



UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

FELIPE MELO DE ASSIS ROCHA

COMPRESSIBILIDADE DE UMA ARGILA ORGÂNICA MOLE DO BAIRRO DE CHÃO
DE ESTRELAS NO RECIFE.

RECIFE, PE - BRASIL
2016

Felipe Melo de Assis Rocha

COMPRESSIBILIDADE DE UMA ARGILA ORGÂNICA MOLE DO BAIRRO DE CHÃO
DE ESTRELAS NO RECIFE.

Dissertação apresentada, como requisito final para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração de Tecnologia das Construções, ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP.

Orientador: Professor Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira.

Coorientador: Professor Dr. Joaquim Teodoro Romão de Oliveira.

Felipe Melo de Assis Rocha

COMPRESSIBILIDADE DE UMA ARGILA ORGÂNICA MOLE DO BAIRRO DE CHÃO
DE ESTRELAS NO RECIFE.

Dissertação apresentada, como requisito final para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração de Tecnologia das Construções, ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP.

Composição da banca examinadora:

.....
Prof. Silvio Romero de M. Ferreira
Orientador - UNICAP

.....
Prof(a). Maria Isabela M.da C. V. Bello
Examinador externo - UFPE

.....
Prof. Romilde de Almeida Oliveira
Examinador Interno - UNICAP

Aprovada em 02 de março de 2016.

“Tudo o que não puder contar como fez, não faça.”
Imanoel Kant

À minha família, em especial aos meus filhos, João Felipe e Lucas.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Silvio Romero de Melo Ferreira pela orientação neste trabalho e pelo exemplo de dedicação e atenção aos seus alunos, em especial a minha pessoa.

Ao professor Joaquim Teodoro Romão de Oliveira pela co-orientação neste trabalho e pelo exemplo de dedicação e atenção aos seus alunos, em especial a minha pessoa.

À professora Maria José de Sena, Reitora da Universidade Federal Rural de Pernambuco que oportunizou a realização desse trabalho.

Aos professores e professoras do curso de Engenharia Civil desta Instituição de Ensino Superior.

Aos funcionários da UNICAP e colaboradores terceirizados desta Instituição de Ensino Superior.

Aos colegas Mestres, em especial André Patriota e Andrezza Pyrro Patriota pelo incentivo.

Aos amigos pela compreensão, em especial à minha esposa Paula.

RESUMO

Rocha, F.M.A.(2016) - Compressibilidade de uma argila orgânica mole do bairro Chão de Estrelas no Recife.

A planície do Recife apresenta origem flúvio-marinha, depósitos de argilas moles que se espalham em mais de 50% de sua área, tornando-se um cenário propício para a ocorrência de recalques diferenciais em bases e fundações de construções diversas assentadas sobre esses depósitos. A presente dissertação trata de uma investigação geotécnica em uma argila orgânica mole no bairro de Chão de Estrelas na cidade do Recife. Nesse local foram retiradas amostras indeformadas das margens do rio Beberibe que resultaram em parâmetros de compressibilidade utilizados como referência na realização de um projeto viário para o bairro. Este trabalho utiliza dessas mesmas amostras para realizar uma complementação desse primeiro estudo. Ademais, um vasto acervo de referências bibliográficas sobre a compressibilidade de solos moles deu suporte. O objetivo geral é a análise da compressibilidade de uma argila orgânica mole através dos ensaios de adensamento com drenagem vertical e radial; e, especificamente, estudar a influência da secagem prévia na obtenção da umidade das amostras; analisar a qualidade das amostras estudadas e propor a correção da curva de compressibilidade de campo; comparar seus resultados ou parâmetros de compressibilidade aos resultados já catalogados para o mesmo local da pesquisa e, de um modo geral, para a planície do Recife; obter valores mais precisos para a tensão de pré-adensamento; e, analisar parâmetros de compressibilidade de uma amostra completamente amolgada em laboratório com outra amostra indeformada de boa qualidade de mesma referência e profundidade. Para tanto, a pesquisa se utilizou de cinco amostras retiradas de duas Ilhas, termo esse que se refere a uma região estudada, ou seja, aos furos de sondagem 203A e 208A, respectivamente, Ilha 1 e Ilha 2. Da primeira foram retiradas amostras em três profundidades; enquanto a segunda ilha proporcionou amostras em duas profundidades; sendo executados dois ensaios de adensamento por profundidade, cinco por drenagem vertical e cinco por drenagem radial. Foi realizado também um outro ensaio de adensamento com drenagem vertical em amostra completamente amolgada em laboratório, totalizando assim 11 ensaios de adensamento. Em todos esses ensaios realizados foram utilizados incrementos de tensão menores que a tensão anterior, ($\Delta\sigma/\sigma < 1$), apenas na região que antecede a compressão virgem, de maneira a melhor definir a tensão de pré-adensamento. Os resultados dos parâmetros de compressibilidade encontrados na pesquisa estão em conformidade com a literatura. As formas das curvas de compressibilidade e parâmetros apresentados pelos ensaios de adensamento vertical e radial se mostraram semelhantes. O índice de plasticidade sofreu influência da secagem prévia do material. Os valores das tensões de pré-adensamento se apresentaram mais próximos em comparação aos primeiros estudos que embasaram o projeto viário no bairro de Chão de Estrelas no Recife. Foi demonstrado também que, pela reconstrução da curva de compressibilidade do campo, as amostras, mesmo as de boa qualidade, sofrem um percentual de amolgamento.

