Elaine Cristina Gomes Barreto

**Caracterização física, química,
mineralógica e micromorfológica
do solo mole do Porto de Santana,
no Amapá.**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil do Departamento de
Engenharia Civil da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Alberto de Sampaio Ferraz Jardim Sayão
Co-Orientador: Prof. Sandro Salvador Sandroni

Rio de Janeiro
Julho de 2015

Elaine Cristina Gomes Barreto

**Caracterização física, química,
mineralógica e micromorfológica
do solo mole do Porto de Santana,
no Amapá.**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Alberto de Sampaio Ferraz Jardim Sayão

Orientador

Departamento de Engenharia Civil / PUC-Rio

Prof. Sandro Salvador Sandroni

Co-Orientador

SEA – Sandro Sandroni Engenheiros Associados

Prof. Tácio Mauro Pereira de Campos

Departamento de Engenharia Civil / PUC-Rio

Prof. Fernando Artur Brasil Danziger

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. Franklin dos Santos Antunes

Consultor Independente

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 27 de julho de 2015.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem a autorização da universidade, da autora e do orientador.

Elaine Cristina Gomes Barreto

Graduou-se em Engenharia Civil na Universidade Federal Fluminense - UFF, em 2012. Ingressou no curso de mestrado em Engenharia Civil - Geotecnia na PUC-Rio no início de 2013. Principais áreas de interesse e linhas de pesquisas: Mecânica dos Solos, Geotecnia Experimental e Solos Moles.

Ficha Catalográfica

Barreto, Elaine Cristina Gomes

Caracterização física, química, mineralógica e micromorfológica do solo mole do Porto de Santana, no Amapá / Elaine Cristina Gomes Barreto; orientador: Alberto de Sampaio Ferraz Jardim Sayão; co-orientador: Sandro Salvador Sandroni. – 2015.

207 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2015.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia Civil - Teses. 2. Solo sedimentar mole. 3. Sensibilidade de solos. 4. Ensaios de caracterização. 5. Ensaios de laboratório. 6. Ensaios especiais. I. Sayão, Alberto de Sampaio Ferraz Jardim. II. Sandroni, Sandro Salvador. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

Para minha mãe, Eliane, e para meu avô, Calmo (in memoriam).
Sonho que se sonha junto se torna realidade.

Agradecimentos

A Deus, primeiramente, por ser minha força e meu guia por todo caminho que eu percorro.

À minha mãe por ser minha melhor amiga e minha base. Por me amar, apoiar e encorajar sempre, por sonhar junto comigo e por torcer por mim mais do que qualquer outra pessoa no mundo.

Ao meu orientador, professor Sandro Sandroni, por quem tenho enorme admiração, por ter confiado a mim um tema tão desafiador e por todos os ensinamentos os quais certamente me fizeram crescer como profissional e pesquisadora.

Ao professor Franklin, por quem nutro imenso carinho e admiração, por praticamente me co-orientar com paciência e com desafios que enriqueceram muito não só a pesquisa, mas a minha vida. Cada conversa com o senhor vale mais que mil páginas de livros.

Aos amigos que fiz na PUC Mariana, Jeremy, Nathalia, Natália, Roberta, por me ajudarem tanto e por todas as horas de desabafo e momentos de distração.

Ao Sergio, pela amizade e por todas as vezes que suas palavras acalmaram meu coração inquieto e me fizeram ter esperança.

Ao engenheiro Edson Silva e aos técnicos do Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio, Amauri e Josué, por toda ajuda que recebi em todo este tempo de pesquisa.

Ao pessoal do Laboratório de Caracterização de Águas da PUC-Rio, Prof. Godoy, Ana Cristina, Diogo e Alan, por toda gentileza, colaboração e ensinamentos.

Ao pessoal do Laboratório de Difração de Raios X da PUC-Rio, Prof. Avillez, Sonia e Pedro, por toda colaboração.

Ao pessoal do Laboratório de Microscopia Eletrônica da PUC-Rio, Antônio Mario, Karla e Yuri, por disponibilizarem material para preparação de amostras e por toda colaboração durante as análises.

