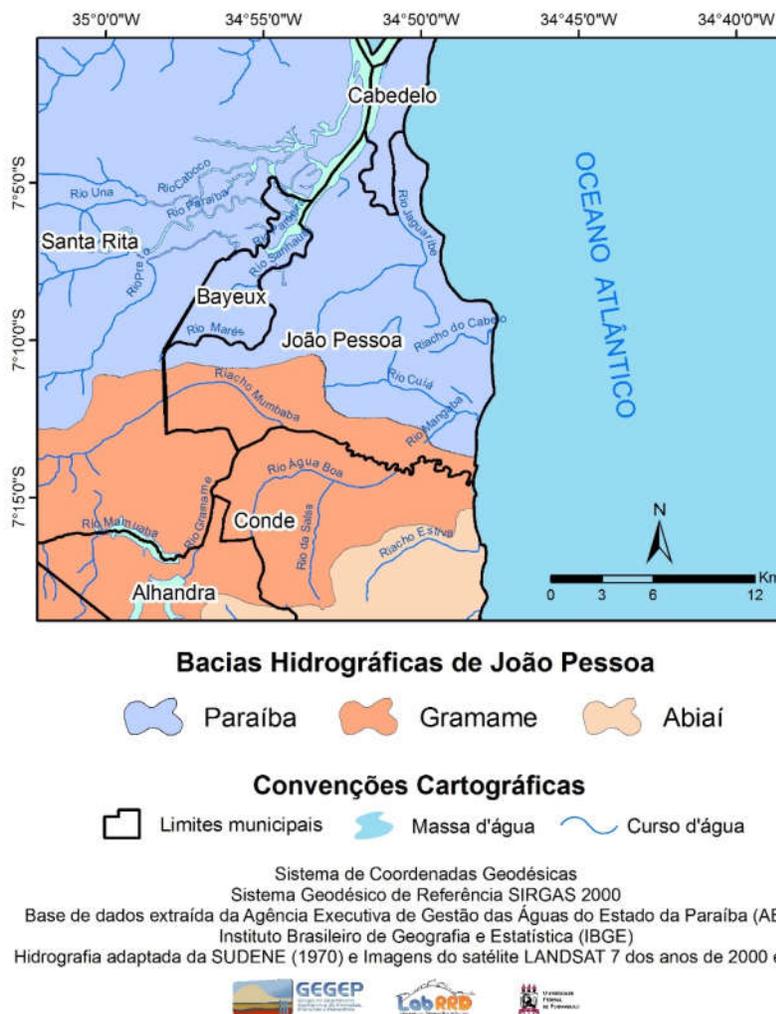


Figura 6 - Bacias Hidrográficas de João Pessoa.

Fonte: o autor (2017).

O fluxo perene, com fluxo de água contínuo no leito, é característica de todas as bacias hidrográficas de João Pessoa, determinada pelas condições climáticas.

Segundo João Pessoa (2012), a formação de aquíferos, em João Pessoa, é favorecida pelas condições geológicas, caracterizadas por sedimentos das Formações Barreiras, Gramame e Beberibe. Os tipos litológicos e seus diversos arranjos estratigráficos são os responsáveis pela formação de diversos aquíferos, como o Beberibe, Gramame e Barreiras.

O aquífero Beberibe é representado pela formação de mesmo nome que se assenta direta e discordantemente sobre o embasamento pré-cambriano, e aflora, em João Pessoa, na barragem

do Buraquinho, representando, por seu potencial de água subterrânea, o mais importante aquífero do município. Furrier (2007) apud Soares (2011), atrela sua potencialidade hídrica à sua profundidade (>100m) e a seu confinamento pelos calcários das Formação Gramame, em sua porção mais oriental, que dificulta sua contaminação.

A alimentação do aquífero Beberibe, segundo Soares (2011), é feita de maneira direta, pelas precipitações ao longo de suas faixas de exposição planas e arenosas, ou indireta, por meio de infiltração vertical do lençol freático que lhe é sobreposto (Barreiras ou depósitos quaternários).

O aquífero Gramame, por sua vez, possui a mesma denominação do rio que corta João Pessoa na sua porção meridional, e aflora a noroeste de João Pessoa, nos bairros do Roger, Mandacaru e nas ilhas estuarinas do Stuart e Tiriri. Conforme Soares (2011), este aquífero, referente aos calcários, possui uma produção de água subterrânea bastante reduzida e com qualidade química insignificante, sendo, sua alimentação, feita de forma verticalmente ascendente, quando proveniente do aquífero Beberibe e verticalmente descendente, a partir do Barreiras ou dos sedimentos quaternários, destacando a possibilidade de existência de uma circulação cárstica nos calcários puros, apesar da baixa permeabilidade média desse aquífero (por efeito da predominância das camadas margosas).

Já o aquífero Barreiras, formado pelos sedimentos da Formação Barreiras, ocupa expressiva extensão na área da bacia do Jaguaribe, configurando-se como de grande importância para o município devido a sua produção de água de boa qualidade, permitida por sua heterogeneidade faciológica e granulométrica que constituem um sistema freático com intercalações clástico-pelíticas.

Soares (2011) afirma que, no geral, o aquífero Barreiras apresenta possibilidades hidrológicas relativamente fracas, devido à sua baixa permeabilidade, à existência de ressurgências nas encostas dos vales, e à alimentação dos rios; desempenhando, no entanto, um papel importante como reservas de água subterrânea, as quais são restritas aos níveis mais arenosos e conglomeráticos, encerrados entre níveis mais finos e argilosos. A alimentação desse aquífero é feita, exclusivamente, pela infiltração das águas das chuvas.

Existem, ainda, os aquíferos constituídos pelos depósitos quaternários. Estes são aquíferos livres e estão bem distribuídos pelas planícies aluviais e pela planície litorânea.

Melo e Alves (2001) citado por Soares (2011) especificam, basicamente, dois sistemas de águas subterrâneas que ocorrem em João Pessoa: um livre, contido, sobretudo nos sedimentos da Formação Barreiras e nos sedimentos inconsolidados do Quaternário, e, mais restritamente, nos calcários da Formação Gramame e nos arenitos da Formação Beberibe; e um

confinado, contido nos sedimentos da Formação Beberibe, caso se encontrem sotopostos à Formação Gramame, ou sob níveis confinantes, argilosos das Formações Barreiras.

3.1.7 Vegetação

João Pessoa está inserida no domínio da Mata Atlântica, formada, segundo Barbosa (2008) apud João Pessoa (2012), por um tipo florestal denominado de Mata dos Tabuleiros, caracterizada pelo contato entre a vegetação de restinga e, predominantemente, a floresta estacional semidecidual.

A vegetação de João Pessoa é composta, basicamente, por matas fechadas, mangues, restingas, matas ciliares e arborização urbana. No entanto, pode-se afirmar que, como efeito do processo de urbanização, a vegetação natural na Planície Litorânea está bastante deteriorada.

3.1.8 Urbanização

Barbosa (2015) em sessão (a partir do qual foi baseado este item) sobre urbanização de João Pessoa, afirma que a cidade foi fundada em 1585, nas encostas das vertentes do rio Sanhauá, subindo em direção aos tabuleiros costeiros - na sua região central -, sendo cortada por vales de rios que adicionou ao seu sítio planícies e vertentes - também alvos da ocupação e da urbanização.

Em 1910, a cidade não apresentava grande crescimento em sua extensão territorial, uma vez que uma dolina de subsidência lenta, hoje chamada popularmente de Lagoa, era considerada barreira contra a expansão da cidade em direção ao leste. No final dos anos de 1910 e dos anos de 1920 a 1950, segundo Barbosa (2015), foi fundado o Parque Sólon de Lucena e a lagoa foi urbanizada, bem como o Parque Arruda Câmara, o Ponto Cem Réis e várias praças, levando à ocupação de extensa parte da cidade alta e do atual centro histórico. Foram realizadas, ainda, melhorias nas áreas de saneamento básico, saúde, transporte e energia.

A Avenida Epitácio Pessoa foi aberta no ano de 1933 e foi a porta de entrada em direção à ocupação das planícies e terraços marinhos da zona litorânea, assim como às áreas adjacentes a elas, que são as áreas de menores cotas altimétricas, compondo a Baixada Litorânea.

Entre os anos de 1940 e 1950, conforme Maia (2000) apud Barbosa (2015), a expansão de João Pessoa para Leste já era considerável, mas a cidade ainda apresentava algumas características rurais.

Em 1960, com o recebimento de maiores recursos federais e intervenções públicas, foram implantados: o Campus da Universidade Federal da Paraíba, no bairro do Castelo Branco; o anel viário, responsável pela formação de algumas das vertentes antropogênicas presentes por cortes de estrada; o Distrito Industrial e os conjuntos habitacionais, favorecendo a expansão em direção ao sul e sudeste do município, principalmente, por parte da população de renda média e média-baixa. No eixo de ligação com as praias foram estabelecidas unidades habitacionais destinadas à população de renda mais elevada, contribuindo para a valorização destes bairros e início do processo de ocupação permanente da orla marítima.

Nos anos de 1970 a cidade de João Pessoa atinge de forma significativa a faixa litorânea, rompendo os limites rurais e naturais, engolindo sítios e fazendas e ocupando vales de rios e manguezais. Em 1980, 98,98% da população de João Pessoa já era considerada urbana (MAIA, 2000 apud BARBOSA,2015).

Ainda na década de 1980, a Avenida Epitácio Pessoa foi deixando de ser residencial e transformando-se em uma avenida comercial, administrativa e de serviços, e entre os bairros de Tambaú e Manaíra, principalmente, passou a se compor de um misto de prédios comerciais e residenciais. Ainda na área litorânea norte, alguns outros bairros, hoje considerados nobres, foram se instalando, como é o caso dos bairros do Bessa, Aeroclub e Jardim Oceania, ambos construídos sobre os cordões litorâneos que correspondem à restinga.

A acelerada expansão da malha urbana do município aconteceu sem uma política adequada de planejamento urbano e veio acompanhada pela estratificação social do uso da terra da cidade. O processo de urbanização do município trouxe problemas urbanos, sociais e ambientais, pois, paralelamente à construção de grandes bairros residenciais e comerciais, acontecia o processo de empobrecimento urbano, com a ocupação de áreas de risco junto às encostas e vales de rios pela população de renda mais baixa, sem condições de residir em outras áreas, tornando obrigatórias, a segregação e as condições precárias de vida.

3.1.9 Áreas de Risco

O mapa da Figura 7 apresenta informações divulgadas pela CPRM em 2013, através do Mapa de Geodiversidade da Paraíba, acerca da suscetibilidade a movimentos de massa e inundações em João Pessoa.

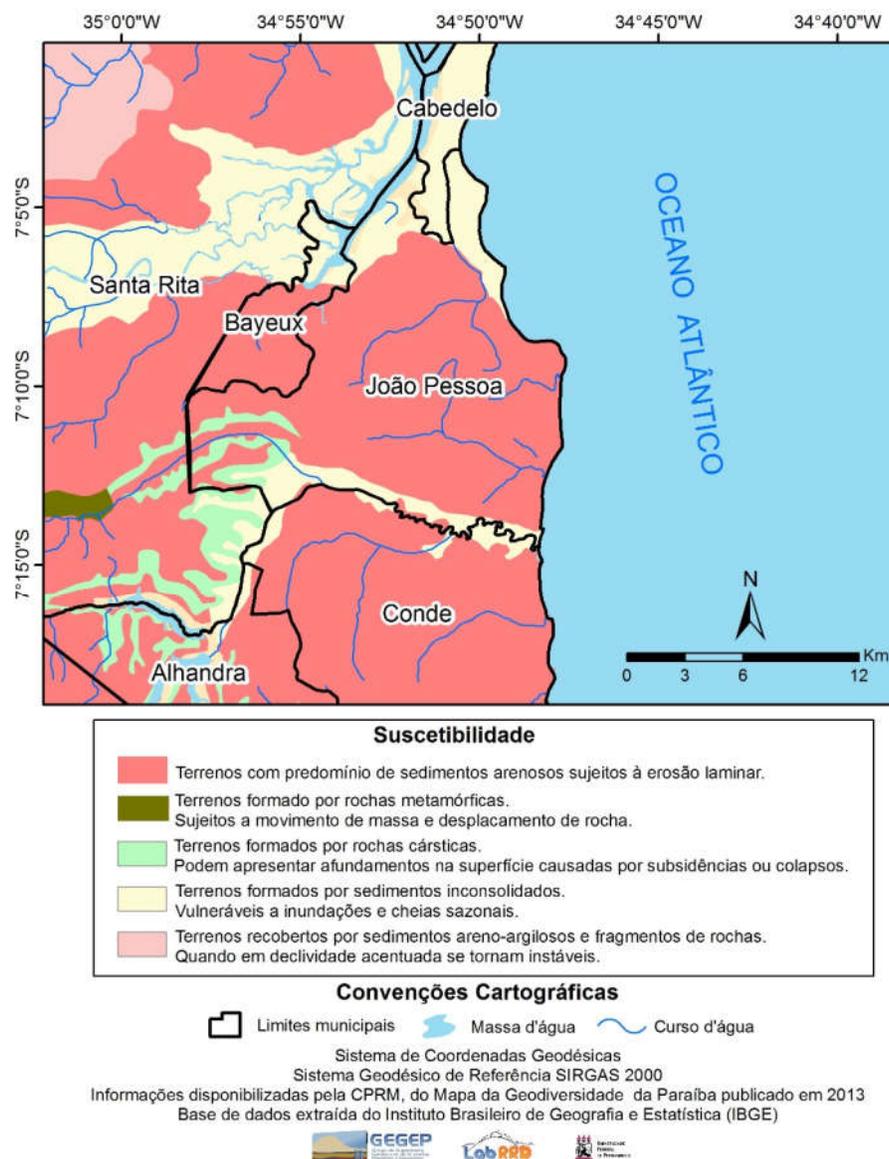


Figura 7 - Mapa de Suscetibilidade de João Pessoa.

Fonte: o autor (2017).

Até o ano de 2010, em João Pessoa, havia 26 áreas, dentre encostas e margens de rios, degradadas por ocupação irregular, susceptíveis a desmoronamentos, deslizamentos e/ou alagamentos. Estimava-se uma população total de 38.145 e 8.163 domicílios nesses pontos de vulnerabilidade.

A Tabela 8 apresenta a distribuição dos números acima citados entre as 26 comunidades e os tipos de risco encontrados nessas áreas.

Tabela 8 - Áreas degradadas por ocupação irregular - encostas e margens de rios.

Nº	Comunidade	População	Domicílios	Tipos de Risco		
				Desmoronamento	Deslizamento	Alagamento
0.1	Saturnino de Brito (Bairro: Trinchiras)	2.100,00	500,00	X	X	
0.2	Santa Clara (Bairro: Castelo Branco)	1.750,00	350,00	X	X	X
0.3	São Rafael (Bairro: Castelo Branco)	1.800,00	345,00	X	X	X
0.4	Tito Silva (Bairro: Miramar)	1.900,00	380,00	X	X	X
0.5	São José (Bairro: São José)	2.000,00	402,00	X	X	X
0.6	São Judas Tadeu (Bairro: Alto do Mateus)	1.030,00	206,00	X	X	
0.7	Boa Esperança (Bairro: Cristo)	5.200,00	1.050,00	X	X	X
0.8	Maria de Nazaré (Bairro: Funcionários II)	2.250,00	500,00	X	X	
0.9	Riacho/Riachinho (Bairro: Jardim 13 de maio)	950,00	210,00	X	X	X
0.10	Chatuba (Bairro: Manaíra)	1.900,00	361,00	X	X	X
0.11	Sta. Emília de Rodath (Bairro: Ilha do Bispo)	1.700,00	400,00	X		X
0.12	Porto do Capim (Bairro: Varadouro)	550,00	130,00	X		X
0.13	Filipéia (Bairro: Tambiá)	205,00	41,00	X	X	
0.14	Beira da Linha (Bairro: Alto do Mateus)	1.400,00	280,00	X		X
0.15	Barreira do Cabo Branco (Bairro: Cabo Branco)	450,00	90,00		X	
0.16	Comunidade "S" (Bairro: Roger)	930,00	193,00	X		X
0.17	Sta. Bárbara (Bairro: Valentina)	1.500,00	300,00	X	X	
0.18	Nova República (Bairro: Geisel)	2.200,00	480,00		X	X
0.19	Arame (Bairro: Grotão)	450,00	100,00	X	X	
0.20	Bananeiras (Bairro: Grotão)	1.100,00	240,00	X	X	
0.21	Porto de João Tota (Bairro: Mandacaru)	2.500,00	600,00		X	X
0.22	Jardim Coqueiral (Bairro: Mandacaru)	3.300,00	760,00	X		X

0.23	Rua Ari Barroso (Bairro: Alto do Mateus)	180,00	45,00	X	X	
0.24	São Geraldo	100,00	25,00	X	X	
0.25	KM-19/ BR-230 (Bairro: Castelo Branco)	340,00	85,00	X	X	
0.26	Renascer - I (Bairro: Distrito Mecânico/Varadouro)	360,00	90,00	X	X	
	TOTAIS	38.145,00	8.163,00	23	21	14

Fonte: Paraíba (2016).

3.2 Bairro Castelo Branco

A seguir será caracterizado o bairro do Castelo Branco, especialmente a área onde foram coletadas amostras indeformadas e realizada uma sondagem, dentro da Comunidade Santa Clara.

3.2.1 Localização

A encosta estudada neste trabalho está localizada na comunidade Santa Clara, um dos 15 setores censitários do bairro Castelo Branco, na cidade de João Pessoa, capital da Paraíba, conforme Figura 8.

O Castelo Branco, um dos 64 bairros da área urbana da capital paraibana, apresenta, segundo o IBGE (2010), uma população de 11.642 habitantes, 1,61% da população pessoense, e uma extensão territorial de 3,7 Km².

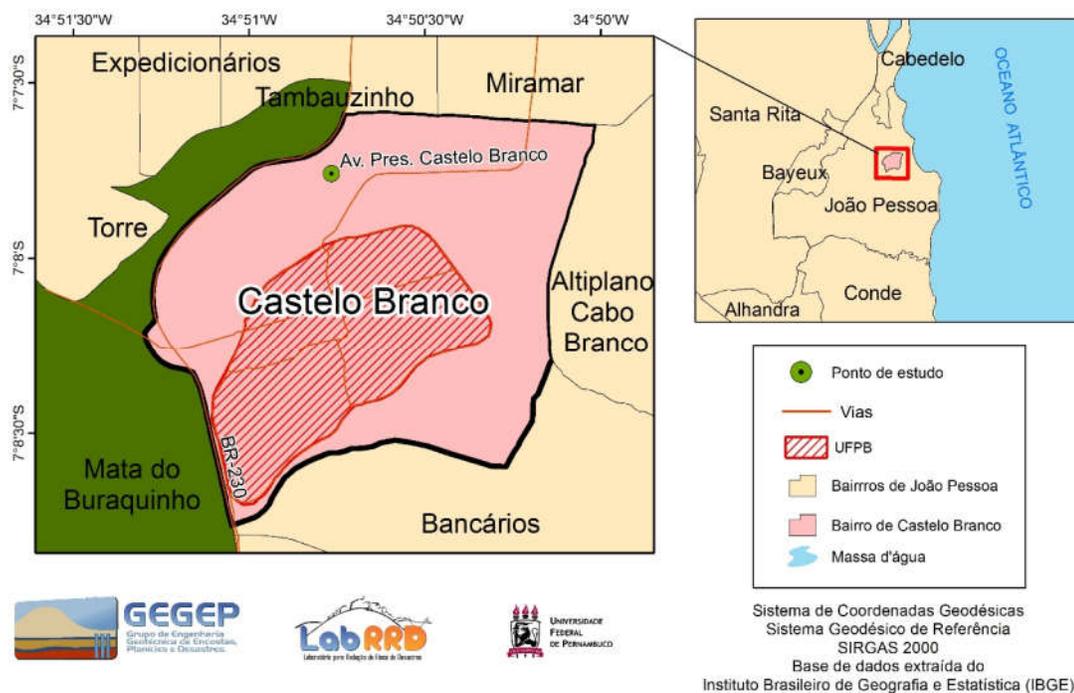


Figura 8 - Localização do bairro Castelo Branco e da encosta estudada.
 Fonte: o autor (2017).

3.2.2 Características Gerais

A comunidade Santa Clara ocupa uma área aproximada de 7,287 ha, segundo dados da Coordenadoria Municipal de Defesa Civil – COMDEC – em João Pessoa (2013), apresentando ocupação espontânea e desordenada.

Com um número aproximado de 350 domicílios, esta comunidade dispõe de uma população média de 1.750 habitantes, conforme dados da COMDEC em João Pessoa (2016).

O início de ocupação da Santa Clara data de 44 anos atrás, com a tomada dos taludes por famílias de baixa renda oriundas de outras cidades e bairros vizinhos, as quais se expandiram para as margens do Rio Jaguaribe, edificando moradias nos topos e sopés das encostas, dando forma a um aglomerado subnormal, com o poder público ausente e habitações carentes, contribuindo para o atual cenário de risco.

A infraestrutura da comunidade é dada por rede de água e elétrica, iluminação pública, coleta de lixo, telefones públicos, drenagem deficiente (apenas uma parte da comunidade é atendida), rede parcial de esgoto (com alguns trechos a céu aberto), e pavimentação com paralelepípedo em apenas três ruas (as principais).

O cenário é bastante vulnerável. A maioria das edificações está em área de grandes inclinações, com riscos de desabamentos por deslizamentos; as ruas são becos estreitos com circulação inadequada para a população; moradias precárias estão localizadas a poucos metros do emissário da rede de água que passa pela região, colocando os moradores em risco pelo rompimento desta adutora.

As edificações, em alvenaria, mistas e em taipa, são de uso fundamentalmente residencial, havendo, ainda, pequenos comércios, e estão situadas em terras de propriedade do Estado e do Município.

A comunidade Santa Clara é, segundo a Tabela 8, a 11ª comunidade mais populosa, entre aquelas localizadas em áreas de risco, abrigando uma população de 1.750 habitantes e 350 domicílios, apresentando, ainda, riscos de desmoronamento, deslizamento e alagamento. Atualmente, segundo dados da COMDEC, 38 desses domicílios estão em áreas com alta susceptibilidade de ocorrência de deslizamentos.

Um mapeamento de áreas de risco realizado por Soares et al. (2015) nesta comunidade, dividiu-a em 29 setores de risco. O mapeamento foi realizado em conformidade com a metodologia sugerida pelo Ministério das Cidades, através de uma análise qualitativa e o zoneamento de risco. A setorização realizada está apresentada na Figura 9. A área R4 apontada nesta figura diz respeito a encosta estudada neste trabalho.



Figura 9 - Setorização da Comunidade Santa Clara.
Fonte: Soares et al (2015).

Cada um dos setores acima foi classificado segundo suas características. Setores de grau muito alto, alto e médio apresentam risco de desmoronamento, primordialmente em virtude da

ação humana, com o lançamento de lixo e águas servidas nas encostas, com a ausência de rede de drenagem, e com a construção indevida de edificações, por exemplo.

Após a setorização da comunidade, observou-se que dentre os 29 setores, 8 (27,6%) apresentaram grau de risco muito alto e alto, 4 (13,8%) foram classificados com risco médio, e 17 (58,6%) são de grau de risco baixo. São aproximadamente 500 habitantes em zona de alto risco, 250 em médio risco e 1050 em baixo risco.

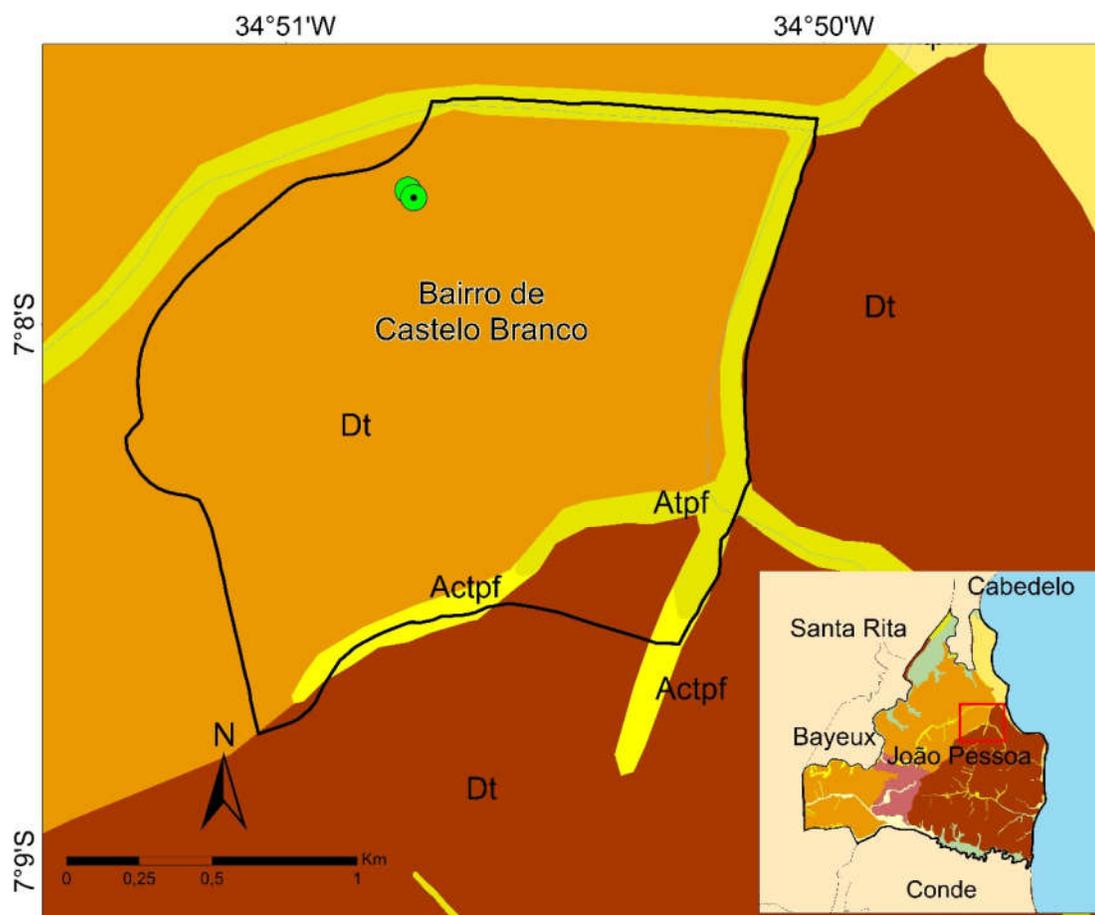
3.2.3 Características Fisiográficas

Localizado na bacia hidrográfica do Rio Paraíba, em uma região na qual o sistema de aquíferos é o Paraíba-Pernambuco, que ocupa, segundo Paraíba (2006), uma área média de 3.400 km² na região litorânea (leste do estado da Paraíba), o Castelo Branco é um bairro firmado sobre os Tabuleiros Litorâneos, em um talude de corte de constituição geomorfológica caracterizada pelos sedimentos mal consolidados da Formação Barreiras, banhado por um trecho do Rio Jaguaribe. A Figura 10 apresenta a geomorfologia encontrada no bairro.

A vegetação dos taludes é do tipo rasteira, apresentando árvores de grande porte.

Segundo o Brasil (2013) a comunidade está inserida na unidade Geoambiental dos Tabuleiros Costeiros, apresentando uma altitude média de 50 a 100 metros, e compreendendo platôs de origem sedimentar, com grau de entalhamento variável, ora com vales estreitos e encostas abruptas, ora abertos com encostas suaves e fundos com amplas várzeas, sendo, o solo, de modo geral, profundos e de baixa fertilidade natural.

A Figura 11 apresenta as curvas de nível da área estudada, bem como a locação dos pontos de coleta de amostras na encosta.



● Pontos de coleta

□ Bairro do Castelo Branco Massa d'água ~ Curso d'água

Tipos de formas de relevo	Morfoescultura	Morfoestrutura
<p>Actpf</p> <p>Atpf</p> <p>Atpm</p>	Baixada litorânea	Sedimentos Quaternários
<p>Dt (Entalhamento médio dos vales)</p> <p>Dt (Entalhamento forte dos vales)</p>	Baixos planaltos costeiros	Cobertura sedimentar de plataforma (Formação Barreiras)

FORMAS DE ACUMULAÇÃO

A - Acumulação
 Atpf - Formas de terraço e planície fluvial
 Atpm - Formas de terraços e planícies marinhas
 Actpf - Formas de colúvio, terraço e planícies fluviais

FORMAS DE DENUDAÇÃO

D - denudação
 Dt - denudação com formas tabulares

Sistema de Cordenadas Geodésicas

Dados de Geomorfologia extraídos da Dissertação de Tamires Barbosa (2015)
 tema Geodésico de Referência SIRGAS 2000 / Base de dados extraída do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)



Figura 10 - Geomorfologia do bairro do Castelo Branco - João Pessoa - PB.

Fonte: o autor (2017).

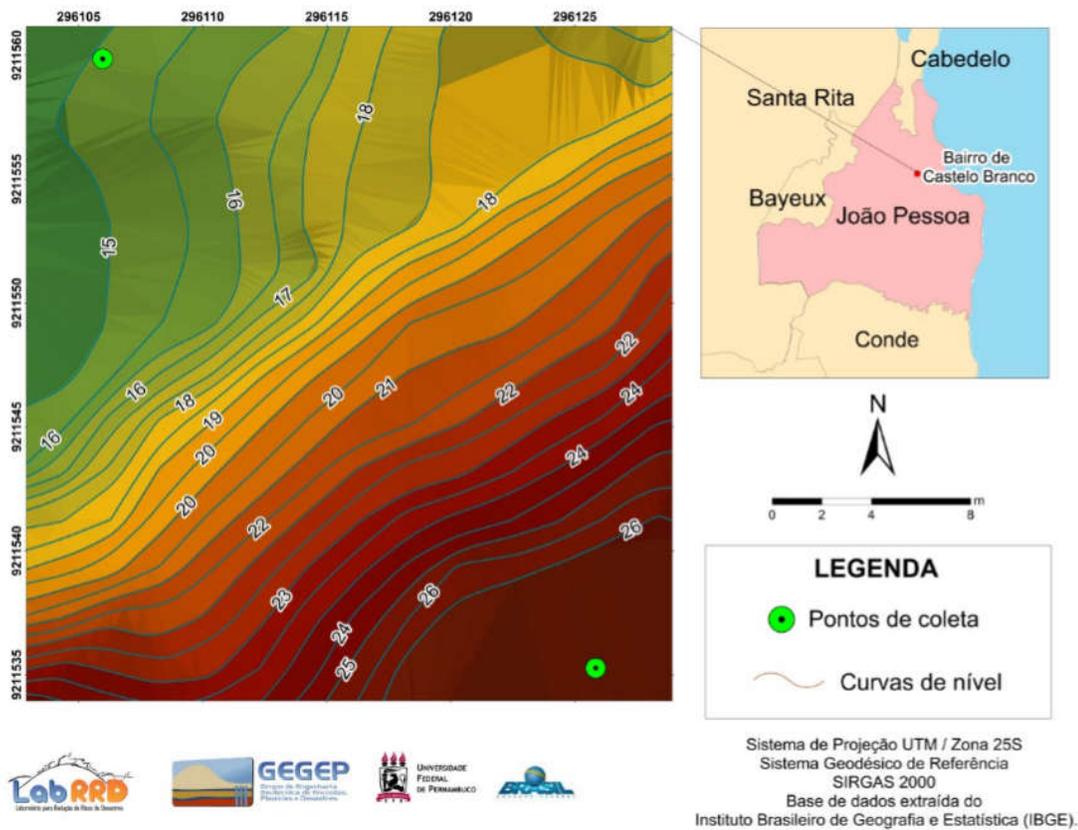


Figura 11 - Curvas de nível do bairro do Castelo Branco em João Pessoa - PB.
Fonte: o autor (2017).

3.2.4 Registros Fotográficos

As imagens a seguir apresentam a realidade atual da encosta em estudo.

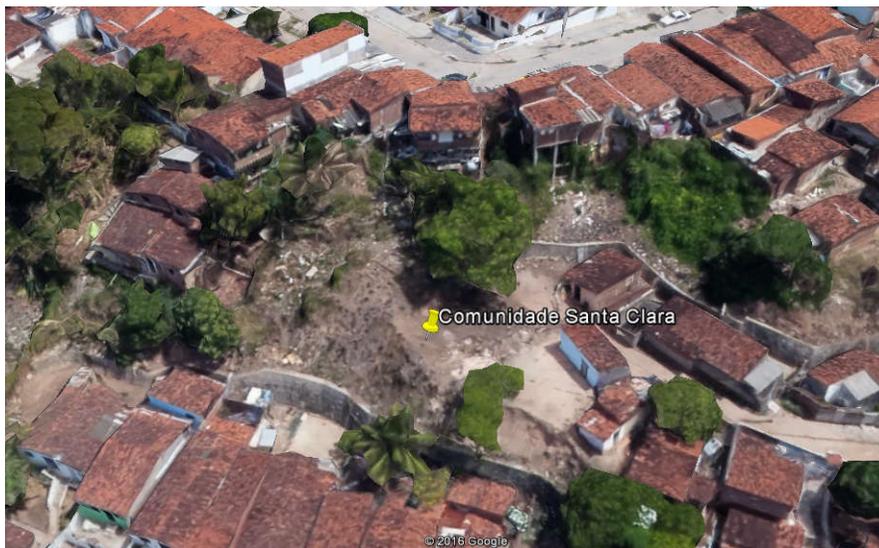


Figura 12 - Imagem aérea da Comunidade Santa Clara.
Fonte: Google Earth. Acesso em 20 de abril de 2016.



Figura 13 - Comunidade vista da BR-230.
Fonte: o autor (2016).



Figura 14 - Topo da Encosta (rua calçada).
Fonte: o autor (2016).



Figura 15 - Visão Geral da Topografia da Comunidade.
Fonte: o autor (2016).



Figura 16 - Sistema de Drenagem da Comunidade (a Céu Aberto) com Recebimento de Águas Servidas.
Fonte: o autor (2017).



Figura 17 - Vista Frontal da Encosta Estudada.
Fonte: o autor (2016).

4 METODOLOGIA E EQUIPAMENTOS

Neste capítulo estão descritos os materiais, equipamentos e métodos utilizados durante esta pesquisa. A pesquisa é de abordagem qualitativa e quantitativa, constituindo-se de um trabalho de campo e de laboratório de natureza exploratória e explicativa que visa a obtenção de parâmetros para a caracterização da Formação Barreiras da cidade de João Pessoa, e a determinação de parâmetros geotécnicos de uma encosta com alta classificação de risco.

4.1 Estrutura da pesquisa

As principais etapas da pesquisa estão esquematizadas a seguir.

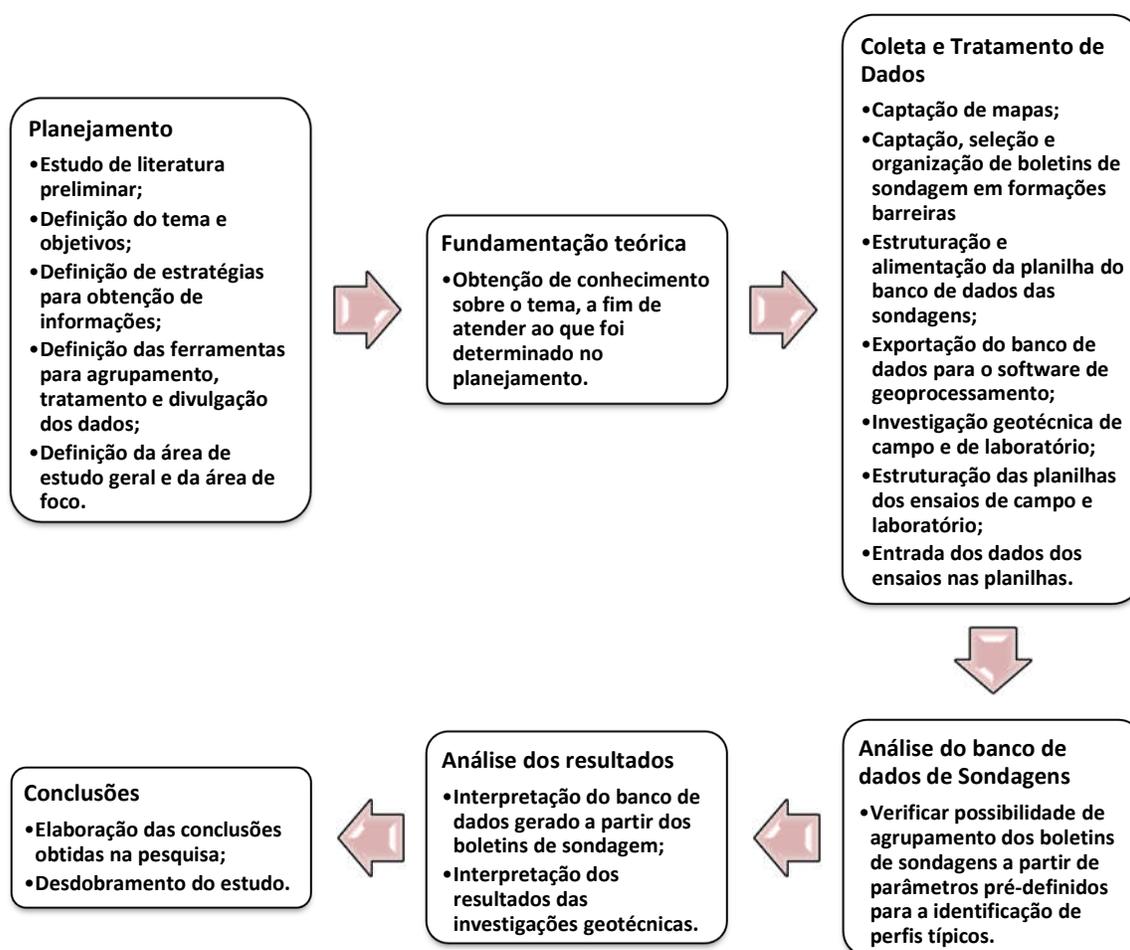


Figura 18 - Metodologia da pesquisa.
Fonte: o autor (2016).

4.2 Planejamento e fundamentos teóricos

Nesta etapa da pesquisa foram desenvolvidas atividades que orientassem o trabalho. Um estudo teórico preliminar foi realizado, a fim de que o tema fosse definido, bem como os objetivos traçados.

Em virtude da natureza do trabalho, que requeria a coleta de dados diversos, foram definidas, ainda nesta etapa, a área de estudo e as estratégias para a obtenção das informações necessárias. O município de João Pessoa (PB) foi escolhido pela possibilidade de acesso a boletins de sondagem à percussão na região e pela facilidade de acesso a pontos de coleta de amostras e ensaios. O foco dado à uma comunidade do bairro Castelo Branco foi determinado por questões sociais, uma vez que a área é de alto risco.

As estratégias para a coleta de informações foram:

- Estabelecimento de comunicação direta com a diretoria da Coordenadoria Municipal de Defesa Civil (COMDEC), que cedeu informações sobre as áreas de risco da cidade e acompanhou a sondagem e as coletas de amostra realizadas, garantindo acesso seguro à comunidade;
- Contato com Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) – que forneceu informações técnicas sobre as formações barreiras, através de relatórios;
- Comunicação com a Secretaria do Meio Ambiente de João Pessoa (SEMAM), que cedeu o mapa de pedologia em formato compatível com o programa ArcGIS®, e com a Secretaria de Planejamento de João Pessoa (SEPLAN), que disponibilizou as curvas de nível da cidade; e
- Parceria com a empresa Engeobase Engenharia de Fundações LTDA, que colaborou com a realização de uma sondagem à percussão na comunidade Santa Clara e com o fornecimento de outros 20 boletins de sondagem de João Pessoa, e com a empresa Coneresolo Consultoria em Concreto e Solos LTDA, que cedeu 49 boletins de sondagem à percussão realizados na cidade.

Finalmente, foram definidas as ferramentas para agrupamento, tratamento e divulgação dos dados. O agrupamento e o tratamento das informações obtidas através da análise das sondagens e o tratamento dos dados determinados nas investigações geotécnicas foram feitos através do software Microsoft Excel, tendo em vista a simplicidade de exportação dos dados deste programa para outros. Quanto a divulgação dos resultados, ela foi feita através de gráficos gerados no Excel®, imagens criadas no AutoCAD® e de mapas criados no SIG ArcGIS®, software que agrega funções de gerenciamento e análise de uma base de dados de natureza

espacial, característica das variáveis geotécnicas estudadas, e que foi utilizado por facilidade de acesso.

Após o planejamento, teve início a fase destinada à consolidação do conhecimento técnico teórico sobre os temas envolvidos nesta pesquisa. Esta etapa do trabalho foi sintetizada no Capítulo 2.