Palavras-chaves: Argilas moles. Parâmetros de compressibilidade. Qualidade das amostras.

ABSTRACT

Rocha, F.M.A.(2016) - Compressibility of the organic soft clay of the Chão de Estrelas Recife's district.

The origin of Recife's plain is riverine and marine. Deposits of organic soft clay are spread in more than 50% of its area, which creates a favorable scenery for a occurrence of differential repression in several constructions foundations localized over these deposits. The present work treats of a geotechnical investigation of the a soft organic clay of the Chão de Estrelas's neighborhood. In this location many not deformed samples of this material were taken in the Beberibe riverside margin's that resulted in parameters of compressibility used as reference in the accomplishment of a road project for the neighborhood. This research, however, used the same soft organic clay sample's of the Chão de Estrelas's neighborhood to accomplish a complementation of that first study. Besides, a vast collection of literature references on the compressibility of organic soft clay gave support to this study. The general objective this thesis is the analysis of the compressibility of a organic soft clay through of the vertical or radial drainage oedometer test; and, specifically, to study the influence of the preview drying these materials in the obtaining of the natural humidity these samples; to analyze the quality of this organic soft samples clays and to propose the correction of the field compressibility graph line's; to make a comparison between the fists studies result's or compressibility parameter's already classified and the news complements result's by this work, and, in general, with results found in the plain of Recife city; to find accurate value to the pre-compression stress; and, to analyze the results of the compressibility parameters of the a unstructured sample with the results of the a structured sample in the same condition e depth. To achieve those goals, the research used five samples taken from two islands, this term refers to a region studied, called Island 1 e Island 2, respectively, referring of the borehole 203A e 208A. Of the Island 1 were taken in the three depths; while on the second Island were taken in the two depths; being executed two drainage rehearsals by each depth, five vertical drainage rehearsals and five radial drainage rehearsals. It were still accomplished for another vertical drainage rehearsals with a unstructured organic soft clay sample, totalizing 11 rehearsals. In all those rehearsals were used small adjustment or increments of the stress, always using less stress that the before stress, ($\Delta\sigma/\sigma < 1$), only in the area that precedes the virgin compression, way to define the best pre-compression stress value. The results of the compressibility parameters found in this work are in accordance with the literature values. The forms of the compressibility curves and the compression parameters values by the vertical and radial drainage rehearsals are shown similar. The plasticity index suffer influence of the previous drying of the material. The value of the pre-compression stress came closer in comparison with the results of the first study that based the road project for the Chão de Estrelas's neighborhood. This work demonstrated by the reconstruction of the curve of compressibility of the field that good quality organic soft clay sample's suffer some percentual of the unstructured situation.

Key-words: Organic soft clay. Parameters of compressibility. Quality of the samples.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Perfis geotécnicos do bairro de Boa Viagem na cidade do Recife.	10
Figura 2 – Perfis geotécnicos do bairro de Bongi na cidade do Recife.....	11
Figura 3 - Perfis geotécnicos do bairro da Caxangá na cidade do Recife.	12
Figura 4 - Perfis geotécnicos do bairro da Estância na cidade do Recife.....	13
Figura 5 - Perfis geotécnicos do bairro da Madalena na cidade do Recife.	14
Figura 6 - Perfil geotécnico e resultados de ensaios de caracterização com a profundidade no Clube Internacional do Recife.	17
Figura 7 - Curva CR vs. ϵ_v0 para o depósito do SESI-Ibura–Recife-PE (Cavalcante et al. (1998) apud Coutinho et al. (2000b)).	21
Figura 8 - Influência do transporte na curva tensão-deformação – amostra 1, Sherbrooke (3,38–3,63m).	23
Figura 9 - Curvas de compressão normalizadas de curvas de boa e má qualidade por FUTAI (2010).	25
Figura 10 - Perfil do subsolo na BR 101, bairro de Dois Irmãos.	30
Figura 11 - Resultados dos ensaios de caracterização do E98 em Suape.....	33
Figura 12 - Resultados dos ensaios de caracterização do E102 em Suape.....	33
Figura 13 - Resultados dos ensaios de caracterização do E112 em Suape.....	34
Figura 14 - Resultados dos ensaios de caracterização do E120 em Suape.....	34
Figura 15 - Resultado gráfico da Curva do Coeficiente de Adensamento Vertical, C_v , no Recife.....	47
Figura 16 - Curva do Coeficiente de Adensamento (C_v) na BR 101, bairro de Dois Irmãos..	48
Figura 17 - Resultados dos ensaios de adensamento vertical com a profundidade do E112 em Suape.	51
Figura 18 - Resultados dos ensaios de adensamento vertical com a profundidade do E120 em Suape.	51
Figura 19 - Curva de Compressibilidade para Ilha 1 e 2, profundidade de 2m e 8m.....	54
Figura 20 - Curva Compressibilidade para Ilha 1, profundidade de 11m.	55
Figura 21 - Gráfico do Coeficiente de Adensamento (C_v) vs. Logaritmo da Tensão Vertical Média de Consolidação.	55
Figura 22 - Gráficos das sondagens do furo 203A , referente a Ilha 1.....	56
Figura 23 - Gráficos das sondagens do furo 208A, referente a Ilha 2.	56
Figura 24 - Localização dos furos de sondagens do furo 203A e 208A, respectivamente.....	57
Figura 25 - Foto atualizada do local do furo 203A referente a Ilha 1 em frente a rua Colorado.	59
Figura 26 – Localização e fotos atualizadas do local do furo 208A referente a Ilha 2.	60
Figura 27 – Ensaio de densidade e Casagrande para a amostras da referente a Ilha 1.....	61
Figura 28 - Registro fotográfico da prensa tipo Bishop.	62
Figura 29 - Registro fotográfico dos anéis de moldagem dos corpos de prova.....	63
Figura 30 - Registro fotográfico das células de adensamento.	64
Figura 31 - Registro fotográfico do conjunto prensa, célula de adensamento e carregamentos.	66