Ao geólogo Sebastião Calderano e ao técnico Gilson da Embrapa Solos, que me receberam em seu laboratório e dedicaram uma parte de seu tempo a me ensinar sobre química e mineralogia de solos.

À CAPES e à PUC-Rio pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

À Anglo American e à SEA por permitirem o estudo do tema do Porto de Santana e pelo incentivo fornecido à pesquisa.

A todos que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho.

Resumo

Barreto, Elaine Cristina Gomes; Sayão, Alberto de Sampaio Ferraz Jardim; Sandroni, Sandro Salvador. **Caracterização física, química, mineralógica e micromorfológica do solo mole do Porto de Santana, no Amapá.** Rio de Janeiro, 2015. 207p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Um grande movimento de massa do tipo deslizamento seguido de fluxo de solo, ocorrido em 28 de março de 2013 no Porto de Santana, na região da foz do Rio Amazonas, no Amapá, motivou o estudo das características do solo local, cujo comportamento na ruptura foi semelhante ao dos solos sensíveis da Escandinávia e do leste do Canadá, deslocando-se como um fluido-viscoso e alcançando grandes distâncias no fundo do rio. Para procurar entender o comportamento do material, o presente trabalho propôs extenso programa experimental objetivando a caracterização física, química, mineralógica e micromorfológica do material. Resultados de ensaios de campo relativos às amostras de solo estudadas são apresentados e os métodos de classificação de solos sensíveis, estabelecidos no meio geotécnico, são discutidos sobre sua eficiência. O trabalho apresenta resultados de ensaios físicos, incluindo ensaios de sensibilidade com cone sueco e ensaios de caracterização geotécnica convencional de laboratório; ensaios químicos de composição dos grãos, de capacidade de troca catiônica, pH e porcentagem de matéria orgânica; de composição iônica, condutividade elétrica e salinidade da água dos poros do solo; ensaios mineralógicos de difração de raios X; e ensaios de visualização da micromorfologia dos solos com microscopia eletrônica de varredura e detector de dispersão de energia. Os resultados obtidos permitiram identificar sensibilidades elevadas em algumas das amostras ensaiadas, assim como algumas causas de seu desenvolvimento.

Palavras-chave

Solo sedimentar mole, sensibilidade de solos, ensaios de caracterização, ensaios de laboratório, ensaios especiais.

Abstract

Barreto, Elaine Cristina Gomes; Sayão, Alberto de Sampaio Ferraz Jardim (Advisor); Sandroni, Sandro Salvador (Co-Advisor); **Physical, chemical, mineralogical and micromorphological characterization of the soft soil of Port of Santana, in Amapá.** Rio de Janeiro, 2015. 207p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A large mass movement like flow-sliding of soil, occurred in March 28, 2013 at the Port of Santana, in the region of the mouth of the Amazon River in Amapá, led to the study of the local soil characteristics, whose behavior at rupture was similar to the sensitive soils from Scandinavia and eastern Canada, moving like a viscous fluid and reaching long distances on the river bottom. To try to understand the behavior of the material, this paper has proposed extensive experimental program aimed at the physical, chemical, mineralogical and micromorphological characterization of the material. Field tests results on soil samples studied are presented and the sensitive soil classification methods established in the geotechnical environment are discussed about its efficiency. The paper presents results of physical tests, including sensitivity tests with Swedish fall-cone and conventional laboratory geotechnical characterization tests; chemical tests of grain composition, cation exchange capacity, pH and percentage of organic matter; ion composition, conductivity electrical and salinity of pore water of soil; mineralogical tests with X-ray diffraction, micromorphology viewing tests of soils with scanning electron microscopy and energy dispersive detector. The results have identified high sensitivities in some of the test samples, as well as some causes of its development.

Keywords

Soft sedimentary soil, sensitive soils, characterization tests, laboratory tests, special tests.