4.3 Coleta e tratamento de dados

A etapa de coleta e tratamento de dados envolveu diversas etapas, estando elas descritas na sequência.

4.3.1 Mapas e Cartas

O mapa político-administrativo de João Pessoa foi obtido no site do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), através do canal de mapas, que disponibiliza uma grande diversidade de mapas em formato compatível com o ArcGIS®. Este mapa data de 2010.

A carta topográfica da cidade de João Pessoa foi cedida pela Secretaria de Planejamento. Foi disponibilizado um arquivo em formato compatível com o ArcGIS®, datado de 2011, apresentando um desnível de um metro entre as curvas de nível.

O mapa geomorfológico utilizado neste trabalho foi o proposto por Barbosa (2015) para a cidade de João Pessoa. O arquivo em formato compatível com o ArcGis® foi cedido pela própria autora.

Outros mapas e cartas temáticas, necessários à caracterização do município de João Pessoa, são de domínio público e foram obtidos nos sites de importantes entidades, tais quais:

- IBGE: Vegetação e Clima;
- CPRM: Altimetria, Revelo e Risco Geológico;
- AESA: Sistemas Aquíferos e Bacias Hidrográficas.

4.3.2 Captação, Seleção e Organização de Boletins de Sondagem em Formações Barreiras

A captação, seleção e organização dos boletins de sondagens foram realizadas em João Pessoa-PB. Os boletins foram cedidos pelas empresas Engeobase e Coneresolo, atuantes na área de investigações geotécnicas na cidade de João Pessoa – PB.

Às empresas, foram solicitadas sondagens realizadas nos bairros localizados sobre a Formação Barreiras, conforme mapa geomorfológico de João Pessoa fornecido por Barbosa (2015). Ambas realizam as sondagens segundo as normas vigentes da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), tais quais: NBR 9603 (1986) – Sondagem a Trado; NBR 6484 (2001) – Solos: Sondagem de Simples Reconhecimento com SPT – Método de Ensaio; e NBR 6502 – Rochas e Solos: Terminologia; NBR 13441 – Rochas e Solos: Simbologia.

Cada furo de sondagem é nivelado em relação à referência de nível (RN) utilizada, com cota arbitrada de 0,0 m. Para cada furo é apresentado, no relatório de sondagem, um perfil, contendo as seguintes informações: tipos de solo, suas características (cor, compacidade e granulometria) e suas respectivas profundidades de ocorrência; posição do nível d'água, quando este é encontrado durante o ensaio; índices de resistência à penetração (N_{SPT}) a cada metro; cota do furo em relação ao RN adotado; obra associada; endereço do local onde o furo foi realizado, com nome da rua, número do terreno e bairro; data da realização da sondagem; cota da boca do furo; e profundidade do impenetrável ou limite de sondagem.

Obtiveram-se 69 boletins de sondagem com as empresas, e um outro boletim foi resultado de um ensaio SPT realizado na área de estudo, totalizando 70 boletins de sondagem, os quais foram agrupados com base nas características mais argilosas ou arenosas dos solos, e nos comportamentos crescentes ou variáveis dos gráficos de penetração.

Na classificação realizada, solos classificados nos boletins de sondagem como “siltes argilosos” foram considerados solos argilosos, e aqueles classificados como “siltes arenosos”, foram considerados solos arenosos, simplesmente.

Perfis representativos das categorias definidas estão apresentados no anexo deste trabalho – sendo um perfil para cada categoria –, tendo sido escolhidos por corresponderem, graficamente, à uma média dos perfis que compõem cada categoria.

4.3.3 Estruturação e Alimentação das Planilhas do Banco de Dados das Sondagens

Para a captura e armazenamento dos dados fornecidos nos boletins de sondagem foi estruturada uma tabela, no programa Microsoft Excel, em função das informações disponíveis.

À cada furo de sondagem foi associado um número de ordem (de 1 a 70, sendo o perfil de número 15, aquele obtido no ensaio SPT realizado na encosta), e os dados apresentados para cada furo foram: coordenadas x e y de cada ponto; empresa responsável pelo ensaio; nível de água; data de realização do ensaio; bairro de localização; compartimentação geológica na qual o ponto está inserido; profundidade do topo e base das camadas de solo; características das

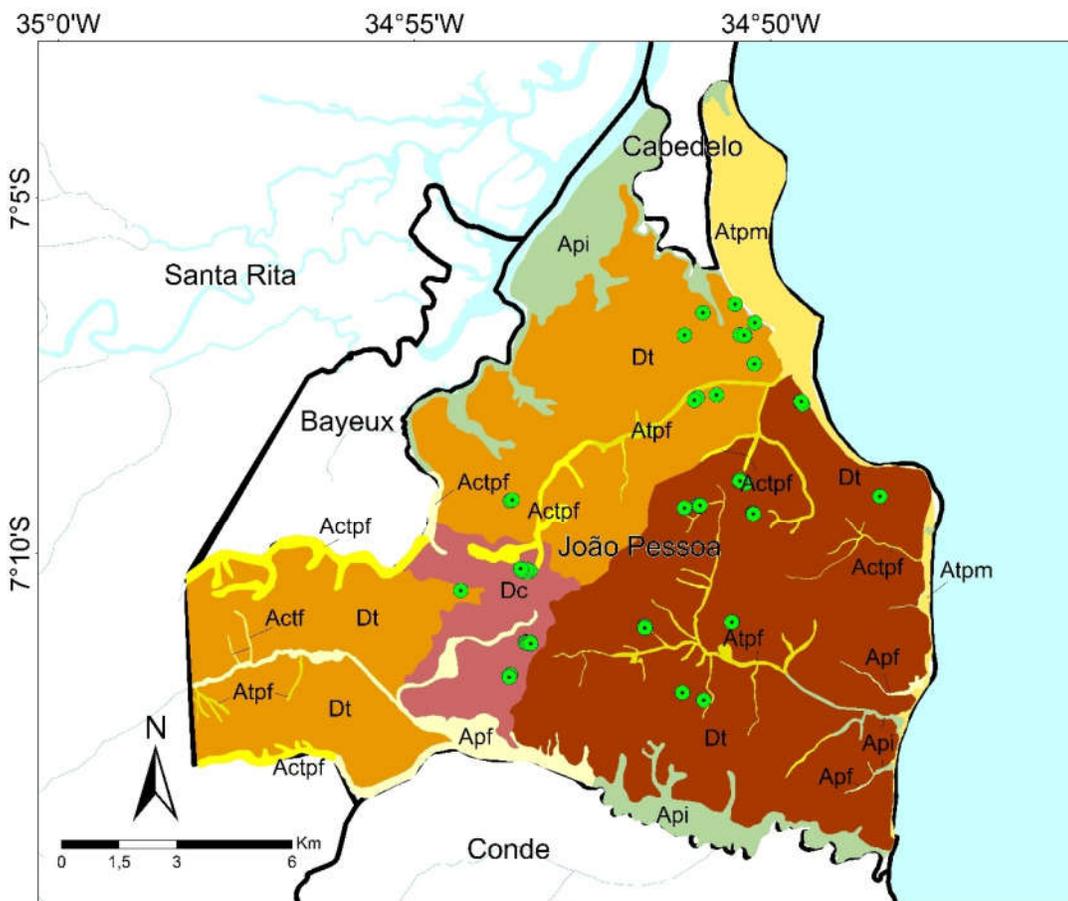
amostras de solo (cor, compactidade e granulometria); valores do índice de resistência à penetração N_{SPT} nos topos e bases das camadas de solo, bem como o seu valor médio; e a profundidade do impenetrável ou limite de sondagem.

A configuração da tabela é bastante simples: a primeira linha contém os títulos dos atributos que serão extraídos de cada boletim de sondagem, e as linhas subsequentes apresentam as informações, sendo que cada linha corresponde a um boletim de sondagem.

Concluída a elaboração da planilha, seu preenchimento foi necessário. Devido à ausência de coordenadas georreferenciadas nos boletins de sondagem, os furos foram localizados a partir das informações apresentadas nos croquis existentes (nome da rua, número de lote, bairro, etc.). A localização dos furos foi realizada com o auxílio do software Google Earth versão 7.3.0, e suas coordenadas x e y foram obtidas.

Foi possível localizar todos os 70 furos de sondagem recebidos da Engeobase e da Coneresolo, sendo uma média de 3 furos por lote de terreno. A Figura 19 apresenta a locação dos boletins de sondagens sobre o mapa geomorfológico de João Pessoa (que também apresenta a geologia da cidade) e a Figura 20 apresenta a distribuição destes nos bairros da cidade. É importante observar que todos os 70 furos foram inseridos no gráfico, no entanto, devido à proximidade entre alguns deles e a escala do mapa, houveram algumas superposições.

A tabela elaborada e preenchida foi, posteriormente, vinculada ao programa ArcGis, tornando-se uma planilha de atributos, através da qual foi possível o agrupamento, isolamento, e extração de diversas informações espaciais a partir das ferramentas do SIG.



● Sondagens

Tipos de formas de relevo	Morfoescultura	Morfoestrutura
<ul style="list-style-type: none"> Actf Actpf Apf Api Atpf Atpm Dc Dt (Entalhamento médio dos vales) Dt (Entalhamento forte dos vales) 	<p>Baixada litorânea</p> <p>Baixos planaltos costeiros</p>	<p>Sedimentos Quaternários</p> <p>Cobertura sedimentar de plataforma (Formação Barreiras)</p>

FORMAS DE ACUMULAÇÃO
<p>A - Acumulação</p> <p>Atpf - Formas de terraço e planície fluvial</p> <p>Api - Formas de planícies intermareais</p> <p>Apf - Formas de planícies fluviais</p> <p>Atpm - Formas de terraços e planícies marinhas</p> <p>Actpf - Formas de colúvio, terraço e planícies fluviais</p> <p>Actf - Formas de colúvio e terraços fluviais</p>
FORMAS DE DENUDAÇÃO
<p>D - denudação</p> <p>Dt - denudação com formas tabulares</p> <p>Dc - denudação com formas convexas</p>

— LIMITES MUNICIPAIS Massa d'água Curso d'água

Sistema de Cordenadas Geodésicas

Dados de Geomorfologia extraídos da Dissertação de Tamires Barbosa (2015)

Sistema Geodésico de Referência SIRGAS 2000 / Base de dados extraída do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)



Figura 19 - Locação dos boletins de sondagens sobre o mapa geomorfológico de João Pessoa-PB. Fonte: o autor (2017).

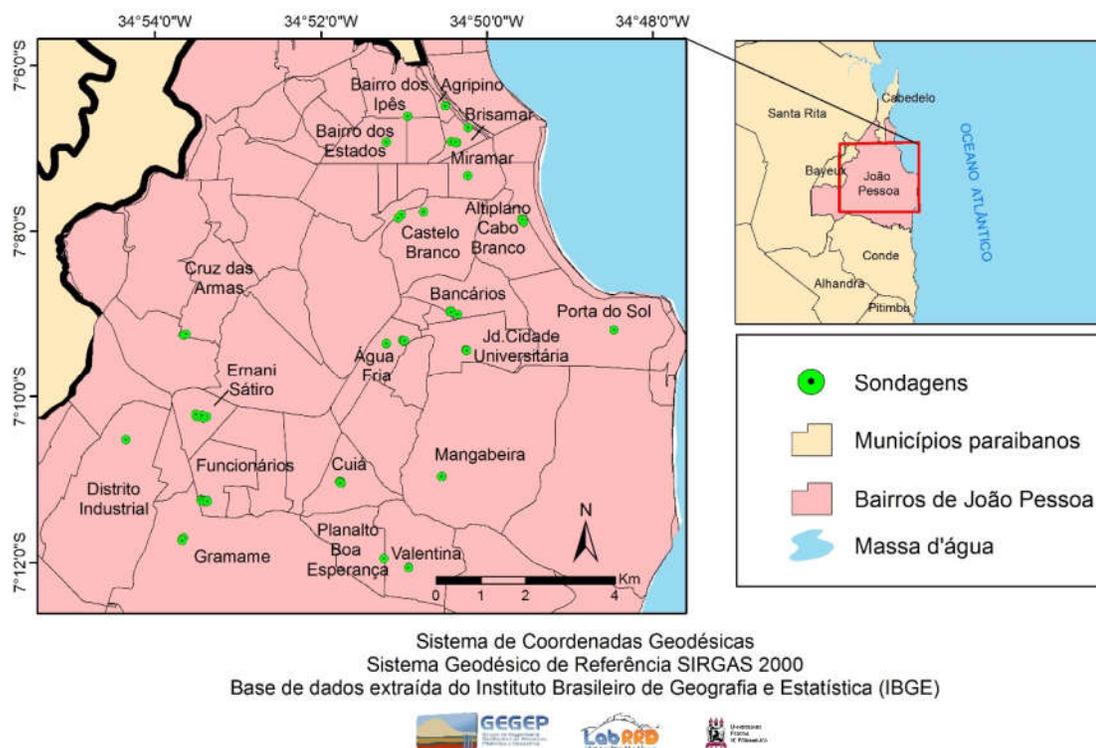


Figura 20 - Distribuição dos Boletins de Sondagem na Área de Estudo.
Fonte: o autor (2017).

4.3.4 Exportação do Banco de Dados Para o Software de Geoprocessamento;

A planilha com o banco de dados das sondagens foi exportada para o ArcGis e sobreposta aos demais mapas obtidos, com o cuidado de que todos os mapas estivessem no mesmo sistema de coordenadas geográficas.

Desta forma, os boletins de sondagem foram distribuídos espacialmente conforme suas coordenadas x e y, permitindo a determinação das características que cada mapa apresentava para cada ponto.

O tratamento dos dados foi realizado pontualmente, uma vez que o número de sondagens é pequeno quando comparado à área de estudo, e suas distribuições bastante modestas. A realização de interpolações para a delimitação de áreas ou zonas características, apesar de possível, não era recomendada pelos motivos mencionados, pois resultaria em informações pouco confiáveis.

4.3.5 Investigação Geotécnica de Campo

Em campo, a topografia e a ocupação da encosta foram observadas, foi realizada uma sondagem à percussão e foram retiradas amostras deformadas e indeformadas de solo.

4.3.5.1 Sondagem de Simples Reconhecimento

A sondagem de simples reconhecimento do solo foi realizada em 23 de setembro de 2016 pela Engeobase Engenharia de Fundações LTDA, que utilizou o Standard Penetration Test (SPT) como ferramenta de investigação do perfil geotécnico e da resistência à penetração do amostrador padrão (N_{SPT}) no topo da encosta (furo S1), conforme Figura 21.

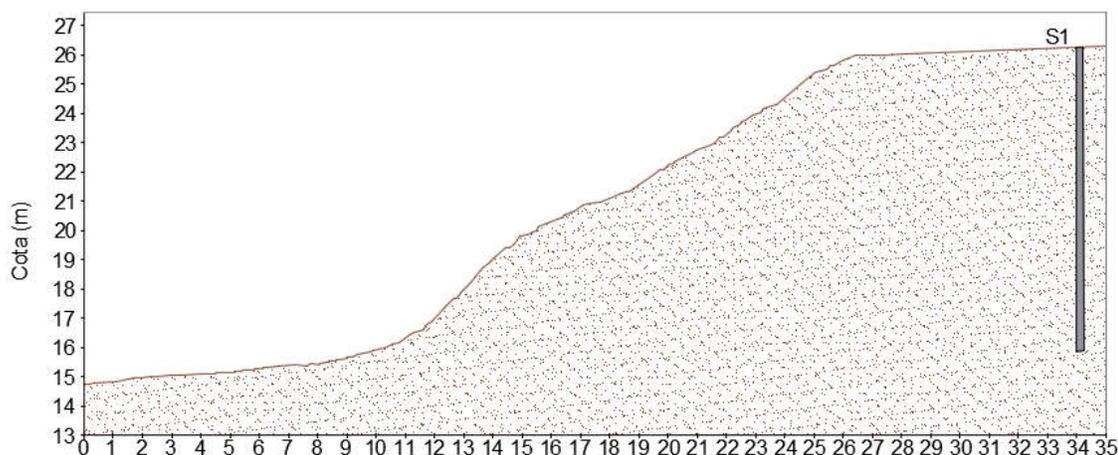


Figura 21 - Localização da sondagem S1 no topo da encosta.

Fonte: O autor.

A execução da sondagem seguiu as determinações da norma NBR 6484 (ABNT, 2001) - Solos: Sondagem de Simples Reconhecimento com SPT – Método de Ensaio.

Ao longo do ensaio, a cada um metro de profundidade, uma amostra de solo era retirada do amostrador, armazenada em cápsulas metálicas com tampa, numerada, identificada segundo a profundidade, e colocada em uma caixa térmica. A cada duas horas as amostras eram levadas para o Laboratório de Geotecnia e Pavimentação (LAPAV) da Universidade Federal da Paraíba. No LAPAV as cápsulas com as amostras úmidas foram pesadas, obtendo-se a massa bruta úmida (m_{bu}), e posteriormente colocadas, sem tampas, em uma estufa elétrica à temperatura constante de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 24h. No dia seguinte, as amostras secas foram pesadas, com tampas, e a massa bruta seca (m_{bs}) foi obtida para cada amostra. Finalizada a pesagem, as amostras foram descartadas e as cápsulas, com suas respectivas tampas, foram pesadas, limpas e secas, para a obtenção da tara do recipiente (m).

Finalmente, a umidade foi determinada, conforme norma rodoviária DNER-ME 213/94:

$$h = \frac{m_{bu} - m_{bs}}{m_{bs} - m} \times 100 \quad (\text{Equação 4.1})$$

4.3.5.2 Retirada de Amostras

As amostras deformadas e indeformadas foram retiradas no topo e na base da encosta. As amostragens na base e no topo ocorreram em 21 de setembro de 2016 (mês com pluviosidade de 60 mm, segundo Figura 5) e 30 de novembro de 2016 (mês mais seco do ano, de acordo com a Figura 5, com pluviosidade de 38 mm), respectivamente.

A retirada das amostras procedeu conforme preconiza a norma NBR 9604 (ABNT, 2016) – Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas – Procedimento.

Os poços de investigação eram quadrados, tendo, o PI1 (base da encosta) e o PI2 (topo da encosta), 1,50 m e 1,00 m de lado, respectivamente. Foram escavados com pá e picareta com profundidade de 1,30m. Foram tomados os devidos cuidados para que a área destinada à moldagem dos blocos não fosse pisoteada.



Figura 22 - Escavação do PI1.
Fonte: o autor (2016).



Figura 23 - PI1.
Fonte: o autor (2016).



Figura 24 - Escavação do PI2.
Fonte: o autor (2016).

A seção do PI1 (base da encosta) permitiu a moldagem de três blocos cúbicos de amostra com aresta de 0,30 m (BL1, BL2 e BL3), enquanto que a do PI2 (topo da encosta), devido a limitação da área disponível para escavação, permitiu a moldagem de apenas um bloco (BL4) com as mesmas dimensões.

A cota de topo de BL1, BL2 e BL 4 foi de 1,00m, enquanto que a de BL 3 foi de 0,80 m. A Figura 25 posiciona as amostras no perfil do solo traçado entre PI1 e PI2.

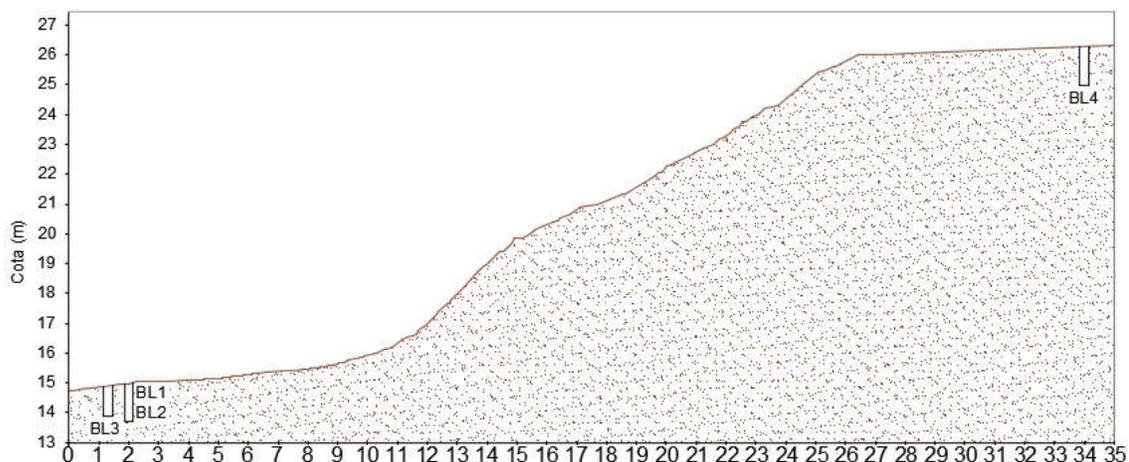


Figura 25 - Localização das Amostras Indeformadas no Perfil da Encosta.
Fonte: o autor (2017).

Ao alcançar 0,10 m acima da cota da face superior dos blocos, as escavações foram mais cuidadosas, tendo sido realizadas com colher de pedreiro. Atingidas as cotas de topo dos blocos, iniciaram-se suas talhagens laterais, com faca de cortar frios, até 0,30 m e 0,10 m abaixo de suas bases, sem, no entanto, seccioná-los.

Os topos dos blocos foram identificados com a letra T e as faces expostas foram envolvidas por papel alumínio, sobre o qual se colocou uma talagarça com tramas de 2 mm x 2 mm e uma camada generosa de parafina líquida. Sobre BL1, BL2 e BL3 foram feitas cinco camadas de talagarça e parafina, uma vez que esses blocos apresentavam baixa coesão aparente, enquanto que sobre BL4, devido à maior coesão aparente do solo, foram feitas apenas 3 camadas.



Figura 26 - BL1 Envolto por Papel Alumínio.
Fonte: o autor (2016).



Figura 27 - Aplicação de Talagarça e Parafina sobre BL1.
Fonte: o autor (2016).

Sobre o topo dos blocos, anteriormente à aplicação última camada de parafina, foram colocadas etiquetas identificadoras do topo e da amostra (local, identificação do poço, número da amostra, orientação, profundidade do topo e base, data da amostragem e responsável pela coleta).

Após o procedimento descrito, as bases dos blocos foram seccionadas com o auxílio de um fio de arame de aço e de serrote para madeira, e tombados sobre um colchão fofo de solo proveniente da própria escavação. As faces das bases foram regularizadas até os 0,30 m previstos e cobertas por camadas de talagarça e parafina, conforme as outras faces dos blocos.

Por fim, os blocos foram levados à superfície do terreno, onde foram colocados no interior de caixas cúbicas de madeirite, com lados de 0,36 m, e fundos cobertos camadas de 0,03 m de serragem úmida (que também preencheu os espaços remanescentes entre as amostras e as caixas).

As mesmas etiquetas identificadoras do topo e da amostra afixadas sobre os topos dos blocos foram colocadas nos lados das caixas correspondentes aos topos das amostras.

As amostras deformadas PI1A1, PI1A2, e PI2A1 foram coletadas das profundidades de coleta dos blocos BL2, BL3 e BL4, respectivamente.

Os cuidados no acondicionamento e transporte das amostras se processaram em conformidade com o que preconiza a norma NBR 9604 (ABNT, 2016). As amostras foram encaminhadas para o Laboratório de Solos e Instrumentação da UFPE.

Além dos dois poços de visita escavados, outros dois foram iniciados: um no meio da encosta (tentativa 1) e outro mais próximo à base (tentativa 2), conforme Figura 28, mas, após 0,60 m e 0,80 m de escavação, respectivamente, ainda não se via solo natural, apenas aterro (resíduos de construções/demolições e lixo misturados e recobertos por um solo escuro, diferente do que se observava no talude e do que se encontrou nos poços de investigação) . Desta forma, as escavações foram abandonadas, uma vez que aprofundá-las poderia comprometer ainda mais a estabilidade da encosta, e as edificações locadas no topo e na base dela.

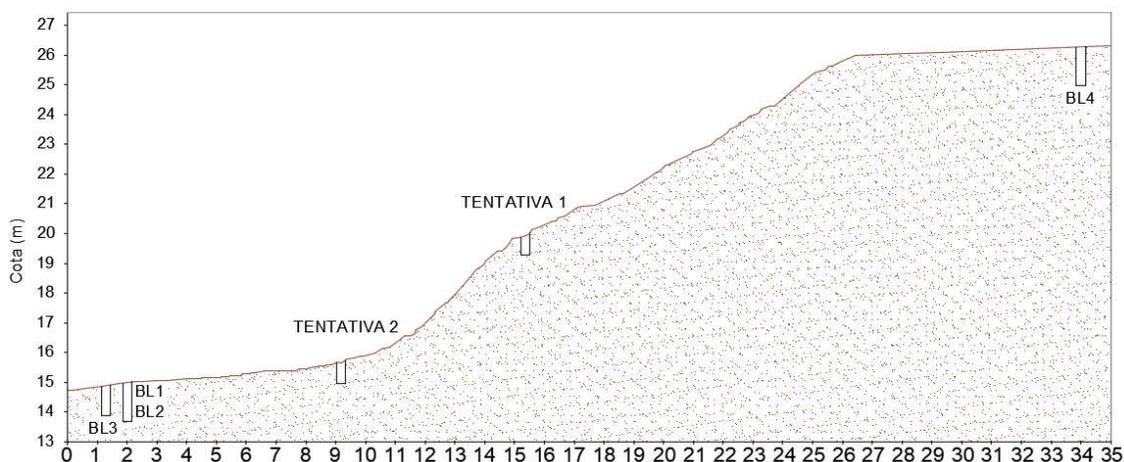


Figura 28 - Locação das escavações abandonadas durante a coleta de amostras.
Fonte: o autor (2017).

Das amostras indeformadas coletadas, o BL1 foi inutilizado por apresentar características visualmente semelhantes ao do BL2, e ter sido coletado no mesmo poço e em cota semelhante a este bloco.

4.3.6 Investigação Geotécnica de Laboratório

O programa de investigação geotécnica de laboratório abrangeu ensaios de caracterização física, condutividade hidráulica, ensaios edométricos e de cisalhamento direto. Os ensaios foram desenvolvidos no Laboratório de Solos e Instrumentação, da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE.

4.3.6.1 Caracterização Física do Solo

Objetivando caracterizar fisicamente o solo da encosta, realizaram-se ensaios de granulometria com e sem defloculante e de limites de consistência.

As amostras utilizadas nos ensaios foram as deformadas: P11A1 e P11A2, da base da encosta, e P12A1 do topo da encosta.

Todos os ensaios foram realizados em conformidade com as normas técnicas vigentes, quais sejam:

- NBR 6457/2016 – Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização;
- NBR 7181/2016 – Solo – análise granulométrica;



Figura 29 - Ensaio de sedimentação.

Fonte: o autor (2016).

- NBR 6508/1984 – Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica;
- NBR 6459/2016 – Solo – Determinação de limite de liquidez (Figura 30);
- NBR 7180/2016 – Solo – Determinação do limite de plasticidade;



Figura 30 - Determinação de limites de consistência.
Fonte: o autor (2016).

4.3.6.2 Ensaio Edométrico

Para determinar e avaliar parâmetros de deformabilidade devido ao colapso dos solos da encosta com diferentes condições de umidade, foram realizados ensaios edométricos duplos.

As prensas edométricas utilizadas foram do tipo Bishop, fabricadas pela Ronald Top S.A., do tipo convencional, com sistema de cargas através de pesos em pendural, com relação de braço 1:10 e células edométricas do tipo anel fixo, e estão apresentadas na Figura 31. As leituras das deformações foram realizadas através de extensômetros com sensibilidade de 0,01 mm, fabricados por Mitutoyo.



Figura 31 - Prensas edométricas do tipo Bishop.
Fonte: o autor (2016).

As amostras foram moldadas a partir dos blocos indeformados, com auxílio de espátulas e utilização de anéis rígidos metálicos de 87,4 mm de diâmetro e 20 mm de altura, conforme

observa-se na Figura 32. As sobras do material foram utilizadas na determinação das umidades iniciais das amostras.



Figura 32 - Moldagem dos corpos de prova.
Fonte: o autor (2016).

Foram moldadas, em cada um dos blocos BL2, BL3 e BL4, duas amostras: uma para ser ensaiada na condição natural e outra na condição inundada. Elas foram designadas conforme apresentado na

Tabela 9.

Tabela 9 - Designação de Amostras Para Ensaio Edométrico.

Amostra	Bloco de Origem	Condição de Ensaio
E2N	BL2 (base)	Natural
E2I		Inundada
E3N	BL3 (base)	Natural
E3I		Inundada
E4N	BL4 (topo)	Natural
E4I		Inundada

Fonte: o autor (2016).

A montagem de cada célula de adensamento consistiu em colocar na base do equipamento um conjunto composto de pedra porosa e papel filtro, em cima e abaixo do corpo de prova. Sobre o conjunto, coloca-se um colarinho metálico para que as tensões sejam uniformemente distribuídas, e acima dele, um outro papel filtro.

A base do equipamento é tampada, suas bases superior e inferior são fixadas por parafusos, e a mangueira do equipamento é inserida. Neste momento, no caso de amostra inundada (E2I, E3I e E4I), o corpo de prova começa a ser saturado e a base do equipamento é envolvida com plástico para que a perda de umidade seja mínima, conforme realizado por Ferreira, 1995.

Posteriormente, a prensa do equipamento é nivelada com o auxílio do contrapeso inserido na parte traseira do equipamento, o braço de alavanca é regulado com parafuso, e a base do equipamento e o corpo de prova são encaixados na prensa edométrica.

O parafuso é regulado até que o mesmo toque na célula, o deflectômetro é ajustado para que as leituras possam ser obtidas no decorrer do ensaio.

Uma tensão inicial foi aplicada aos sistemas para o assentamento e leitura inicial dos processos de deformação, no entanto, os recalques decorrentes desta tensão não foram considerados nos cálculos das deformações, mas sim atribuídos à acomodação do sistema.

Foi iniciada, na sequência, a fase de carregamento axial, como na Figura 33, nas amostras em estado natural (E2N, E3N e E4N) com cargas que aumentavam na medida em que as deformações se estabilizavam. As amostras a serem ensaiadas inundadas ficaram imersas em água destilada durante 24h, a fim de que fossem volumetricamente estabilizadas, e, passadas estas horas, foram carregadas até a estabilização das deformações, nas mesmas tensões das amostras naturais.



Figura 33 - Prensa edométrica carregada.
Fonte: o autor (2016).

As tensões verticais de carregamento foram: 2,5, 5, 10, 20, 40, 80, 160, 320, 640 e 1280 kPa, com exceção das amostras E4N e E4I que não foram submetidas à tensão de 2,5 kPa e

descarregamento de 640, 160 e 40 kPa. Durante o carregamento, realizaram-se leituras das deformações no deflectômetro em intervalos de tempo de 0, 9, 15, 30 segundos, 1, 2, 4, 8, 15, 30, 60, 120 e 480 minutos, e esperou-se até a estabilização das deformações (aproximadamente 24h).

Ao fim de cada ensaio, as células foram drenadas, desmontadas, pesadas para a determinação de seus teores de umidade.

4.3.6.3 Permeabilidade – TRI-FLEX II

As condutividades hidráulicas das amostras foram determinadas com a utilização do permeâmetro de parede flexível modelo tri-flex II (Figura 34), que permite simular o ensaio de permeabilidade com diferentes pressões.



Figura 34 - Tri-flex II.
Fonte: o autor (2016).

Foram realizados três ensaios com corpos de prova cilíndricos moldados a partir das amostras indeformadas BL2, BL3 e BL4, denominados, respectivamente, de CPP2, CPP3 e CPP4. A Tabela 10 apresenta as dimensões desses blocos e a Figura 35 apresenta um corpo de prova moldado.

Tabela 10 - Dimensões dos Corpos de Prova.

Corpo de Prova	Altura (m)	Diâmetro (m)
CPP2 (base)	0,12	0,096
CPP3 (base)	0,12	0,098
CPP4 (topo)	0,115	0,098

Fonte: o autor (2016).



Figura 35 - Corpo de Prova Moldado.
Fonte: o autor (2016).

Após a moldagem dos corpos de prova, foram montadas as células de ensaio, na ordem: pedra porosa e papel filtro na base, corpo de prova, papel filtro e pedra porosa no topo, tampa acrílica “top cap” e membrana de proteção. A Figura 36 ilustra a montagem de uma célula.



Figura 36 - Montagem da Célula de Ensaio.
Fonte: o autor (2016).

Os encamisamentos dos corpos de prova foram feitos com o auxílio de um tubo de PVC com diâmetro maior que o das amostras (Figura 37), e a membrana de proteção foi fixada aos corpos de prova por ligas de borracha (Figura 38), garantindo, assim, que não houvesse contato entre a água e as faces dos corpos de prova.

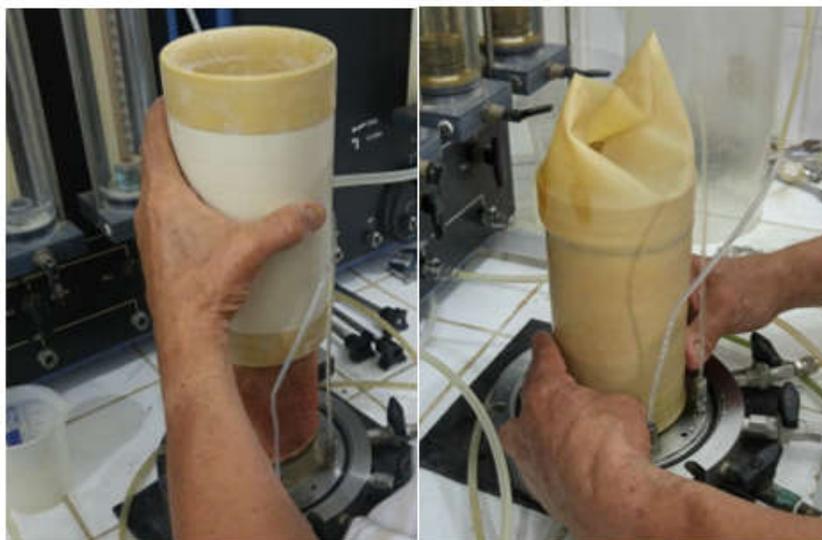


Figura 37 - Encamisamento do Corpo de Prova.
Fonte: o autor (2016).



Figura 38 - Fixação da Membrana com Ligas de Borracha.
Fonte: o autor (2016).

Após o encamisamento, as mangueiras de drenagem foram conectadas à tampa de acrílico e vedadas com silicone (Figura 39). A célula foi, então, fechada, conectada ao painel de controle, e preenchida com água (Figura 40).



Figura 39 - Conexão das Mangueiras de Drenagem ao "Top Cap".
Fonte: o autor (2016).



Figura 40 - Célula de Ensaio Finalizada.
Fonte: o autor (2016).

Após as montagens das células verificou-se a existência de bolhas de ar nas mangueiras de drenagem e estas foram eliminadas a partir da saturação do corpo de prova. Aplicou-se uma pressão lateral, mantendo as pressões de base e topo com valores iguais e inferiores à pressão lateral, e drenou-se os sistemas com água destilada até que as bolhas de ar fossem completamente removidas. Passadas 24 horas desde a montagem dos sistemas e aplicação das pressões confinantes, verificou-se a saturação dos corpos de prova, partindo da premissa de

que, sob pressão lateral constante, ao atingir a saturação, o volume de água que entra pela base da amostra é igual àquele que sai pelo topo.

Confirmado a saturação dos blocos, os ensaios de permeabilidade tiveram início. Para cada amostra, as válvulas de pressão de topo e base foram inicialmente fechadas, um fluxo constante e ascendente de água foi induzido por uma diferença de pressão entre a base e o topo, e as válvulas de topo e base foram reabertas. Anotaram-se, então, os tempos necessários para percolar um volume de água de $5 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ por cada amostra, repetindo o procedimento até que fossem obtidas, no mínimo, três leituras de tempo com pequenas variações ($\pm 5\%$) para cada sistema.

As pressões aplicadas na saturação e durante a percolação de água nas amostras estão apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 - Pressões dos Ensaios de Permeabilidade.

Amostra		Pressões (kPa)		
		Lateral	Base	Topo
CPP2 (base da encosta)	Saturação 1	30	20	20
	Saturação 2	60	50	50
	Saturação 3	110	100	100
	Percolação	110	100	95
CPP3 (base da encosta)	Saturação 1	30	20	20
	Saturação 2	70	50	50
	Percolação	70	50	45
CPP4 (topo da encosta)	Saturação 1	70	50	50
	Saturação 2	120	100	100
	Saturação 3	170	150	150
	Percolação	170	150	100

Fonte: o autor (2016).

Determinados os tempos de percolação nas amostras, suas permeabilidades foram calculadas pela equação:

$$k = \frac{V_p \times L}{A_c \times T \times \Delta p} \quad (\text{Equação 4.2})$$

Sendo:

V_p : volume percolado (m^3)

L : altura do corpo de prova (m)

A_c : área da base do corpo de prova (m^2)

T : tempo de percolação (s)

Δp : variação de pressão (em m H_2O)

4.3.6.4 Cisalhamento Direto

Os ensaios de cisalhamento direto realizados foram: convencional e com reversões múltiplas. Os ensaios convencionais foram realizados com solos nas condições inundadas e nas umidades naturais, a fim de determinar parâmetros de resistências de pico e pós-pico, enquanto que os ensaios com reversões múltiplas foram desenvolvidos com solos na condição inundada, objetivando a obtenção de parâmetros de resistência residual dos solos estudados.

Os equipamentos utilizados foram prensas de cisalhamento com sistema de cargas através de peso em pendural, fabricadas por Ronald Top S/A (Figura 41). As leituras de deformações verticais e deslocamentos horizontais eram realizadas por extensômetros com sensibilidade de 0,01 mm e anel de carga para determinação das forças horizontais aplicadas aos corpos de prova, fabricados pela Mitutoyo.



Figura 41 - Prensas de Cisalhamento Ronald Top S/A.
Fonte: o autor (2016).

Para a realização dos ensaios, corpos de prova com seção transversal quadrada de 0,1016 m de lado e 0,039 m de altura foram moldados a partir dos blocos indeformados BL2, BL3 e BL4 (Figura 42).



Figura 42 - Moldagem dos Corpos de Prova Para Ensaio de Cisalhamento Direto.
Fonte: o autor (2016).

Nos ensaios de cisalhamento direto convencional, foram seguidas as recomendações de Head (1994) para realização dos ensaios, e adotadas velocidades de deformação de 0,05051 mm/min.

Os corpos de prova ensaiados na condição inundada ficaram imersos em água destilada, antes dos ensaios, por um período de 24 horas, e, posteriormente, assim como os corpos de prova em umidade natural, foram adensados por mais 24 horas, até as deformações se estabilizarem.

O cisalhamento, em cada corpo de prova, era iniciado após a estabilização das deformações, aplicando-se as tensões normais: 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa. O critério de ruptura adotado foi o valor de pico da tensão cisalhante ou o deslocamento horizontal máximo (13 a 15 mm), quando não era possível definir bem o valor de pico na curva tensão x deformação. No início e no final de cada ensaio eram determinadas as umidades iniciais e finais dos corpos de prova.

Os ensaios de cisalhamento direto com reversões múltiplas foram realizados no equipamento adaptado para a realização de reversões da caixa de cisalhamento, sendo possível atingir grandes deslocamentos devido à inversão da direção do cisalhamento até o estabelecimento da condição residual. A velocidade de deformação e os máximos deslocamentos horizontais foram os mesmos adotados nos ensaios convencionais, e as tensões normais aplicadas também foram as iguais. No início e no final de cada ensaio eram determinadas as umidades iniciais e finais dos corpos de prova.

Os ensaios com reversões foram realizados conforme proposto por Head (1994). Após a conclusão do ensaio de cisalhamento direto convencional, a água destilada e a carga vertical

aplicada na amostra eram retiradas, e a máquina era revertida para sua posição inicial, fazendo a caixa de cisalhamento retornar através de movimentos manuais de rotação da manivela.

Na sequência, a caixa de cisalhamento era retirada, a amostra era seccionada em duas partes (com o auxílio de um fio de arame), e retornava para a o equipamento. A água destilada e o carregamento vertical eram reaplicados, um novo adensamento era feito na amostra (durante 12 horas) e, por fim, realizava-se um novo ciclo de cisalhamento.

As reversões foram realizadas até que valores constantes de resistência fossem atingidos, correspondendo, em princípio, aos mínimos valores de tensão cisalhante e, portanto, à resistência residual.

4.3.7 Estruturação das Planilhas dos Ensaios de Campo e Laboratório e Entrada dos Dados

Com o auxílio do programa Excel®, tendo por base a bibliografia consultada, foram montadas planilhas para organizar e tratar os dados obtidos através dos ensaios de laboratório e de campo.