Figura 32 – Registro fotográfico do conjunto anel com pedra porosa radial e célula de carga.	69
Figura 33 - Curva de Compressibilidade para amostras da Ilha 1 do ensaio de adensamento vertical, sendo A) profundidade 2 metros; B) profundidade 8 metros; e, C). profundidade 11 metros.	71
Figura 34 – Curva de Compressibilidade para amostras da Ilha 2 do ensaio de adensamento vertical, sendo A) profundidade 2 metros; e, B) profundidade 8 metros.	72
Figura 35 – Curva de Compressibilidade da Ilha 2 com 8 metros de profundidade com amostra amolgada em laboratório.	74
Figura 36 – Curvas de Compressibilidade para todas as profundidades das amostras coletadas na Ilha 1 e 2.	76
Figura 37 - Gráfico resultante do Ensaio de Adensamento Vertical para o Coeficiente de Adensamento C_v referente às Ilha 1 e Ilha 2.....	76
Figura 38 - Gráfico resultante do Ensaio de Adensamento Vertical para o Coeficiente de Compressibilidade Volumétrica (m_v) referente às Ilha 1 e Ilha 2.....	77
Figura 39 - Gráfico resultante do Ensaio de Adensamento Vertical para o Coeficiente de Permeabilidade (K_v) referente às Ilha 1 e Ilha 2.	77
Figura 40 - Gráfico resultante do Ensaio de Adensamento Vertical para o Coeficiente de Compressibilidade Secundária (C_α) referente às Ilhas 1 e 2.....	78
Figura 41 – Curva de Compressibilidade para amostras da Ilha 1 do ensaio de adensamento radial, sendo A) profundidade 2 metros; B) profundidade 8 metros; e, C). profundidade 11 metros.	79
Figura 42 - Curva de Compressibilidade para amostras da Ilha 2 do ensaio de adensamento radial, sendo A) profundidade 2 metros; e, B) profundidade 8 metros.	80
Figura 43 - Curvas de Compressibilidade para todas as profundidades das amostras coletadas na Ilha 1 e 2.	82
Figura 44 - Gráfico resultante do Ensaio de Adensamento Radial para o Coeficiente de Adensamento (C_h) referente às Ilha 1 e Ilha 2.	82
Figura 45 - Gráfico resultante do Ensaio de Adensamento Radial para o Coeficiente de Compressibilidade Volumétrica referente às Ilha 1 e Ilha 2.	83
Figura 46 - Gráfico resultante do Ensaio de Adensamento Radial para o Coeficiente de Permeabilidade (K_h) referente às Ilha 1 e Ilha 2.	83
Figura 47 - Gráfico resultante do Ensaio de Adensamento Radial para o Coeficiente de Compressibilidade Secundária (C_α) referente à Ilha 2.....	84
Figura 48 - Resultados de OCR versus profundidade (m).....	85
Figura 49 - Curvas de Compressibilidade do solo da Ilha 1.....	89
Figura 50 - Curvas de Compressibilidade do solo da Ilha 2.....	89
Figura 51 - Curva do Módulo Edométrico das amostras da Ilha 1.....	93
Figura 52 - Curva do Módulo Edométrico das amostras da Ilha 2.....	93
Figura 53 - Linha de Tendência da permeabilidade da Ilha 1.	94
Figura 54 - Linha de Tendência da permeabilidade da Ilha 2.	94
Figura 55 - Curvas da Compressão Secundária – Ilha 1 e 2.....	95
Figura 56 – Curva de reconstrução de campo pelo método de Schmertmann (1955) para a profundidade de 8 m.....	96