Sumário

1. Introdução	24
1.1. Contexto do Estudo	24
1.2. Objetivos do Estudo	25
1.3. Organização do Trabalho	25
2. Revisão Bibliográfica	27
2.1. Movimentos de Massa	27
2.1.1. Classificação de Varnes (1978)	27
2.1.2. Classificação de Cruden & Varnes (1996)	30
2.2. Corrida ou Fluxo de Solo	32
2.2.1. Corrida de Detritos	32
2.2.2. Fluxo de Terra	33
2.3. Sensibilidade ao Amolgamento	39
2.4. Identificação de Existência de Solos Sensíveis	40
2.4.1. Identificação com Piezocone	41
2.4.2. Medição da Sensibilidade com Palheta	44
2.4.3. Medição da Sensibilidade pela Queda do Cone Sueco (<i>Fall-Cone</i>)	46
2.4.4. Estimativa da Sensibilidade com Índice de Liquidez	48
2.5. Causas de Sensibilidade Elevada	48
2.5.1. Composição Mineralógica	49
2.5.2. Estrutura Metaestável	50

2.5.3. Tixotropia	52
2.5.4. Cimentação e Consolidação Mínima	53
2.5.5. Intemperismo	53
2.5.6. Lixiviação	53
2.5.7. Agentes Dispersantes	55
2.5.8. Remoção de Cátions Divalentes	56
3. Descrição do Local de Estudo	58
3.1. Localização Geográfica do Porto	58
3.2. Características do Meio Físico	59
3.2.1. Clima Atual	60
3.2.2. Geologia	60
3.2.3. Geomorfologia	60
3.2.4. Pedologia	62
3.2.5. Informações Hidrológicas e Oceanográficas	62
3.3. Histórico do Local	64
3.4. Descrição da Ruptura	65
3.4.1. Características do Solo Envolvido na Ruptura	67
4. Materiais e Métodos	73
4.1. Materiais Analisados	73
4.1.1. Pontos Estudados	73
4.1.2. Amostragem e Transporte das Amostras	75
4.1.3. Amostras Analisadas no Trabalho	75
4.2. Ensaios Realizados e Metodologias Adotadas	80

4.2.1. Ensaio com Cone Sueco ou “ <i>Fall-Cone</i> ”	82
4.2.2. Caracterização Geotécnica Convencional de Laboratório	86
4.2.3. Caracterização Química do Solo	87
4.2.4. Caracterização Química da Água dos Poros do Solo	93
4.2.5. Caracterização Mineralógica	97
4.2.6. Caracterização Micromorfológica	101
5. Apresentação e Análise dos Resultados	106
5.1. Caracterização Física	106
5.1.1. Sensibilidade com Cone Sueco	106
5.1.2. Índices Físicos	109
5.1.3. Granulometria	110
5.1.4. Limites de Atterberg	111
5.1.5. Classificação do Solo	113
5.2. Caracterização Química do Solo	115
5.2.1. Composição Química do Solo	115
5.2.2. PH do Solo	118
5.2.3. Porcentagem de Matéria Orgânica	120
5.2.4. Capacidade de Troca de Cátions e Superfície Específica dos Minerais	122
5.3. Caracterização Química da Água dos Poros do Solo	127
5.3.1. Condutividade Elétrica e Salinidade	127
5.3.2. Porcentagem de Cátions Monovalentes	128
5.4. Caracterização Mineralógica	130
5.4.1. Resultados das Análises com Preparação Simples de Amostras	130
5.4.2. Resultados das Análises com Preparação Especial de Amostras	133