As planilhas possibilitaram a apresentação e a comparação gráfica dos resultados, simplificando a apresentação dos resultados, como será visto no item 5.

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados e as análises dos ensaios de laboratório e da sondagem SPT realizados na encosta da Comunidade Santa Clara, bem como o resultado do estudo das sondagens SPT da Formação Barreiras de João Pessoa, estão apresentados neste capítulo.

5.1 Boletins de sondagem SPT

Estão apresentados, na sequência, o processo de exame e o agrupamento das sondagens SPT realizadas na Formação Barreiras de João Pessoa, bem como os resultados e a análise obtidos a partir destes.

5.1.1 Exame e Agrupamento dos Boletins de Sondagem

A Formação Barreiras de João Pessoa foi distribuída em nove “perfis típicos”, baseado em características específicas, conforme apresentado na Tabela 12.

Os critérios utilizados para a classificação foram, nesta ordem: constituição granulométrica do perfil e comportamento do gráfico de penetração ao longo da profundidade.

Com relação à constituição granulométrica, dois grandes grupos foram criados: areias e argilas. Consideraram-se “areias” os solos classificados em sondagem como “areia”, “silte arenoso” e “silte areno-argiloso”, enquanto as “argilas” eram os solos denominados de “argilas”, “silte argiloso” e “silte argilo-arenoso”. Tendo esta subdivisão por base, os perfis foram classificados em: exclusivamente arenoso, exclusivamente argiloso, predominantemente arenoso, predominantemente argiloso, e com intercalações de solo argiloso e arenoso.

Os perfis “exclusivamente arenoso” e “exclusivamente argiloso”, como a denominação sugere, são compostos apenas por areias e argilas, respectivamente. Já os perfis “predominantemente arenoso” e “predominantemente argiloso” apresentam uma ou duas camadas de pouca expressividade com granulometria diferente das demais. Sendo assim, na classificação “predominantemente arenoso”, os perfis podem ter até duas camadas argilosas, e vice-versa. Nos perfis “com intercalações de solos argiloso e arenoso”, as camadas de areia e argila são igualmente significativas, em quantidade e profundidade.

Quanto ao comportamento do gráfico de penetração, os perfis foram divididos em “crescimento aproximadamente linear ou hiperbólico”, quando os valores do N_{spt} crescem ao longo da profundidade de maneira aproximadamente linear ou hiperbólica, e em “variável ao

longo da profundidade” quando o Nspt cresce e decresce ao longo da profundidade, sem padrão de comportamento.

A classificação dos perfis está esquematizada na Figura 43.

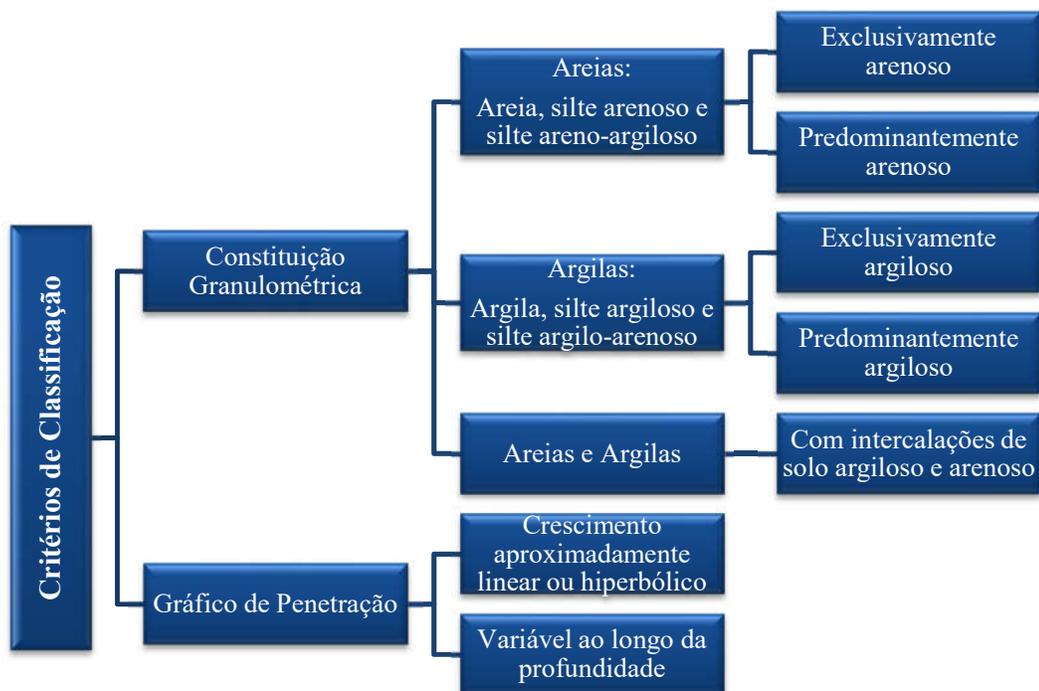


Figura 43 - Esquema de classificação dos perfis de sondagem.

Fonte: o autor (2017).

Algumas informações adicionais foram acrescentadas à caracterização dos grupos, como a presença de pedregulho e laterita, valores característicos de Nspt, e presença de lençol freático.

Da Figura 44 à Figura 52 são apresentados graficamente os grupos de perfis típicos, indicando, para cada perfil típico, quais dos 70 (setenta) pontos de sondagem coletados os constituem, e um perfil geotécnico representativo para cada grupo. Os boletins de sondagem desses perfis representativos estão anexos a este trabalho.

Tabela 12 - Perfis Típicos de Sondagens SPT.

PT1A	<p>Perfil predominantemente arenoso e gráfico de penetração crescendo de forma aproximadamente linear ou hiperbólica até 10 m de profundidade, com o Nspt variando de 4 a 44. A partir desta profundidade não há padrão de comportamento.</p> <p>Pontos de sondagem: 16, 18, 38, 39, 50, 51, 52, 53, 66.</p> <p>Presença de pedregulho: 16, 18, 38.</p> <p>Presença de laterita: 16, 18, 38, 39, 66.</p> <p>Presença de NA: 50, 51, 52, 53, 66.</p>
PT1B	<p>Perfil exclusivamente arenoso e gráfico de penetração variável ao longo da profundidade, com Nspt superior a 20 já nas primeiras camadas, alcançando valores maiores que 40 a partir de 3 m de profundidade.</p> <p>Pontos de sondagem: 3, 4, 33.</p> <p>Presença de pedregulho: 4.</p>
PT1C	<p>Perfil predominantemente arenoso e gráfico de penetração variável ao longo da profundidade. Até 6,5 m de profundidade, a faixa de valores do Nspt é de 5 a 40. A partir desta, até 13 m, os valores variam de 25 a 55.</p> <p>Pontos de sondagem: 34, 35, 63, 64, 65.</p> <p>Presença de pedregulho: 34, 63.</p> <p>Presença de laterita: 63, 64, 65.</p> <p>Presença de NA: 63, 64, 65.</p>
PT1D	<p>Perfil exclusivamente arenoso com presença de pedregulho e gráfico de penetração crescendo de forma aproximadamente linear ou hiperbólica, apresentando, até a profundidade de 7 m, Nspt entre 1 e 20, alcançando, a partir dos 8 m, valores superiores a 30.</p> <p>Pontos de sondagem: 1, 2, 14, 17, 40, 41, 44, 45.</p> <p>Presença de laterita: 14, 40.</p>
PT2A	<p>Perfil predominantemente argiloso com presença de laterita e gráfico de penetração crescendo de forma aproximadamente linear ou hiperbólica até 15 m de profundidade, com Nspt variando de 1 a valores superiores a 50. A partir dos 15 m, o Nspt mínimo foi 25.</p> <p>Pontos de sondagem: 11, 12, 13, 22, 23, 24, 25, 27, 28, 29.</p> <p>Presença de pedregulho: 22, 23, 24, 25, 27, 28, 29.</p> <p>Presença de NA: 22, 23, 24, 25, 27</p>
PT2B	<p>Perfil exclusivamente argiloso com presença de laterita e gráfico de penetração crescendo de forma aproximadamente linear ou hiperbólica até 9 m de profundidade, e Nspt variando de 4 a 20.</p> <p>Pontos de sondagem: 7, 8, 9, 10.</p>
PT3A	<p>Perfil com intercalações de solo argiloso e arenoso com presença de pedregulho, e gráfico de penetração variável ao longo da profundidade, apresentando Nspt entre 5 e 40 até 9 m e atingindo, em camadas mais profundas, Nspt maiores que 40.</p> <p>Pontos de sondagem: 15, 19, 20, 42, 67, 68, 69, 70.</p> <p>Presença de laterita: 15, 19, 20, 42.</p> <p>Presença de NA: 67, 68, 69, 70.</p>
PT3B	<p>Perfil com intercalações de solo argiloso e arenoso com presença de pedregulho e laterita, e gráfico de penetração crescendo de forma aproximadamente linear ou hiperbólica até 10 m de profundidade, apresentando valores de Nspt entre 1 e 30.</p> <p>Pontos de sondagem: 5, 6, 26, 36, 37, 43, 48, 49, 54, 56, 57, 58, 59, 60, 61.</p> <p>Presença de NA: 26.</p>
PT3C	<p>Perfil com intercalações de solo argiloso e arenoso com presença de pedregulho, e gráfico de penetração variável ao longo da profundidade, com Nspt superior a 20 já nas primeiras camadas e picos de Nspt geralmente superiores a 50 em camadas de arenito ou com presença de laterita.</p> <p>Pontos de sondagem: 21, 30, 31, 32, 46, 47, 55, 62.</p> <p>Presença de laterita: 21, 46, 47, 55, 62.</p> <p>Presença de NA: 30, 31, 32, 62.</p>

Fonte: o autor (2017).

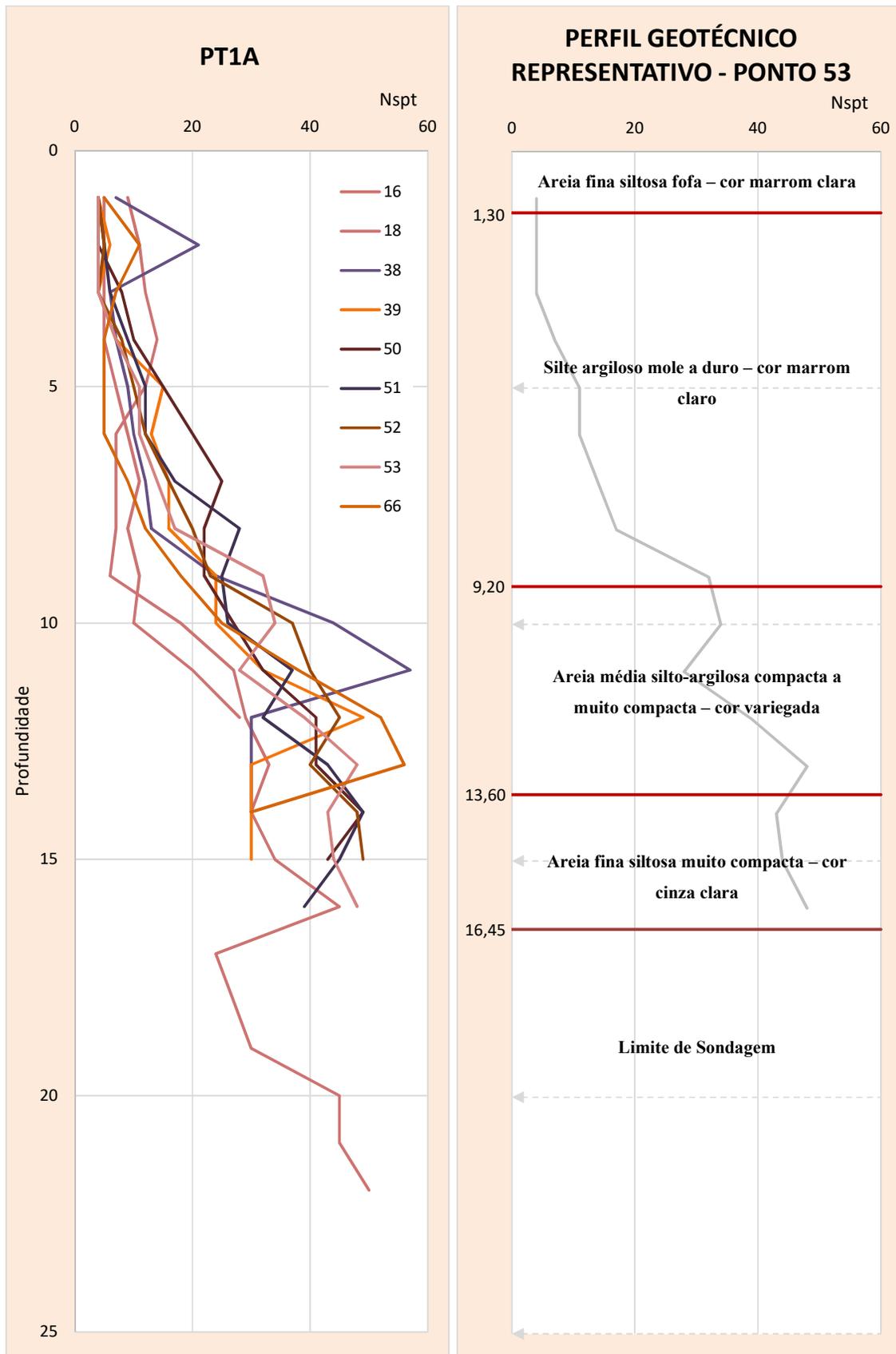


Figura 44 - Grupo de perfis PT1A e perfil geotécnico representativo (Ponto 53).

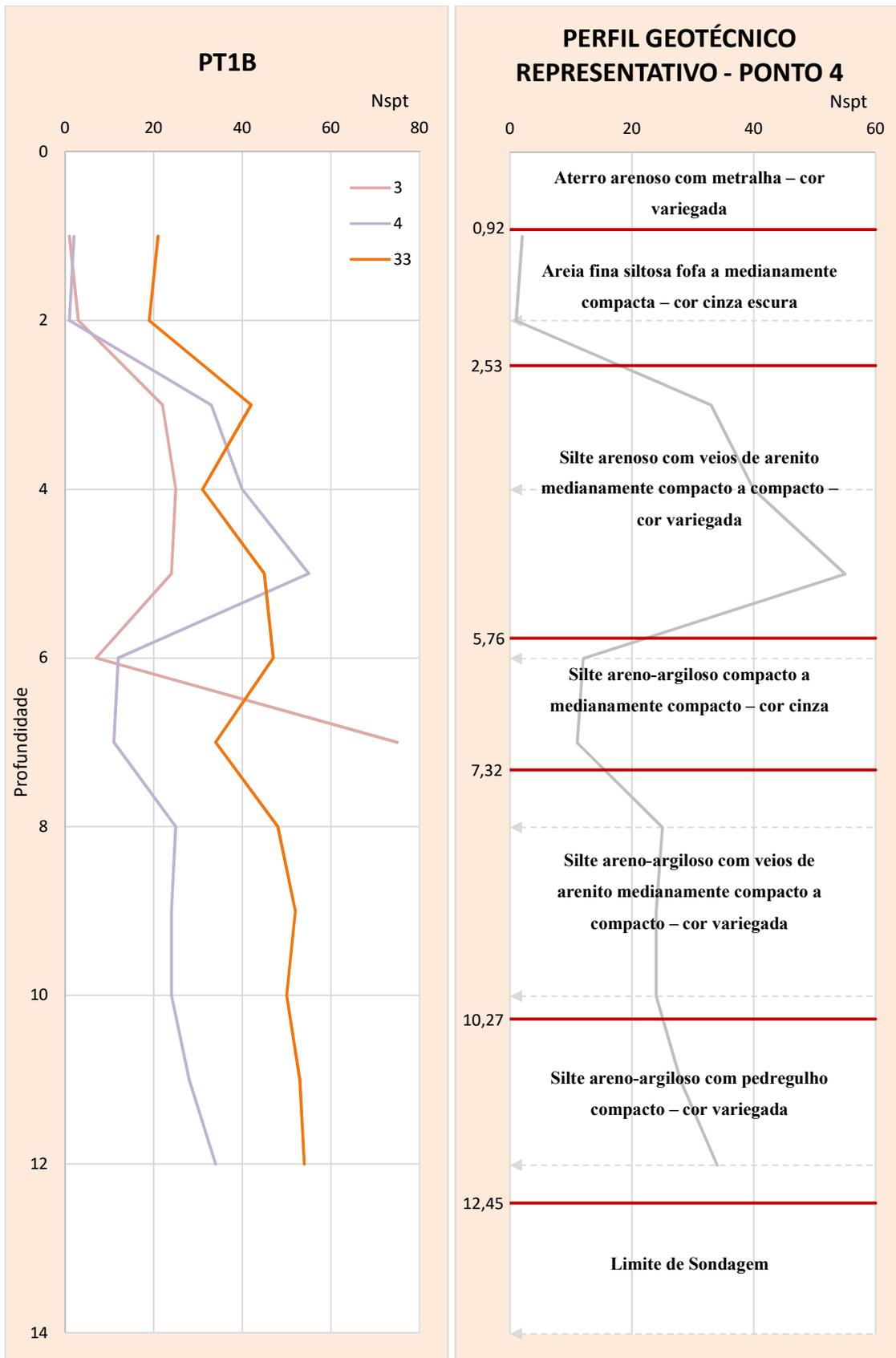


Figura 45 - Grupo de perfis PT1B e perfil geotécnico representativo (Ponto 4).

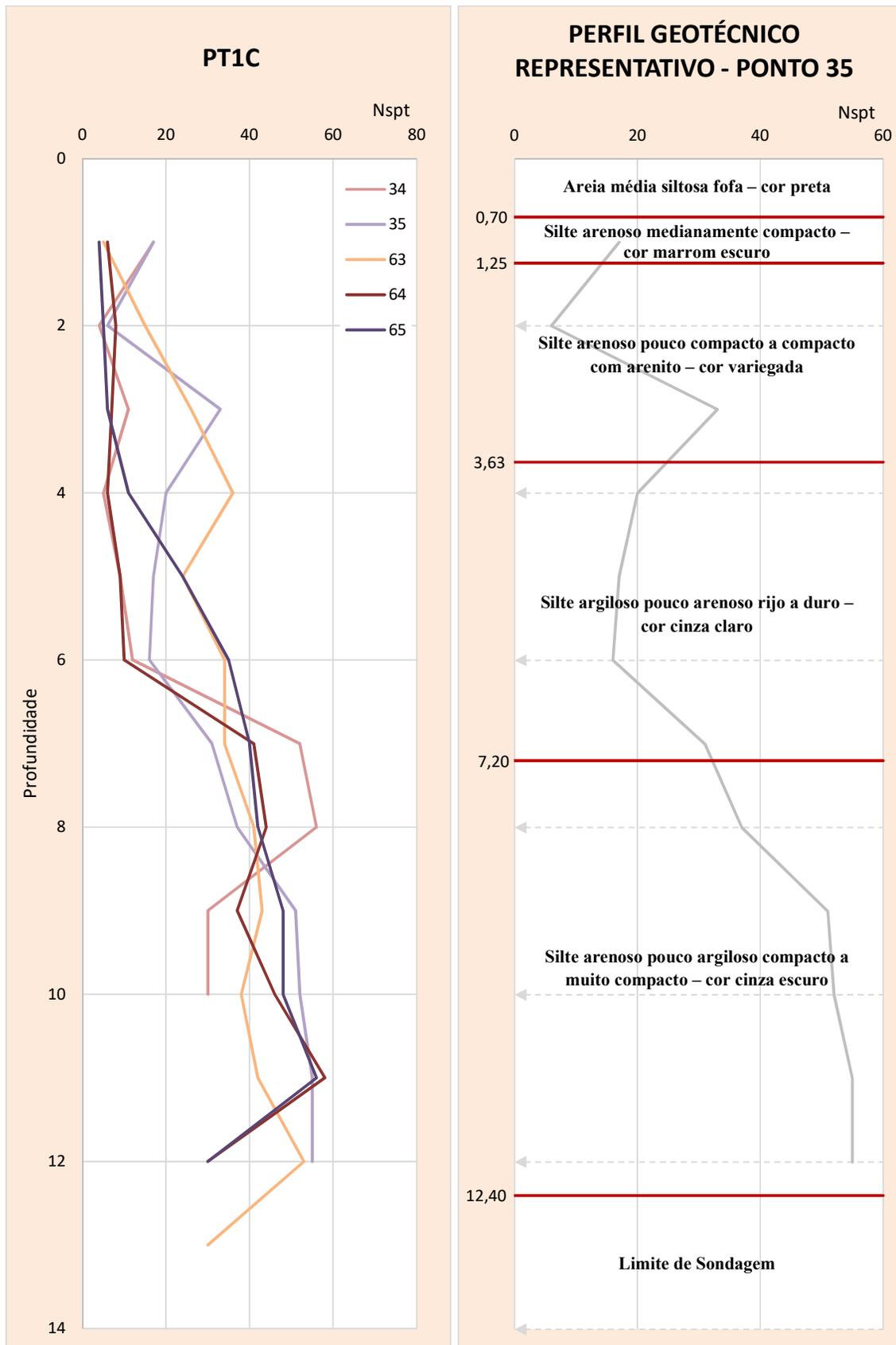


Figura 46 - Grupo de perfis PT1C e perfil geotécnico representativo (Ponto 35).

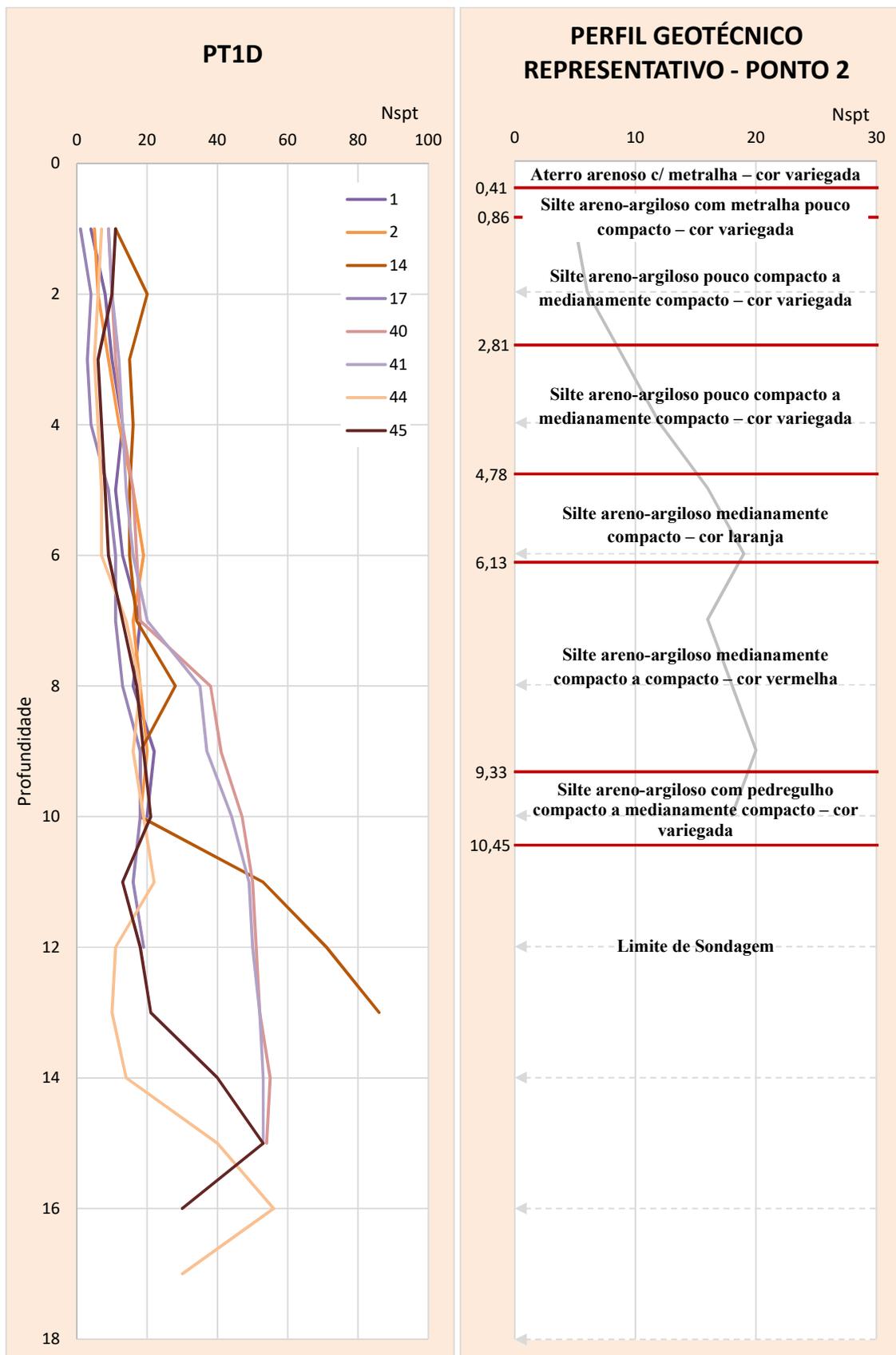


Figura 47 - Grupo de perfis PT1D e perfil geotécnico representativo (Ponto 2).

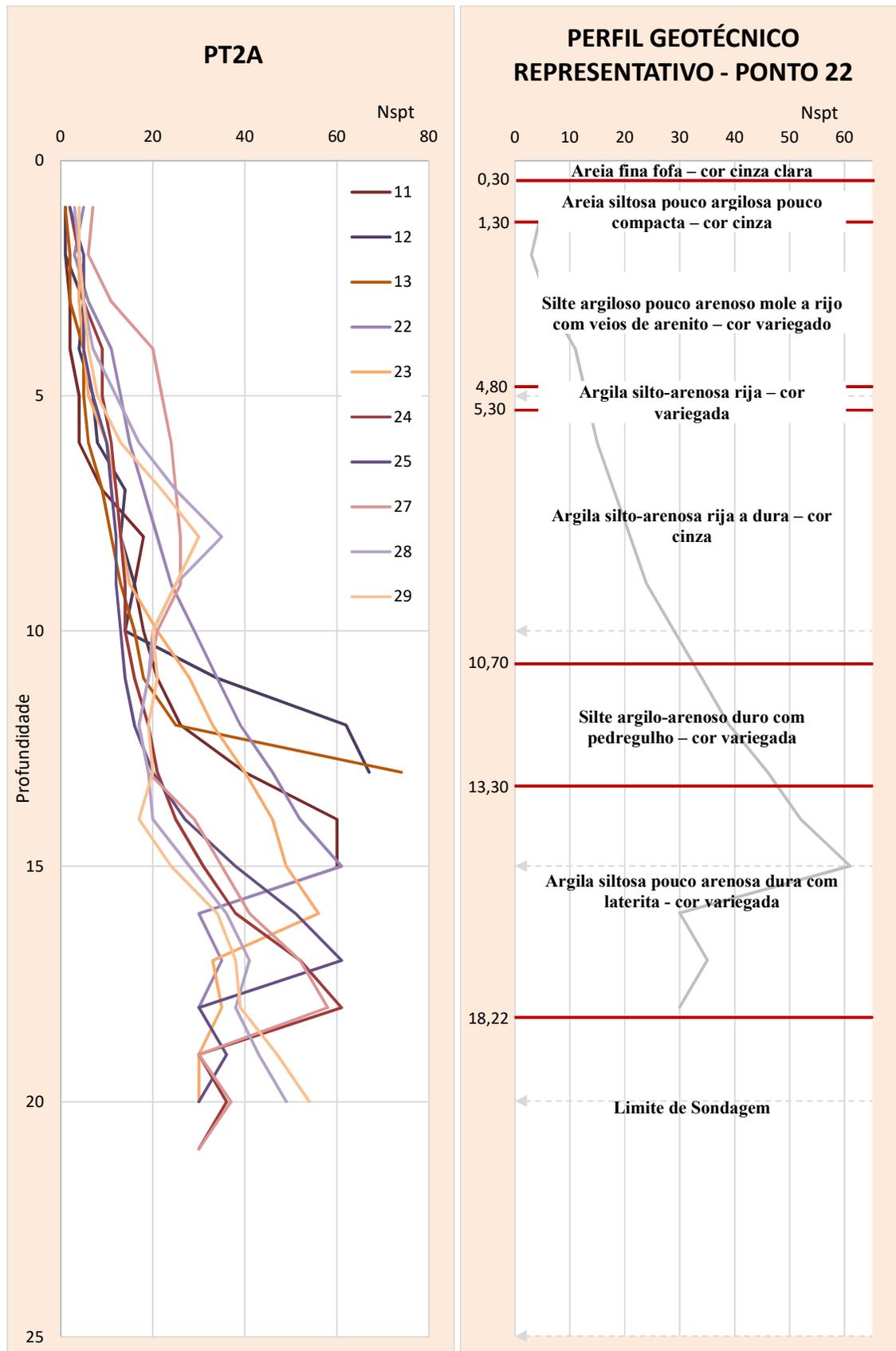


Figura 48 - Grupo de perfis PT2A e perfil geotécnico representativo (Ponto 22).

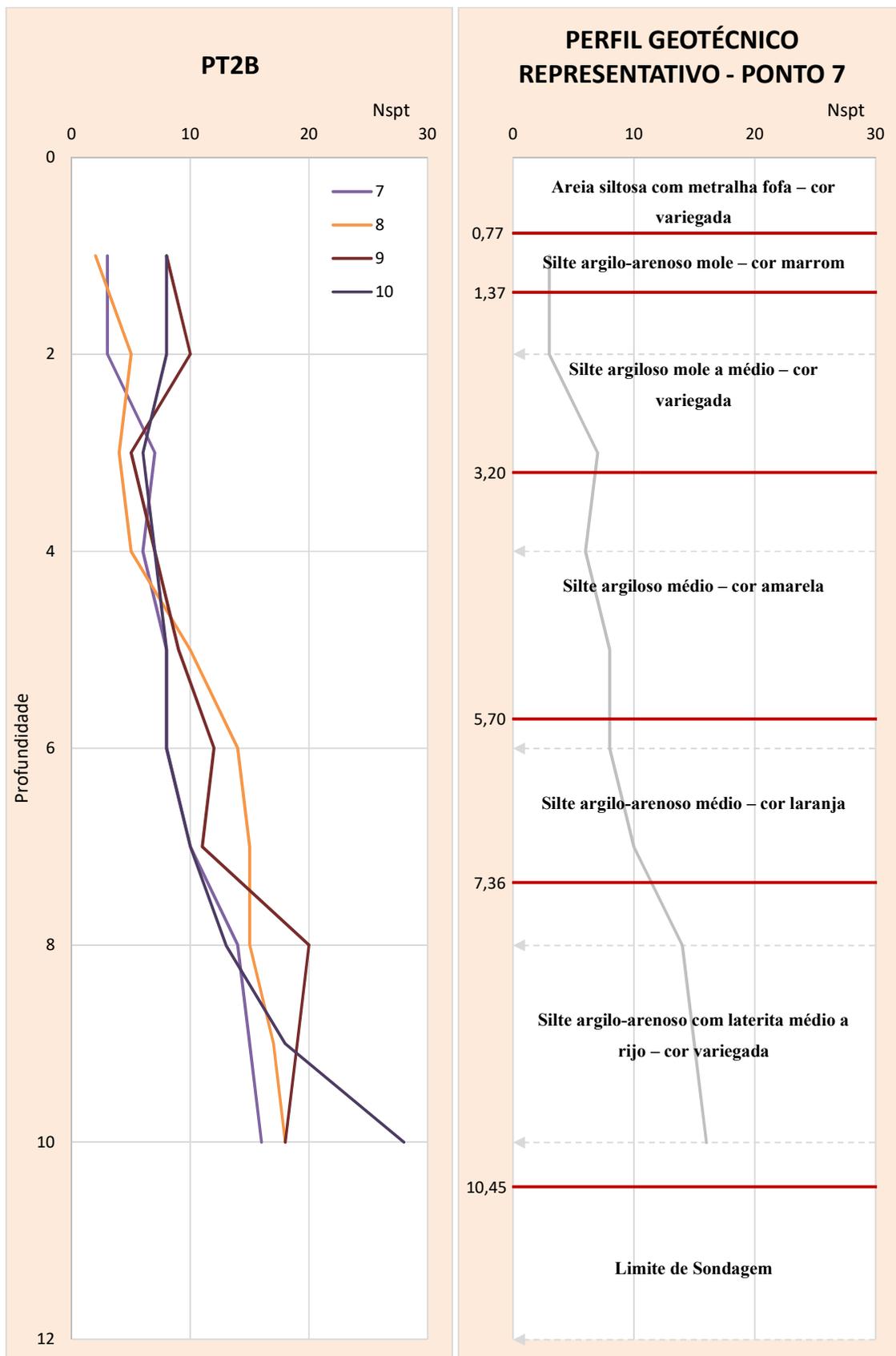


Figura 49 - Grupo de perfis PT2B e perfil geotécnico representativo (Ponto 7).

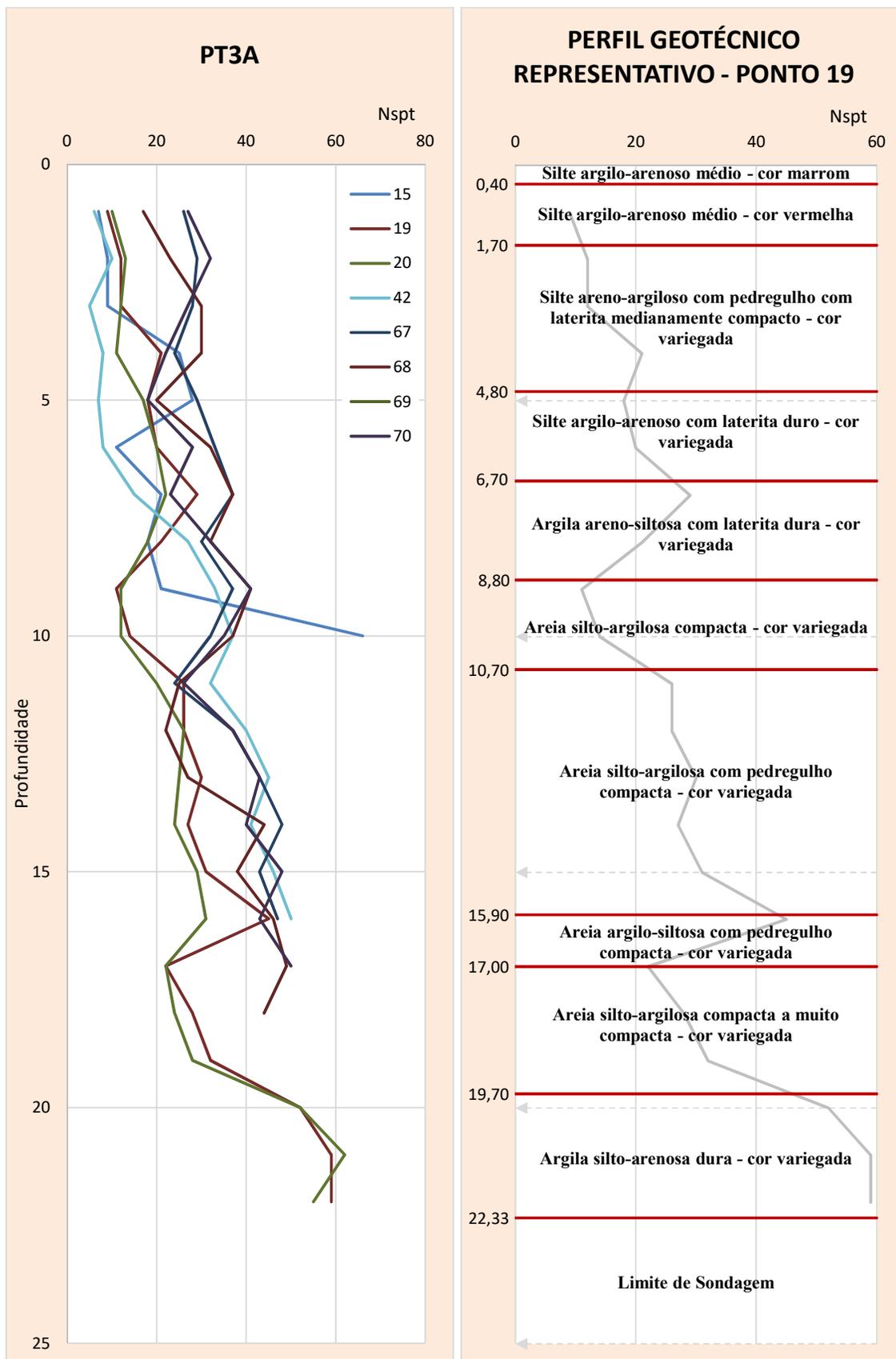


Figura 50 - Grupo de perfis PT3A e perfil geotécnico representativo (Ponto 19).

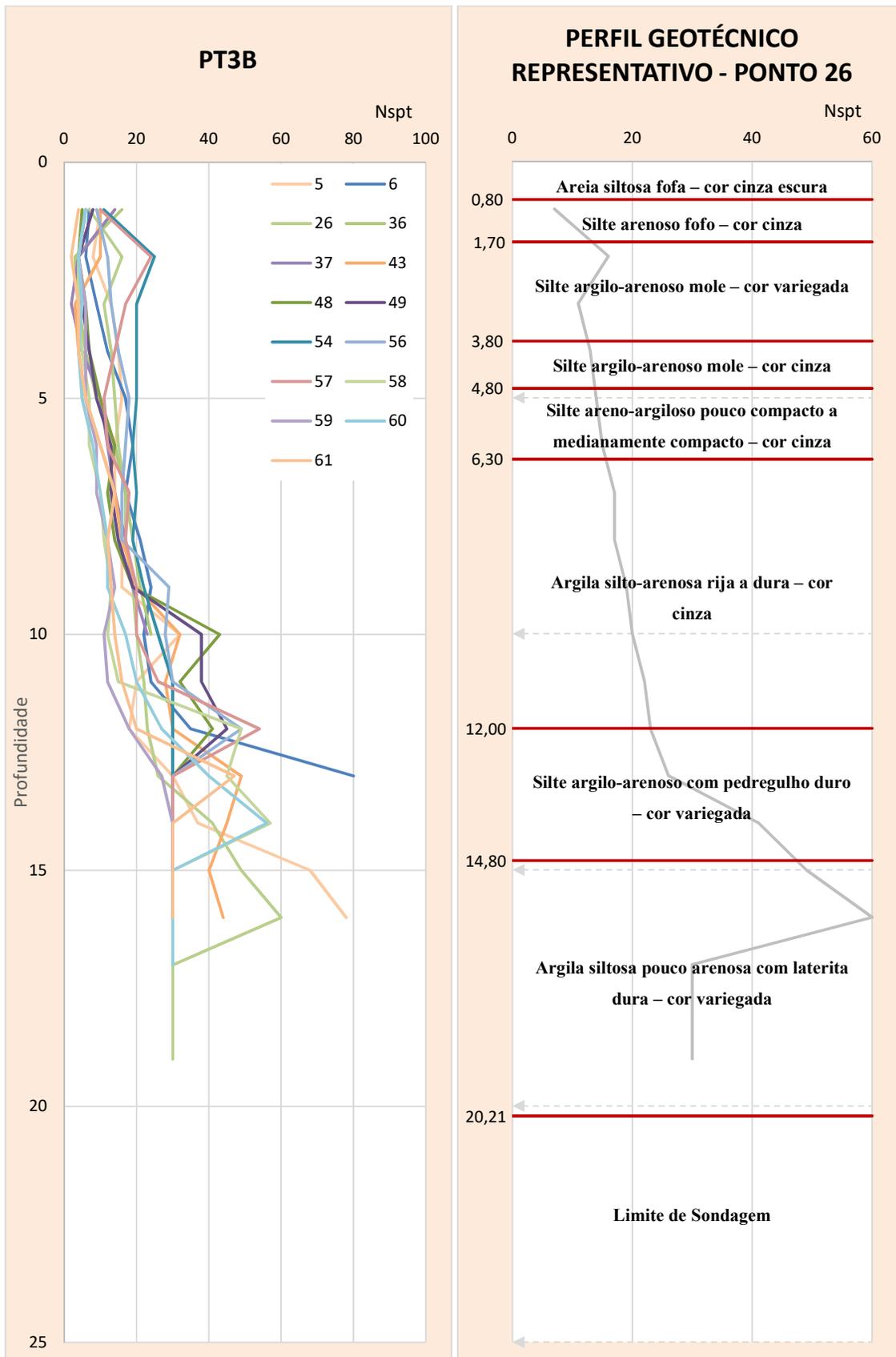


Figura 51 - Grupo de perfis PT3B e perfil geotécnico representativo (Ponto 26).