Figura 57 – Curvas experimentais de amostras de boa qualidade, amolgada em laboratório e estimada pelo ábaco proposto por Oliveira (2002) para a profundidade de 8 m.....	97
Figura 58 – Curvas e $x \text{ Log } \sigma$ experimentais das amostras de boa qualidade, amolgadas em laboratório, reconstituição pelo método de Schmertmann (1955) e estimada pelo ábaco proposto por Oliveira (2002).	97
Figura 59 - Gráfico Índice de Plasticidade versus Profundidade (m) para Ilha 1	101
Figura 60 - Gráfico Índice de Plasticidade versus Profundidade (m) para Ilha 2.	101
Figura 61 - Curvas de Compressibilidade da Ilha 1.	102
Figura 62 - Curvas de Compressibilidade da Ilha 2.	103
Figura 63 - Gráfico Índice de Compressibilidade versus profundidade (m) para a s Ilhas 1 e 2.	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Critério de avaliação de amolgamento/qualidade de amostras ($\Delta e/e_0$).	20
Tabela 2 - Critério de avaliação de qualidade de amostras, em termos de εV_0 , para índice de vazios inicial igual a 2,0.	20
Tabela 3 - Qualidade de amostras para o depósito SESI-Ibura – Recife-Pe (Coutinho et al., 1998 a partir de Lunne et al., 1997).....	21
Tabela 4 - Percentagem de amolgamento (SD%) das amostras Sherbrooke – Critério de Hong e Onitsuka(1998) – ensaio edométrico.	22
Tabela 5 - Critério de avaliação de amolgamento/qualidade das amostras – Argilas moles do Recife –Coutinho (2007), a partir de Coutinho et al. (1998a); Oliveita (2002).	24
Tabela 6 - Resumo da Granulometria e TMO encontrada em vários bairros do Recife.	27
Tabela 7 - Granulometria do depósito de argila orgânica mole no bairro da Madalena.	27
Tabela 8 - Limites de Atterberg para o depósito no bairro da Madalena.	28
Tabela 9 - Limites de Atterberg para o Clube Internacional do Recife no bairro da Madalena.	29
Tabela 10 - Resultados de caracterização física em Suape.	32
Tabela 11 - Profundidade e índices de vazios.	35
Tabela 12 - Parâmetros do Adensamento com amostras indeformadas de boa qualidade e amostras completamente amolgadas em laboratório.	37
Tabela 13 - Resultados dos parâmetros de compressibilidade encontrados para a profundidade de 6,00 – 15,00 metros nos estudos do solo do bairro da Madalena.	41
Tabela 14 - Resultados encontrados para parâmetros de compressibilidade a profundidade de 15,00 – 24,00 metros nos estudos do solo do bairro da Madalena.	41
Tabela 15 - Resultados de parâmetros de compressibilidade encontrados para a profundidade de 6,00 – 24,00 metros em amostras de má-qualidade ou amolgadas em laboratório.	42
Tabela 16 - Parâmetros encontrados através do Ensaio de Adensamento Vertical.....	46
Tabela 17 - Índices de Atterberg e parâmetros do solo do Recife.....	49

Tabela 18 - Correlações Gerais.	49
Tabela 19 - Resultados de σ_{vm} ; σ_{vo} ; OCR; e_0 ; C_c ; C_s ; variação $\Delta e/e_0$ e classificação de qualidade das amostras das estacas do 1º Trecho: E98, E102, E112 e E120 em Suape.	50
Tabela 20- Resultados de C_v ; C_h e C_α para as amostras das estacas: E98, E102, E112 e E120 em Suape	52
Tabela 21 - Resultados de granulometria, Limites de Atterberg e TMO.	53
Tabela 22 - Resultados da umidade natural (W_n), peso específico, índice de vazios, índice de compressão (C_c) e expansão (C_s) e Tensão de Pré-adensamento (σ_{vm}).	54
Tabela 23- Tipos de ensaios realizados, finalidade e quantidade.	59
Tabela 24 - Resultado dos Limites de Atterberg, sem secagem prévia.	70
Tabela 25 - Resultados obtidos em ensaios de adensamento vertical realizados em amostras semi-indeformadas de boa qualidade.	71
Tabela 26 - Resultados para σ_{vm} , C_c , C_s e e_0 para amostra indeformada de boa qualidade.	73
Tabela 27 - Parâmetros físicos obtidos de amostra amolgada em laboratório e amostra de boa qualidade pelo adensamento com drenagem vertical e radial, para a Ilha 2 aos 8 metros de profundidade.	75
Tabela 28 – Parâmetros de compressibilidade, σ_{vm} , C_c , C_s e e_0 , obtidos de amostra amolgada em laboratório e amostra de boa qualidade pelo adensamento com drenagem vertical e radial, para a Ilha 2 aos 8 metros de profundidade.	75
Tabela 29 - Resultados obtidos em ensaios de adensamento radial realizados em amostras semi-indeformadas de boa qualidade	78
Tabela 30 - Resultados para σ_{vm} , C_c , C_s e e_0 para amostra indeformada de boa qualidade.	81
Tabela 31 - Resultado do OCR (Over Consolidation Ratio) para a Ilha 1.	84
Tabela 32 - Resultado do OCR (Over Consolidation Ratio) para a Ilha 2.	84
Tabela 33 - Resultados da qualidade da amostra da Ilha 1, por Lunne et al (1997) e Hong & Onitsuka (1998).	86
Tabela 34 - Resultados da qualidade da amostra da Ilha 2, por Lunne et al (1997) e Hong & Onitsuka (1998).	86
Tabela 35 - Resultados da qualidade da amostra da Ilha 1, por Coutinho (2007).	86
Tabela 36 - Resultados da qualidade da amostra da Ilha 2, por Coutinho (2007).	86
Tabela 37 - Resultados dos índices de vazios, tensão de pré-adensamento, C_c e C_s da Ilha 1.	90
Tabela 38 - Resultados dos índices de vazios, tensão de pré-adensamento, C_c e C_s da Ilha 2.	90
Tabela 39 - Resultados do Grau de Amolgamento encontrados por Oliveira (2002) para o bairro da Madalena.	98
Tabela 40 - Proposta de correção da tensão de pré-adensamento por Oliveira (2002) e resultado para a presente Tese.	99
Tabela 41 - Resultado da variação da correção da tensão de pré-adensamento da presente Tese e intervalos encontrados por Oliveira (2002) e Bello (2011)	99
Tabela 42 - Resultados do WL e WP sem e com secagem prévia para as Ilhas 1 e 2.	100
Tabela 43 - Parâmetros compilados dos ensaios atuais e anteriores, no mesmo local do presente estudo por Cadete (2016)	104