5.5. Caracterização Micromorfológica	135
5.5.1. Resumo da Caracterização Micromorfológica	164
6. Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	166
6.1. Conclusões	166
6.2. Sugestões para Trabalhos Futuros	169
7. Referências Bibliográficas	170
Anexo I – Ensaaios de Campo	178
A. I. 1. Sondagem à Percussão 1A	178
A. I. 2. Sondagem à Percussão 2A	184
A. I. 3. Sondagem à Percussão 5A	189
A. I. 4. Resumo Ensaaios de Campo 1A	192
A. I. 5. Resumo Ensaaios de Campo 2A	193
A. I. 6. Resumo Ensaaios de Campo 5A	194
Anexo II – Resultados da Fluorescência de Raios X	195
A. II. 1. Espectro Experimental Amostra 5A 16,10m	195
A. II. 2. Espectro Experimental Amostra 5A 20,10m	196
A. II. 3. Espectro Experimental Amostra 2A 21,15m	197
A. II. 4. Espectro Experimental Amostra 2A 29,50m	198
A. II. 5. Espectro Experimental Amostra 2A 36,50m	199
A. II. 6. Espectro Experimental Amostra 1A 36,50m	200
A. II. 7. Espectro Experimental Amostra 1A 38,35m	201

Anexo III – Difractogramas	202
A. III. 1. Amostra 5A 16,10m	202
A. III. 2. Amostra 5A 20,10m	203
A. III. 3. Amostra 2A 21,10m	204
A. III. 4. Amostra 2A 29,50m	205
A. III. 5. Amostra 1A 36,50m	206
A. III. 6. Amostra 1A 38,50m	207

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Canyon do Pinheirinho, Timbé do Sul, SC (1995) depois de chuvas severas. (Bressani, 2010).	32
Figura 2.2 - Ruptura por liquefação da barragem Lower San Fernando (Carter & Seed, 1988 apud Cárdenas Guillén, 2004).	34
Figura 2.3 - Argila de alta sensibilidade no estado indeformado (à esquerda) e no estado completamente amolgado (à direita). Fotografia de Haley & Aldrich apud Mitchell & Soga (2005a).	35
Figura 2.4 - Ilustração de deslizamentos retrogressivos seguido de corrida em argilas sensíveis de comportamento rápido.	35
Figura 2.5 – Desenhos de Gregersen (1981) sobre o deslizamento seguido de corrida de Rissa em 1978. (a) Área afetada, (b) até (e) Sequência de deslizamentos retrogressivos e fluxo do material.	36
Figura 2.6 – Imagem real do deslizamento seguido de corrida de terra em Rissa, em 1978. Fotografia de Aftenposten apud Gregersen (1981).	37
Figura 2.7 - Deslizamento seguido de fluxo de terra de Lemieux, depósito do Mar Champlain, em 1993, Ontario, Canadá. Fotografia de S. Evans apud Brooks <i>et. al.</i> (1994).	38
Figura 2.8 - Croqui do equipamento CPTU.	41
Figura 2.9 - Ábacos de Robertson (1990) para identificação do comportamento do solo através dos resultados do ensaio CPTU.	42
Figura 2.10 - B_q aumentando com o OCR para um depósito de argila mole na Noruega (Schnaid (2009), modificado de Karlsrud <i>et. al.</i> (1996))	43
Figura 2.11 – Relação entre OCR e B_q de algumas argilas sensíveis do leste do Canadá (Demers & Leroueil, 2002).	44
Figura 2.12 – Equipamento de palheta (NBR 10905 MB 3122, 1989).	45
Figura 2.13 - Equipamento cone sueco (Geonor).	47