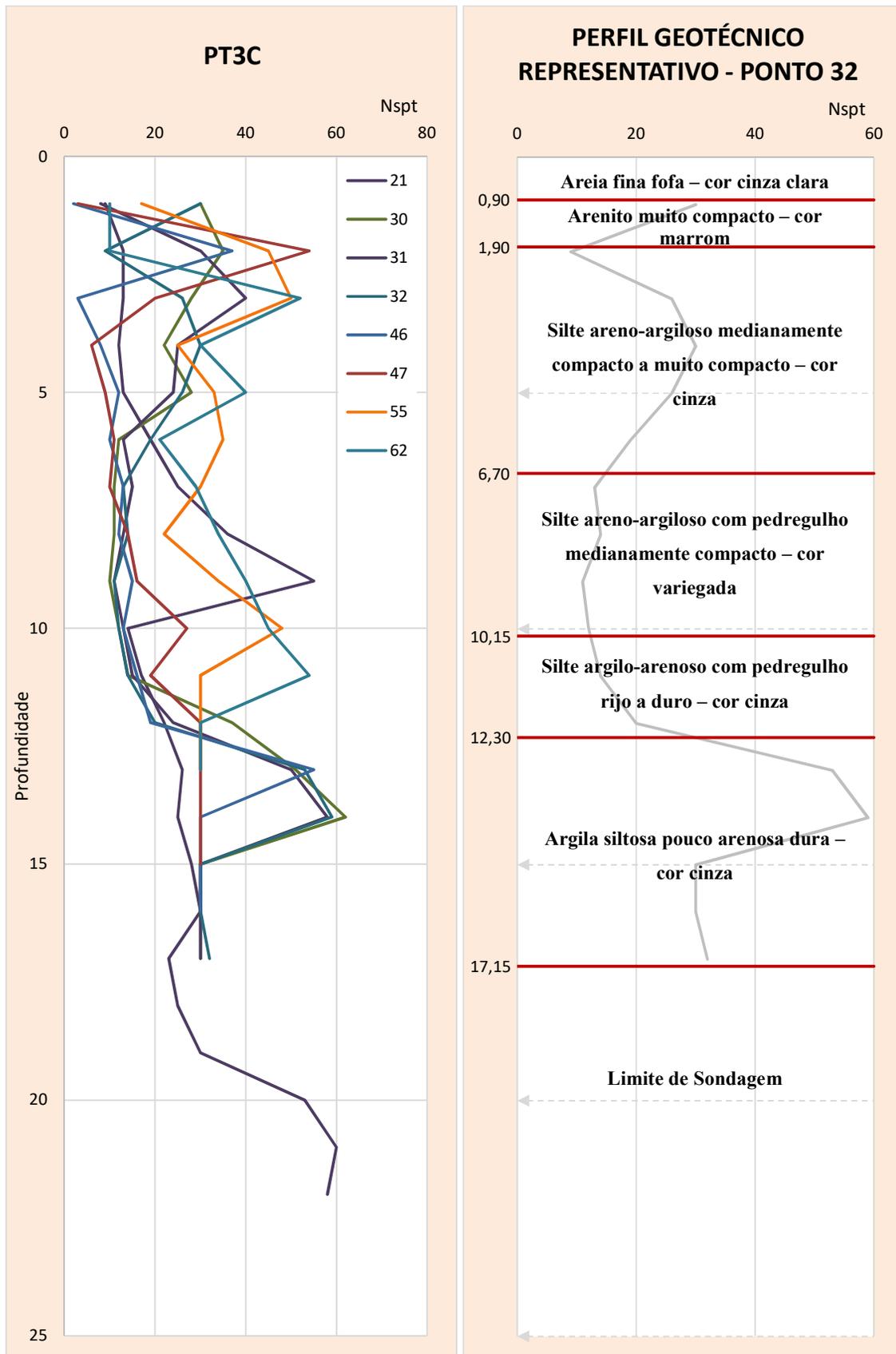


Figura 52 - Grupo de perfis PT3C e perfil geotécnico representativo (Ponto 32).

5.1.2 Análise dos Resultados

A Figura 53 mostra, em termos percentuais, a distribuição dos pontos de sondagem coletados nos grupos de perfis criados. Observa-se que o perfil típico mais recorrente é o PT3B (21%), caracterizado por intercalações de solo argiloso e arenoso com presença de pedregulho e laterita, enquanto que o mais raro é o perfil PT1B (4%), exclusivamente arenoso.

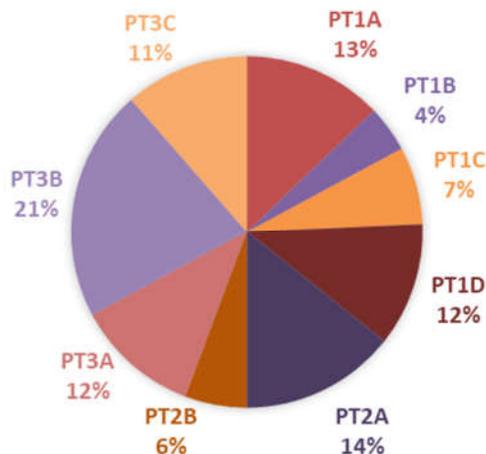


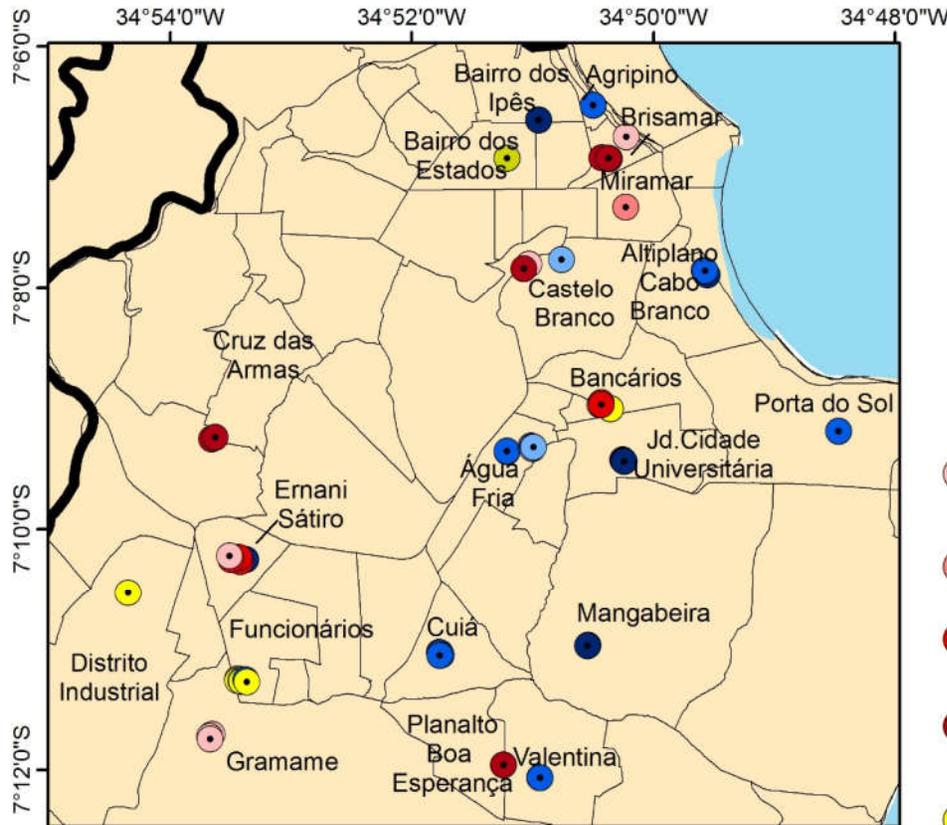
Figura 53 – Distribuição percentual dos pontos de sondagem SPT entre os grupos de perfis típicos.

A Figura 54 e a Figura 55 apresentam a distribuição dos perfis típicos nos bairros de João Pessoa, e na Formação Barreiras da cidade, respectivamente.

No geral, não se percebe segregação de pontos de mesma coloração, nem em bairros, nem em regiões, nem em nenhuma das denudações de Formação Barreiras, indicando que perfis de um mesmo grupo podem ser encontrados em bairros de localização distintas na cidade.

Observando-se a Figura 56 que apresenta a distribuição individualizada de cada perfil sobre o território de João Pessoa, é possível concluir que os perfis PT1D, PT3B e PT3C são os que se apresentam melhor distribuídos, estando os perfis de PT3A posicionados de forma alinhada, de norte a sul da cidade, os de PT1C e PT2A na linha central do município, com pontos a leste e oeste, os perfis de PT1A concentrados no norte e no oeste, os de PT1B ao norte, muito próximo à região central, e os perfis de PT2B localizados pontualmente no norte da cidade.

É importante destacar que a ausência de pontos de sondagem nas regiões noroeste e sudoeste da cidade, e a consequente dificuldade de caracterizá-las, é devida ao baixo padrão das edificações da região, quase sempre executadas sem projetos e estudos de solo.

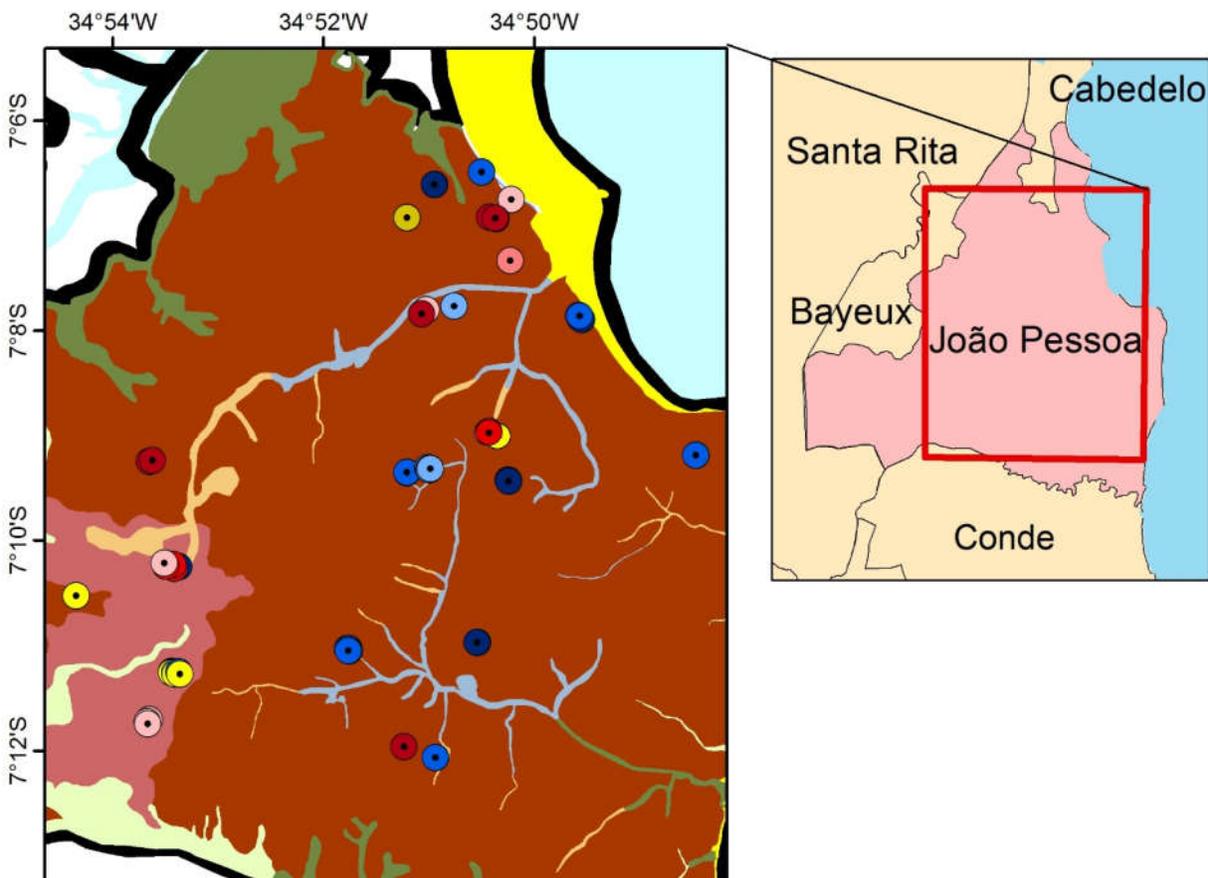


- PT1A "Perfil predominantemente arenoso e gráfico de penetração crescendo de forma aproximadamente linear ou hiperbólica até 10 m de profundidade, com o Nspt variando de 4 a 44. A partir desta profundidade não há padrão de comportamento."
- PT1B "Perfil exclusivamente arenoso e gráfico de penetração variável ao longo da profundidade, com Nspt superior a 20 já nas primeiras camadas, alcançando valores maiores que 40 a partir de 3 m de profundidade."
- PT1C "Perfil predominantemente arenoso e gráfico de penetração variável ao longo da profundidade. Até 6,5 m de profundidade, a faixa de valores do Nspt é de 5 a 40. A partir desta, até 13 m, os valores variam de 25 a 55."
- PT1D "Perfil exclusivamente arenoso com presença de pedregulho e gráfico de penetração crescendo de forma aproximadamente linear ou hiperbólica, apresentando, até a profundidade de 7 m, Nspt entre 1 e 20, alcançando, a partir dos 8 m, valores superiores a 30."
- PT2A "Perfil predominantemente argiloso com presença de laterita e gráfico de penetração crescendo de forma aproximadamente linear ou hiperbólica até 15 m de profundidade, com Nspt variando de 1 a valores superiores a 50. A partir dos 15 m, o Nspt mínimo foi 25."
- PT2B "Perfil exclusivamente argiloso com presença de laterita e gráfico de penetração crescendo de forma aproximadamente linear ou hiperbólica até 9 m de profundidade, e Nspt variando de 4 a 20."
- PT3A "Perfil com intercalações de solo argiloso e arenoso com presença de pedregulho, e gráfico de penetração variável ao longo da profundidade, apresentando Nspt entre 5 e 40 até 9 m e atingindo, em camadas mais profundas, Nspt maiores que 40."
- PT3B "Perfil com intercalações de solo argiloso e arenoso com presença de pedregulho e laterita, e gráfico de penetração crescendo de forma aproximadamente linear ou hiperbólica até 10 m de profundidade, apresentado valores de Nspt entre 1 e 30."
- PT3C "Perfil com intercalações de solo argiloso e arenoso com presença de pedregulho, e gráfico de penetração variável ao longo da profundidade, com Nspt superior a 20 já nas primeiras camadas e picos de Nspt geralmente superiores a 50 em camadas de arenito ou com presença de laterita."

Sistema de Coordenadas Geodésicas
 Sistema Geodésico de Referência SIRGAS 2000
 Base de dados extraída do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)



Figura 54 - Distribuição dos grupos de perfis típicos nos bairros João Pessoa - PB.



Tipos de formas de relevo	Morfoescultura	Morfoestrutura
Actpf	Baixada litorânea	Sedimentos Quaternários
Apf		
Api		
Atpf		
Atpm		
Dc	Baixos planaltos costeiros	Cobertura sedimentar de plataforma (Formação Barreiras)
Dt		

FORMAS DE ACUMULAÇÃO

A - Acumulação
 Atpf - Formas de terraço e planície fluvial
 Api - Formas de planícies intermareais
 Apf - Formas de planícies fluviais
 Atpm - Formas de terraços e planícies marinhas
 Actpf - Formas de colúvio, terraço e planícies fluviais
 Actf - Formas de colúvio e terraços fluviais

FORMAS DE DENUDAÇÃO

D - denudação
 Dt - denudação com formas tabulares
 Dc - denudação com formas convexas

- PT1A "Perfil predominantemente arenoso e gráfico de penetração crescendo de forma aproximadamente linear ou hiperbólica até 10 m de profundidade, com o Nspt variando de 4 a 44. A partir desta profundidade não há padrão de comportamento."
- PT1B "Perfil exclusivamente arenoso e gráfico de penetração variável ao longo da profundidade, com Nspt superior a 20 já nas primeiras camadas, alcançando valores maiores que 40 a partir de 3 m de profundidade."
- PT1C "Perfil predominantemente arenoso e gráfico de penetração variável ao longo da profundidade. Até 6,5 m de profundidade, a faixa de valores do Nspt é de 5 a 40. A partir desta, até 13 m, os valores variam de 25 a 55."
- PT1D "Perfil exclusivamente arenoso com presença de pedregulho e gráfico de penetração crescendo de forma aproximadamente linear ou hiperbólica, apresentando, até a profundidade de 7 m, Nspt entre 1 e 20, alcançando, a partir dos 8 m, valores superiores a 30."
- PT2A "Perfil predominantemente argiloso com presença de laterita e gráfico de penetração crescendo de forma aproximadamente linear ou hiperbólica até 15 m de profundidade, com Nspt variando de 1 a valores superiores a 50. A partir dos 15 m, o Nspt mínimo foi 25."
- PT2B "Perfil exclusivamente argiloso com presença de laterita e gráfico de penetração crescendo de forma aproximadamente linear ou hiperbólica até 9 m de profundidade, e Nspt variando de 4 a 20."
- PT3A "Perfil com intercalações de solo argiloso e arenoso com presença de pedregulho, e gráfico de penetração variável ao longo da profundidade, apresentando Nspt entre 5 e 40 até 9 m e atingindo, em camadas mais profundas, Nspt maiores que 40."
- PT3B "Perfil com intercalações de solo argiloso e arenoso com presença de pedregulho e laterita, e gráfico de penetração crescendo de forma aproximadamente linear ou hiperbólica até 10 m de profundidade, apresentando valores de Nspt entre 1 e 30."
- PT3C "Perfil com intercalações de solo argiloso e arenoso com presença de pedregulho, e gráfico de penetração variável ao longo da profundidade, com Nspt superior a 20 já nas primeiras camadas e picos de Nspt geralmente superiores a 50 em camadas de arenito ou com presença de laterita."

● Massa d'água

Sistema de Coordenadas Geodésicas / Sistema Geodésico de Referência SIRGAS 2000
 Dados de Geomorfologia extraídos da Dissertação de Tamires Barbosa (2015)
 Base de dados extraída do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)



Figura 55 - Distribuição dos grupos de perfis típicos na geomorfologia de João Pessoa - PB./

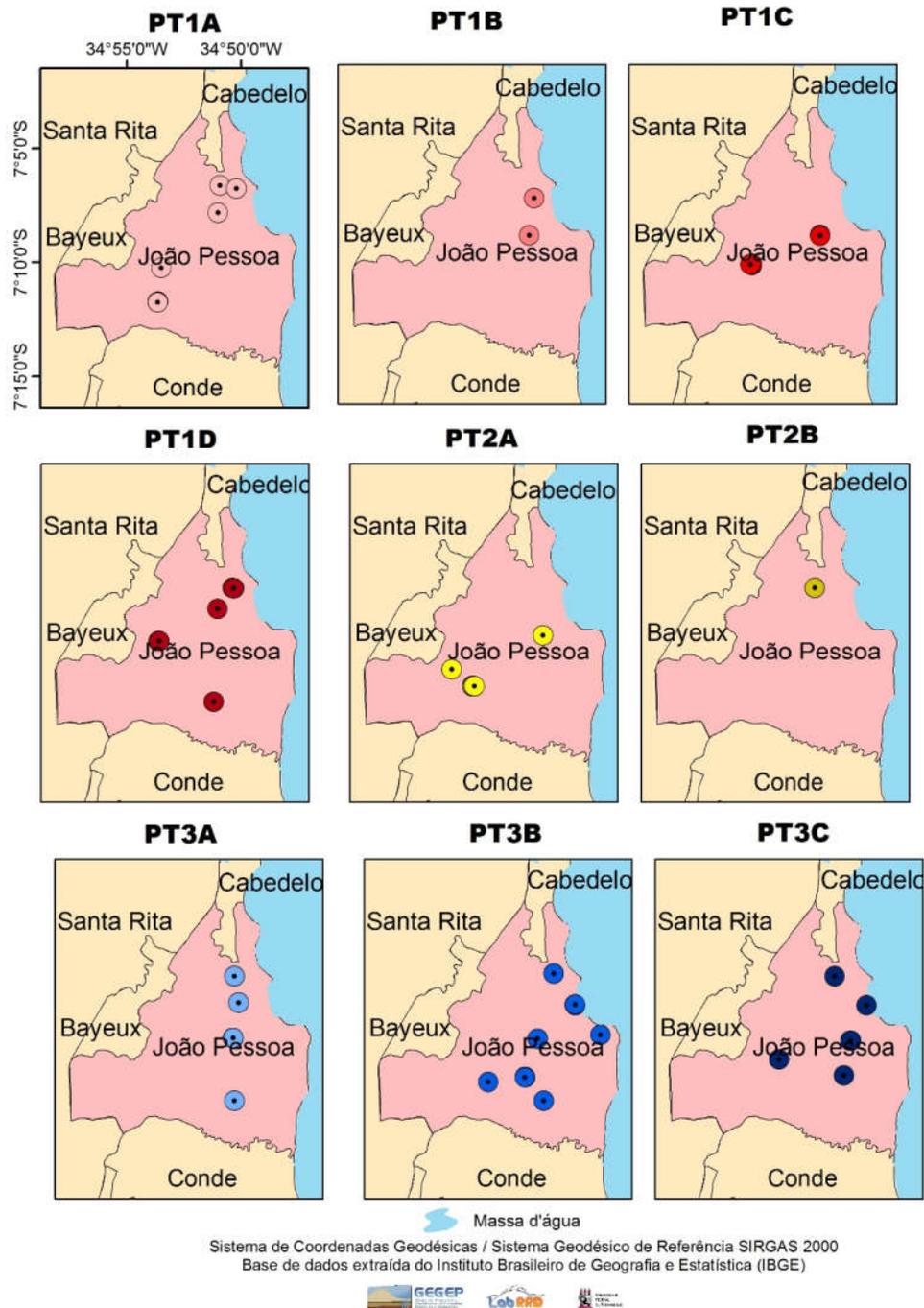


Figura 56 - Distribuição dos pontos de sondagens nos grupos de perfis típicos.

Afim de otimizar a análise dos resultados, foram reunidos os perfis arenosos aos de predominância arenosa, os argilosos aos de predominância argilosa, e os que apresentam variação entre areias e argilas, tem-se o gráfico apresentado na Figura 57, onde é possível verificar que o número de perfis constituídos por solos argilosos e arenosos é o mais expressivo (44%), seguido pelos perfis com predomínio de areias (36%) e por aqueles com predomínio de

argilas (20%). A Figura 58 apresenta a distribuição dos perfis em João Pessoa com base nessa união de grupos, e a Figura 59 os loca sobre a Formação Barreiras da cidade.

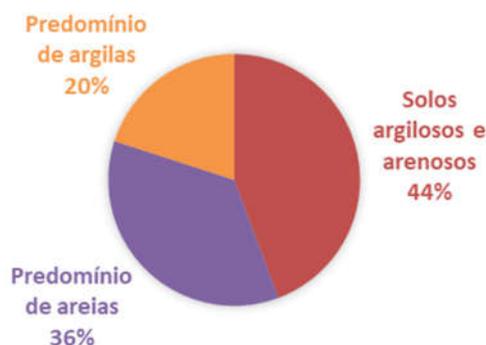


Figura 57 – Distribuição percentual dos pontos de sondagem SPT com base na união de grupos de perfis típicos.

Na Figura 58 e na Figura 59 observam-se: concentração de perfis de composição arenosa e argilosa nos bairros da zona sul e nordeste da cidade, predominando no sul; concentração de perfis predominantemente arenosos na zona nordeste e oeste; e perfis predominantemente argilosos espalhados por todas as regiões. É importante, ainda, ressaltar que, apesar da tendência de concentração dos perfis em zonas específicas, estes podem ser encontrados nas mais diversas zonas da cidade.

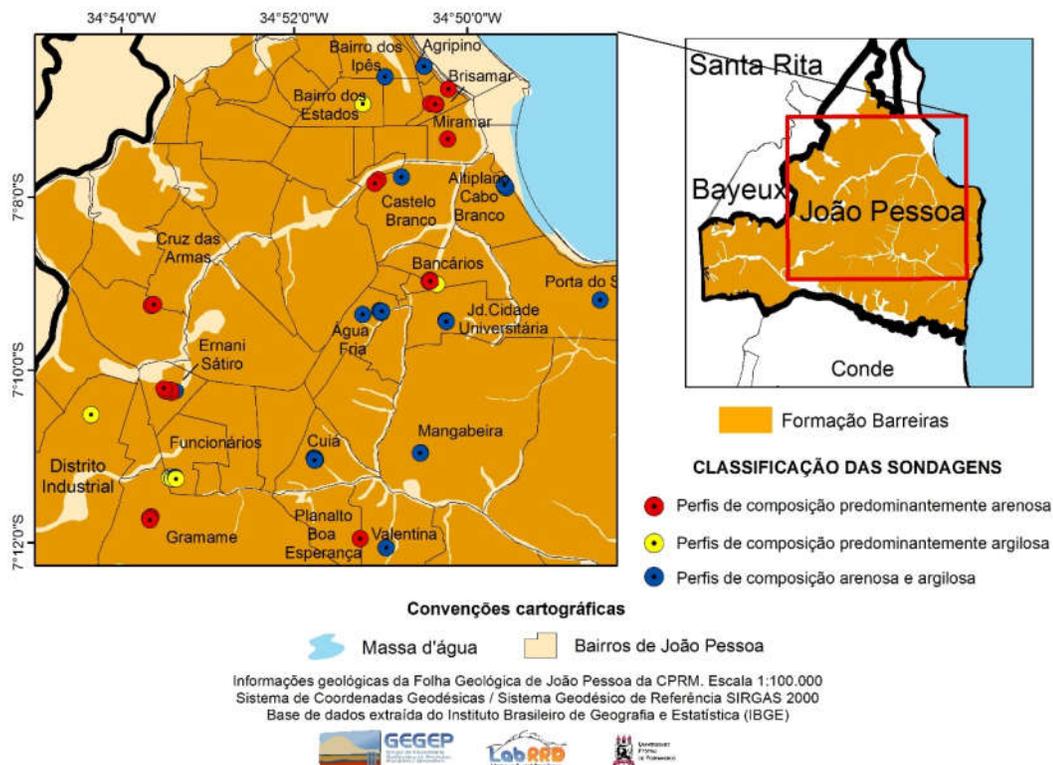


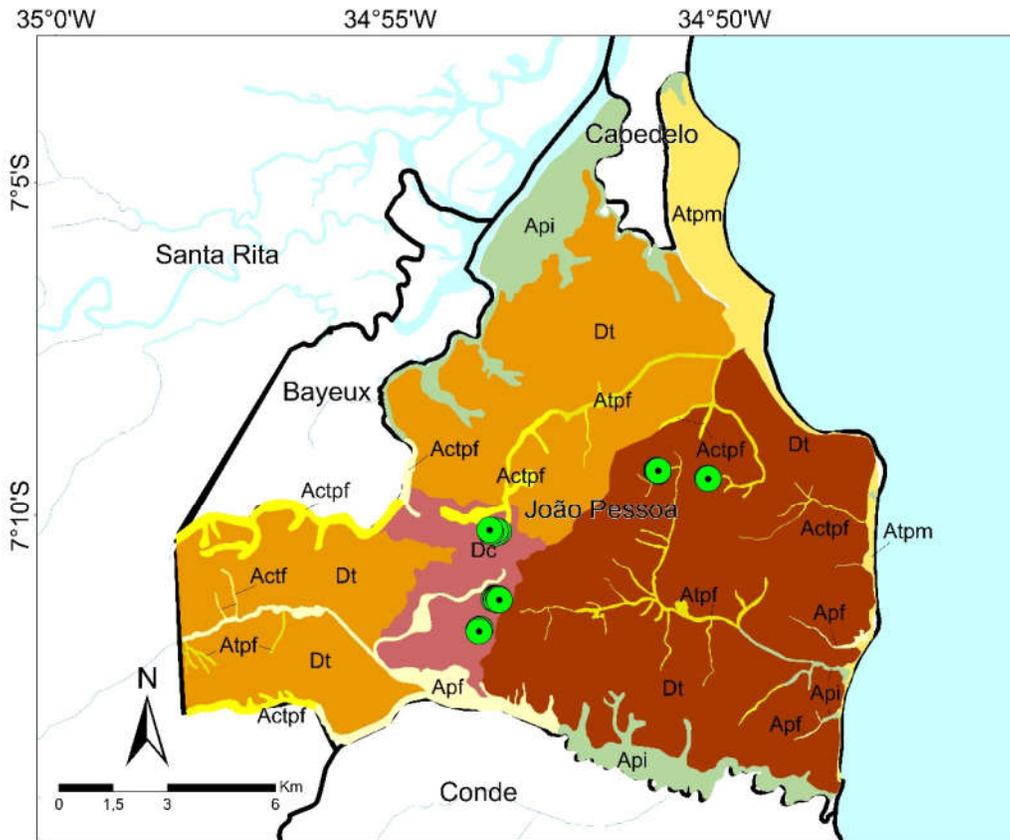
Figura 58 - Distribuição dos boletins de sondagem em João Pessoa com base na união de grupos.

cinco foram classificados em PT1A, três em PT1C, cinco em PT2A, quatro e PT3A, um em PT3B e quatro em PT3C.

Observa-se que todos os perfis com água estão localizados muito próximos às massas d'água, embora existam perfis igualmente próximos que não apresentaram água na sondagem.

Na Figura 61 apresentam-se as profundidades nas quais os níveis d'água foram encontrados (0,16 a 15 m). As maiores profundidades encontradas foram em perfis predominantemente arenosos (PT3A) e com intercalações entre solo arenoso e argiloso (PT1A).

Há, portanto, na Formação Barreiras de João Pessoa, o predomínio de perfis geotécnicos com níveis d'água muito profundos (não alcançados nas sondagens SPT), corroborando com o apresentado por Coutinho e Severo (2009) sobre os níveis de água na Formação Barreiras, que, segundo estes autores, encontram-se em grandes profundidades.



 Sondagens com nível de água

Tipos de formas de relevo	Morfoescultura	Morfoestrutura	FORMAS DE ACUMULAÇÃO
<ul style="list-style-type: none">  Actf  Actpf  Apf  Api  Atpf  Atpm  Dc  Dt (Entalhamento médio dos vales)  Dt (Entalhamento forte dos vales) 	<p>Baixada litorânea</p> <p>Baixos planaltos costeiros</p>	<p>Sedimentos Quaternários</p> <p>Cobertura sedimentar de plataforma (Formação Barreiras)</p>	<p>FORMAS DE ACUMULAÇÃO</p> <p>A - Acumulação</p> <ul style="list-style-type: none"> Atpf - Formas de terraço e planície fluvial Api - Formas de planícies intermareais Apf - Formas de planícies fluviais Atpm - Formas de terraços e planícies marinhas Actpf - Formas de colúvio, terraço e planícies fluviais Actf - Formas de colúvio e terraços fluviais <p>FORMAS DE DENUDAÇÃO</p> <p>D - denudação</p> <ul style="list-style-type: none"> Dt - denudação com formas tabulares Dc - denudação com formas convexas

 LIMITES MUNICIPAIS  Massa d'água  Curso d'água

Sistema de Cordenadas Geodésicas

Dados de Geomorfologia extraídos da Dissertação de Tamires Barbosa (2015)

Sistema Geodésico de Referência SIRGAS 2000 / Base de dados extraída do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)



Figura 60 - Distribuição dos pontos de sondagem com presença de nível d'água na Formação Barreiras de João Pessoa.

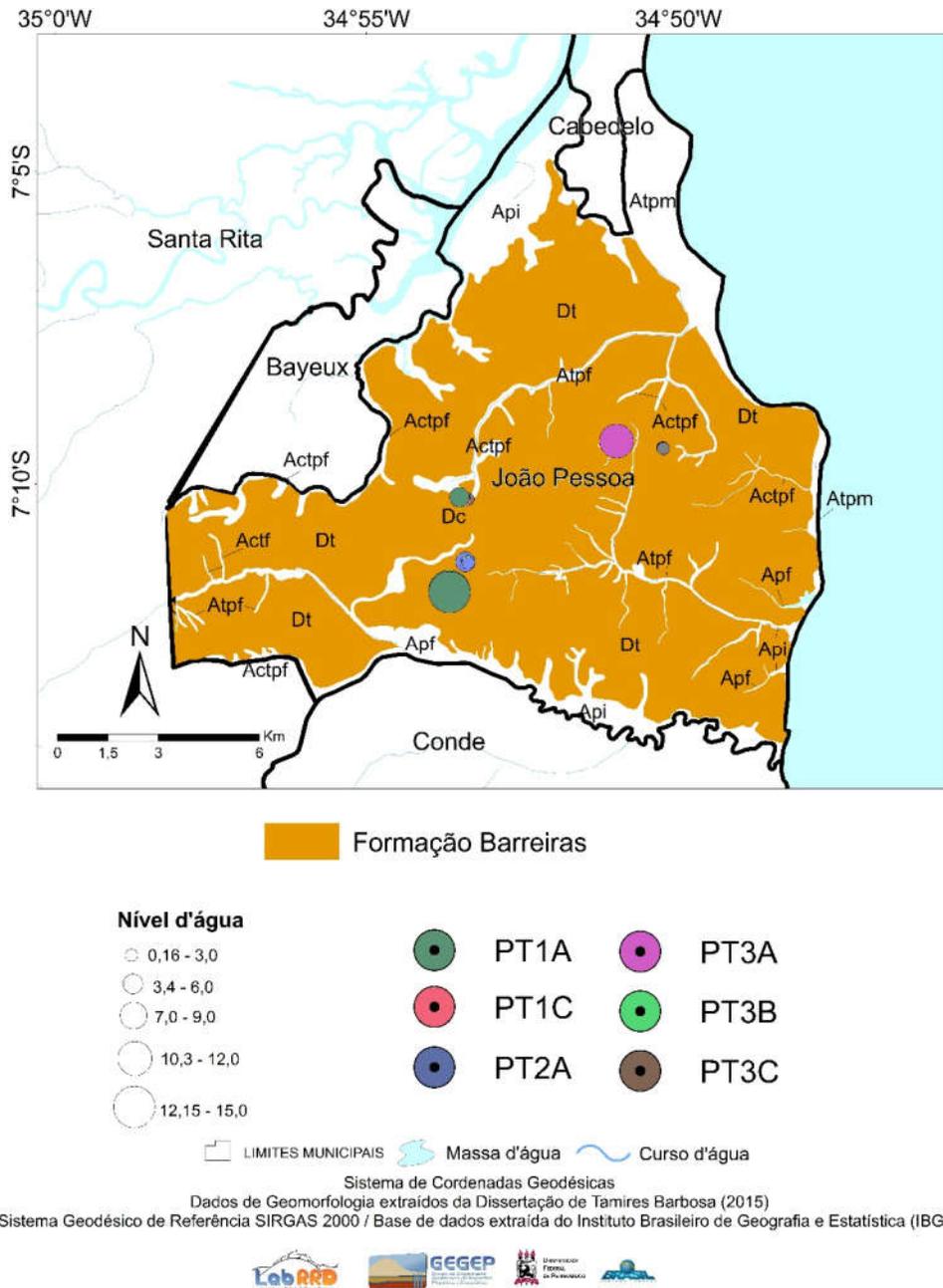


Figura 61 – Escala de profundidade dos níveis d'água nos perfis estudados e classificação dos pontos de sondagem.

5.2 Resultados dos ensaios de campo e laboratório

A realização dos ensaios geotécnicos, de campo e de laboratório, permitiu definir realisticamente as características e propriedades geomecânicas do solo da encosta, além de estimar a estratigrafia do subsolo.

5.2.1 Visitas Técnicas

Foram observados na Comunidade Santa Clara diversos problemas de risco geotécnico. As constatações foram realizadas durante as visitas iniciais de reconhecimento, nos momentos de extração de blocos indeformados no topo e no pé da encosta e no ensaio SPT no topo.

Algumas situações que favorecem a movimentação de massa foram registradas: ocupação desordenada, lançamento de águas servidas no solo e casas construídas sobre taludes quase verticais (Figura 62), acúmulo indiscriminado de lixo e remoção da vegetação primitiva (Figura 63). Foram registrados, ainda, sinais de recentes movimentações de massa (Figura 64).



Figura 62 - Ocupação Desordenada, Lançamento de Águas Servidas no Solo e Casas Sobre Taludes Quase Verticais na Comunidade Santa Clara.

Fonte: o autor (2016).



Figura 63 – Acúmulo de Lixo e Remoção da Vegetação Primitiva do Talude.

Fonte: o autor (2016).



Figura 64 - Sinais de Recente Movimentação de Massa.
Fonte: o autor (2016).

5.2.2 Sondagem de Simples Reconhecimento

A sondagem foi realizada apenas no topo da encosta, como pode ser observado na Figura 21. Não foi possível realizar sondagens em outros pontos, como na base ou na meia encosta, em virtude da impossibilidade de acesso dos equipamentos.

Além da resistência à penetração dinâmica (N_{SPT}), o ensaio, juntamente com a classificação tátil visual das amostras coletadas, permitiu a identificação geotécnica do perfil do solo.

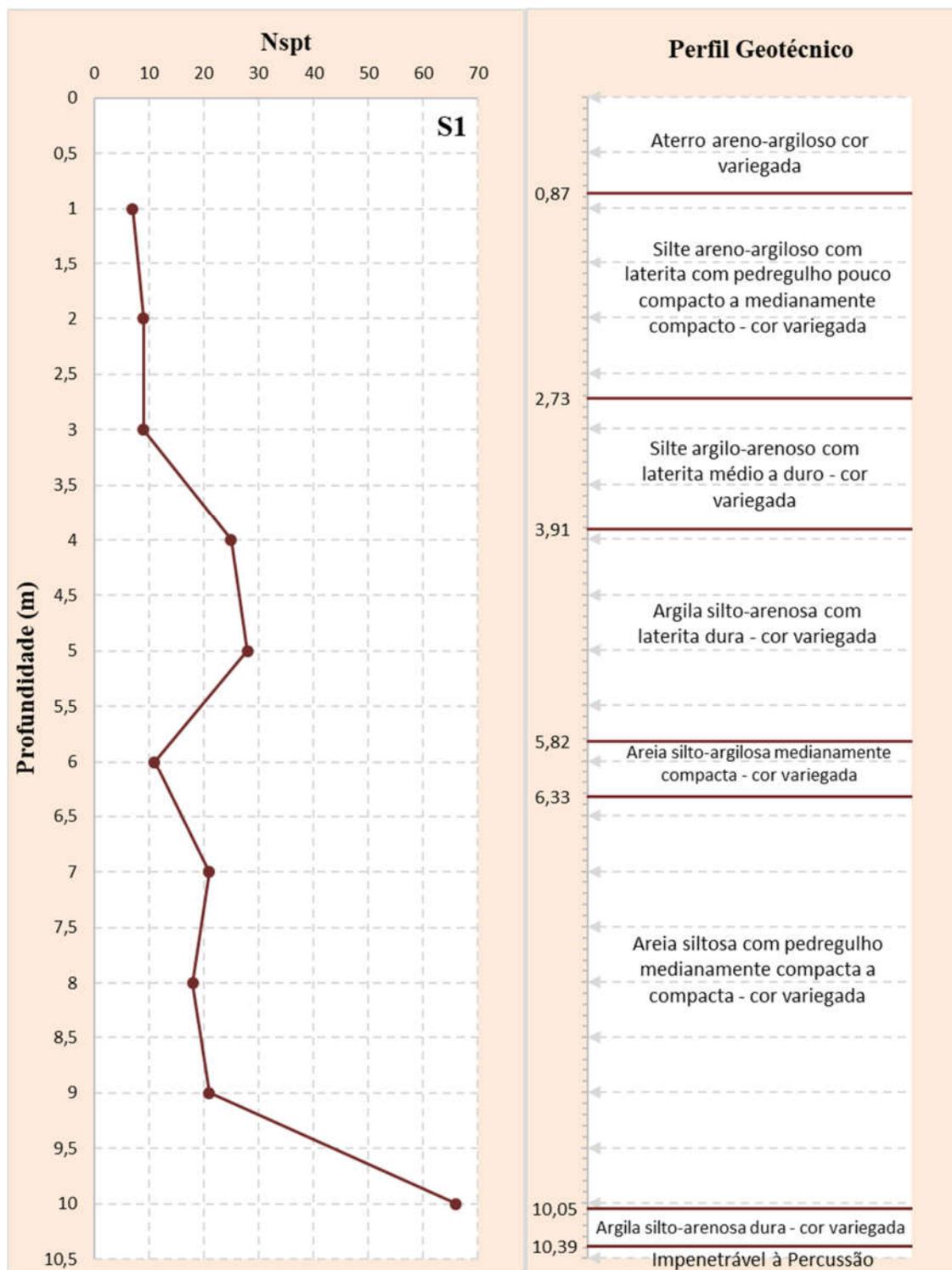


Figura 65 - Descrição do Nspt e das Camadas do Solo do Topo da Encosta da Comunidade Santa Clara.