LISTA DE EQUAÇÕES

Equações 1 – Equações matemáticas do Coeficiente de Adensamento e Permeabilidade.	37
Equações 2 – Correlações estatísticas com relação a profundidade.	43
Equações 3 – Correlações estatísticas com relação aos parâmetros de caracterização.	43
Equações 4 - Equações matemáticas para a compressibilidade volumétrica, mv	44

LISTA DE SÍMBOLO

PARÂMETROS DE MATERIAIS

Ch	coeficiente de adensamento para drenagem (fluxo) horizontal
Cc	índice de compressão
Cr	índice de recompressão
Cs	índice de expansão
Cu	resistência média não drenada da argila
Cv	coeficiente de adensamento primário ou consolidação vertical
C α	coeficiente de adensamento secundário
Cv	coeficiente de variação
e_0	índices de vazios iniciais
e_f	índice de vazios finais
e_{v0}	índice de vazios para a tensão vertical efetiva inicial <i>in situ</i>
E	módulo de elasticidade
IP	índice de plasticidade
K	coeficiente de permeabilidade
WP	Limite de plasticidade
mv	coeficiente de compressibilidade vertical (ou de variação volumétrica)
Su	resistência não drenada
WL	limite de liquidez
m	fator de correção da resistência não drenada do ensaio de palheta
ν	coeficiente de poisson

v_s	coeficiente de posição do solo
γ	peso específico do material
γ_t	peso específico úmido
W_n	Umidade natural
ID	índice de desestruturação

DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS, DESLOCAMENTOS, DISTORÇÕES, VELOCIDADES, FORÇAS, TENSÕES E PRESSÕES

σ_v	tensão total
u	poro-pressão
Δe	variação do índice de vazios
Δ_h	recalque por adensamento primário final (tempo) infinito
Δ_p	variação de pressão
σ_{vc}	tensão efetiva do solo
σ_{vm}	tensão de pré-adensamento de um solo

SIGLAS

OCR	razão de sobreadensamento (Overconsolidation ratio)
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CP	corpo de prova
CPT e CPTU	ensaio de cone e piezocone, respectivamente
DER	Departamento de Estradas de Rodagem
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infra-estrutura e Transporte
GEGEP	Grupo de Engenharia Geotécnica de Encosta e Planície
LSI	laboratório de solos e instrumentação
NA	nível d'água

NBR	Norma Brasileira
RSA	razão de sobre adensamento
SPT	standart penetration test
T.M.O.	teor de matéria organica
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
UU	ensaios triaxial não adensado com ruptura não drenada (unconsolidade undrained).

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	iv
RESUMO	v
ABSTRACT	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE EQUAÇÕES	xi
LISTA DE SÍMBOLO	xi
SUMÁRIO	xiv
CAPÍTULO 1	1
INTRODUÇÃO	1
1.1 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES	1
1.2 OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS	3
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	4
CAPÍTULO 2	6
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 CONSIDERAÇÃO INICIAIS	6
2.2 ORIGEM E FORMAÇÃO DA PLANÍCIE DO RECIFE	8
2.3 MATERIAL ORGÂNICO DO SUBSOLO DO RECIFE	15
2.4 HISTÓRIA DE TENSÕES E TENSÃO DE PRÉ-ADENSAMENTO	18
2.5 QUALIDADE DAS AMOSTRAS	19
2.6 CARACTERIZAÇÃO E COMPRESSIBILIDADE DE ALGUMAS ARGILAS MOLES	26
2.6.1 CARACTERIZAÇÃO DE ARGILAS MOLES DA REGIÃO METROPOLITANA RECIFE	26
2.6.2 COMPRESSIBILIDADE DE ARGILAS MOLES DA REGIÃO METROPOLITANA RECIFE E DO RIO DE JANEIRO	35
2.7 RESULTADO DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO E ADENSAMENTO REALIZADO EM 2014 NO BAIRRO CHÃO DE ESTRELAS	52
CAPÍTULO 3	58
3. MATERIAL E MÉTODOS	58

3.1. INTRODUÇÃO.....	58
3.2 PROCEDIMENTO DO ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO WL E WP.....	60
3.3 PROCEDIMENTO DO ENSAIO DE ADENSAMENTO VERTICAL E EQUIPAMENTOS.....	61
3.4 PROCEDIMENTO DO ENSAIO DE ADENSAMENTO RADIAL E EQUIPAMENTOS.....	68
CAPÍTULO 4.....	70
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	70
4.1 LIMITES DE LIQUIDEZ E PLASTICIDADE OBTIDOS SEM SECAGEM PRÉVIA DA AMOSTRA.....	70
4.2 ENSAIO DE ADENSAMENTO VERTICAL.....	71
4.3 ENSAIO DE ADENSAMENTO RADIAL.....	78
4.4 HISTÓRICO DE TENSÕES DO SOLO.....	84
4.5 QUALIDADE DAS AMOSTRAS DO PRESENTE ESTUDO.....	85
4.6 COMPARAÇÃO DAS CURVAS DE COMPRESSIBILIDADE OBTIDAS POR MEIO DE ENSAIOS DE ADENSAMENTO VERTICAL E RADIAL.....	88
4.7 RECONSTRUÇÃO DA CURVA DE COMPRESSIBILIDADE DA AMOSTRA AMOLGADA EM LABORATÓRIO.....	95
4.8 ANÁLISE DOS RESULTADOS DA PESQUISA COM OS VALORES UTILIZADOS NO PROJETO DA VIA DE TRÁFEGO.....	99
4.8.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE LIMITE DE LIQUIDEZ E PLASTICIDADE SEM E COM SECAGEM PRÉVIA DO MATERIAL.....	99
4.8.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS CURVAS DE COMPRESSIBILIDADE.....	101
CAPÍTULO 5.....	106
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISAS.....	106
5.1 CONCLUSÕES.....	106
5.2 SUGESTÕES PARA PRÓXIMAS PESQUISAS.....	109
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	110