Figura 2.14 - Tipos de estruturas de agregados floclados (adaptado de Collins & Mc Gown, 1974)	50
Figura 2.15 - Microfotografias de argilas de alta sensibilidade, mostrando sua estrutura floclada metaestável.	51
Figura 2.16 - Tixotropia pura e parcial (adaptado de Skempton & Northey (1952)).	52
Figura 2.17 - Efeito da lixiviação do sal em uma argila marinha indeformada (Skempton & Northey, 1952).	54
Figura 2.18 - Relação entre sensibilidade e cátions monovalentes em argilas de baixa salinidade e entre sensibilidade e potencial eletrocinético (Penner (1965) apud Mitchell & Soga (2005a)).	57
Figura 3.1 - Macrolocalização do Porto de Santana com relação ao Rio Amazonas e ao Oceano Atlântico (Google Earth, adaptado).	58
Figura 3.2 - O Porto de Santana antes do acidente (Google Earth, 2007).	59
Figura 3.3 - Mapa Geológico de Santana do Amapá (CPRM, 2004).	61
Figura 3.4 - Vista aérea do Porto de Santana em 2007 (Google Earth, adaptado).	64
Figura 3.5 - Vista aérea do local pós-acidente (Sandroni <i>et. al.</i> (2015), modificado).	66
Figura 3.6 – Área do porto, comparação da situação antes e depois do acidente, evidenciando o movimento de fluxo de solo (Sandroni <i>et. al.</i> (2015), modificado).	66
Figura 3.7 - Seção total com topografias do porto e batimetrias da enseada e do leito profundo do rio (Laudo, 2013).	67
Figura 3.8 - Localização das sondagens (Laudo, 2013). F = sondagem à percussão antiga, SP = sondagem à percussão feita em 2007, SC = vertical de piezocone feita em 2007.	68
Figura 3.9 - Resultados do piezocone na vertical SC4 (Laudo, 2013).	69
Figura 3.10 - Resultados do piezocone na vertical SC8 (Laudo, 2013).	69
Figura 3.11 - Ábaco de Robertson (1990) para classificação dos solos com os resultados do ensaio CPTU no ponto SC4 (Laudo, 2013).	70

Figura 3.12 - Ábaco de Robertson (1990) para classificação dos solos com os resultados do ensaio CPTU no ponto SC8 (Laudo, 2013).	70
Figura 3.13 - Perfil geotécnico da região leste do porto "tempo 2" (Laudo, 2013).	71
Figura 3.14 - Perfil de umidade do material que sofreu ruptura (Laudo, 2013).	72
Figura 4.1 - Localização dos pontos em estudo (adaptado de Google earth).	73
Figura 4.2 - Perfil do solo do Porto de Santana - pontos 1A, 2A, 5A.	74
Figura 4.3 - Ábaco $Q_t \times B_q$ de Robertson (1990) para classificação das amostras de solo com uso do piezocone.	78
Figura 4.4 - Observação na abertura das amostras.	79
Figura 4.5 - Seixos e cascalhos na amostra 2A 21,05m.	80
Figura 4.6 - Oxidação interna na amostra 1A 38,35m.	80
Figura 4.7 - Pedaco de madeira na amostra 1A 38,35m.	80
Figura 4.8 - Equipamento cone sueco Geonor.	82
Figura 4.9 - Procedimento de medição de S_u no ensaio de sensibilidade com o cone sueco.	83
Figura 4.10 - Procedimento de ensaio de sensibilidade com cone sueco.	84
Figura 4.11 - Execução do ensaio de limite de liquidez por meio do cone sueco.	85
Figura 4.12 - Gráfico de interpretação do ensaio de limite de liquidez dado pelo cone sueco.	85
Figura 4.13 - Medição do pH do solo.	90
Figura 4.14 – Procedimento do ensaio de adsorção de azul de metileno.	92
Figura 4.15 – Procedimento para extração de água intersticial do solo.	94
Figura 4.16 - Coluna cromatográfica.	95

Figura 4.17 - Saída dos resultados do ensaio de Cromatografia de íons (Embrapa, 2012).	96
Figura 4.18 - Condições geométricas para difração de raios X de acordo com a Lei de Bragg (adaptado de Mitchell & Soga, 2005c).	97
Figura 4.19 - Exemplo de difratograma.	98
Figura 4.20 - Etapas da preparação das amostras em lâmina para a DRX.	99
Figura 4.21 - Difratômetro utilizado.	100
Figura 4.22 - Extrusão das amostras indeformadas.	102
Figura 4.23 - Materiais utilizados na preparação das amostras para MEV.	103
Figura 4.24 - Procedimento de preparação das amostras por liofilização.	104
Figura 4.25 – Metalização.	105
Figura 4.26 – Equipamento MEV utilizado.	105
Figura 5.1 - Curvas granulométricas.	111
Figura 5.2 - Carta de Plasticidade de Casagrande com as amostras de estudo.	113
Figura 5.3 - Relação entre o pH do solo e a porcentagem de óxido de ferro.	120
Figura 5.4 - Relação entre o Índice de Plasticidade e a Capacidade de Troca de Cátions de argilas sensíveis de Quebec, do Japão, e dos solos do Porto de Santana, no Amapá.	125
Figura 5.5 - Gráfico de salinidade da água dos poros versus condutividade elétrica.	128
Figura 5.6 - Relação entre a sensibilidade medida das amostras de solo e a porcentagem de cátions monovalentes na água dos poros do solo.	129
Figura 5.7 - Difratogramas natural, glicolada e aquecida a 550°C - amostra 5A 16,1m – Preparação simples.	131
Figura 5.8 - Difratogramas natural, glicolada e aquecida a 550°C - amostra 5A 20,1m – Preparação simples.	131