O perfil geotécnico topo da encosta (S1), apresentado na Figura 65, é constituído por sete camadas até 10,39 m de profundidade. A primeira camada, com 0,87m de espessura, é constituída por um aterro areno-argiloso de cor variegada. Também de cor variegada, a segunda

camada, com espessura de 1,86m, constitui-se de um silte areno-argiloso com pedregulho e laterita, pouco a medianamente compacto. A terceira camada, de 1,18m de espessura, é formada por um silte argilo-arenoso com laterita, variando de médio a duro, com cor variegada.

A quarta camada, por sua vez, com 1,91m de espessura, é constituída por argila silto-arenosa, com laterita, dura e de coloração variegada. A quinta camada, medindo 0,51m, consiste em uma areia silto-argilosa medianamente compacta, também de cor variegada. Já a sexta camada, a mais expressiva do perfil, com 3,72m de espessura, compõe-se de uma areia siltosa com pedregulho, variando de medianamente compacta a compacta, de cor variegada. Finalmente, na sétima camada, de apenas 0,34m de espessura, encontra-se argila silto-arenosa dura de cor variegada.

Ao longo da profundidade, o material apresentou-se heterogêneo quanto à descrição tátil-visual, variando entre areias, siltes e argilas.

A resistência à penetração do amostrador padrão (N_{SPT}) cresce e decresce ao longo da profundidade. Os valores de N_{SPT} crescem lentamente de forma aproximadamente linear até os 3,30m de profundidade ($7 < N_{SPT} < 9$). A partir desta profundidade, a resistência aumenta rapidamente até os 5,30m, onde atinge o valor de pico ($N_{SPT} = 28$). Deste ponto até os 6,30m de profundidade, há uma queda brusca nos valores, chegando ao $N_{SPT} 11$. A resistência volta a crescer até os 7,30m ($N_{SPT} = 21$), a partir de onde decresce sutilmente até 8,30m ($N_{SPT} = 18$), crescendo novamente até os 10,39m, onde encontra-se o impenetrável à percussão (66 golpes para uma penetração de 0,24 m).

Conforme a classificação proposta no item 5.1, o perfil está classificado como do tipo PT3A, com intercalações de solo argiloso e arenoso, presença de pedregulho, e gráfico de penetração crescendo e decrescendo ao longo da profundidade, correspondendo ao perfil de número 15 da Figura 50.

Observando a Figura 65 nota-se a ausência do nível d'água no perfil, tornando, este, um solo não saturado. Segundo Coutinho e Severo (2009) esta situação é comum nos perfis residuais e na Formação Barreiras, devido aos níveis de água estarem, muitas vezes, em grandes profundidades.

A constatação de que o solo é não saturado é fundamental na interpretação dos ensaios, sobretudo os de campo, de acordo com Coutinho e Severo (2009), uma vez que, diferentemente dos solos saturados, nestes existe uma poropressão negativa instalada na fase líquida intersticial (sucção) que tende a fazer com que os solos se apresentem com resistência e rigidez elevadas.

O teor de umidade do solo é bastante variável ao longo da profundidade, como se observa na Figura 66.

A umidade é decrescente até a profundidade de 1,45m, caindo de 11,9% para 4%, voltando a crescer até a profundidade de 2,45m, onde atinge 10,3%. A partir deste ponto, os valores decrescem até 7,6% na profundidade de 2,95m, de onde retomam o crescimento até a profundidade de 3,95m, alcançando uma umidade de 12,3%. A umidade volta a cair até os 5,95m (4,3%), crescendo até os 6,45m (5,8%), decrescendo até os 8,45m (3,7%), e finalmente, crescendo até a umidade de 16,6%, na profundidade do impenetrável (10,39m).

Os valores máximos e mínimos obtidos foram, respectivamente: 16,6% (10,39m de profundidade) e 3,7% (na profundidade de 8,45m).

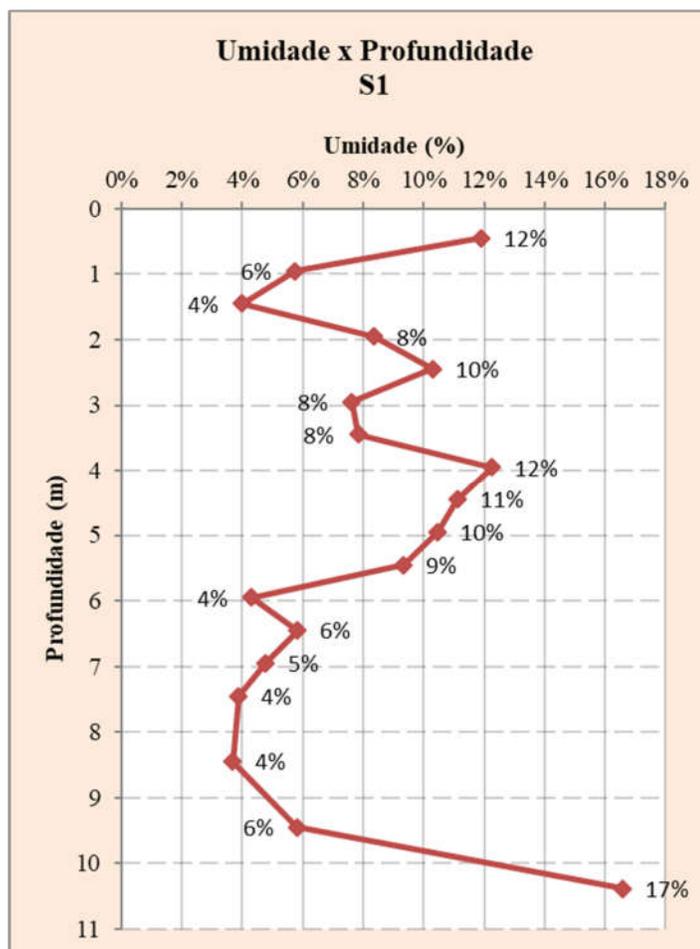


Figura 66 - Variação da Umidade ao Longo da Profundidade no Furo S1.

5.2.3 Análise Granulométrica, Limites de Consistência e Atividade do Solo

A partir da análise granulométrica realizada nas amostras indeformadas PI1A1 e PI1A2 (base da encosta) e PI2A1 (topo da encosta), com e sem defloculante, obtiveram-se os gráficos apresentados em: Figura 67, Figura 70 e Figura 73 (curvas e composições granulométricas das

amostras ensaiadas sem defloculante), e Figura 68, Figura 71 e Figura 74 (curvas granulométricas das amostras ensaiadas com e sem defloculante, e composições granulométricas das amostras ensaiadas com defloculante). As composições granulométricas das amostras estão dispostas, assim como os limites de Atterberg em: Tabela 13, Tabela 15 e Tabela 17.

Observa-se que, na amostra PI1A1 (Figura 67, Figura 68 e Tabela 13), houve aumento no percentual de argila (de 0,15 para 15%) e de silte (de 1,85 para 4%) e diminuição do teor de areia fina (de 26 para 9%) no ensaio realizado com defloculante, comparando-o ao realizado sem ele. Com base no Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) o solo tem textura grossa e é classificado em SM (areia siltosa).

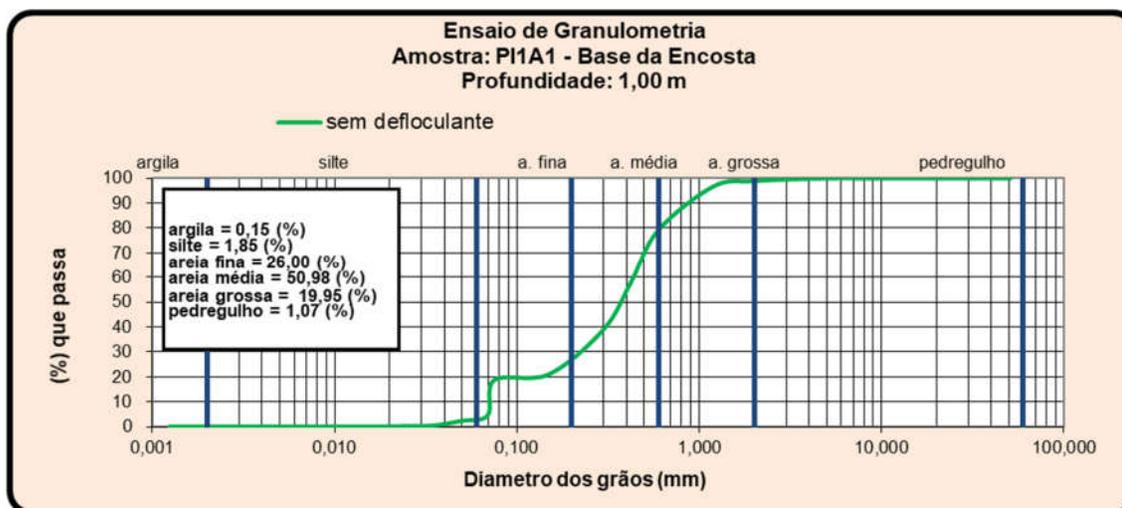


Figura 67 – Curva e Composição Granulométrica sem Defloculante da Base da Encosta, amostra PI1A1.

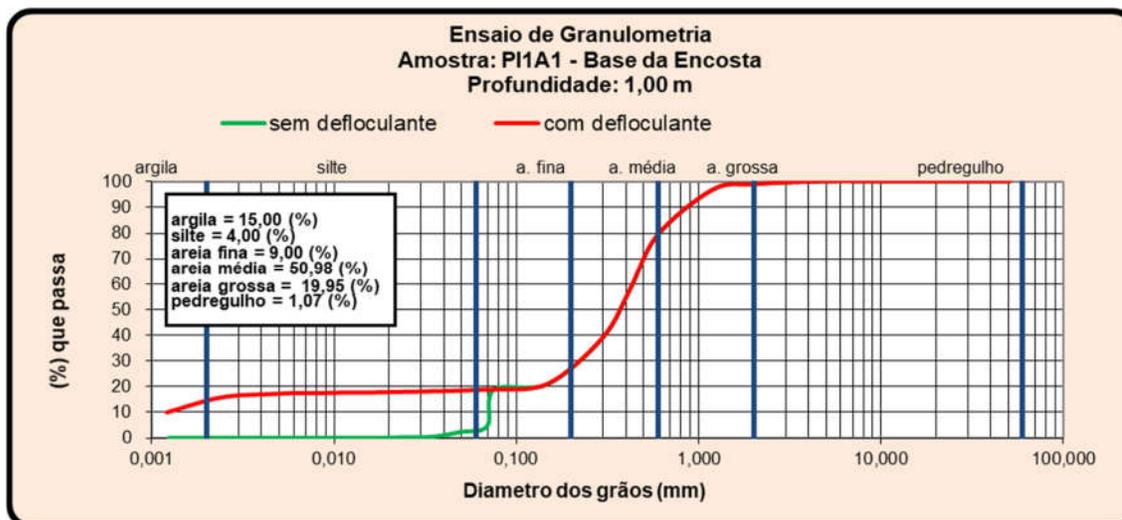


Figura 68 - Curva Granulométrica com e sem Defloculante e Composição Granulométrica sem defloculante da Base da Encosta, amostra PI1A1.

Tabela 13 - Composição Granulométrica e Limites de Atterberg, amostra PIIA1.

PIIA1										
Prof. (m)		Composição Granulométrica (%)						Limites de Atterberg (%)		
		Pedregulho	Areia Grossa	Areia Média	Areia fina	Silte	Argila	LL	LP	IP
1,00	Sem defloculante	1,07	19,95	50,98	26	1,85	0,15	NL	19	NP
	Com defloculante	1,07	19,95	50,98	9	4	15			

Para confirmar o limite de liquidez obtido em PIIA1, uma vez que não foram atingidos 25 golpes durante o ensaio de limite de liquidez (Tabela 14) e o percentual de argila no solo é significativo (Tabela 13), plotaram-se, em um gráfico que correlaciona número de golpes e teor de umidade do solo, os pontos obtidos, traçando, posteriormente, uma reta que se aproxima à configuração destes pontos (Figura 69). Desta forma, a partir da equação desta reta, um valor teórico foi determinado para LL (17%) e, conseqüentemente, para IP (- 3%), confirmando, que, de fato, o solo é não líquido e não plástico.

Tabela 14 - Dados e cálculos do ensaio do LL da amostra PIIA1.

Limite de Liquidez - NBR 6459					
Cápsula (N°)	97	45	40	86	LL = 17%
Golpes (N°)	19	15	11	7	
Peso Bruto Úmido (g)	28,84	25,3	32,92	30,01	
Peso Bruto Seco (g)	25,18	22,22	28,27	25,34	
Peso da Cápsula (g)	6,46	6,78	7,37	5,79	
Peso da Água (g)	3,66	3,08	4,65	4,67	
Peso do Solo Seco (g)	18,72	15,44	20,9	19,55	
Umidade (%)	20%	20%	22%	24%	

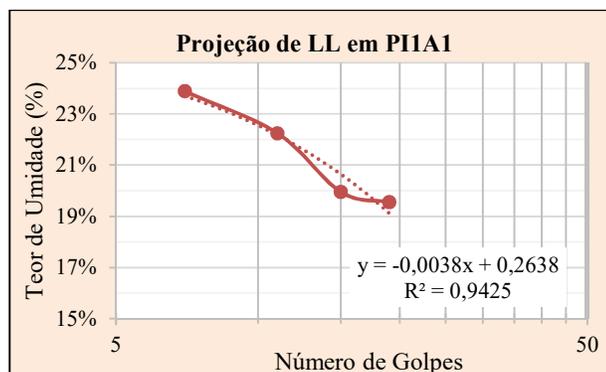


Figura 69 - Projeção do gráfico “teor de umidade x número de golpes” para a amostra PIIA1.

A amostra PI1A2 (Figura 70, Figura 71 e Tabela 15) apresentou alterações de valores nos ensaios com defloculante, semelhantes às identificadas na amostra PI1A1. Observa-se, nos ensaios com defloculante, aumento nos percentuais de argila (de 0 para 6,47%) e de silte (de 2,10 para 3,53%) e diminuição do teor de areia fina (de 16,9 para 9%). Com base no Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) o solo tem textura grossa e é classificado em SW-SM (areia siltosa bem graduada).

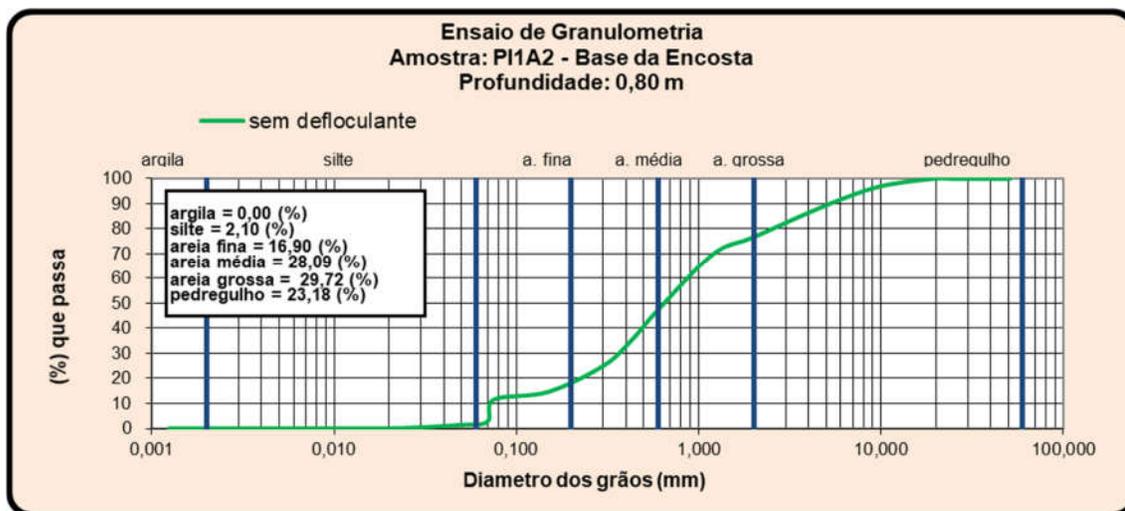


Figura 70 - Curva e Composição Granulométrica sem Defloculante da Base da Encosta, amostra PI1A2.

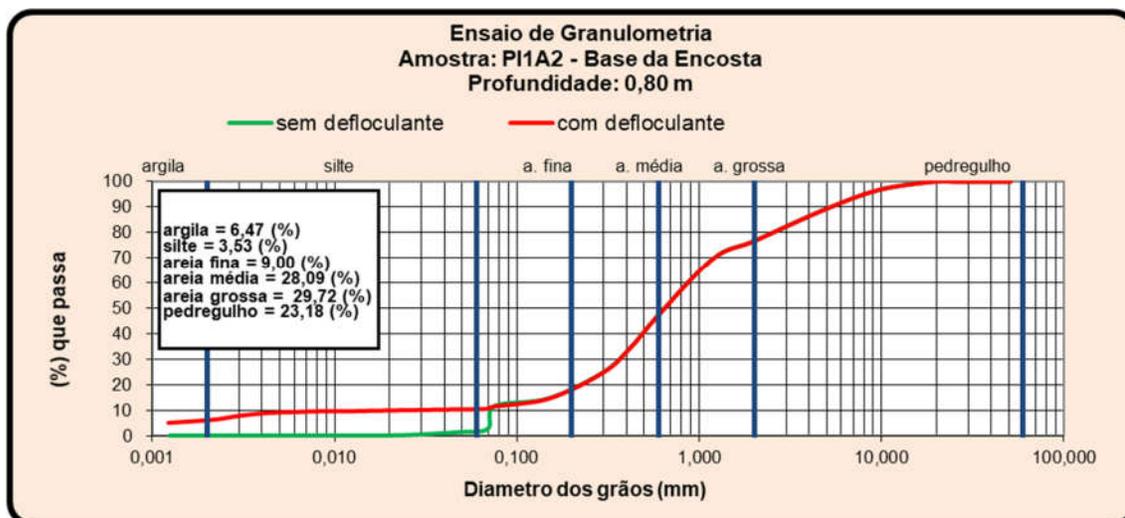


Figura 71 - Curva Granulométrica com e sem Defloculante e Composição Granulométrica sem defloculante da Base da Encosta, amostra PI1A2.

Tabela 15 - Composição Granulométrica e Limites de Atterberg, amostra P11A2.

P11A2										
Prof. (m)		Composição Granulométrica (%)						Limites de Atterberg (%)		
		Pedregulho	Areia Grossa	Areia Média	Areia fina	Silte	Argila	LL	LP	IP
0,80	Sem defloculante	23,18	29,72	28,09	16,9	2,1	0	NL	18	NP
	Com defloculante	23,18	29,72	28,09	9	3,53	6,47			

Assim como em P11A1, não foram atingidos, em P11A2, 25 golpes durante o ensaio de limite de liquidez (Tabela 16). Desta forma, em um gráfico que correlaciona número de golpes e teor de umidade do solo, foram plotados os pontos obtidos no ensaio, traçando, posteriormente, uma reta que se aproxima à configuração destes pontos (Figura 72). A partir da equação desta reta, o valor teórico determinado para LL foi 14% e, conseqüentemente, -3% para IP, confirmando que este solo também é não líquido e não plástico.

Tabela 16 - Dados e cálculos do ensaio do LL da amostra P11A2.

Limite de Liquidez - NBR 6459					
Cápsula (Nº)	566	19	40	91	LL = 14%
Golpes (Nº)	17	11	8	5	
Peso Bruto Úmido (g)	31,11	27,08	27,85	23,97	
Peso Bruto Seco (g)	27,55	23,83	24,31	20,9	
Peso da Cápsula (g)	6,72	6,12	6,26	6,12	
Peso da Água (g)	3,56	3,25	3,54	3,07	
Peso do Solo Seco (g)	20,83	17,71	18,05	14,78	
Umidade (%)	17%	18%	20%	21%	

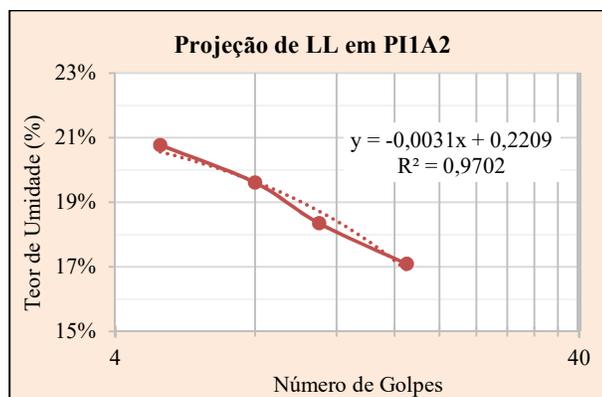


Figura 72 - Projeção do gráfico “teor de umidade x número de golpes” para a amostra P11A1.

Já na amostra PI2A1 (Figura 73, Figura 74 e Tabela 17) observaram-se alterações de valores bem mais significativas. Comparando os ensaios com e sem defloculante, identifica-se um grande aumento nos percentuais de argila (de 0,14 para 33%) e uma forte diminuição do teor de areia fina (de 44 para 11%) nos ensaios com defloculante. Com base no Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) o solo tem textura grossa e é classificado em SM-SC (areia silto-argilosa).

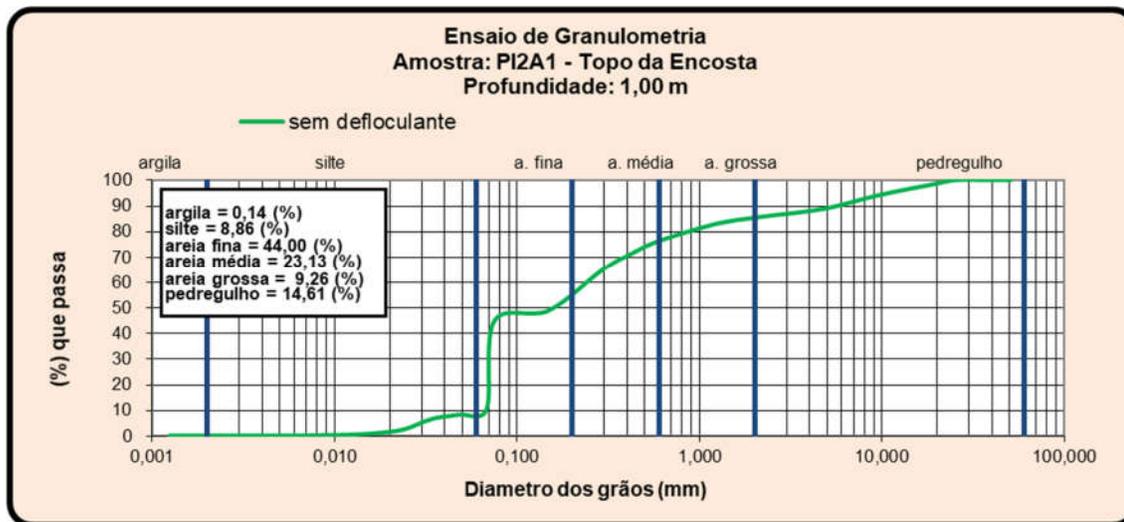


Figura 73 - Curva e Composição Granulométrica sem Defloculante do Topo da Encosta, amostra PI2A1.

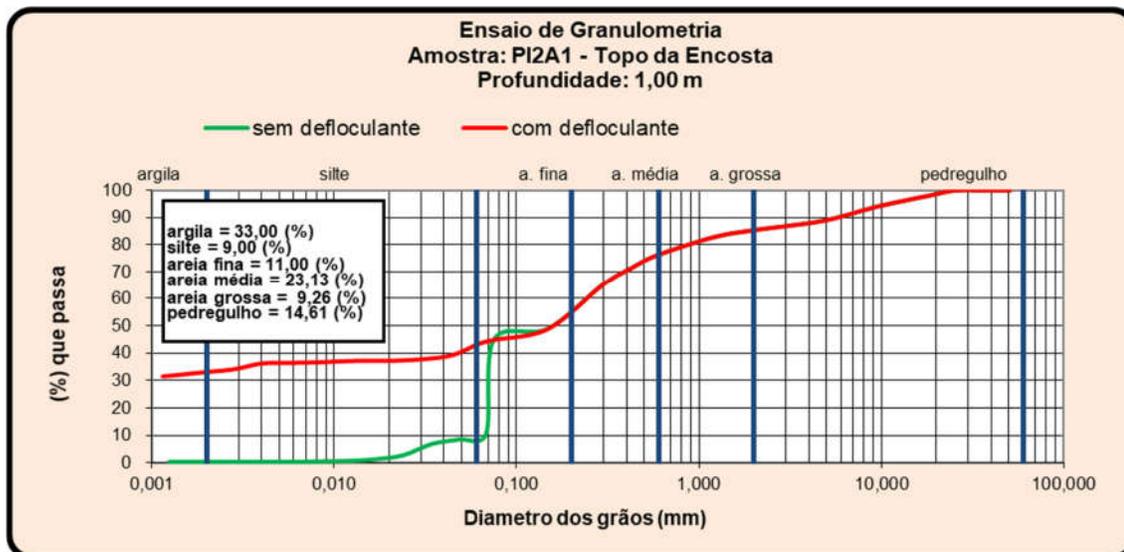


Figura 74 - Curva Granulométrica com e sem Defloculante e Composição Granulométrica sem defloculante do Topo da Encosta, amostra PI2A1.

Tabela 17 - Composição Granulométrica e Limites de Atterberg, amostra PI2A1.

PI2A1										
Prof. (m)		Composição Granulométrica (%)						Limites de Atterberg (%)		
		Pedregulho	Areia Grossa	Areia Média	Areia fina	Silte	Argila	LL	LP	IP
1,00	Sem defloculante	14,61	9,26	23,13	44	8,86	0,14	27	22	5
	Com defloculante	14,61	9,26	23,13	11	9	33			

Durante o ensaio de limite de liquidez em PI2A1, atingiram-se 25 golpes (Tabela 18). Plotando-se em um gráfico (número de golpes vs. teor de umidade do solo) os pontos obtidos no ensaio e traçando uma reta que se aproxima à configuração destes pontos (Figura 77), determinou-se o valor do LL (27%) e IP (5%).

Tabela 18 - Dados e cálculos do ensaio do LL da amostra PI2A1.

Limite de Liquidez - NBR 6459					
Cápsula (N°)	1	28	780	50	LL = 27%
Golpes (N°)	38	26	17	10	
Peso Bruto Úmido (g)	21,3	30,22	28,73	32,69	
Peso Bruto Seco (g)	18,78	24,94	23,78	26,81	
Peso da Cápsula (g)	8,55	5,14	6,5	7,44	
Peso da Água (g)	2,52	5,28	4,95	5,88	
Peso do Solo Seco (g)	10,23	19,8	17,28	19,37	
Umidade (%)	25%	27%	29%	30%	

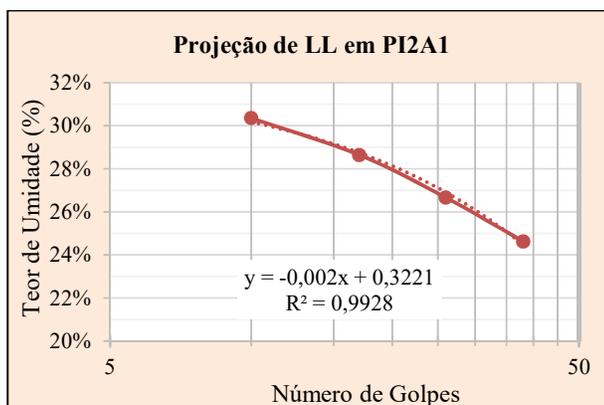


Figura 75 - Projeção do gráfico “teor de umidade x número de golpes” para a amostra PI1A1.

Em todas as amostras ensaiadas observaram-se o aumento dos percentuais de argila e diminuição do percentual de areia nos ensaios realizados com defloculante, comparando aos valores obtidos nos ensaios sem defloculante. Este fenômeno sugere que as frações mais finas do solo se encontravam agregadas, necessitando da utilização do defloculante para a definição de sua granulometria.

As amostras PI1A1 e PI1A2 (base da encosta) possuem classificação e índices bastante semelhantes, provavelmente por terem sido retiradas do mesmo poço de inspeção com diferença de cota de apenas 0,20 m. Já a amostra PI2A1 (topo da encosta), com percentual de argila muito mais significativo do que os apresentados na base, mostrou-se bem diferenciada das demais amostras, com classificação que remete a um solo mais argiloso (embora ainda arenosa).

Quanto a plasticidade, conforme Tabela 13, Tabela 15 e Tabela 17, as amostras PI1A1 e PI1A2 (base da encosta) são não líquidas e não plásticas, enquanto que a amostra PI2A1 (topo da encosta), conforme classificação proposta por Jenkins (apud Caputo, 1987) é fracamente plástica ($1 < IP \leq 7\%$).

No que diz respeito à atividade dos solos, a Tabela 19 apresenta os valores encontrados. Todos os solos são inativos ($I_A < 0,75$).

Tabela 19 - Atividade dos Solos Ensaiaados.

Amostra	% Argila	IP	Atividade $I_A = \frac{IP}{(\% \text{ argila})}$
PI1A1	15	NP	0
PI1A2	6,47	NP	0
PI2A1	33	5	0,15

Comparando, a partir da Tabela 20, os resultados obtidos para a Paraíba (nesta pesquisa e em Soares et. al (2017) para outro solo localizado sobre a Formação Barreiras de João Pessoa-PB, também na Comunidade Santa Clara, no bairro Castelo Branco) com experiências observadas nos solos da Formação Barreiras de Pernambuco, observam-se algumas similaridades: classificação predominantemente arenosa; percentuais de argila, silte e areia dentro da mesma faixa de valores; e inatividade. Diferenças significativas foram observadas em dois aspectos: no teor de pedregulho dos solos, que em Pernambuco fica entre 0 e 8% e na Paraíba chegou a 23%, e nos valores dos limites de Atterberg, tendo sido encontrado, na Paraíba, solo não líquido e não plástico.

Tabela 20 - Caracterização de solos da Formação Barreiras de Pernambuco e Paraíba (adaptado de Silva, 2007).

Local	Ref.	Prof. (m)	Descrição do solo	Granulometria				Limites de Atterberg		Atividade
				Argila	Silte	Areia	Pedregulho	LL (%)	IP (%)	
Paraíba	Presente estudo	0,80 - 1,00	areias siltosas e argilosas	6 e 33	4 e 9	43 e 80	1 e 23	NL e 27	NP e 5	0 - 0,15
Paraíba	Soares et. al (2017)	-	areias argilosas	-	-	62	3	31 e 47	8 e 19	-
Pernambuco	Silva (2007)	1,5 - 6,3	areia argilosa	20 - 28	8 - 12	57 - 68	0 e 8	32 - 42	12 - 14	0,5 - 0,7
Pernambuco	Coutinho et. al (2006)	0 - 5,0	areia argilosa e siltosa	8 - 30	3 - 15	55 - 87	0 - 2	29 - 34	11 - 15	...
Pernambuco	Lima (2002)	1,3	argila arenosa	58	3	39	0	42	16	0,3
Pernambuco	Bandeira (2003)	0,5 - 5,0	areia argilosa	20 - 48	8 - 31	40 - 57	0 - 8	45 - 49	14 - 19	0,7 - 1,1
		0,5 - 4,0	areias argilosas e siltosas	10 - 35	4 - 24	58 - 85	0	20 - 31	6 - 11	0,3 - 0,5
Pernambuco	Lafayette (2006)	0,5 - 6,0	areias argilosas e siltosas	5 - 39	1 - 7	66 - 94	0,5 - 2	20 - 32	4 - 13	0,3 - 0,5
Pernambuco	Santana (2006)	0,0 - 3,3	areia argilosa	17 - 20	4 - 13	65 - 67	2 - 6	24 - 29	7 - 12	0,5 - 0,6

5.2.4 Perfil Estratigráfico da Encosta da Comunidade Santa Clara

Baseando-se nas informações obtidas sobre as camadas do solo da encosta a partir da sondagem realizada no topo (Figura 65), nos resultados dos ensaios de caracterização dos solos da base (item 5.2.3), e nas observações feitas em campo nas escavações abandonadas citadas no item 4.3.5.2, é proposta uma aproximação ao perfil estratigráfico da encosta.

Os solos da base da encosta foram classificados, de forma geral, em areias siltosas, e o alto teor de pedregulho observado na Tabela 15 induziu uma associação entre estes solos e aquele encontrado na camada 6 do perfil de sondagem, classificado como “areia siltosa com pedregulho”.

Assumindo que o solo da base da encosta e o da camada 6 do perfil pertencem a mesma camada, traçou-se, a partir das curvas de nível da região, um perfil aproximado para a encosta, conectando estes solos para formar a primeira camada e traçando, paralelas à esta, as outras camadas de solo. Posteriormente, baseando-se nas escavações abandonadas pela presença exclusiva de aterro, estimou-se uma área com essa constituição, conforme apresentado na

Figura 76, que apresenta o perfil geotécnico da encosta com a localização dos poços de coleta de amostra (BL1, BL2, BL3 e BL4), das escavações abandonadas (T1 e T2) e do furo de sondagem (S1).

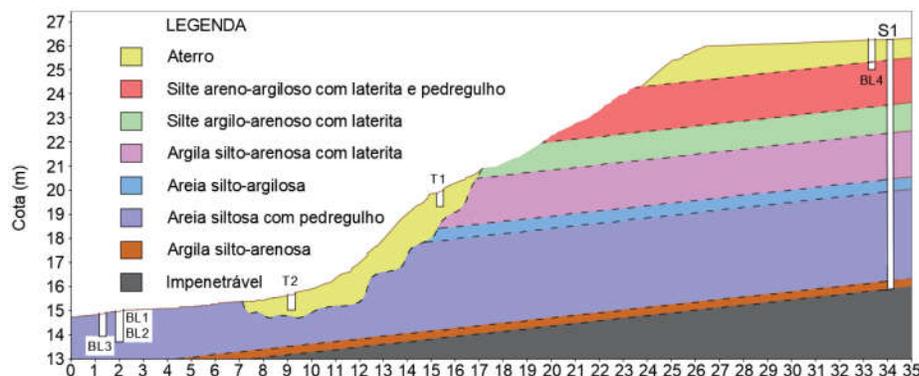


Figura 76 - Perfil estratigráfico aproximado da encosta da comunidade Santa Clara de João Pessoa – PB.

Ainda na Figura 76 observa-se que a amostra indeformada retirada no topo da encosta (BL 4) está na camada classificada na sondagem como “silte areno-argiloso com laterita e pedregulho”, divergindo da classificação proposta a partir da caracterização física realizada, que foi “areia silto-argilosa”. Na Tabela 17, onde estão apresentados a composição granulométrica da amostra e seus limites de Atterberg, observa-se que a presença de pedregulho, indicada pela análise tátil visual da sondagem, é, de fato, considerável, mas que o teor de silte da amostra é muito pequeno, quando comparado ao de areia. Esta falha de classificação durante a sondagem não é rara, como já foi mencionado no item 2.3, e reafirma a necessidade de realização de ensaios mais específicos para estudos de áreas em detalhe, sendo, o resultado do ensaio SPT, uma fase preliminar de direcionamento esta análise.

5.2.5 Permeabilidade

Os coeficientes de permeabilidade saturada (k) foram obtidos a partir dos dados apresentados no item 4.3.6.3, resumidos na Tabela 21. Os valores obtidos estão apresentados na Tabela 22.

Tabela 21 - Dados Para a Determinação dos Coeficientes de Permeabilidade das Amostras.

Amostra		L (m)	D (m)	A _c (m ²)	V _p (m ³)	T (s)	DP (m H ₂ O)
ID	Local						
CPP2	Base da encosta	0,12	0,096	7,24 x 10 ⁻³	5 x 10 ⁻⁶	9	0,50
CPP3	Base da encosta	0,12	0,098	7,54 x 10 ⁻³	5 x 10 ⁻⁶	9	0,50
CPP4	Topo da encosta	0,115	0,098	7,54 x 10 ⁻³	5 x 10 ⁻⁶	599	0,50

Tabela 22 - Coeficientes de Permeabilidade (k) dos Solos Ensaaiados.

Amostra		k (m/s)
ID	Local	
CPP2	Base da encosta	$1,84 \times 10^{-5}$
CPP3	Base da encosta	$1,77 \times 10^{-5}$
CPP4	Topo da encosta	$2,55 \times 10^{-7}$

Os valores de permeabilidade calculados para a base e topo da encosta estão em acordo com a faixa de valores apresentada por Coutinho e Severo (2009) para a Formação Barreiras, que é da ordem de 10^{-5} a 10^{-7} m/s, sendo essa variação de resultados dependente dos teores mais argilosos ou arenosos dos solos estudados.

Os coeficientes de permeabilidade obtidos na base da encosta apresentam valores muito semelhantes, como já era esperado a partir da análise granulométrica que apontou similaridade entre as amostras, da ordem de 10^{-5} m/s, enquanto que o encontrado para o topo da encosta foi da ordem de 10^{-7} m/s. Esta diferença pode ser atribuída à maior porcentagem de finos presente neste solo, que faz sua permeabilidade ser diminuída.

Segundo a classificação de grau de permeabilidade proposta por Terzaghi e Peck (1967), os solos da base da encosta são de média permeabilidade, enquanto que o do topo da encosta é de baixa permeabilidade.

5.2.6 Ensaio Edométrico

Os ensaios edométricos duplos foram realizados para avaliar o comportamento das tensões de pré-consolidação das amostras (ensaaiadas nas condições natural e inundada), bem como para a classificação do potencial de colapso. Seus resultados serão apresentados através da avaliação dos parâmetros de compressibilidade e das tensões de escoamento dos materiais estudados. Estão apresentadas, na Tabela 23, as condições iniciais e finais das amostras ensaiadas.

Os valores encontrados para os índices de vazios iniciais dos solos ensaiados (0,61 – 0,85) estão de acordo com a faixa de valores de alguns solos da Formação Barreiras de Pernambuco, apresentada por Coutinho e Severo (2009) (Tabela 24).

Tabela 23 - Condições iniciais e finais das amostras utilizadas nos ensaios edométricos duplos.

Amostra	Local	Condição de ensaio	Condições iniciais das amostras				Condições finais das amostras		
			W ₀ (%)	γ _s (g/cm ³)	e ₀	S ₀ (%)	W _f (%)	e _f	S _f (%)
E2N	Base	Natural	5,68	2,66	0,61	24,86	4,26	0,50	22,70
E2I		Inundada	5,75	2,66	0,61	25,14	15,03	0,30	100,00
E3N	Base	Natural	4,40	2,67	0,65	18,13	4,03	0,48	22,21
E3I		Inundada	4,57	2,67	0,65	18,75	22,43	0,37	100,00
E4N	Topo	Natural	17,04	2,65	0,84	53,62	14,85	0,26	100,00
E4I		Inundada	17,17	2,65	0,85	53,86	17,97	0,26	100,00

Tabela 24 - Índice de vazios de alguns solos da Formação Barreiras (modificada de Coutinho e Severo, 2009).

Local	Referência	Índice de vazios inicial
Paraíba	Este trabalho	0,61 – 0,85
Pernambuco	Lafayette (2000)	0,62 - 0,82
	Lafayette et al. (2003, 2005)	0,82 - 0,84
	Silva et al. (2005)	0,65 - 0,91
	Coutinho et al. (1999)	0,62 - 0,69
	Bandeira et al. (2004)	0,63 – 0,84
	Silva (2007))	0,61 – 0,92
	Meira (2008)	0,62 – 0,98
Rio Grande do Norte	Severo et al.(2006)	0,40 – 0,75

A amostra do topo da encosta ainda em estado natural (E4N) possui grau de saturação bastante elevado ($\cong 54\%$), quando comparado ao das demais amostras (entre 19% e 25%). Este fato sugere que haverá uma variação de comportamento entre os ensaios na condição natural e inundada menor do que nas demais amostras.

Na Figura 77, na Figura 78 e na Figura 79 estão apresentados os resultados dos ensaios edométricos duplos, através de dois tipos de curvas: curvas que relacionam o índice de vazios (e) e a tensão vertical de consolidação em escala logarítmica ($\log \sigma_v$), e as curvas que relacionam a deformação volumétrica específica em escala linear (ϵ_v) com a tensão vertical de consolidação em escala logarítmica ($\log \sigma_v$).

Observa-se, nas curvas referentes às amostras do topo da encosta (Figura 79), nítida mudança do comportamento rígido para o plástico, com o trecho virgem bem definido para o ensaio na umidade natural e também no inundado. Essas amostras são as que apresentam as maiores deformações volumétricas, situação que pode ser explicada pelos maiores índices de vazios iniciais encontrados nessas amostras, quando comparadas às demais amostras ensaiadas (Tabela 23).