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

As obras de Engenharia Civil normalmente estão apoiadas sobre determinado solo, quando, muitas vezes, suas fundações encontram suporte diretamente na superfície, outras precisam atingir grandes profundidades até encontrarem solos com características que resistam aos esforços produzidos.

Em determinadas regiões as construções são apoiadas em argilas moles, orgânicas ou marinhas, apresentando-se como mais um desafio para os engenheiros geotécnicos e projetistas, afinal tais solos estão sempre sujeitos ao surgimento de recalques e rupturas inesperadas, o que condiz com um estudo detalhado de suas características para fins de qualidade e durabilidade esperadas à obra.

Vários estudos já abordaram o tema de relevância, inclusive, nacional e internacional, citando como exemplo a Torre de Pisa, Itália. Aqui no Brasil, casos bem conhecidos são vistos no litoral de Santos, São Paulo, onde altos edifícios se apresentam com recalques diferenciais da ordem de 2,1 metros.

O reduto limítrofe da abrangência deste estudo está a Capital Pernambucana, Recife, que em face do contexto de sua formação geológica, apresenta subsolo variado, com depósitos de argila mole e matéria orgânica em mais de 50% (cinquenta por cento) da sua área metropolitana, aflorando em superfície ou em profundidades, 30 (trinta) metros, atingindo espessuras superiores a 15 (quinze) metros.

A Veneza Brasileira, como por aqui se chama a cidade do Recife, entrecortados pelos seus principais rios: o Beberibe e o Capibaribe, está situada numa planície muito baixa, com nível do lençol freático alto, encontrando-se geralmente muito próximo a superfície do terreno,

restando depósitos de argilas saturados, exigindo assim projetos de fundações adequados com as propriedades geotécnicas da região.

Várias publicações e pesquisas têm sido realizadas para o conhecimento e catalogação dos parâmetros encontrados nos depósitos de argilas moles de diversos bairros desta Cidade, servindo assim como referência para evitar rupturas do solo e recalques incompatíveis em estruturas de fundação de obras e construções apoiadas diretamente sobre esses solos, não obstante a alta compressibilidade e a baixa capacidade de carga ou de suporte apresentados por eles quando submetidos a esforços de compressão.

Exemplo clássico local é a Av. Agamenon Magalhães, construída em pavimento rígido, que corta a cidade do Recife de norte a sul, apresentando desnivelamento do greide da pista, rupturas das placas de concreto e danos irreparáveis tanto estéticos, como materiais à população que se utiliza daquela via.

Assim, devido a grande quantidade de solos moles em superfície e em profundidade existente na cidade do Recife, ao posicionamento do nível de água próximo à superfície e ao crescimento da população associada à pequena área urbana da Cidade várias pesquisas já foram desenvolvidas para avaliar as características de compressibilidade, resistência e história das tensões dos depósitos.

Nesse sentido, as argilas moles do Recife já foram estudadas por Teixeira (1972), Amorim (1975), Ferreira (1982), Ferreira et al (1986), Ferreira e Coutinho (1988), Oliveira (1991), Oliveira (2002), Bello (2004), dentre outros que apresentaram um banco de dados dessa argilas orgânicas.

Ademais, a baixa resistência, a alta compressibilidade e a baixa permeabilidade apresentadas pelas argilas moles, associado, no caso da cidade do Recife, ao nível do lençol freático muito próximo à superfície e ainda a cidade ter sido formada em um ambiente de transição entre o continente e o mar, onde há uma vegetação de manguezais, muitas obras de engenharia para serem construídas estão sobre aterros, necessitando que os recalques sejam minimizados, acelerados e admissíveis para não causar danos nas edificações.

Portanto, o crescimento da Cidade tem levado a necessidade de se construir obras de infraestrutura, fato que motivou em 2014 ser elaborado um projeto de via de acesso de tráfego com 7 metros de largura e 1.400 metros de extensão na marginal do Rio Beberibe no bairro de Chão de Estrelas, contemplando um programa de investigação geotécnica no local. A via foi projetada sobre um depósito de argila mole que é o material de estudo da presente pesquisa.

O estudo aqui desenvolvido, na presente dissertação, utilizou das amostras coletadas em dois locais, chamadas de Ilhas, para o projeto da via e amplia a investigação realizada no que concerne ao estudo da compressibilidade por adensamento com drenagem vertical e radial, avalia a influência da matéria orgânica nos limites de consistência, a qualidade das amostras e a história de tensão do depósito.

Nesse contexto, buscou-se contribuir para um melhor entendimento do comportamento dos solos moles desse depósito da cidade do Recife quando submetido à solicitação de tensões de carregamento.

1.2 OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS

Esta dissertação apresenta como objetivo geral analisar a compressibilidade de uma argila orgânica mole do Recife, localizada no bairro Chão de Estrelas.