Figura 5.9 - Difrátogramas natural, glicolada e aquecida a 550°C - amostra 2A 21,1m – Preparação simples.	131
Figura 5.10 - Difrátogramas natural, glicolada e aquecida a 550°C - amostra 2A 29,5m – Preparação simples.	132
Figura 5.11 - Difrátograma natural - amostra 2A 36,5m – Preparação simples.	132
Figura 5.12 - Difrátogramas natural, glicolada e aquecida a 550°C - amostra 1A 36,5m – Preparação simples.	132
Figura 5.13 - Difrátogramas natural, glicolada e aquecida a 550°C - amostra 1A 38,5m – Preparação simples.	133
Figura 5.14 - Difrátogramas amostra 1A 38,5m – Preparação especial.	134
Figura 5.15 - Difrátogramas amostra 1A 38,5m – Preparação especial.	134
Figura 5.16 - Microfotografias de MEV - 5A 20,20m Plano Horizontal (1).	138
Figura 5.17 - Microfotografias de MEV - 5A 20,20m Plano Horizontal (2).	139
Figura 5.18 - Microfotografias de MEV - 5A 20,20m Plano Vertical (1).	140
Figura 5.19 - Microfotografias de MEV - 5A 20,20m Plano Vertical (2).	141
Figura 5.20 - Microfotografias de MEV - 2A 21,20m Plano Horizontal (1).	143
Figura 5.21 - Microfotografias de MEV - 2A 21,20m Plano Horizontal (2).	144
Figura 5.22 - Microfotografias de MEV - 2A 21,20m Plano Vertical (1).	146
Figura 5.23 - Microfotografias de MEV - 2A 21,20m Plano Vertical (2).	147
Figura 5.24 - Microfotografias de MEV - 1A 36,40m Plano Horizontal (1).	149
Figura 5.25 - Microfotografias de MEV - 1A 36,40m Plano Horizontal (2).	150

Figura 5.26 - Microfotografias de MEV - 1A 36,40m Plano Vertical (1).	152
Figura 5.27 - Microfotografias de MEV - 1A 36,40m Plano Vertical (2).	153
Figura 5.28 - Microfotografias de MEV - 1A 38,30m Plano Horizontal (1).	156
Figura 5.29 - Microfotografias de MEV - 1A 38,30m Plano Horizontal (2).	157
Figura 5.30 - Microfotografias de MEV - 1A 38,30m Plano Horizontal (3).	158
Figura 5.31 - Microfotografias de MEV - 1A 38,30m Plano Vertical (1).	161
Figura 5.32 - Microfotografias de MEV - 1A 38,30m Plano Vertical (2).	162
Figura 5.33 - Microfotografias de MEV - 1A 38,30m Plano Vertical (3).	163