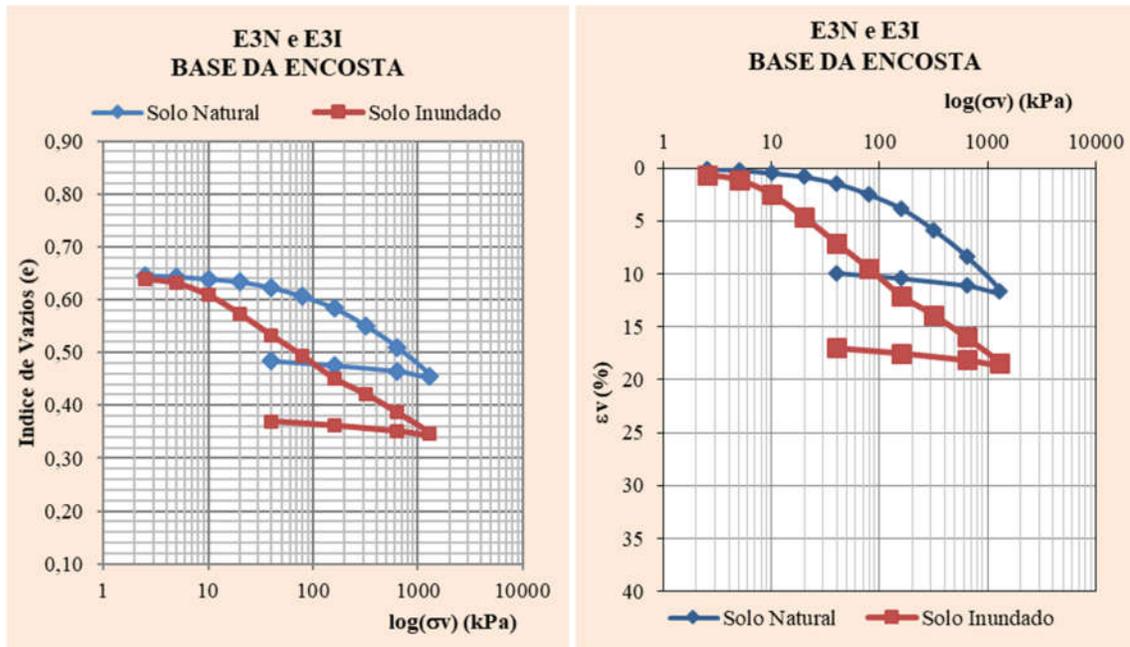


Figura 78 - Ensaio edométrico duplo: a) Variação do índice de vazios x tensão vertical de consolidação; e b) Deformação volumétrica específica x tensão vertical de consolidação das amostras E3N e E3I (base da encosta).

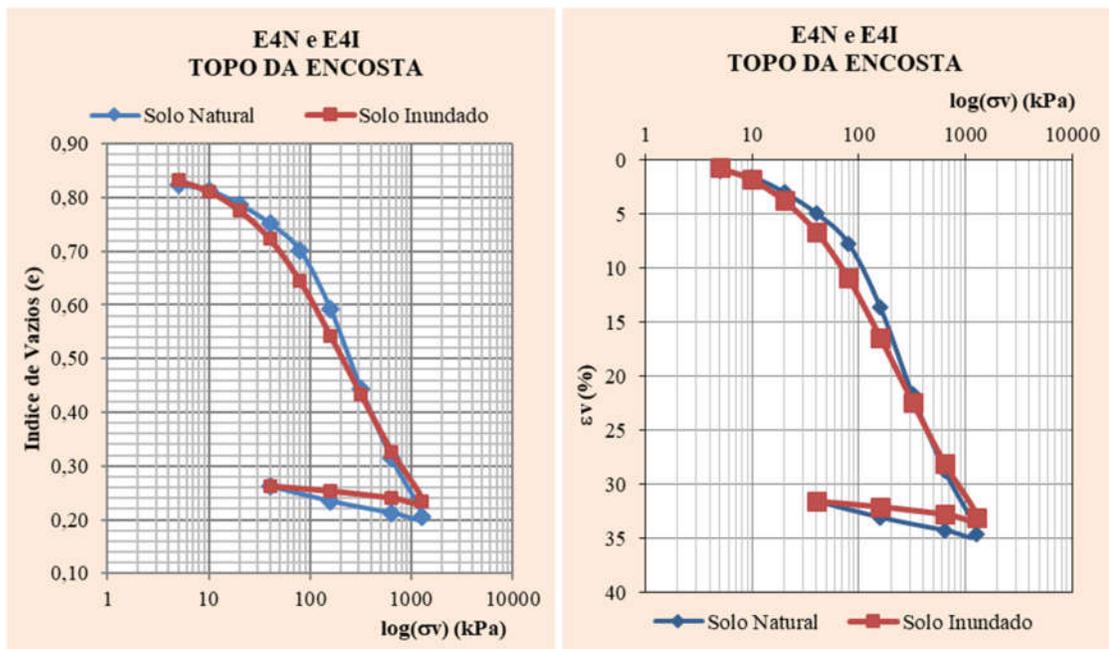


Figura 79 - Ensaio edométrico duplo: a) Variação do índice de vazios x tensão vertical de consolidação; e b) Deformação volumétrica específica x tensão vertical de consolidação das amostras E4N e E4I (topo da encosta).

Para melhor observação do comportamento entre as amostras ensaiadas, foram traçadas no mesmo gráfico as curvas com os resultados dos ensaios edométricos para a condição natural de umidade (Figura 80).

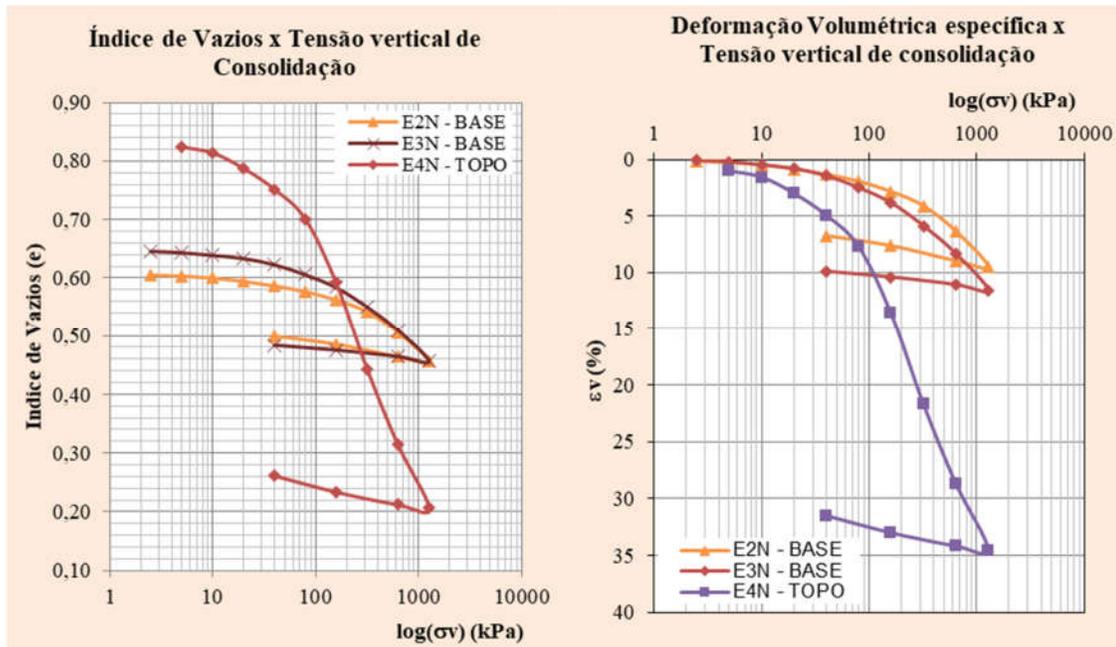


Figura 80 - Ensaio edométrico duplo: Comparação entre a variação do índice de vazios e a deformação volumétrica específica em função da tensão vertical de consolidação das amostras E2N, E3N e E4N.

As diferenças identificadas entre o comportamento das amostras de solo da base da encosta na condição de umidade natural e inundada pode ser atribuído, conforme Silva (2007), ao efeito da sucção que, através do aumento da resistência dos aglutinados de partículas e das ligações cimentantes, provoca o enrijecimento do solo, aumentando a tensão de escoamento para as amostras na umidade natural. Nos ensaios inundados há redução da sucção e consequente enfraquecimento dessas ligações, levando a deformações superiores às observadas nos solos na umidade natural.

A partir das curvas que relacionam o índice de vazios à tensão vertical de consolidação em escala logarítmica ($e \times \log(\sigma_v)$) foram determinadas, para todas as amostras, as tensões de escoamento, pelo método gráfico de Pacheco e Silva, bem como os índices de compressão (C_c) e expansão (C_s). Os índices de compressão e expansão foram calculados para as retas aproximadas definidas entre $100 \text{ kPa} < \sigma_v < 1000 \text{ kPa}$ para todas as amostras, sendo que os valores de C_c foram determinados sob as curvas de carregamento e os de C_s sob as de descarregamento. Os resultados estão apresentados na Tabela 25.

Os valores encontrados de tensão de escoamento são maiores nas amostras ensaiadas na condição natural, devido a maior rigidez apresentada pelo solo nessa condição. As menores diferenças entre as tensões de escoamento na condição de umidade natural e inundadas são observadas nas amostras do topo da encosta, mais uma vez devido ao seu alto grau de saturação ainda na condição natural, como abordando anteriormente.

Tabela 25 - Tensão de escoamento e parâmetros de compressibilidade obtidos nos ensaios edométricos duplos.

Amostra	Local	Condição de ensaio	Tensão de escoamento	Parâmetros	
				Cc	Cs
E2N	Base	Natural	230 kPa	0,143	0,028
E2I		Inundada	13 kPa	0,150	0,040
E3N	Base	Natural	105 kPa	0,136	0,019
E3I		Inundada	7,2 kPa	0,127	0,015
E4N	Topo	Natural	66 kPa	0,411	0,019
E4I		Inundada	33 kPa	0,371	0,010

Na Tabela 25 ainda é possível observar maiores índices de compressão no solo com o de maior teor de argila dentre todos (topo da encosta), confirmando o caráter mais compressivo deste solo em relação aos demais.

A partir dos ensaios edométricos duplos foi possível, ainda, avaliar a colapsibilidade dos solos estudados, através do critério de classificação de Reginatto e Ferrero (1973). Os autores propõem a avaliação do potencial de instabilidade estrutural a partir do coeficiente de colapsibilidade (C) a partir da equação:

$$C = \frac{\sigma_{vps} - \sigma_{v0}}{\sigma_{vpn} - \sigma_{v0}} \quad (\text{Equação 5.1})$$

Sendo:

σ_{vpn} : tensão de escoamento do solo na umidade natural;

σ_{vps} : tensão de escoamento do solo inundado;

σ_{v0} : tensão vertical devido ao peso próprio do solo “in situ”.

Segundo esses autores, o solo pode ser classificado, de acordo com o colapso, em: verdadeiramente colapsível se $\sigma_{vps} < \sigma_{v0}$ e $C < 0$ (solo sofre colapso com o peso próprio); solo condicionado ao colapso se $\sigma_{vpn} > \sigma_{v0}$ e $0 < C < 1$ (solo sofre colapso independente de σ_v); o solo pode ser não colapsível se $\sigma_{vpn} = C = 1$.

A Tabela 26 apresenta os valores das tensões de escoamento e devido ao peso do solo para as amostras ensaiadas, bem como suas classificações.

Tabela 26 - Tensões de pré-consolidação e classificação de Reginatto e Ferrero (1973) obtidos dos ensaios edométricos duplos.

Amostra	Blocos	Prof. (m)	σ_{v0} (kPa)	σ_{vpn} (kPa)	σ_{vps} (kPa)	C	Classificação
E2N	BL2	1,00	26,60	230	13	-0,07	Solo verdadeiramente colapsível
E2I							
E3N	BL3	0,80	21,36	105	7,2	-0,17	Solo verdadeiramente colapsível
E3I							
E4N	BL4	1,00	26,50	66	33	0,17	Solo condicionado ao colapso
E4I							

Os potenciais de colapso CP (%) estão apresentados na Tabela 27 e foram calculados através da equação:

$$CP = \frac{\Delta\varepsilon_V}{(1 - \varepsilon_{Vnat})} \times 100 \quad (\text{Equação 5.2})$$

Sendo:

$$\Delta\varepsilon_V = \varepsilon_{Vnat} - \varepsilon_{Vinun} \quad (\text{Equação 5.3})$$

O gráfico da variação do potencial de colapso (CP) com a tensão vertical de consolidação dos solos de BL1, BL2 e BL3 está apresentado na Figura 81.

Na Figura 81 e na Tabela 27 verifica-se que, para tensões verticais de consolidação até 1280 kPa, há um aumento crescente do potencial de colapso do solo de BL 2. Para BL 3 observa-se que o potencial de colapso cresce até a tensão de 320 kPa, a partir de onde passa a decrescer até 1280 kPa. O solo de BL 3 apresenta pico. Quanto ao BL 4, identifica-se que seu potencial de colapso é bastante variável com o crescimento da tensão de consolidação, apresentando trechos crescentes e decrescentes.

Tabela 27 - Potencial de colapso no topo e na base da encosta pelo ensaio edométrico duplo.

Tensão de consolidação (kPa)	Potenciais de colapso CP (%)		
	BL 2 - base	BL 3 - base	BL 4 - topo
2,5	1,19	0,57	-
5	2,79	0,93	0,29
10	4,55	2,00	0,25
20	6,42	3,85	0,77
40	7,99	5,71	1,77
80	9,56	7,16	3,47
160	11,18	8,54	3,26
320	13,10	8,52	0,91
640	14,34	8,34	0,84
1280	14,62	7,74	2,22

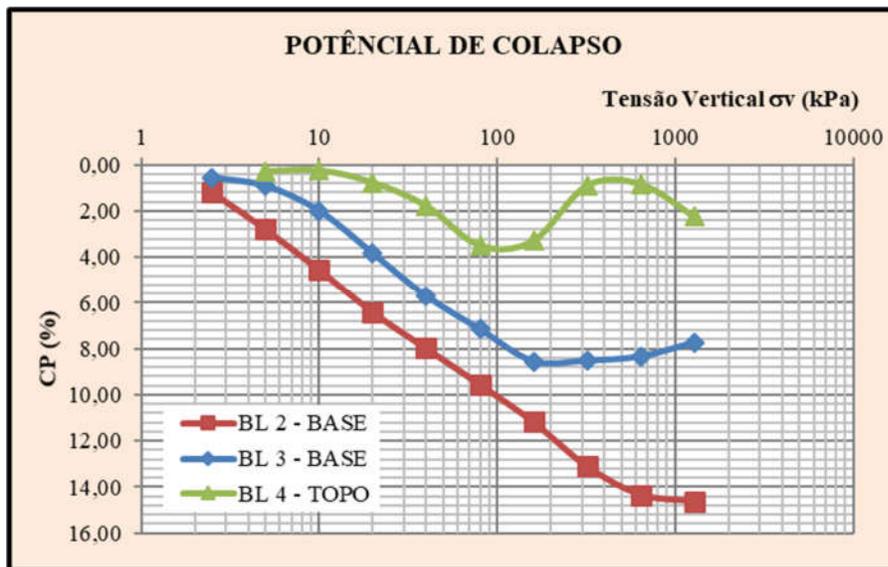


Figura 81 - Variação do potencial de colapso com a tensão vertical de consolidação.

O maior potencial de colapso obtido foi para o solo da base da encosta, da amostra BL 2, no valor de 14,62% para a tensão de 1280kPa. Para a amostra do BL 3, também na base, o maior valor determinado (8,54%) foi na tensão de 160 kPa. Já no BL 4, topo da encosta, o maior potencial de colapso obtido foi de 3,47% em 80 kPa.

Os solos classificados como “verdadeiramente colapsíveis”, segundo Reginatto & Ferrero (1973), BL 2 e BL 3, apresentaram comportamento relativamente semelhantes, como pode-se observar na Figura 81, crescentes até altas tensões de consolidação. Estes solos também apresentaram os maiores valores de potencial de colapso, quando comparados aos valores obtidos para BL 4 (“condicionado ao colapso”), corroborando com a classificação empregada.

Os módulos edométricos dos solos nas condições de umidade natural e inundada foram calculados para diversas variações de tensões, e respectivas deformações, pela equação:

$$E_{OED} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_V} \quad (\text{Equação 5.4})$$

Onde:

$\Delta\sigma$: variação de tensão vertical de consolidação; e

$\Delta\varepsilon_V$: variação de deformação volumétrica específica.

Os resultados estão apresentados na Tabela 28.

Observa-se que, para todos os solos, os módulos edométricos na umidade natural apresentaram valores elevados em todos os intervalos de tensão, quando comparados aos

módulos edométricos das amostras inundadas. O maior valor encontrado foi na amostra natural do BL2 (E2N), no intervalo de 640 – 1280 kPa, de 20,32 kPa.

A velocidade de recalque de um solo é determinada por sua compressibilidade e permeabilidade, podendo ser expressa através do coeficiente de adensamento (C_v) para diferentes tensões. Para a determinação do C_v é preciso determinar o tempo referente a 90% do recalque (t_{90}). O método gráfico de Taylor foi o utilizado.

Os valores encontrados para t_{90} estão apresentados na Tabela 29. Observa-se que entre as amostras ensaiadas na condição de umidade natural as faixas de valores foram pouco variáveis: em E2N houve variação de 0,64 a 1,88 minutos, em E3N o tempo foi de 0,75 a 2,20 minutos, e para E4N os valores foram de 0,56 a 1,96 minutos. É importante, ainda, notar que, para as mesmas tensões de consolidação, a partir de 20 kPa, os maiores valores de t_{90} são identificados para a amostra de solo inundada do BL 4 (topo da encosta), seguida pelas amostras inundadas da base da encosta, BL 2 e BL 3, nesta ordem. Observa-se, então, que amostras de caráter mais argiloso apresentam maiores valores de t_{90} , pois: percentual de argila do BL 4 (33%) > percentual de argila do BL 2 (15%) > percentual de argila do BL 3 (6,47%).

Tabela 28 - Módulos edométricos dos solos na umidade natural e inundada.

Módulo edométrico - ensaio edométrico duplo			
Amostras	Intervalo de tensão (kPa)	Módulo edométrico solo natural (MPa)	Módulo edométrico solo inundado (MPa)
BL 2 - base da encosta	2,5 - 5	2,27	0,15
	5 - 10	2,50	0,26
	10 - 20	2,86	0,46
	20 - 40	4,08	1,00
	40 - 80	6,56	1,90
	80 - 160	8,79	3,33
	160 - 320	12,75	5,41
	320 - 640	14,32	10,34
	640 - 1280	20,32	21,62
BL 3 - base da encosta	2,5 - 5	1,85	0,50
	5 - 10	1,82	0,37
	10 - 20	3,08	0,47
	20 - 40	3,08	0,81
	40 - 80	3,85	1,67
	80 - 160	5,93	3,09
	160 - 320	7,90	8,77
	320 - 640	12,93	15,24
	640 - 1280	19,69	26,12
BL 4 - topo da encosta	5 - 10	0,91	0,46
	10 - 20	0,70	0,52
	20 - 40	1,03	0,70
	40 - 80	1,45	0,93
	80 - 160	1,35	1,44
	160 - 320	1,99	2,69
	320 - 640	4,56	5,61
	640 - 1280	10,94	12,80

Tabela 29 - Variação de t_{90} nas amostras de solo estudadas em função da tensão de consolidação.

Tensão de consolidação (kPa)	t_{90} (min)					
	BL 2 - base		BL 3 - base		BL 4 - topo	
	E2N	E2I	E3N	E3I	E4N	E4I
5	0,64	0,81	0,75	0,56	0,56	0,81
10	1,00	1,00	0,85	0,72	1,00	1,00
20	1,32	1,21	1,00	1,00	1,21	1,56
40	1,56	1,44	1,25	1,21	1,44	2,10
80	1,69	1,69	1,40	1,56	1,69	2,40
160	1,77	1,82	1,70	1,69	1,82	2,72
320	1,82	2,25	2,00	1,82	1,96	3,24
640	1,88	2,89	2,10	1,96	1,96	3,61
1280	1,88	4,00	2,20	1,96	1,96	4,00

A partir da determinação dos valores de t_{90} foram calculados os coeficientes de adensamento vertical (C_v) para cada estágio de tensão vertical de consolidação. Na Figura 82 e na Figura 83 estão apresentadas os C_v em escala linear e a tensão vertical de consolidação em escala logarítmica para os solos nas condições de umidade natural e inundada, respectivamente.

No geral, verifica-se, em todas as amostras e condições de umidade, uma tendência de diminuição do C_v com o aumento da tensão vertical de consolidação.

A variação do coeficiente de adensamento (C_v) se deu na faixa de $0,64$ a $2,2 \times 10^{-6}$ m²/s em E2N, $0,22$ a $1,67 \times 10^{-6}$ m²/s em E2I, $0,52$ a $1,88 \times 10^{-6}$ m²/s em E3N, $0,49$ a $2,47 \times 10^{-6}$ m²/s em E3I, $0,34$ a $2,49 \times 10^{-6}$ m²/s em E4N, e $0,17$ a $1,73 \times 10^{-6}$ m²/s em E4I.

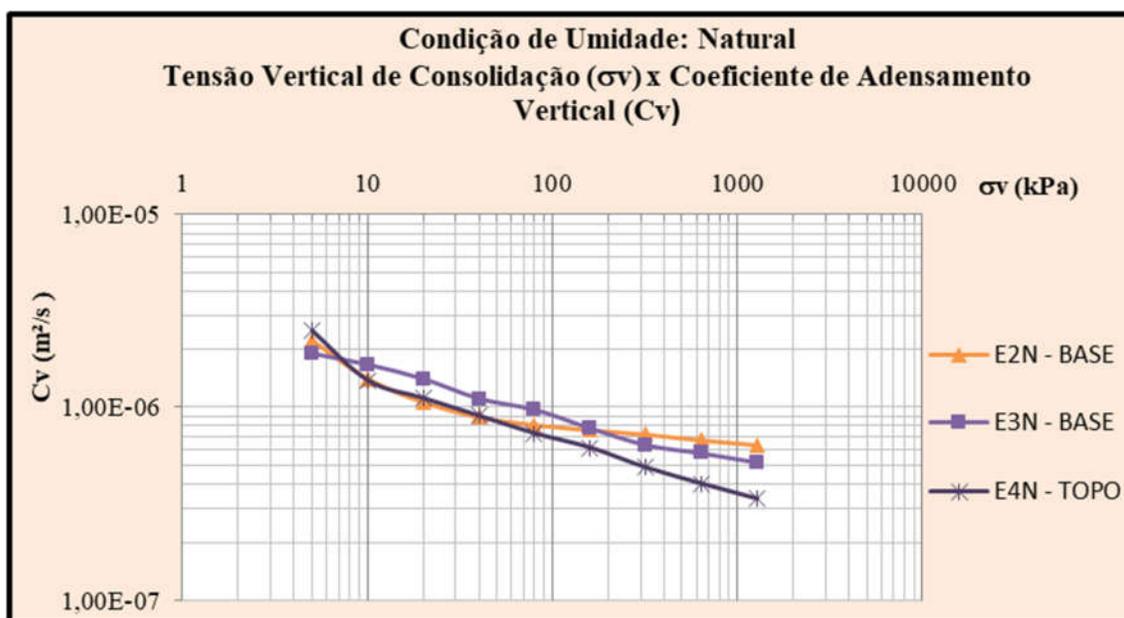


Figura 82 - Variação do coeficiente de adensamento vertical (C_v) com a tensão vertical de consolidação das amostras na condição natural.

Os valores obtidos de C_v são pouco variáveis nas amostras naturais e mais expressivas nas amostras inundadas. Nas amostras inundadas, percebe-se valores mais altos para E3I, e mais baixos para E4I, ficando, E2I, em um patamar intermediário.

Segundo Silva (2007) os valores encontrados para C_v são altos, indicando que, nos solos amostrados, a compressão primária tenha ocorrido em um curto período de tempo, com rápida dissipação de poro-pressões, e que as deformações cisalhantes nestes solos devem ocorrer de forma essencialmente drenada.

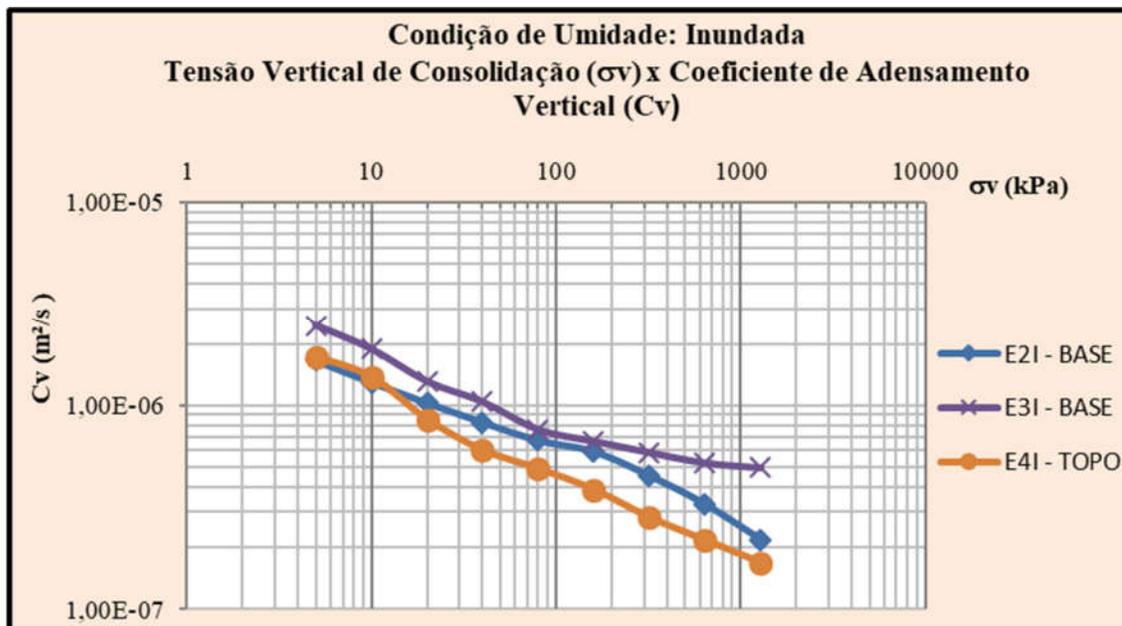


Figura 83 - Variação do coeficiente de adensamento vertical (C_v) com a tensão vertical de consolidação das amostras na condição inundada.

5.2.7 Resistência ao Cisalhamento

A resistência ao cisalhamento dos solos estudados foi obtida através de ensaios de cisalhamento direto convencionais (condições: inundada e umidade natural) e com reversões múltiplas (condição inundada) realizados a partir de corpos de prova moldados nos blocos indeformados BL 2 e BL 3 na base da encosta e BL4 no topo da encosta. A Tabela 30 registra as condições iniciais das amostras ensaiadas, bem como suas condições de ruptura.

Tabela 30 - Condições iniciais e de ruptura dos corpos de prova dos ensaios de cisalhamento direto.

Local da amostra	Condição de ensaio	σ_n (kPa)	W_0 (%)	γ_{nat} (g/cm ³)	γ_s (g/cm ³)	e_0	S_0 (%)	Condições de Ruptura		
								τ_{rup} (kPa)	$\sigma_{máx}$	ϵ_a (%)
BL 2	NATURAL	25	5,56	1,85	2,66	0,52	28	21,91	29,29	8,73*
		50	5,49	1,86		0,51	29	47,68	58,48	14,51
		100	5,68	1,85		0,52	29	77,09	116,75	14,34
		200	5,81	1,85		0,52	30	166,7	219,49	8,88*
	INUNDADA	25	5,48	1,87		0,50	29	17,26	29,30	14,67
		50	5,62	1,88		0,49	30	36,65	58,52	14,57
		100	5,69	1,89		0,49	31	94,52	116,63	11,28*
		200	5,49	1,87		0,5	29	162,05	232,34	9,90*
BL 3	NATURAL	25	4,25	1,75	2,67	0,59	19	25,06	29,28	14,63
		50	4,26	1,74		0,60	19	50,85	57,15	12,51*
		100	4,21	1,75		0,59	19	98,33	116,60	11,26*
		200	4,36	1,75		0,59	20	202,66	231,62	13,65
	INUNDADA	25	4,58	1,74		0,61	20	21,79	29,29	14,65
		50	4,30	1,77		0,58	20	40,99	58,51	14,54
		100	4,49	1,72		0,62	19	83,21	116,70	14,31
		200	4,06	1,74		0,59	18	170,02	226,87	11,84*
BL 4	NATURAL	25	17,84	1,68	2,65	0,86	55	27,59	29,28	6,73*
		50	16,85	1,69		0,83	54	48,04	58,48	14,50
		100	15,90	1,68		0,82	51	83,03	116,70	14,31
		200	16,71	1,68		0,84	52	177,99	231,99	13,79
	INUNDADA	25	17,15	1,69		0,84	54	20,88	29,29	14,65
		50	16,97	1,70		0,83	54	36,83	58,52	14,56
		100	17,06	1,68		0,84	54	78,71	116,73	14,34
		200	17,68	1,68		0,85	55	143,97	232,50	13,98

* situações onde o comportamento de pico foi identificado.

Observa-se uma variação de índice de vazios entre 0,49 (BL 2 - base) e 0,85 (BL 4 - topo), e de umidade inicial de 4,06% (BL 3 - base) a 17,84% (BL 4 - topo).

Da Figura 84 à Figura 89 estão apresentados os resultados dos ensaios das amostras na umidade natural em comparação com os correspondentes na condição inundada, através das curvas que relacionam a tensão cisalhante (τ) com a deformação horizontal específica (ϵ_h) e das curvas que relacionam a deformação vertical específica (ϵ_v) e a deformação horizontal específica (ϵ_h).

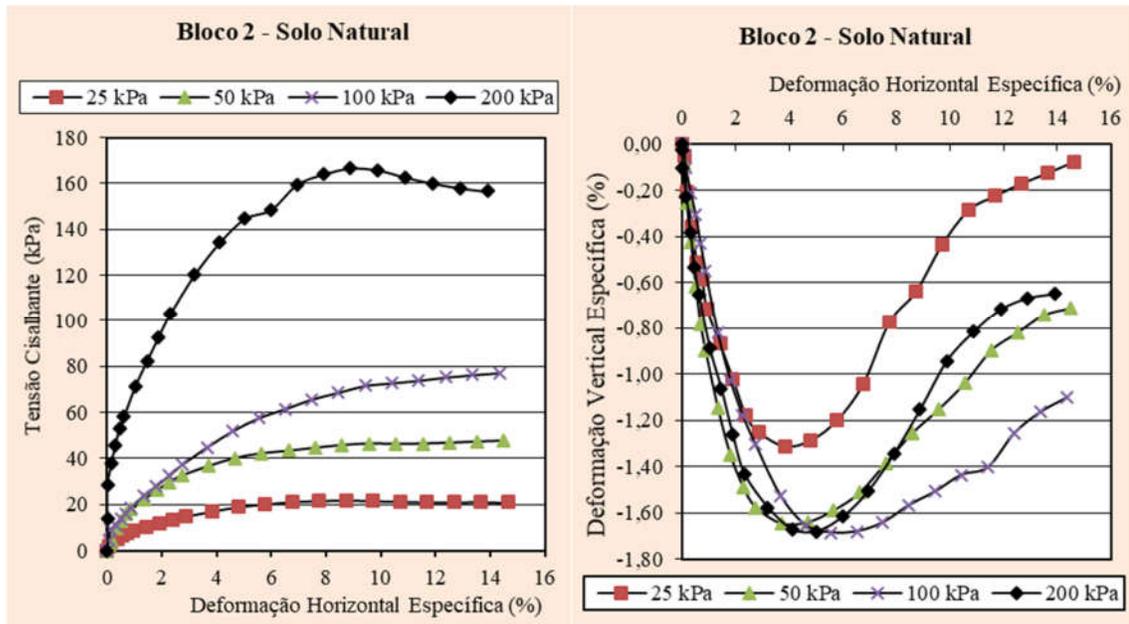


Figura 84 – Bloco 2 na condição natural de umidade: a) variação da tensão cisalhante com a deformação horizontal específica, e b) variação da deformação vertical específica com deformação horizontal específica.

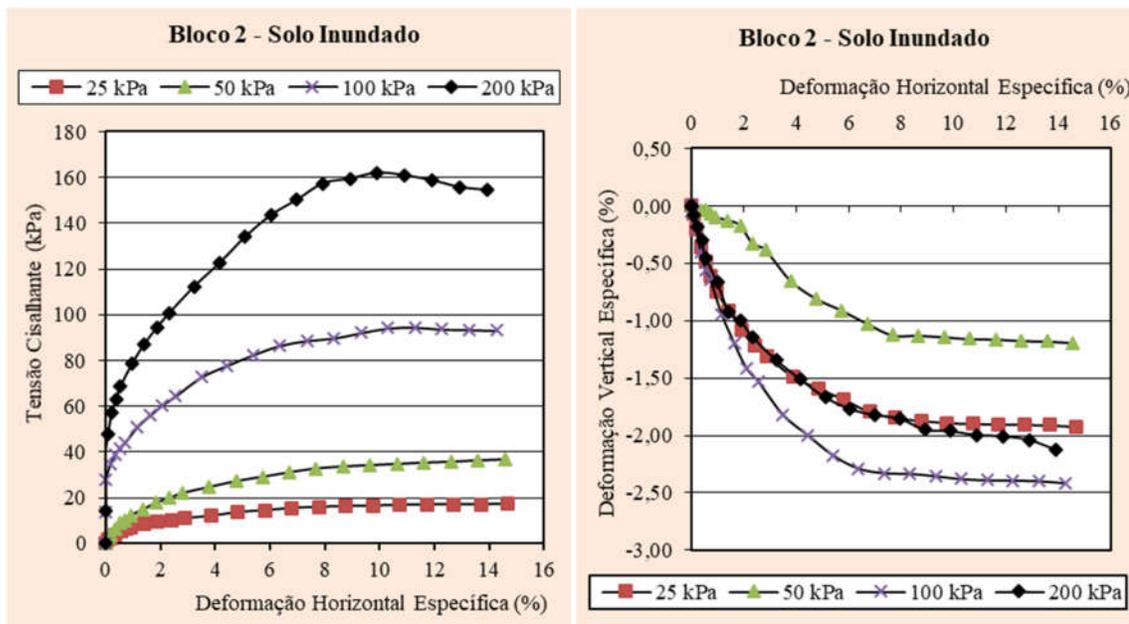


Figura 85 - Bloco 2 na condição inundada de umidade: a) variação da tensão cisalhante com a deformação horizontal específica, e b) variação da deformação vertical específica com deformação horizontal específica.

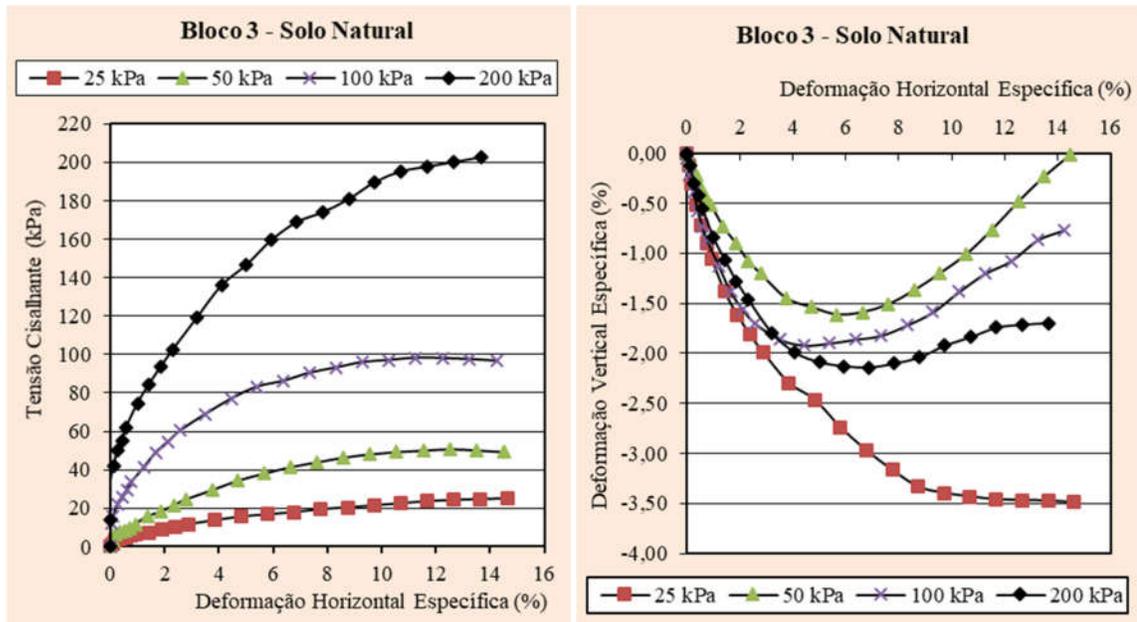


Figura 86 - Bloco 3 na condição natural de umidade: a) variação da tensão cisalhante com a deformação horizontal específica, e b) variação da deformação vertical específica com deformação horizontal específica.

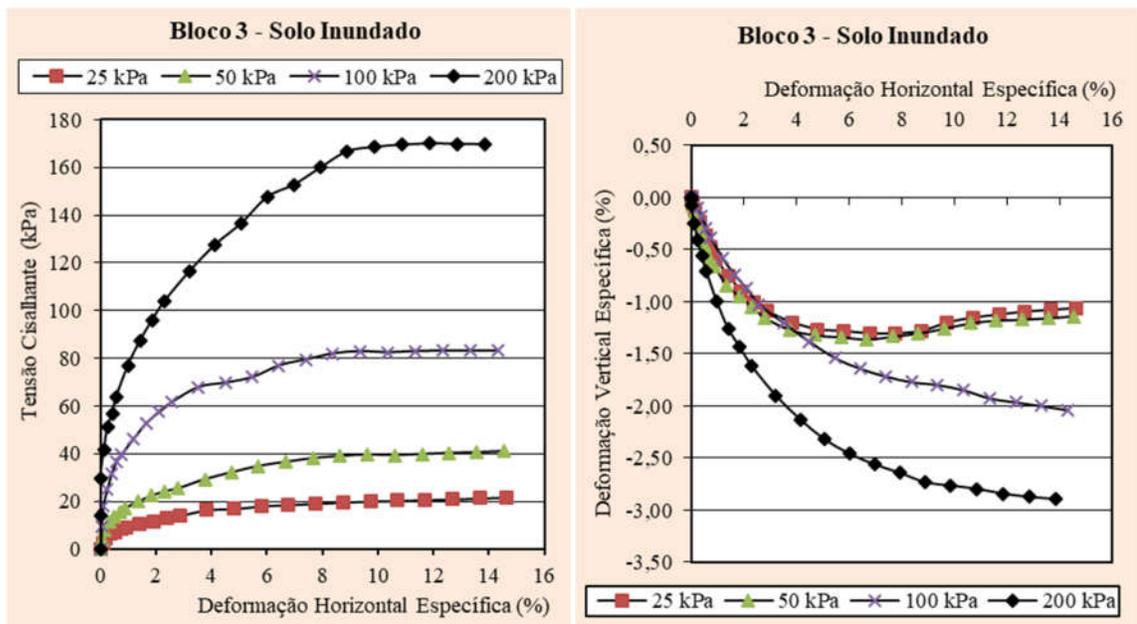


Figura 87 - Bloco 3 na condição inundada de umidade: a) variação da tensão cisalhante com a deformação horizontal específica, e b) variação da deformação vertical específica com deformação horizontal específica.