Como objetivos específicos:

- Caracterizar fisicamente o perfil do depósito argiloso estudado;
- Avaliar a influência da secagem prévia nos valores de Limite de Liquidez (WL) e Limite de Plasticidade (WP);
- Avaliar a influência da qualidade da amostra e propor a correção da curva de compressibilidade de campo;
- Avaliar a tensão de pré-adensamento e a história de tensão do depósito;
- Avaliar a variação do coeficiente de compressibilidade volumétrica (m_v), do coeficiente de adensamento vertical e horizontal (C_v e C_h), do coeficiente de

permeabilidade (K_v e K_h) e do coeficiente de compressão secundária (C_α) com a tensão vertical de consolidação para os ensaios edométricos vertical e radial;

- Comparar seus resultados ou parâmetros de compressibilidade aos resultados já catalogados para o mesmo local da pesquisa e para a planície do Recife;
- Analisar parâmetros de compressibilidade de uma amostra completamente amolgada em laboratório com outra amostra indeformada de boa qualidade de mesma referência e profundidade.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

No Capítulo 1 são apresentados a justificativa, o objetivo geral e os objetivos específicos da presente dissertação.

O Capítulo 2, a primeira parte refere-se aos estudos realizados para definição e análise dos solos moles, comportamento e propriedades. A segunda parte aborda a origem e formação dos solos moles da planície do Recife. A terceira parte apresenta breve comentário sobre a ocorrência de solos orgânicos, argilas orgânicas moles. Na quarta parte comenta-se sobre o histórico das tensões e tensões de pré-adensamento. A quinta parte traz como tema a qualidade das amostras.

Em seguida, apresentam-se os ensaios de caracterização obtidos e realizados por diversos autores em argilas moles do Recife e do Rio de Janeiro. Por fim, a sétima parte do segundo capítulo apresenta os resultados cedidos da pesquisa anterior para concepção de projeto da via marginal ao Rio Beberibe no bairro Chão de Estrelas.

No Capítulo 3 detalha-se o desenvolvimento dessa pesquisa, a metodologia, os equipamentos e materiais utilizados, dificuldades ocorridas ao longo dos ensaios, os procedimentos adotados tanto no ensaio de adensamento vertical como no de drenagem radial, assim como o tempo de execução de cada ensaio.

O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos pelo presente trabalho para cada Ilha estudada: Limites de Liquidez e Plasticidade sem secagem prévia do material; parâmetros e curvas de compressibilidade pelos ensaios de adensamento vertical e radial; OCR; e, a qualidade das amostras analisada pelos critérios de Lunne et al (1997), Hong e Onitsuka (1998), Oliveira (2002) e Coutinho (2007).

Nos resultados comparam-se os valores de Limites de Liquidez encontrados com estudos anteriores para o projeto realizados com a secagem prévia do material e sem secagem prévia desse trabalho; Analisa-se a forma das curvas de compressibilidade encontradas; e, realiza-se a reconstrução da curva de compressibilidade de uma amostra amolgada em laboratório pelo método de Schmertmann (1955) e a estimativa de uma curva de compressibilidade baseada em ábaco proposto por Oliveira (2002) com dados de amostras de qualidade obtidas pelo amostrador Sherbrooke .

Finalmente, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões deste trabalho e as sugestões que podem ser utilizadas para futuras atividades de pesquisa de forma a contribuir para o avanço do estudo do comportamento dos solos moles na planície da cidade do Recife.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONSIDERAÇÃO INICIAIS

A construção civil tanto no que tange ao crescimento de uma demanda habitacional ou como aporte do desenvolvimento em infraestrutura, vem ocupando todos os espaços das grandes cidades, gerando verdadeiras selvas de pedra, renegando planejamento e harmonia com a necessidade de um meio ambiente sustentável.

Essa ocupação aparentemente consolidada, muitas vezes apresenta fundações diretas apoiadas em terrenos situados sobre imensos depósitos de solos moles, pouco visíveis e passíveis de gerar transtornos indesejados em construções sobre eles alocados.

Os solos moles são aqueles que apresentam baixa resistência a penetração, com índice N não superior a 4 (quatro) golpes, em geral apresentam matéria orgânica, cor escura e cheiro característico. A fração de argila apresenta coesão, alta compressão e baixa permeabilidade.

Essas características, por sí sós, requerem cuidados especiais e a utilização de técnicas construtivas e pesquisas de solo diferenciadas quando comparadas às práticas normalmente aplicadas, assim, o uso do ensaio de cone (CPT - Cone Penetration Test) e piezocone (CPTU - Piezocone Penetration Test), Vane test e adensamento com drenagem radial estão se tornando cada vez mais frequentes na engenharia geotécnica.

Não obstante às novas tecnologias, conhecer as características dos solos moles para obtenção de seus parâmetros físicos específicos possibilita minimizar recalques indesejáveis de obras, fundações e rupturas dos solos, contribuindo para a estabilidade e durabilidade das construções.

Os recalques tendem a acontecer devido ao adensamento da argila mole, reduzindo os vazios gradativamente com o tempo. Então, se observe que independente da obra (aterro, pavimentação, edificação, pontes ou viadutos) importante é conhecer o solo onde será transmitida suas cargas, evitando surpresas, principalmente, depois da obra pronta, já que relevante considerar o carregamento gradual imposto ao solo na fase construtiva.