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Classificação de movimentos de taludes de Varnes (1978) - abreviada.	28
Tabela 2.2 - Critério de velocidade da classificação de Varnes (1978).	30
Tabela 2.3 – Glossário de Cruden & Varnes (1996) para classificação dos movimentos de talude.	31
Tabela 2.4 - Escala de velocidades dos movimentos de Cruden & Varnes (1996).	31
Tabela 2.5 - Classificação quanto à sensibilidade ao amolgamento (Skempton & Northey, 1952).	40
Tabela 2.6 - Classificação quanto à sensibilidade ao amolgamento (Rosenqvist, 1953 apud Torrance, 1983).	40
Tabela 2.7 - Classificação quanto à sensibilidade ao amolgamento (Norsk Geoteknisk Forening, 1974 apud Torrance, 1983).	40
Tabela 2.8 - Classificação de Robertson (1990) dos solos por tipo de comportamento.	43
Tabela 2.9 - Classificação da atividade de solos segundo Skempton (1953).	49
Tabela 2.10 - Mineralogia de solos de sensibilidade elevada.	50
Tabela 2.11 - Sensibilidades e resistências de argilas marinhas lixiviadas (Torrance, 1983).	55
Tabela 3.1 - Datação com radiocarbono (C_{14}) em vertical de solo no Porto de Santana.	63
Tabela 4.1 - Amostras analisadas no trabalho.	76
Tabela 4.2 - Descrição de cada amostra obtida pela sondagem à percussão.	76

Tabela 4.3 – Valores de resistência e sensibilidade das amostras com a palheta.	77
Tabela 4.4 - Dados do piezocone nas profundidades das amostras shelby.	77
Tabela 4.5 - Classificação das amostras com o ábaco $Q_t \times B_q$ de Robertson (1990).	78
Tabela 4.6 - Programa experimental do trabalho com as amostras de solo do Porto de Santana, Amapá.	81
Tabela 4.7 - Características dos cones utilizados para determinação de S_u .	82
Tabela 4.8 - Ensaio de caracterização geotécnica, normas utilizadas e modificações aplicadas.	86
Tabela 4.9 - Distâncias interplanares basais típicas para argilominerais.	98
Tabela 5.1 - Resultados dos ensaios de sensibilidade com queda do cone sueco.	106
Tabela 5.2 – Classificações da sensibilidade com base nas escalas propostas.	108
Tabela 5.3 - Medidas da resistência S_{ur} das amostras levadas já amolgadas em sacos plásticos.	108
Tabela 5.4 - Valores especulativos das sensibilidades das amostras dos saquinhos e sua classificação.	109
Tabela 5.5 - Índices físicos das amostras de solo estudadas.	109
Tabela 5.6 - Tabela resumo da análise granulométrica.	110
Tabela 5.7 - Resultados de limites de liquidez com concha de Casagrande e de limite de plasticidade, e os índices derivados.	111
Tabela 5.8 - Resultados de limite de liquidez com o cone sueco.	112
Tabela 5.9 - Índices de atividade e de consistência e classificações dos solos.	112
Tabela 5.10 - Classificação SUCS dos solos.	114
Tabela 5.11 - Resumo dos resultados da caracterização física para identificação de solos sensíveis.	114

Tabela 5.12 - Resultados da composição química parcial dos grãos por ataque sulfúrico.	116
Tabela 5.13 - Resultados da composição química total dos grãos por FRX.	116
Tabela 5.14 – Medição do pH do solo em água destilada.	119
Tabela 5.15 - Valores de pH do solo e porcentagem de óxido de ferro de cada amostra estudada.	120
Tabela 5.16 - Resultados das medições da porcentagem de matéria orgânica.	121
Tabela 5.17 - Cálculo da CTC do solo com o ensaio de complexo sortivo.	122
Tabela 5.18 - Resultados dos ensaios de adsorção de azul de metileno.	123
Tabela 5.19 - Capacidade de Toca Catiônica e Superfície Específica de Argilominerais (Sparks, 2003).	124
Tabela 5.20 – Comparação da CTC com Índice de Atividade de Skempton.	124
Tabela 5.21 – Comparação entre as características físicas e químicas de argilas sensíveis e os solos estudados do Porto de Santana.	126
Tabela 5.22 - Resultados das análises químicas na água dos poros do solo.	127
Tabela 5.23 - Cálculo da PCM na água dos poros.	129
Tabela 5.24 – Resumo dos minerais presentes nas amostras de solo estudadas.	135

*“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém
ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê”.*
Arthur Schopenhauer