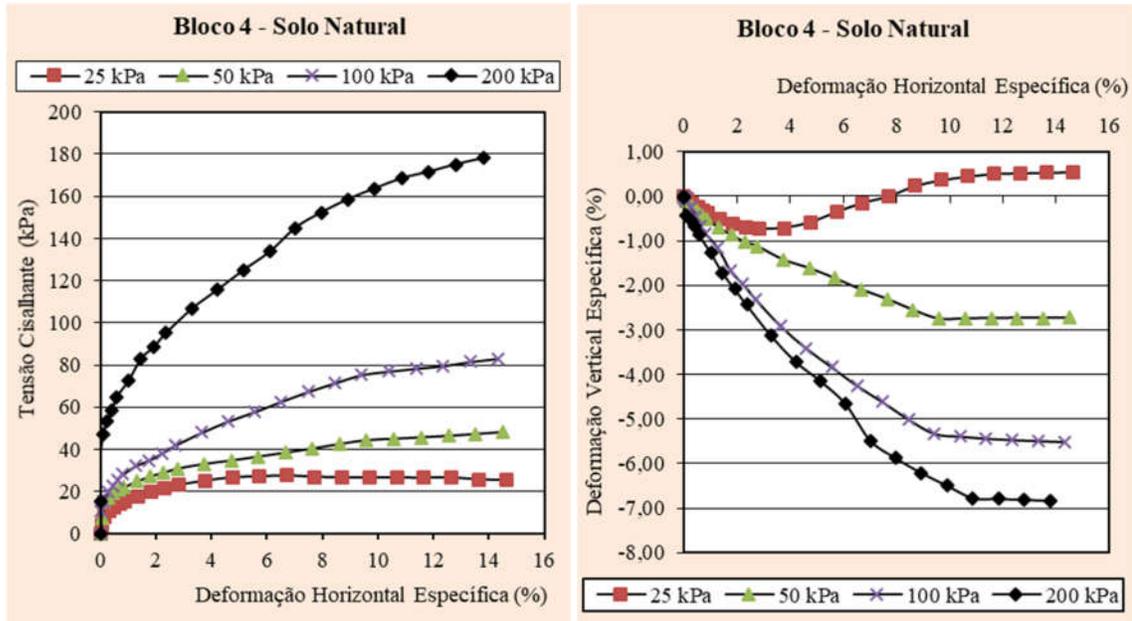


Figura 88 - Bloco 4 na condição natural de umidade: a) variação da tensão cisalhante com a deformação horizontal específica, e b) variação da deformação vertical específica com deformação horizontal específica.

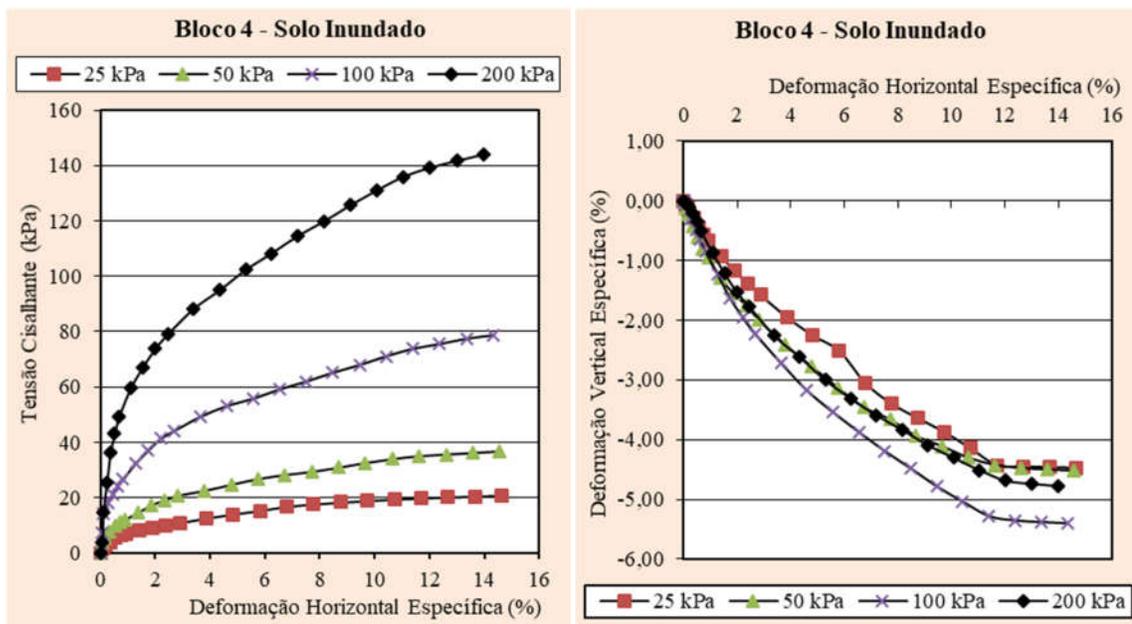


Figura 89 - Bloco 4 na condição inundada de umidade: a) variação da tensão cisalhante com a deformação horizontal específica, e b) variação da deformação vertical específica com deformação horizontal específica.

Observando o comportamento dos solos através das curvas que relacionam as tensões cisalhantes e as deformações horizontais, verifica-se que, para a tensão normal de 200 kPa, as amostras natural e inundada de BL 2 apresentaram nítido comportamento de pico. Características de pico menos evidentes graficamente também foram apresentadas: na tensão normal de 25 kPa da amostra natural de BL 2 e de 100 kPa na amostra inundada; nas tensões

de 50 kPa e 100 kPa na amostra natural de BL 3, e de 200 kPa na amostra inundada; e na tensão de 25 kPa na amostra natural de BL 4. Nestas situações, observa-se, em geral, um decréscimo da resistência para todas as tensões normais aplicadas depois de alcançado o pico, atingindo posteriormente patamares constantes. Para as demais amostras, tensões e condições de umidade, não é observado pico e as tensões cisalhantes são crescentes com o deslocamento horizontal, tendendo a atingir valores constantes após certo nível de deslocamento. Estes solos, segundo Lacerda (2004), tendem a apresentar rupturas lentas em movimentos de massa.

Sobre os gráficos “deformação vertical específica (ϵ_v) x deformação horizontal específica (ϵ_h)”, verifica-se variações nos comportamentos das amostras: na amostra natural de BL 2 houve compressão seguida por dilatação para todas as tensões normais; na inundada de BL 2 houve apenas compressão; na natural de BL 3 houve compressão seguida por dilatação em todas as tensões normais, com exceção da normal de 25 kPa, onde o volume só diminuiu; na amostra inundada de BL 3 houve compressão nas tensões normais de 200 kPa e 100 kPa, e compressão seguida por dilatação para as tensões de 25 kPa e 50 kPa; na natural de BL 4 o volume só aumenta para as tensões normais de 50, 100 e 200 kPa, sofrendo compressão e dilatação na tensão de 25 kPa; a amostra inundada de BL 4, por fim, só sofre compressão.

Os aumentos de volume observados são comuns em solos compactados e Pinto (2000) os explica pelo entrosamento entre as partículas que atuam como obstáculos na trajetória de outros grãos, que precisam se dilatar para vencê-los. Já as diminuições do volume são atreladas a uma acomodação das partículas provocadas pelo processo de cisalhamento.

Estabelecendo uma comparação entre as tensões cisalhantes nas condições de umidade natural e inundada de todos os solos estudados, observam-se maiores tensões cisalhantes nos solos naturais, e, portanto, maior resistência.

Dentre as amostras de solo estudadas, não foi verificado comportamento de pós-pico, pois a maior parte delas apresenta ruptura plástica, com mobilização crescente de tensões cisalhantes com os deslocamentos, tendendo a atingir valores constantes após certo nível de deslocamento, e naquelas nas quais se observou comportamento de pico, as tensões não chegaram a ficar estáveis.

Na Figura 90, na Figura 91 e na Figura 92 estão apresentadas as envoltórias de resistência, critério Mohr-Coulomb, pico dos solos ensaiados nas condições de umidade naturais e inundadas, podendo ser observadas a variação da coesão (c') e do ângulo de atrito (ϕ') nas duas condições. Os parâmetros de resistência obtidos estão apresentados na Tabela 31.

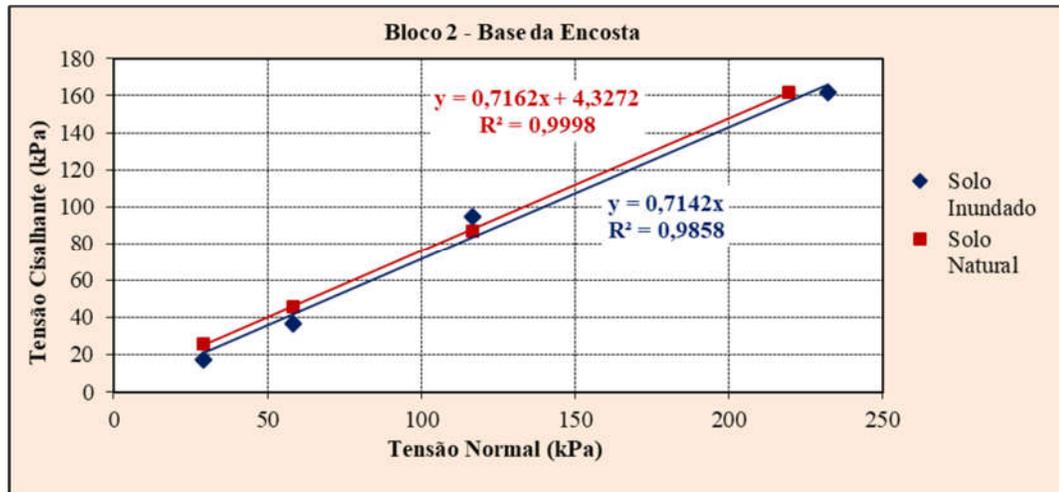


Figura 90 - Envoltória de pico das amostras do BL 2 no ensaio de cisalhamento direto convencional.

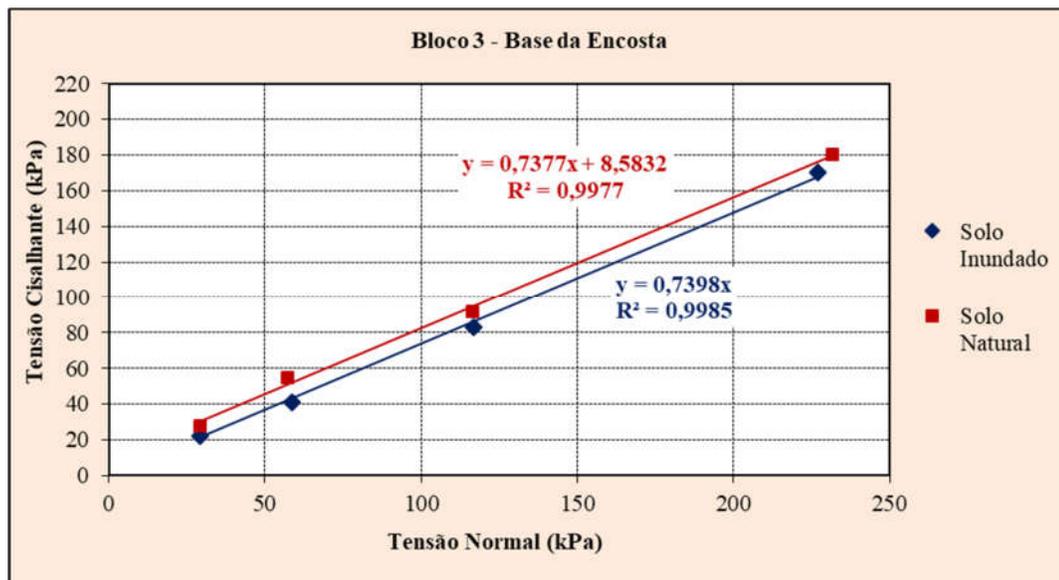


Figura 91 - Envoltória de pico das amostras do BL 3 no ensaio de cisalhamento direto convencional.

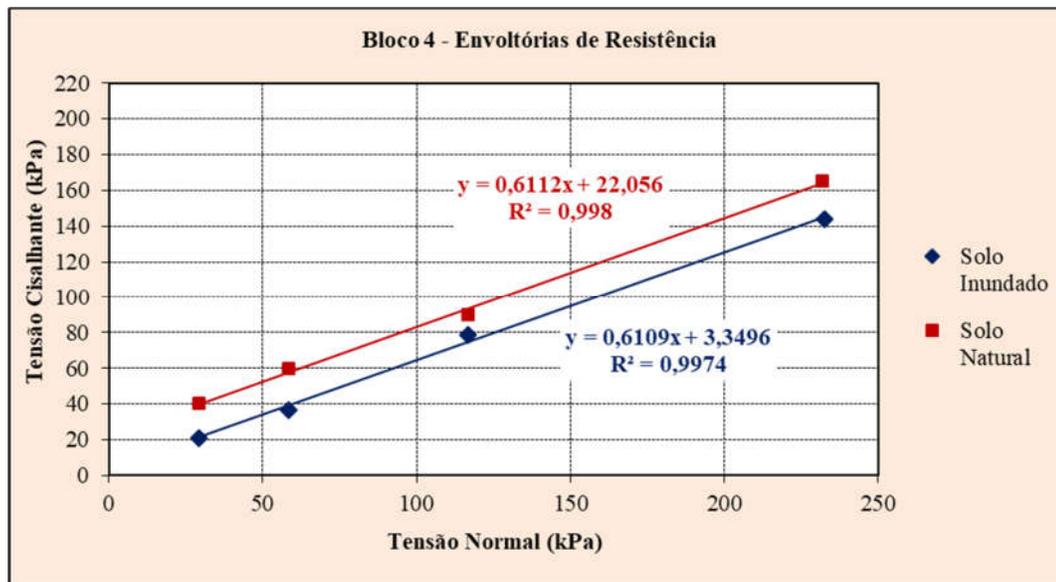


Figura 92 - Envoltória de pico das amostras do BL 4 no ensaio de cisalhamento direto convencional.

Tabela 31 - Parâmetros de resistência dos solos obtidos a partir do ensaio de cisalhamento direto.

Local da amostra	Condição de ensaio	c (kPa)	ϕ (°)
BL 2	Natural	4,3	36
	Inundada	0	36
BL 3	Natural	8,6	36
	Inundada	0	36
BL 4	Natural	22,0	31
	Inundada	3,4	31

As amostras ensaiadas de BL 2 e BL 3 (base da encosta) apresentaram valores de coesão inferiores aos de BL 4 (topo da encosta), tanto na condição de umidade natural, quanto na inundada, chegando a zero nesta umidade. Esta diferença já era esperada devido ao alto teor de areia e baixo teor de argila em BL 2 (79,93% de areia e 15% de argila) e BL 3 (66,81% de areia e 6,47% de argila) quando comparados aos teores em BL 4 (43,39% de areia e 33% de argila). Observa-se que quanto maiores os teores de argila e menores os teores de areia, maior a coesão apresentada pelo solo.

A inundação das amostras, e a conseqüente redução do efeito da sucção nos solos, fez diminuir a coesão destas e suas resistências devidas a este parâmetro.

A diferenç a entre os ângulos de atrito interno das amostras foi pequena, sendo idênticos os valores apresentados pelas amostras de BL 2 e BL 3 (36 ), e superiores aos valores obtidos em BL 4 (31 ), indicando que a resistência devida ao atrito entre as partículas de solo   menor nesta última.

Os parâmetros de resistência de BL 2 e BL 3 na condição inundada foram idênticas, confirmando as semelhanças já observadas nos ensaios anteriores (granulometria, permeabilidade e compressibilidade).

A Tabela 32 apresenta uma comparação entre os parâmetros de resistência de pico obtidos em algumas cidades da Região Metropolitana do Recife com os encontrados neste trabalho e no trabalho de Soares et. al (2017) para a Paraíba (os resultados apresentados nesta tabela não correspondem aos do solo apresentado na Tabela 20). Verifica-se que a maioria dos solos de Pernambuco apresentam forte caráter argiloso (argilas e areias argilosas), com exceção do estudado por Bandeira et al. (2004) que foi um silte arenoso, enquanto que os ensaiados nesta pesquisa apresentam caráter arenoso (areias siltosas). Esta diferença é refletida nos valores dos índices de plasticidade e coesão dos solos na condição natural de umidade, que, nos solos estudados da Paraíba, são menores do que aqueles encontrados em Pernambuco. Os valores de coesão dos solos na condição inundada e de ângulo de atrito interno nas condições natural e inundada encontrados em João Pessoa – PB se aproximam dos valores encontradas por alguns autores para Pernambuco, enquanto que os valores de coesão dos solos na condição natural de umidade são, no geral, inferiores, confirmando o caráter mais arenoso desses solos.

Tabela 32 - Parâmetros de resistência de pico de solos provenientes da Formação Barreiras de Pernambuco e da Paraíba (Modificado de Coutinho e Severo, 2009).

Referência/Local	Tipo de ensaio	Descrição / Classificação	IP	Condição de umidade	c (kPa)	ϕ (°)
Este trabalho / João Pessoa - PB	Cis. Direto	Areia siltosa SM	NP - 5	Natural	4,3 - 22	31 e 36
				Inundado	0 e 3,4	31 e 36
Soares et al. (2017) / João Pessoa - PB	Cis. Direto	-	-	Natural	9	39
Gusmão Filho et al. (1986) / Olinda -PE	Triaxial (CU)	Areia argilosa SC	31 - 40	Inundado	20 - 50	20 - 24
Coutinho et al. (1999; 2006); Santos (2001) / Horto Dois Irmãos: Recife-PE	Cis. Direto	Areia argilosa SC	10 - 16	Natural	13	31
				Inundado	0	30
Lafayette (2000) / Alto do Reservatório: Recife - PE	Cis. Direto	Areia argilosa SC	11 - 18	Inundado	7 - 13	24 - 26
Lima (2002) / Alto do Reservatório: Recife -PE	Cis. Direto	Argila arenosa SC	16	Natural	28	31
				Inundado	10	32
Lafayette et al. (2003; 2005) / Cabo de S. Agostinho -PE	Cis. Direto	Areia argilosa SC	9 - 13	Natural	33 - 56	33- 36
				Inundado	1,5 - 1,8	33- 35
Silva (2005) / Camaragibe -PE	Cis. Direto	Areia argilosa SC	12 - 13	Natural	43 - 46	31 - 45
				Inundado	0 - 3,7	31 - 35
Bandeira et al. (2004) / Camaragibe -PE	Cis. Direto	Silte arenoso ML	14 - 16	Inundado	12	29
Silva (2007) / Camaragibe - PE	Cis. Direto	Areia argilosa SC	12 - 14	Natural	45 -47	31 - 44
				Inundado	0 -3,7	31 - 34
Meira (2008)	Cis. Direto	Areia argilosa SC	7,9-9,2	Natural	1,0 - 4,2	28 - 34
				Inundado	0,4 - 3,5	23 - 26
Severo et al. (2006) / Tibau do Sul - RN	Cis. Direto	Argila baixa plasticidade CL	7 - 19	Natural	116-192	27 - 32
				Inundado	23 - 54	26 - 30

A Figura 93, a Figura 94 e a Figura 95 apresentam as curvas $\tau \times \varepsilon_h$ (tensão cisalhante x deslocamento horizontal) na condição inundada referente as amostras coletadas em bloco na base da encosta (BL 2 e BL 3) e no topo da encosta (BL 4). A Tabela 33 apresenta a condição inicial e residual, dos corpos de prova utilizados nos ensaios de cisalhamento direto com reversões múltiplas.

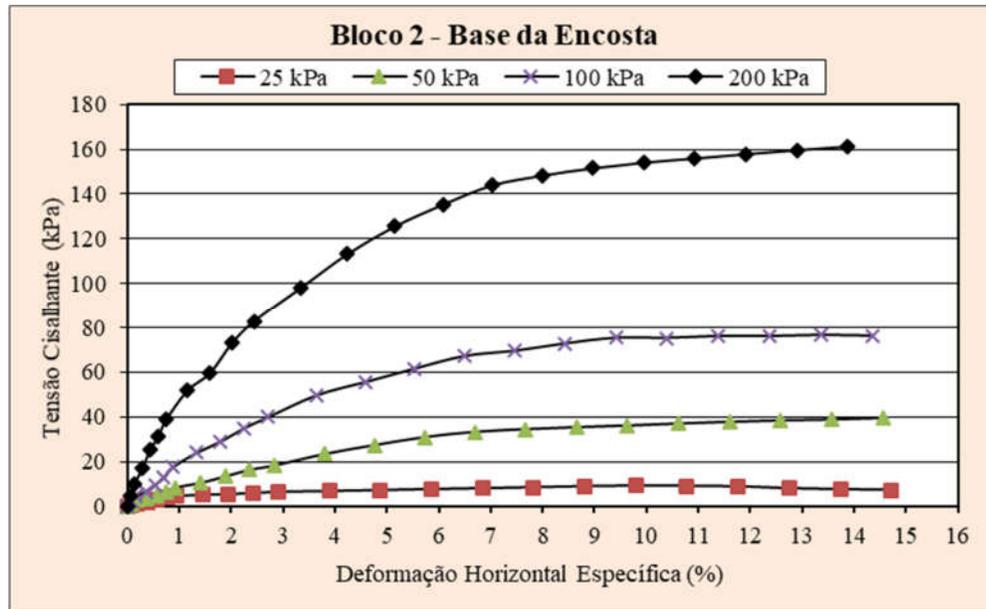


Figura 93 - Curvas tensão-deformação dos ensaios de cisalhamento direto com reversões múltiplas - Amostra do BL 2 (base da encosta).

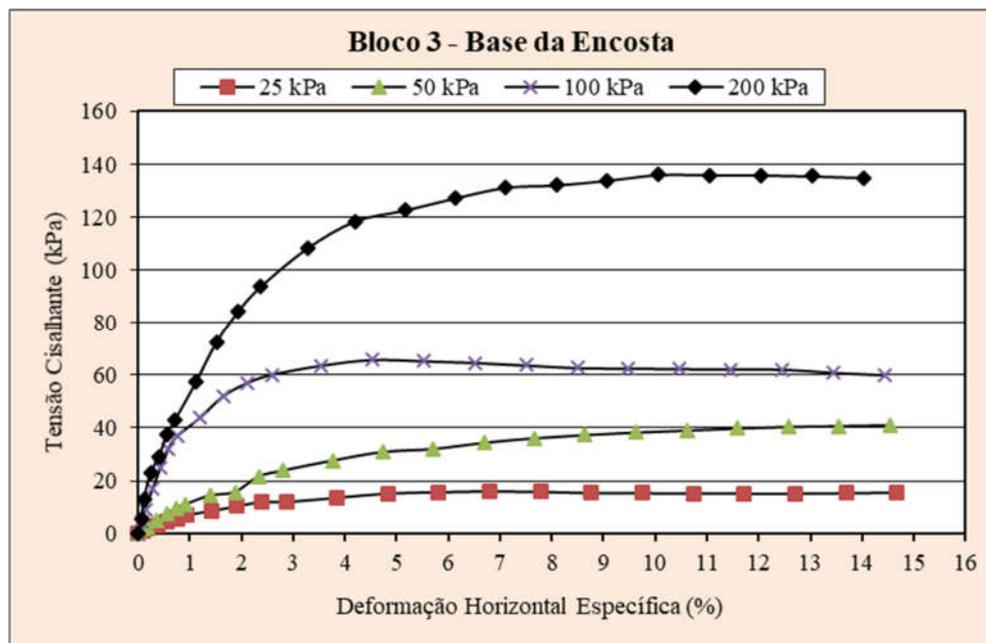


Figura 94 - Curvas tensão-deformação dos ensaios de cisalhamento direto com reversões múltiplas - Amostra do BL 3 (base da encosta).

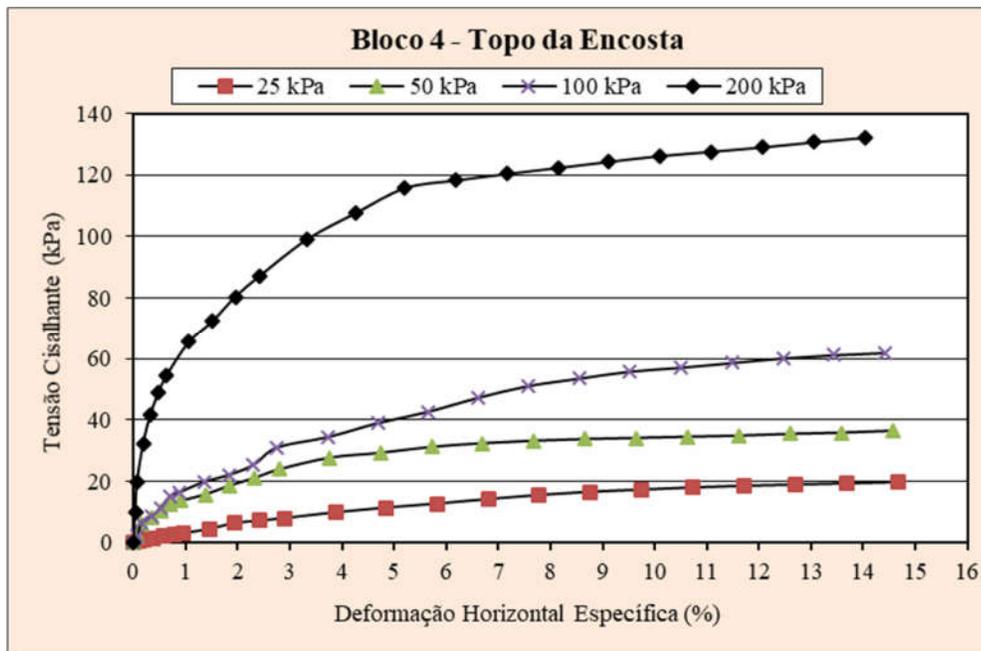


Figura 95 - Curvas tensão-deformação dos ensaios de cisalhamento direto com reversões múltiplas - Amostra do BL 4 (base da encosta).

De modo geral, nas curvas $\tau \times \varepsilon_h$, as tensões cisalhantes tendem a crescer com os deslocamentos horizontais, apresentando comportamento relativamente plástico.

Na tensão normal de 25 kPa as tensões cisalhantes atingiram valores praticamente constantes com o aumento dos deslocamentos com maior rapidez, sendo, para as tensões normais superiores, mais evidente o acréscimo de resistência com o aumento dos deslocamentos. Esta situação, segundo Skempton (1985) apud Silva (2007), é típica de ensaios com reversão múltipla, o que o torna limitado para a determinação da resistência residual, uma vez que o comportamento do solo é mascarado pela configuração do ensaio. Silva (2007) explica o aumento das tensões cisalhantes com os deslocamentos horizontais no decorrer das reversões pelo efeito de atrito da caixa de cisalhamento gerado pelo escape de material.

Os resultados sugerem que a determinação da resistência residual é mais facilmente alcançada em ensaios de cisalhamento com reversões com tensões normais relativamente baixas.

Tabela 33 - Condições iniciais e residuais dos corpos de prova referentes aos ensaios de cisalhamento direto com reversões múltiplas.

Local da amostra	Condição de ensaio	σ_n (kPa)	W_0 (%)	γ_{nat} (g/cm ³)	γ_s (g/cm ³)	e_0	S_0 (%)	Condições de Residuais		
								τ_{res} (kPa)	$\sigma_{máx}$	ϵ_a (%)
BL 2	INUNDADA	25	5,48	1,87	2,66	0,5	29	9,11	27,71	9,79*
		50	5,62	1,88		0,49	30	39,36	58,51	14,55
		100	5,69	1,89		0,49	31	76,57	115,42	13,36
		200	5,49	1,87		0,5	29	161,27	232,24	13,88
BL 3	INUNDADA	25	4,58	1,74	2,67	0,61	20	16,13	29,30	6,79*
		50	4,3	1,77		0,58	20	40,99	58,51	14,54*
		100	4,49	1,72		0,62	19	65,75	116,87	4,52*
		200	4,06	1,74		0,59	18	135,96	232,63	10,05*
BL 4	INUNDADA	25	16,15	1,69	2,65	0,83	52	19,62	29,29	14,66
		50	14,25	1,70		0,83	55	36,47	58,52	14,57
		100	17,62	1,68		0,85	55	61,95	116,86	14,43
		200	16,65	1,68		0,84	53	132,18	232,67	14,04

* situações onde o comportamento de pico foi identificado.

A Figura 96, a Figura 97, e a Figura 98 comparam as envoltórias de resistência para todas as amostras de solo ensaiadas, nas condições naturais e inundadas e nos ensaios com reversão. Para a mesma tensão normal, observam-se, para todas os solos, tensões cisalhantes maiores nas amostras ensaiadas na umidade natural e tensões menores naquelas ensaiadas com reversões múltiplas, estando as amostras inundadas em um patamar intermediário.

A Tabela 34 apresenta os parâmetros de resistência dos solos obtidos nos ensaios com reversões múltiplas.

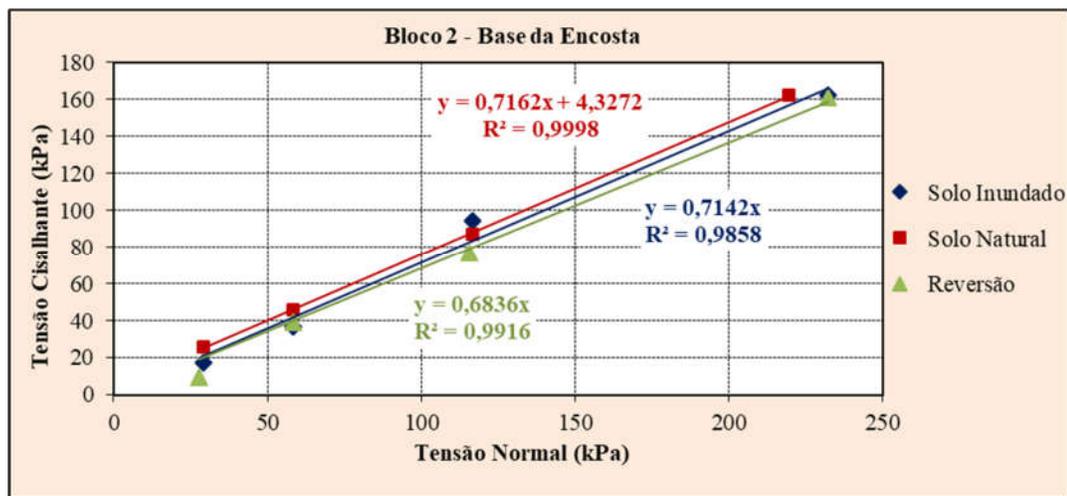


Figura 96 - Envoltória de pico residual das amostras do BL 2 no ensaio de cisalhamento direto com reversões múltiplas.

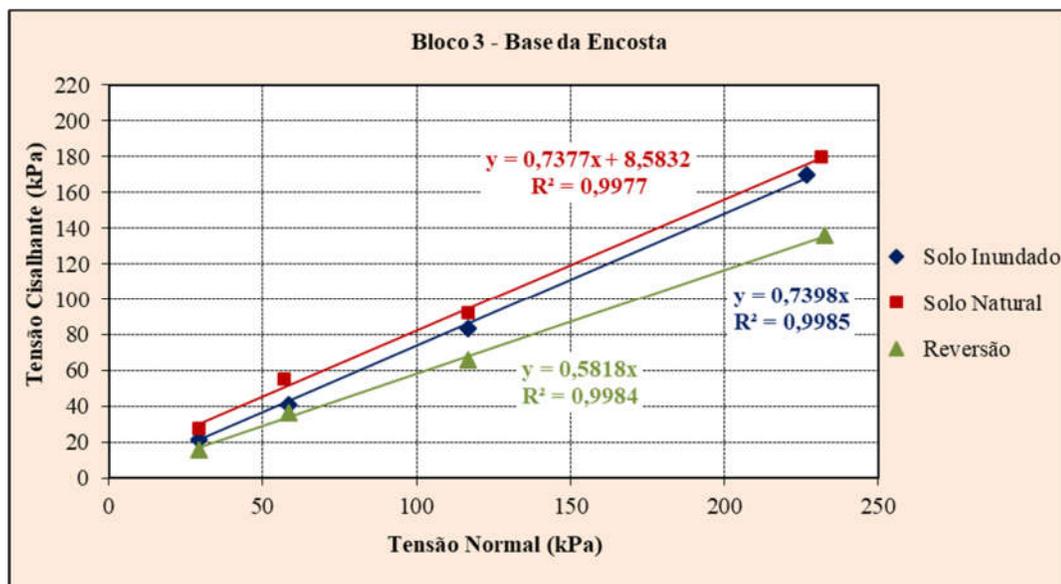


Figura 97 - Envoltória de pico residual das amostras do BL 3 no ensaio de cisalhamento direto com reversões múltiplas.

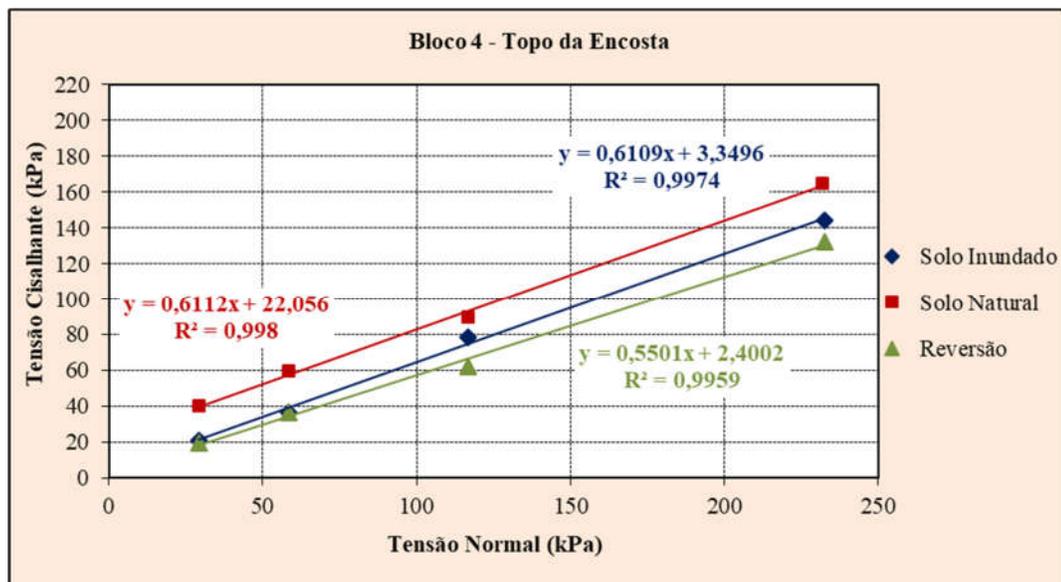


Figura 98 - Envoltória de pico residual das amostras do BL 4 no ensaio de cisalhamento direto com reversões múltiplas.

Tabela 34 - Parâmetros de resistência dos solos obtidos a partir do ensaio de cisalhamento direto com reversões múltiplas.

Local da amostra	Condição de ensaio	c (kPa)	ϕ_r (°)
BL 2	Inundada	0	34
BL 3	Inundada	0	30
BL 4	Inundada	2,40	29

Observando-se os parâmetros de resistência residual obtidos, e comparando-os com aqueles apresentados na Tabela 31, verifica-se, em todas as amostras, diminuição dos ângulos de atrito interno dos solos (sendo mais significativa em BL 3) e da coesão do bloco moldado em BL 4. A coesão nas amostras do BL 2 e do BL 3 se mantiveram constantes e iguais a zero.

Existem correlações diversas envolvendo o ângulo de atrito residual, a fração argila e as propriedades índices dos solos. Coutinho e Severo (2009) apresentam a relação entre resistência residual e a fração argila proposta por Skempton (1985), com a inserção de alguns solos residuais, colúvios e da Formação Barreiras. Os dados obtidos nos ensaios realizados neste trabalho foram acrescentados à ilustração apresentada por Coutinho e Severo (2009), correspondendo à Figura 99, utilizando a seguinte nomenclatura: FB1 (resultado da amostra do bloco 2 com o percentual de argila com defloculante), FB2 (resultado da amostra do bloco 3 com o percentual de argila com defloculante), FB3 (resultado da amostra do bloco 4 com o percentual de argila com defloculante), FB1' (resultado da amostra do bloco 2 com o percentual de argila sem defloculante), FB2' (resultado da amostra do bloco 3 com o percentual de argila sem defloculante), FB3' (resultado da amostra do bloco 4 com o percentual de argila sem defloculante).

Dentre os solos ensaiados, verifica-se que, quando considerado o percentual de argila com defloculante, aqueles representados por FB2 e FB1 se enquadraram na proposta de Skempton (1985), estando aquele representado por FB3 completamente fora dos limites. O FB1 está um pouco fora dos limites propostos, mas a diferença é pequena e será ignorada. Considerando o percentual de argila sem o defloculante, praticamente todos os solos ensaiados se enquadram na proposição de Skempton (1985).

O solo não enquadrado apresenta elevado ângulo de atrito residual, apesar do alto teor da fração argila, comportamento atribuído por Lacerda (2004) e Fonseca et al. (2004) a partir de Coutinho e Severo (2009), a uma estrutura de solo agregada, fato que condiz com a situação do solo representado por FB3, que apresentou percentual de argila no ensaio com defloculante (33%) muito superior ao encontrado naquele sem defloculante (0%), indicando forte agregação das partículas.

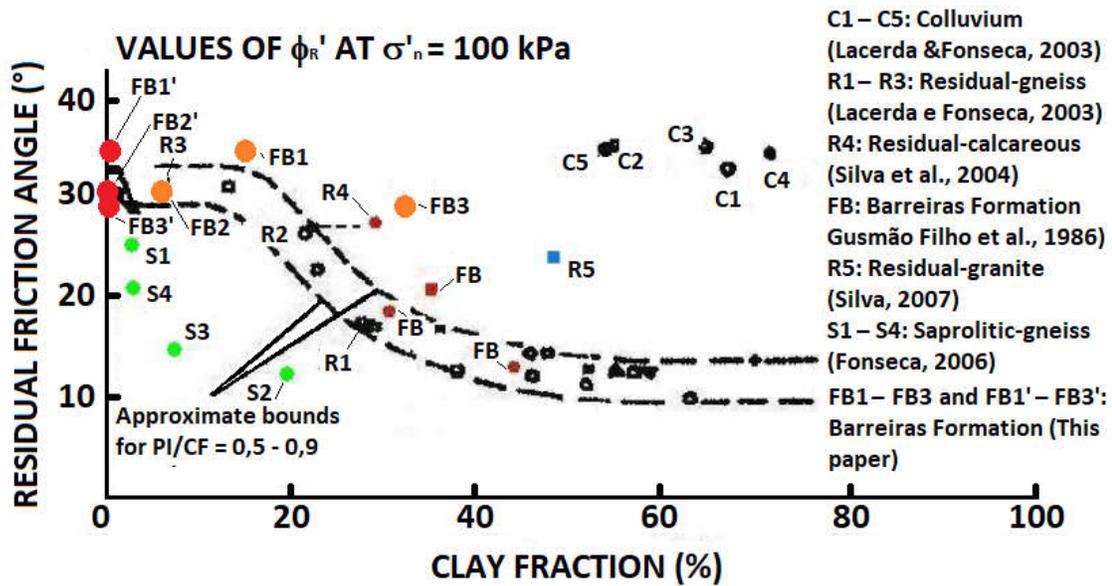


Figura 99 - Resistência residual de colúvios, solos residuais e solos da Formação Barreiras (Skempton, 1985 modificada de Coutinho, 2009).

Constata-se, por fim, que, para o enquadramento dos solos nos limites propostos por Skempton (1985), é mais apropriado considerar o percentual de argila do solo sem defloculante, sendo necessário, para levar em conta a argila com defloculante, estabelecer correlações próprias.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões desta dissertação, além das recomendações para futuras pesquisas.

6.1 Conclusões

A partir desta dissertação, concluiu-se que:

- A caracterização da Formação Barreiras de João Pessoa foi motivada pela necessidade de conhecimento do comportamento dessas formações para a melhor administração de duas situações: frequentes movimentos de massa em áreas de risco com ocupação irregular situadas sobre esta unidade geológica e a intensa e atual expansão urbana direcionada a ela;
- Através de 70 perfis de sondagem, a Formação Barreiras de João Pessoa foi distribuída em nove “perfis típicos”, com base na constituição granulométrica dos perfis e no comportamento dos gráficos de penetração ao longo da profundidade;
- O perfil típico mais recorrente é o PT3B (21%), caracterizado por intercalações de solo argiloso e arenoso com presença de pedregulho e laterita, enquanto que o mais raro é o perfil PT1B (4%), exclusivamente arenoso.
- Não é percebida, em mapa, a segregação de perfis de um mesmo grupo, podendo, estes, ser encontrados em zonas distintas e afastadas entre si;
- Reunindo os perfis arenosos aos de predominância arenosa, os argilosos aos de predominância argilosa, e os que apresentam variação entre areias e argilas, verifica-se que o número de perfis constituídos por solos argilosos e arenosos é o mais expressivo (44%), seguido pelos perfis com predomínio de areias (36%) e por aqueles com predomínio de argilas (20%);
- A partir da reunião dos grupos de perfis, observa-se, em mapa, a tendência de concentração dos perfis compostos por argilas e areias nas zonas sul e nordeste da cidade, e de perfis predominantemente arenosos na zona nordeste e oeste, sendo possível encontrá-los também em várias outras zonas da cidade;
- A encosta estudada em detalhe localiza-se no bairro Castelo Branco, e foi escolhida por se localizar sobre a Formação Barreiras, e estar inserida, segundo Soares et al (2015), em um setor de risco muito alto, apresentando frequentes movimentos de massa, expondo a população local a uma condição permanente de insegurança e medo;

- A sondagem realizada no topo da encosta identificou sete camadas até 10,39 m de profundidade, sem atingir o nível d'água. O material apresentou-se heterogêneo quanto à descrição tátil-visual, variando entre areias, siltes e argilas. A resistência à penetração do amostrador padrão (N_{SPT}) cresce e decresce ao longo da profundidade. Conforme a classificação proposta no trabalho, o perfil é do tipo PT3A;
- As amostras da base da encosta foram classificadas em areia siltosa e a amostra do topo em areia silto-argilosa, tendo sido observado, em todas as amostras ensaiadas, aumento dos percentuais de argila e diminuição do percentual de areia nos ensaios realizados com defloculante, comparando aos valores obtidos nos ensaios sem defloculante, sugerindo agregação das frações mais finas do solo;
- As areias siltosas foram classificadas, quanto a plasticidade, em “não líquidas” e “não plásticas”, e a areia silto-argilosa em “fracamente plástica”, com $IP=5$. Todos os solos foram inativos;
- Baseando-se nas informações obtidas sobre as camadas do solo da encosta a partir da sondagem realizada no topo, nos resultados dos ensaios de caracterização dos solos da base, e nas observações feitas em campo nas escavações abandonadas, foi proposta uma aproximação ao perfil estratigráfico da encosta, onde identificou-se, para a camada de onde foi extraída a amostra indeformada do topo, divergência entre a classificação tátil-visual da sondagem (silte areno-argiloso com laterita e pedregulho) e a determinada nos ensaios de caracterização (areia silto-argilosa), reafirmando a necessidade de realização de ensaios mais específicos para estudos de áreas em detalhe;
- Os valores de permeabilidade calculados para os solos da encosta estão em acordo com a faixa de valores apresentada por Coutinho e Severo (2009) para a Formação Barreiras, que é da ordem de 10^{-5} a 10^{-7} m/s, apresentando valores maiores para as areias siltosas (da ordem de 10^{-5} m/s) e menor para a areia silto-argilosa (da ordem de 10^{-7} m/s), devido à maior porcentagem de finos presente neste solo que faz diminuir a sua permeabilidade;
 - **Nos ensaios edométricos duplos:**
- Os valores dos índices de vazios iniciais dos solos ensaiados (0,61 – 0,85) está de acordo com a faixa de valores de alguns solos da Formação Barreiras de Pernambuco, apresentada por Coutinho e Severo (2009);
- As curvas $e \times \log(\sigma_v)$ e $\epsilon_v \times \log(\sigma_v)$ referentes à areia silto-argilosa (topo da encosta) apresentam nítida mudança do comportamento rígido para o plástico, com o trecho virgem bem definido para o ensaio na umidade natural inundada, enquanto que as areias

siltosas (base da encosta) apresentaram trecho virgem mal definido em todas as amostras ensaiadas;

- A areia silto-argilosa apresentou maiores deformações volumétricas devido aos maiores índices de vazios iniciais nela encontrados, quando comparados aos demais solos ensaiados;
- São identificadas diferenças entre o comportamento das amostras dos solos da base da encosta (areias siltosas) na condição de umidade natural e inundada devido ao efeito da sucção que aumenta a tensão de escoamento para as amostras na umidade natural;
- As areias siltosas foram classificados, através do critério de classificação de Reginatto e Ferrero (1973), como “verdadeiramente colapsíveis”, apresentando os maiores potenciais de colapso, quando comparados aos valores obtidos para a areia silto-argilosa (classificada como “condicionada ao colapso”);

- **Nos ensaios de cisalhamento direto:**

- Não foi verificado comportamento de pós-pico nos solos estudados, tendo, a maior parte deles, apresentado ruptura plástica, com mobilização crescente de tensões cisalhantes com os deslocamentos, tendendo a atingir valores constantes após certo nível de deslocamento, e nos solos nas quais se observou comportamento de pico, as tensões não chegaram a ficar estáveis;
- As areias siltosas apresentaram valores de ângulo de atrito interno superiores aos da areia silto-argilosa e valores de coesão inferiores, sendo maior a coesão para maiores teores de argila e menores teores de areia;
- A inundação das amostras reduziu o efeito da sucção sobre elas, fez diminuir suas coesões e, conseqüentemente, suas resistências devidas a este parâmetro;
- Nas curvas $\tau \times \varepsilon_h$, do ensaio com reversões múltiplas, as tensões cisalhantes tendem a crescer com os deslocamentos horizontais, apresentando comportamento relativamente plástico;
- Observando-se os parâmetros de resistência residual obtidos, verifica-se, em todas as amostras de solo, diminuição dos ângulos de atrito interno dos solos e da coesão da areia silto-argilosa. A coesão nas areias siltosas se mantiveram constantes e iguais a zero.
- Os solos ensaiados, quando considerado o percentual de argila sem defloculante, se enquadraram na relação entre resistência residual e a fração argila proposta por

Skempton (1985), apresentada por Coutinho e Severo (2009), sendo necessário, para a consideração da argila com defloculante, o estabelecimento de correlações próprias.

6.2 Recomendações para futuras pesquisas

Para futuros estudos, recomenda-se:

- a) Expandir o banco de dados criado, inserindo informações de mais pontos de sondagem realizadas na Formação Barreiras de João Pessoa, enquadrando-os na classificação proposta neste trabalho;
- b) Ampliar o nível de informações fornecidas neste trabalho, pelos boletins de sondagem, através da realização de ensaios de campo e laboratório;
- c) Realizar ensaios de sucção nos solos da encosta estudada, a fim de avaliar o efeito deste parâmetro nos solos;
- d) Realizar ensaios de permeabilidade em campo na encosta estudada;
- e) Analisar a estabilidade da encosta estudada com base nos resultados apresentados nesta pesquisa, e elaborar propostas de projetos de contenção para sua estabilização;
- f) Estudar em detalhe, conforme realizado nesta pesquisa, algumas encostas com problemas de instabilidade em João Pessoa; e,
- g) Expandir a níveis regionais e/ou nacionais o banco de dados de sondagem criado.

REFERÊNCIAS

ANJOS, W. L. S. dos. **Aplicação do SIG na elaboração e uso de banco de dados geológico-geotécnico baseado em sondagens à percussão**: estimativa para projetos de fundações em João Pessoa – PB. 2014. 59p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Bacharelado em Engenharia Civil, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa: UFPB, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13441**: Rochas e solos – Simbologia. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6484**: Solo – Sondagens de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9604**: Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo com retirada de amostras deformadas e indeformadas – Procedimento. Rio de Janeiro, 2016.

BANDEIRA, A. P.; COUTINHO, R. Q.; ALHEIROS, M.M. Importância da caracterização geológico-geotécnica e da chuva para gerenciamento de áreas de risco. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS (COBRAE), 5., 2009, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABMS, 2009. Disponível em: < <https://www.abms.com.br/anais-cobrae>>. Acesso em 30 jan. 2017.

BARBOSA, T. S. **Geomorfologia urbana e mapeamento geomorfológico do município de João Pessoa – PB, Brasil**. 2015. 115p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Geografia PPGG, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa: UFPB, 2015.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. CPRM – Serviço Geológico do Brasil. **Ação emergencial para delimitação de áreas em alto e muito alto risco a enchentes e movimentos de massa**. João Pessoa: CPRM, 2013a. 8p.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Minas e Metalurgia. CPRM – Serviço Geológico do Brasil. **Geologia e recursos minerais do Estado da Paraíba**. Recife: CPRM, 2002. 234p.

BRASIL. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Estudos geológicos. In: _____. (Org.). **Memória justificativa**. João Pessoa: 2013b. p. 821-835.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 6 ed. Rio de Janeiro: Livros técnicos e científicos, 1987. 219p.

COUTINHO, R. Q.; SEVERO, R. N. F. Investigação geotécnica para projeto de estabilidade de encostas. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS (COBRAE), 5., 2009, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABMS, 2009.

FERNANDES, L. R. P. T. **A influência da infiltração das chuvas na estabilidade de um talude natural**: caso de estudo: Camaragibe, Pernambuco, Brasil. 2014. 108f. Dissertação

(Mestrado) – Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto: Universidade do Porto, 2014.

FERNANDES, N. F.; AMARAL, C. P. **Movimentos de Massa**: uma abordagem geológico-geomorfológica. In: CUNHA, S. B. GUERRA, A. T. T. Geomorfologia e Meio Ambiente. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1996. 339p

FERREIRA, S. R. M. **Colapso e expansão de solos naturais não saturados devidos à inundação**. 1995. 204f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. Rio de Janeiro: UFRJ, 1995.

FONSECA, A. P. **Análise de mecanismo de escorregamento associados a voçorocamento em área da Bacia do Bananal (SP/RJ)**. 2006. 55f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. Rio de Janeiro: UFRJ, 2006.

FURRIER, M.; ARAÚJO, M. E. de; MENESES, L. F. de. Geomorfologia e tectônica da Formação Barreiras no estado da Paraíba. **Revista do Instituto de Geociências – USP**, v. 6, n. 2, p. 61-70, 2006.

FURRIER, M. **Caracterização geomorfológica e do meio físico da folha João Pessoa – 1:100.000**. 2007. 213 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Geografia Física, Universidade de São Paulo, São Paulo: USP, 2007.

FURRIER, M.; VITAL, S. R. O. A formação de dolinas em áreas urbanas: o caso de Cruz das Armas em João Pessoa-PB. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.1, p.161-173, 2011.

HEAD, K. H. **Manual of soil laboratory testing**. London: Pentech Press, ed. 2, v. 2, 1994.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo demográfico de 2010**. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br>>. Acesso em 28 de fevereiro de 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **João Pessoa: área territorial 2015**. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br>>. Acesso em 28 de fevereiro de 2017.

JOÃO PESSOA. Prefeitura municipal de João Pessoa. Coordenadoria Municipal de Defesa Civil (COMDEC). **Áreas degradadas por ocupação irregular**: encostas e margens de rios. João Pessoa: COMDEC, 2016. 2 p.

JOÃO PESSOA. Prefeitura municipal de João Pessoa. Coordenadoria Municipal de Defesa Civil (COMDEC). **Diagnóstico e caracterização da comunidade Santa Clara**: área de risco – Castelo Branco II. João Pessoa: COMDEC, 2013. 3 p.

JOÃO PESSOA. Prefeitura municipal de João Pessoa. Secretaria Municipal de Meio Ambiente (SEMAM). **Plano municipal de conservação e recuperação da mata atlântica de João Pessoa**. João Pessoa: F & A Gráfica e Editora, 2012. 100 p.

LACERDA, W. A. The behavior of colluvial slopes in a tropical environment. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LANDSLIDES, 9., 2004. Rio de Janeiro, Brasil. [...] v.2, p.1315-1342, 2004.

LUKIANTCHUKI, J. A. **Interpretação de resultados do ensaio SPT com base em instrumentação dinâmica.** 2012. 364p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos: USP, 2012.

MACHADO FILHO, H.O. et al. Novas observações do perfil estratigráfico do Cabo Branco, compartimentação da Formação Barreiras, Paraíba – Brasil. **Revista Principia:** divulgação científica e tecnológica do IFPB, João Pessoa, n. 19, p. 108 – 114, 2011.

PARAÍBA. Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESA). **Plano estadual de recursos hídricos:** relatório final. 2006. 253p. Disponível em: <<http://www.aesa.pb.gov.br/perh>>. Acesso em 20/03/2017.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas.** São Paulo: Oficina dos textos, 2000. 247p.

REGINATTO, A. R.; FERRERO, J. C. Collapse potential os soil and soil water chemistry. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 8., 1973. Moscow. [...] v. 2.2, pp. 177-183, 1973.

RODRIGUEZ, T. G. **Caracterização geotécnica de um solo de diabásio por meio de ensaios SPT e CPT.** 2013. 134p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas: UNICAMP, 2013.

RUVER, C. A. **Determinação do comportamento carga-recalque de sapatas em solos residuais a partir de ensaios SPT.** 2005. 182f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre: UFRS, 2005.

SCHNAID, F. **Ensaio de campo e suas aplicações à engenharia de fundações.** São Paulo: Oficina de textos, 2000. 189p.

SCHNAID, F.; ODEBRETCHT, E. **Ensaio de campo e suas aplicações à engenharia de fundações.** 2 ed. São Paulo: Oficina de textos, 2012.

SILVA, M. M. da. **Estudo geológico-geotécnico de uma encosta com problemas de instabilidade no município de Camaragipe-PE.** 2007. 402f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Recife: UFPE, 2007.

SOARES, F. L.; MEDEIROS, M. G. N.; MEDEIROS, V. N.; NÓBREGA JÚNIOR; J. S. Mapeamento das áreas de risco da comunidade Santa Clara – João Pessoa/PB. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL, 15., 2015. Bento Gonçalves. *Anais...* São Paulo: ABGE, 2015. Disponível em <<http://cbge2015.hospedagemdesites.ws>>. Acesso em 03 de novembro de 2016.

SOARES, F. L.; MORAIS, G. S.; DIAS, S. P. Mapeamento de área em risco de deslizamento e análise de estabilidade de talude na cidade de João Pessoa-PB. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS, 12., 2017. Florianópolis. *Anais...* São Paulo: ABMS, 2017. Disponível em < <http://cobrae2017.com.br>>. Acesso em 16 de janeiro de 2018.

SOARES, W. C. **Banco de dados geológico-geotécnicos com base em sondagens à percussão e uso de SIG:** análise espacial da profundidade do lençol freático e do Nspt para obras de fundação em João Pessoa – PB. 2011. 215f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos: USP, 2011.

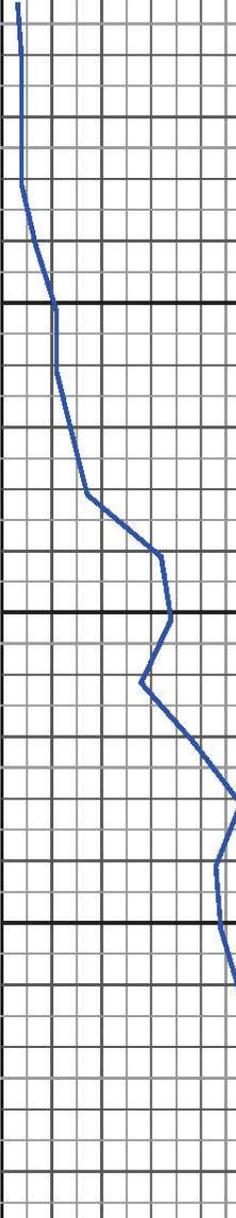
TERZAGHI, K.; PECK, R. B. **Soil mechanics in engineering practice.** 2 ed. New York: John Wiley and Sons Co., 1967. 792p.

Anexo A - perfil 53 – representativo PT1A

Sondagem de Reconhecimento com SPT		RSP 053.16-00
	Consultoria em Concreto e Solos Ltda. R. Prof. Batista Leite, 229 - Róger - João Pessoa/PB Fone(fax): 55 83 3222 0100 / 55 83 3241 5944 homepage: www.solo.eng.br	CLIENTE: COMPANHIA SULAMERICA DE BRINQUEDOS
		OBRA: COMPANHIA SULAMERICA DE BRINQUEDOS Rod. BR 101, Km 02, Distrito Industrial - João Pessoa/PB.

FURO: **SP 04** COTA: (+) 2,20 m RN: Indicado em Planta

INÍCIO: 17/03/16 TÉRMINO: 18/03/16

Prof. (m)	CLASSIFICAÇÃO DO SOLO	Amostras	Prof. Carnada (m)	Nível d'Água	ENSAIO DE PENETRAÇÃO							
					golpes/ 15 cm			NSPT	Gráfico			
					1ª	2ª	3ª		10	20	30	40
1	Areia fina, siltosa; marrom clara (fofa)		1,30		1	1	2	3/30				
2					2	2	4/30					
2	Silte argiloso; cor marrom clara (mole a duro)				1	1	3	4/30				
3					2	2	4/30					
4					3	3	7/30					
5					4	4	11/30					
6					5	5	11/30					
7					6	6	14/30					
8					7	7	17/30					
9					12	15	32/30					
10	Areia média, silto-argilosa; cor variegada (compacta a muito compacta)			N.A. 12,15 m	13	15	19	34/30				
11					10	13	28/30					
12					13	17	39/30					
13					17	23	48/30					
14	Areia fina, siltosa; cor cinza clara (muito compacta)				15	20	23	43/30				
15					16	19	44/30					
16					19	22	48/30					
17	Limite de Sondagem		16,45									
18												
19												
20												

COMPOSIÇÕES DE PERFURAÇÃO Amostrador Padrão { ϕ ext: 50,8 mm ϕ Int: 34,9 mm Martelo { Peso: 65 kg Altura queda: 75 cm Revestimento ϕ ext: 76 mm	PROCESSOS PERFURAÇÃO REVESTIMENTO: 0,0 - 2,0 m CIRCULAÇÃO DE ÁGUA (CA): 2,0 - 16,45 m ESCALA VERTICAL: 1/100	OBSERVAÇÕES:	SONDADOR: ERIVAN FLORÊNCIO
			DESENHO: ERICA COSME
			REVISÃO: ERICA COSME
			ENG. RESP.:

Anexo C - perfil 35 – representativo PT1C

Sondagem de Reconhecimento com SPT		RSP 036.17-00
	Consultoria em Concreto e Solos Ltda. R. Prof. Batista Leite, 229 - Róger - João Pessoa/PB Fone(fax): 55 83 3222 0100 / 55 83 3241 5944 homepage: www.solo.eng.br	CLIENTE: ECO CONSTRUÇÕES E INCORPORAÇÕES LTDA.
		OBRA: EDIFÍCIO COMERCIAL R. Guilherme Pessoa Serrano, Bancários - João Pessoa/PB.

FURO: **SP 03** COTA: (+) 0,35 m RN²: 0,00 m (Melo fio da R. Guilherme Pessoa Serrano) INÍCIO: 03/03/17 TÉRMINO: 03/03/17

Prof.(m)	CLASSIFICAÇÃO DO SOLO	Amostras	Prof. Camada (m)	Nível d'Água	ENSAIO DE PENETRAÇÃO											
					golpes/ 15 cm			NsPT	Gráfico							
					1ª	2ª	3ª		10	20	30	40				
1	Areia média, siltosa; cor preta (fofa)	[diagrama]	0,70	Não Identificado	2	2	2	4/30	[gráfico]							
2	Siltos arenoso; cor marrom escuro (medianamente compacto)	[diagrama]	1,25		1	3	14	17/30								
3	Siltos arenoso, com arenito; cor variegada (pouco compacto a compacto)	[diagrama]	3,63		3	2	4	6/30								
4		[diagrama]			4	12	21	33/30								
5	Siltos argilosos, pouco arenoso; cor cinza claro (rijo a duro)	[diagrama]	7,20		4	8	12	20/30								
6		[diagrama]			5	7	10	17/30								
7		[diagrama]	12,40		6	6	10	16/30								
8	Siltos arenoso, pouco argilosos; cor cinza escuro (compacto a muito compacto)	[diagrama]			8	10	21	31/30								
9		[diagrama]	12,40		10	15	22	37/30								
10		[diagrama]			13	22	29	51/30								
11		[diagrama]	12,40		13	23	29	52/30								
12		[diagrama]			15	25	30/13	55/28								
13	<i>Limite de Sondagem</i>	[diagrama]	16		25	30/10	55/25									
14																
15																
16																
17																
18																
19																
20																

COMPOSIÇÕES DE PERFURAÇÃO Amostrador { ϕ_{ext} : 50,8 mm Padrão { ϕ_{int} : 34,9 mm Martelo { Peso: 65 kg Altura queda: 75 cm Revestimento ϕ_{ext} : 76 mm	PROCESSOS PERFURAÇÃO REVESTIMENTO: 0,0 - 2,0 m CIRCULAÇÃO DE ÁGUA (CA): 2,0 - 12,40 m ESCALA VERTICAL: 1/100	OBSERVAÇÕES:	SONDADOR: ERIOSVALDO DOS SANTOS DESENHO: ERICA COSME REVISÃO: ERICA COSME ENG. RESP.:
---	---	---------------------	--

Anexo D - perfil 2 – representativo PT1D

SONDAGEM À PERCUSSÃO														
CLIENTE / OBRA						SONDADOR		 Engenharia de Fundações Ltda.						
SP		LOCALIZAÇÃO DO FURO				DESENHO								
02		Planalto da Boa Esperança - João Pessoa / PB												
AMOSTRADOR (diâm.)		REVEST. (diâm. nom.)	MARTELO		COTA DO FURO:	REF. DE NÍVEL (RN): 0,00 m (Meio fio)		DATA		REFERÊNCIA				
Externo		50,8 mm	Peso	Alt. de queda				INÍCIO	TÉRMINO					
Interno		34,9 mm	67 mm	65 kg	75 cm	(+) 0,06m		19/01/2016	19/01/2016					
Posição do Revest.	Profund. (m)	Número de Golpes/ Penetração (15 cm)			NSPT	GRÁFICO DE PENETRAÇÃO - PROFUNDIDADE ESCALA: 1/100					Nível d'água (NA)	Profund. das camadas (m)	CLASSIFICAÇÃO DO MATERIAL AMOSTRADO	
		1	2	3										
	0,45	2	3	3	6							0,00	Aterro arenoso c/ metralha - cor variegada	
1	1	1	2	3	5							0,41	Silte areno-argiloso c/ metralha pouco compacto - cor variegada	
2	2	2	2	4	6							0,86	Silte areno-argiloso pouco compacto cor variegada	
3	3	2	4	5	9							2,81	Silte areno-argiloso pouco compacto a medianamente compacto - cor variegada	
4	4	3	5	7	12									
5	5	5	8	10	16							4,78	Silte areno-argiloso medianamente compacto cor laranja	
6	6	7	8	11	19							6,13	Silte areno-argiloso medianamente compacto a compacto - cor vermelha	
7	7	8	7	8	16									
8	8	8	8	10	18									
9	9	4	8	11	20									
10	10	5	7	11	18							9,33	Silte areno-argiloso c/ pedregulho compacto a med. compacto - cor variegada	
11	11											10,45	Limite de Sondagem	
12	12													
13	13													
14	14													
15	15													
16	16													
17	17													
18	18													
19	19													
20	20													
													OBSERVAÇÕES: - Sumidouro à 1,76m.	

Anexo E - perfil 22 – representativo PT1B

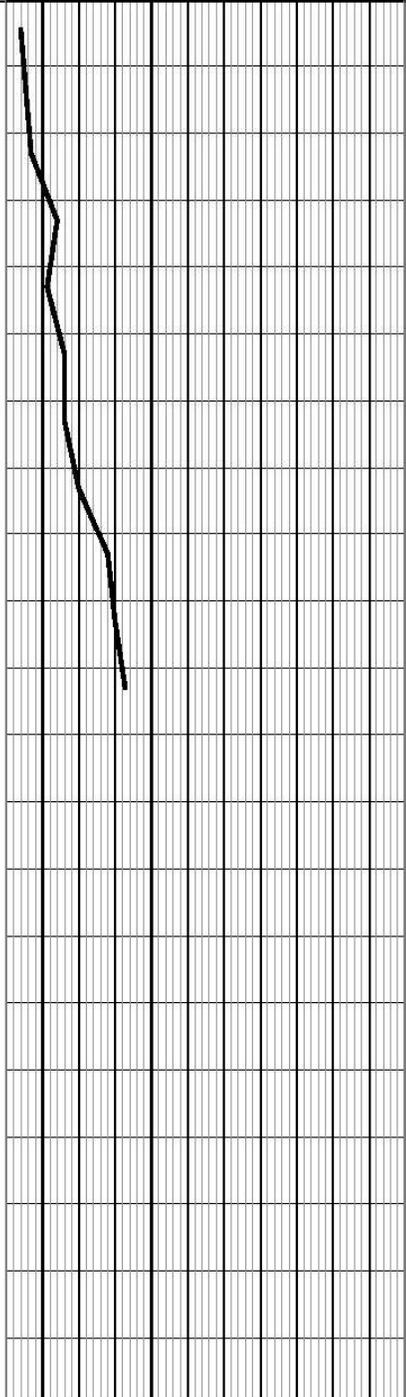
Sondagem de Reconhecimento com SPT		RSP 206.15-00
	Consultoria em Concreto e Solos Ltda. R. Prof. Batista Leite, 229 - Róger - João Pessoa/PB Fone(fax): 55 83 3222 0100 / 55 83 3241 5944 homepage: www.solo.eng.br	CLIENTE: COHEP COOP. HABITACIONAL DO ESTADO DA PARAÍBA LTDA.
		OBRA: RESIDENCIAL ABRAÃO BELTRÃO R. Agrônomo Carlos O. Nóbrega, s/n, Grotão - João Pessoa/PB.

FURO: **SP 01** COTA: **16,00** RN: **Topográfico** INÍCIO: **26/06/15** TÉRMINO: **26/06/15**

Prof.(m)	CLASSIFICAÇÃO DO SOLO	Amostras	Prof. Camada (m)	Nível d'Água N.A. 0,16 m	ENSAIO DE PENETRAÇÃO													
					golpes/ 15 cm			NsPT	Gráfico									
					1ª	2ª	3ª		10	20	30	40						
1	Areia fina; cor cinza clara (fofa)		0,30		1	1	2/18	3/33										
	Areia siltosa, pouco argilosa; cor cinza (pouco compacta)		1,30		1	2	3	5/30										
2	Silte argiloso, pouco arenoso, com velos de arenito; cor variegada (mole a rijo)				1/20	1/10	2	3/25										
3					2	3	3	6/30										
4					3	5	6	11/30										
5				4,80		4	6	7	13/30									
6	Argila silto-arenosa; cor variegada (rifa)		5,30		5	7	8	15/30										
7	Argila silto-arenosa; cor cinza (rifa a dura)				5	8	10	18/30										
8					6	9	12	21/30										
9					6	10	14	24/30										
10					7	12	17	29/30										
11				10,70		7	14	20	34/30									
12		Silte argilo-arenoso, com pedregulho; cor variegada (duro)				8	16	23	39/30									
13						8	18	28	46/30									
14		Argila siltosa, pouco arenosa, com laterita; cor variegada (dura)				10	20	32	52/30									
15					12	25	36	61/30										
16					15	30	-	30/15										
17					18	35	-	35/15										
18			18,22		22	30/07	-	30/07										
19	<i>Limite de Sondagem</i>																	

COMPOSIÇÕES DE PERFURAÇÃO Amostrador { Øext: 50,8 mm Padrão { Øint: 34,9 mm Martelo { Peso: 65 kg Altura queda: 75 cm Revestimento Øext: 76 mm	PROCESSOS PERFURAÇÃO REVESTIMENTO: 0,0 - 2,0 m CIRCULAÇÃO DE ÁGUA (CA): 2,0 - 18,22 m ESCALA VERTICAL: 1/100	OBSERVAÇÕES:	SONDADOR: GERALDO OLIVEIRA DESENHO: ERICA COSME REVISÃO: ERICA COSME ENG. RESP.:
--	--	---------------------	---

Anexo F - perfil 7 – representativo PT2B

SONDAGEM À PERCUSSÃO											
CLIENTE / OBRA						SONDADOR					
SP		LOCALIZAÇÃO DO FURO									
01		Bairro dos Estados- João Pessoa / PB									
AMOSTRADOR (diâm.)		REVEST. (diâm. nom.)	MARTELO		COTA DO FURO:	REF. DE NÍVEL (RN): 0,00 m (Pé do poste da Av. Mato Grosso)		DATA			
Externo	50,8 mm		Peso	Alt. de queda					INÍCIO	TÉRMINO	
Interno	34,8 mm	67 mm	65 kg	75 cm	(+) 0,00 m			04/01/2012	04/01/2012		
Posição do Revest.	Profund. (m)	Número de Golpes/ Penetração (15 cm)	NsPT	GRÁFICO DE PENETRAÇÃO - PROFUNDIDADE ESCALA: 1/100					Nível d'água (NA)	Profund. das camadas (m)	CLASSIFICAÇÃO DO MATERIAL AMOSTRADO
											
	0,45	1 15	1 15	1 15	2				0,00	Areia siltosa c/ metralha fofa cor variegada	
	1		1 27	3 18	3				0,77	Silte argilo-arenoso mole cor marrom	
	2		2 15	2 15	3				1,37	Silte argiloso mole a médio cor variegada	
	3		3 15	4 15	7				3,20	Silte argiloso médio cor amarela	
	4		2 15	3 15	6					Silte argiloso médio cor amarela	
	5		2 15	4 15	8					Silte argiloso médio cor amarela	
	6		2 15	4 15	8				5,70	Silte argiloso médio cor amarela	
	7		2 15	4 15	8					Silte argilo-arenoso médio cor laranja	
	8		3 15	4 15	10				7,36	Silte argilo-arenoso médio cor laranja	
	9		5 15	7 15	14					Silte argilo-arenoso c/ laterita médio a rijo cor variegada	
	10		7 15	8 15	15					Silte argilo-arenoso c/ laterita médio a rijo cor variegada	
	11		8 15	8 15	16				10,45	Limite de Sondagem	
	12										
	13										
	14										
	15										
	16										
	17										
	18										
	19										
	20										

OBSERVAÇÃO:

Anexo G - perfil 19 – representativo PT3A

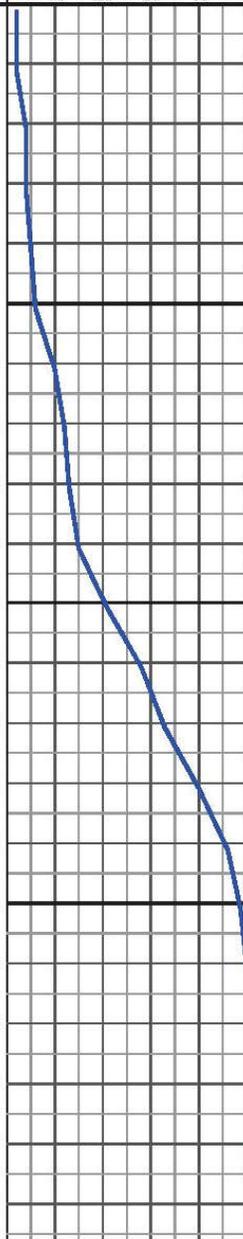
SONDAGEM À PERCUSSÃO																							
CLIENTE / OBRA						SONDADOR		REFERÊNCIA															
PLANC Engenharia / Edifício BurleMarx Ville						Geraldo		011/2013															
SP		LOCALIZAÇÃO DO FURO				DESENHO		DATA															
02		Bairro dos Estados - João Pessoa / PB				Pedro		30/01/2012 31/01/2012															
AMOSTRADOR (diâm.)		REVEST.	MARTELO		COTA DO FURO:	REF. DE NÍVEL (RN): 0,00 m																	
Externo	50,8 mm	(diâm. nom.)	Peso	Alt. de queda	(Meio fio da Rua Bancário Francisco Mendes)	INÍCIO		TÉRMINO															
Interno	34,9 mm	67 mm	65 kg	75 cm	(-)5,50m	30/01/2012		31/01/2012															
Posição do Revest.	Profund. (m)	Número de Golpes/ Penetração (15 cm)	NsPT	GRÁFICO DE PENETRAÇÃO - PROFUNDIDADE										Nível d'água (NA)	Profund. das camadas (m)	CLASSIFICAÇÃO DO MATERIAL AMOSTRADO							
				ESCALA: 1/100																			
					0,45	2 2 2 15 15 15	5													Silte argilo-arenoso médio - cor marrom			
				1	1,15	3 4 5 15 15 15	9											0,40		Silte argilo-arenoso médio cor vermelha			
				2	1,70	4 6 6 15 15 15	12											1,70					
				3	2,40	4 5 7 15 15 15	12													Silte areno-argilo c/ pedregulho c/ laterita medianamente compacta - cor variegada			
				4	3,15	7 8 12 15 15 15	21																
				5	3,90	8 8 10 15 15 15	18											4,80		Silte argilo-arenoso c/ laterita duro cor variegada			
				6	4,65	8 8 12 15 15 15	20																
				7	5,40	8 12 17 15 15 15	29											6,70		Argila areno-siltosa c/ laterita duro cor variegada			
				8	6,15	8 11 10 15 15 15	21																
				9	6,90	4 5 6 15 15 15	11											8,80		Areia silto-argilosa compacta cor variegada			
				10	7,65	4 6 8 15 15 15	14																
				11	8,40	8 14 12 15 15 15	26											10,70		Areia silto-argilosa c/ pedregulho compacta - cor variegada			
				12	9,15	8 12 14 15 15 15	26																
				13	9,90	8 14 18 15 15 15	30																
				14	10,65	8 12 15 15 15 15	27																
				15	11,40	8 13 18 15 15 15	31											15,90		Areia argilo-siltosa c/ pedregulho compacta cor variegada			
				16	12,15	12 22 23 15 15 15	45																
				17	12,90	8 10 12 15 15 15	22											17,00		Areia silto-argilosa compacta a muito compacta - cor variegada			
18	13,65	8 13 15 15 15 15	28																				
19	14,40	8 15 17 15 15 15	32											19,70		Argila silto-arenosa dura cor variegada							
20	15,15	15 32 20 15 15 4	52/19																				

SONDAGEM À PERCUSSÃO																		
CLIENTE / OBRA						SONDADOR		 Engenharia de Fundações Ltda.										
PLANC Engenharia / Edifício Burle Marx Ville						Geraldo												
SP	LOCALIZAÇÃO DO FURO					DESENHO												
02	Bairro dos Estados- João Pessoa / PB					Pedro												
AMOSTRADOR (diâm.)		REVEST.	MARTELO		COTA DO FURO:	REF. DE NÍVEL (RN): 0,00 m (Meio fio da Rua Bancário Francisco Mendes)	DATA		REFERÊNCIA									
Externo	50,8 mm	(diâm. nom.)	Peso	Alt. de queda			INÍCIO	TÉRMINO	011/2013									
Interno	34,8 mm	67 mm	65 kg	75 cm	(-),5,50m	30/01/2012	31/01/2012											
Posição do Revest.	Profund. (m)	Número de Golpes/ Penetração (15 cm)	NSPT	GRÁFICO DE PENETRAÇÃO - PROFUNDIDADE											Nível d'água (NA)	Profund. das camadas (m)	CLASSIFICAÇÃO DO MATERIAL AMOSTRADO	
				ESCALA: 1/100														
	0,45	15 32 20 15 15 4	52/19														Argila siltosa dura e cor variegada	
	21	22 38 20 15 15 5	59/20															
	22	27 44 15 15 15 3	59/18													22,33	Impenetrável à Percussão	
	23																	
	24																	
	25																	
	26																	
	27																	
	28																	
	29																	
	30																	
	31																	
	32																	
	33																	
	34																	
	35																	
	36																	
	37																	
	38																	
	39																	
	40																	
											OBSERVAÇÃO:							

Anexo H - perfil 26 – representativo PT3B

Sondagem de Reconhecimento com SPT		RSP 206.15-00
 Consultoria em Concreto e Solos Ltda. R. Prof. Batista Leite, 229 - Róger - João Pessoa/PB Fone(fax): 55 83 3222 0100 / 55 83 3241 5944 homepage: www.solo.eng.br	CLIENTE: COHEP COOP. HABITACIONAL DO ESTADO DA PARAÍBA LTDA.	
	OBRA: RESIDENCIAL ABRAÃO BELTRÃO R. Agrônomo Carlos O. Nóbrega, s/n, Groirão - João Pessoa/PB.	

FURO: SP 02 COTA: 17,95 RN: Topográfico INÍCIO: 29/06/15 TÉRMINO: 30/06/15

Prof.(m)	CLASSIFICAÇÃO DO SOLO	Amostras	Prof. Camada (m)	Nível d'Água	ENSAIO DE PENETRAÇÃO				
					golpes/ 15 cm	1ª	2ª	3ª	Nspt
1	Arela siltosa; cor cinza escura (fofa)		0,80	N.A. 1,51 m	1	1	1	2/30	
2	Silte arenoso; cor cinza (fofo)		1,70		1	2/30	-	2/30	
3	Silte argilo-arenoso; cor variegada (mole)		3,80		1	2	2	4/30	
4		2			2	2	4/30		
5	Silte argilo-arenoso; cor cinza (mole)		4,80		2	2	3	5/30	
6		2			3	3	6/30		
7	Silte areno-argiloso; cor cinza (pouco compacto a medianamente compacto)		6,30		3	4	6	10/30	
8		3			5	7	12/30		
9		4			6	7	13/30		
10		4			7	8	15/30		
11		5			9	12	21/30		
12		6			12	16	28/30		
13		7			15	18	33/30		
14		8			17	23	40/30		
15		9			21	25	46/30		
16		11			23	26	49/30		
17	Argila silto-arenosa; cor cinza (rija a dura)		12,00		13	26	30	56/30	
18		15			33	-	33/15		
19		17			35	-	35/15		
20		20			30/07	-	30/07		
21	Silte argilo-arenoso, com pedregulho; cor variegada (duro)		14,80	25	30/06	-	30/06		
22		11		23	26	49/30			
23		13		26	30	56/30			
24		15		33	-	33/15			
25	Argila silto-arenosa, pouca arenosa, com laterita; cor variegada (dura)		20,21	17	35	-	35/15		
26		20		30/07	-	30/07			
27	25	30/06	-	30/06					
28	Limite de Sondagem								

COMPOSIÇÕES DE PERFURAÇÃO Amostrador { @ext: 50,8 mm @int: 34,9 mm Padrão { Martelo { Peso: 65 kg Altura queda: 75 cm Revestimento @ext: 76 mm	PROCESSOS PERFURAÇÃO REVESTIMENTO: 0,0 - 2,0 m CIRCULAÇÃO DE ÁGUA (CA): 2,0 - 20,21 m ESCALA VERTICAL: 1/100	OBSERVAÇÕES:	SONDADOR: GERALDO OLIVEIRA
			DESENHO: ERICA COSME
			REVISÃO: ERICA COSME
			ENG. RESP.:

Anexo I - perfil 32 – representativo PT3C

Sondagem de Reconhecimento com SPT		RSP 187.16-00
 Consultoria em Concreto e Solos Ltda. R. Prof. Batista Leite, 229 - Róger - João Pessoa/PB Fone(fax): 55 83 3222 0100 / 55 83 3241 5944 homepage: www.solo.eng.br	CLIENTE: MARCOLINO EDIFICAÇÕES LTDA.	
	OBRA: EDIFÍCIO DE APARTAMENTOS R. Com. Aristides Costa, Jd. Cidade Universitária - João Pessoa/PB.	

FURO: **SP 03** COTA: (-) 0,04 m RN: 0,00 m (Melo fio da R. Com. Aristides Costa) INÍCIO: 21/10/16 TÉRMINO: 21/10/16

Prof.(m)	CLASSIFICAÇÃO DO SOLO	Amostras	Prof. Camada (m)	Nível d'Água	ENSAIO DE PENETRAÇÃO							
					golpes/ 15 cm			NsPT	Gráfico			
					1ª	2ª	3ª		10	20	30	40
1	Areia fina; cor cinza clara (fofa)		0,90	*N.A. 0,90 m	1	1	2	3/30				
2	Arenito; cor marrom (muito compacto)		1,90		30/13	-	-	30/13				
3	Silte areno-argiloso; cor cinza (medianamente compacto a muito compacto)		6,70		2	3	6	9/30				
4					8	11	15	26/30				
5					25	30/08	-	30/08				
6					10	12	14	26/30				
7					8	9	10	19/30				
8	Silte areno-argiloso, com pedregulho; cor variegada (medianamente compacto)		10,15		5	6	7	13/30				
9					5	6	8	14/30				
10					4	5	6	11/30				
11	Silte argilo-arenoso, com pedregulho; cor cinza (rijo a duro)		12,30		4	5	7	12/30				
12					5	6	8	14/30				
13	Argila siltosa, pouco arenoso; cor cinza (dura)		17,15		6	7	13	20/30				
14					10	22	31	53/30				
15					13	24	35	59/30				
16					20	30	-	30/15				
17					25	30/06	-	30/06				
18	Limite de Sondagem				32	-	-	32/15				
19												
20												

COMPOSIÇÕES DE PERFURAÇÃO Amostrador { ϕ ext: 50,8 mm Padrão { ϕ int: 34,9 mm Martelo { Peso: 65 kg Altura queda: 75 cm Revestimento ϕ ext: 76 mm	PROCESSOS PERFURAÇÃO REVESTIMENTO: 0,0 - 2,0 m CIRCULAÇÃO DE ÁGUA (CA): 2,0 - 17,15 m ESCALA VERTICAL: 1/100	OBSERVAÇÕES: *Água empoçada	SONDADOR: GERALDO OLIVEIRA DESENHO: ERICA COSME REVISÃO: ERICA COSME ENG. RESP.:
--	---	---------------------------------------	---