Assim, uma obra construída diretamente sobre um depósito de argila mole saturada tem sua tensão transmitida suportada inicialmente pela água contida nos poros do solo, que tende, com tempo, a ser dissipada. A depender da espessura desses depósitos, origem e formação, esse acréscimo de tensão ocasiona variação do seu volume em face da drenagem dos fluídos dos vazios do solo (expulsão da água dos poros), gerando a diminuição de sua espessura e, conseqüentemente, uma diferença de nível na construção.

Ocorre que solos argilosos saturados (solos coesivos), como é o caso dos depósitos encontrados na planície da cidade do Recife, apresentam a característica de baixa permeabilidade, ou seja, a saída da água contida nos poros do solo ocorre muito lentamente, sendo as variações volumétricas (deformações ou recalques) também lentas, dependentes do tempo de aplicação dessas cargas sobre o solo.

Nesse sentido, a variação de volume dos solos está relacionada a variação do volume de seus vazios que por sua vez depende do tempo de dissipação da água de seus poros, e a essa pressão de dissipação da água dos poros dá-se o nome de poro-pressão ou pressão neutra.

A compressibilidade dos solos que relaciona a diminuição do volume dos solos finos (adensamento) sob a ação de determinada carga com o tempo tem sido objeto de diversos estudos, principalmente na cidade do Recife.

A velocidade que o volume do solo varia e o adensamento que ocorre dependem da facilidade de escoamento da água. Assim, um modelo matemático que traduz esse efeito foi formulado, primeiramente, por Terzaghi (1923) apud Ferreira (1982) lançou a teoria de adensamento, descrevendo essa dissipação da água dos poros e a deformação associada dos solos.

Vários estudos posteriores foram realizados utilizando-se as hipóteses desenvolvidas pela teoria de Terzaghi, quais sejam: o solo deve ser homogêneo e estar saturado; a água e os

sólidos constituintes do solo devem ser considerados incompressíveis; que a lei de Darcy seja válida; que as propriedades de permeabilidade e compressibilidade sejam consideradas constantes; que o tempo necessário de adensamento seja devido a baixa permeabilidade do solo; que o solo seja confinado lateralmente; que as deformações decorrentes do adensamento sejam pequenas; e, que as tensões normais totais e efetivas sejam constantes em uma seção horizontal durante o processo de adensamento.

Dessa forma, Terzaghi criou uma verossimilhança entre o ensaio e as condições de um solo ideal. Outros ensaios, porém, foram realizados sem levar em consideração tais hipóteses, e outros ensaios também são utilizados para a obtenção de dados gerais e complementares no conhecimento das características e parâmetros de depósitos de argila.

Citam-se as investigações geotécnicas com sondagens a percussão (SPT), para a classificação, de maneira preliminar, das camadas atravessadas do subsolo, detecção do nível do lençol freático e da umidade ao longo do depósito; os ensaios de palheta ou Vane Test para pesquisa da resistência não drenada de argilas moles saturadas; os ensaios de piezocone para, confirmar ou não, a classificação dos solos originárias do SPT, assim como estimar a resistência não drenada, a história das tensões do depósito e o coeficiente de adensamento do solo; e, por fim, na retirada de amostras indeformadas para ensaios edométricos e análises laboratoriais.

Nesse contexto, verifica-se que os solos moles estão presentes e espalhados por várias regiões, inclusive na planície do Recife, local desse estudo e pesquisa complementar, e se comportam diferentemente a medida da espessura da camada ou do depósito, apresentando grande heterogeneidade, variação nos valores de compressibilidade e propriedades geotécnicas, sendo relevante a atenção especial para sua origem e formação, tema de nosso próximo item.

2.2 ORIGEM E FORMAÇÃO DA PLANÍCIE DO RECIFE

Segundo Ferreira (1982) a cidade do Recife está inserida em uma planície de origem flúvio-marinha com cerca de 210 km² de extensão, limitada pela Formação Barreira terciária (neogênica) formando um semicírculo quase perfeito pelas colinas de Olinda, de Casa Amarela, da Várzea e de Prazeres e a leste os arrecifes de arenito que protegem o litoral.

Explica ainda que no local da planície do Recife, na época do Plioceno, existia uma enseada que foi recortada na costa do continente pelas correntes de grande intensidade do mar, produzidas pelos fenômenos de regressão e transgressão marinha até este período.

Sobre o fenômeno oceânico, importante destacar o trecho de Gusmão Filho (1995) que explica a formação da planície costeira como depósitos associados à transgressão e retrocesso dos mares em relação à terra:

“Quando ocorre a transgressão, a energia da água do mar provoca erosão a sua frente, na pós-praia. Para trás, na ante-praia, dá-se a deposição devido a frenagem dos sedimentos continentais, à medida que se adensam no oceano encorpado por uma lâmina de água cada vez mais espessa. Com o recuo do mar, a situação se inverte. A perda de energia das águas do mar na frente das ondas provoca a sedimentação, levando o perfil da costa na pós-praia. Para trás, na ante-praia, a força trativa da água desencadeia um processo de erosão, carreando o material do leito para o fundo do oceano.”

Posteriormente, continua Ferreira (1982), já no período do Holoceno, cerca de dez mil atrás, esta enseada deu lugar a planície aluvionar do Recife formada por uma espessa camada de argila orgânica, com camadas intercaladas de areia, argilas de cores e consistências variadas e siltes, que se encontram misturados na própria argila, todos elementos provenientes da composição da Formação Barreiras.

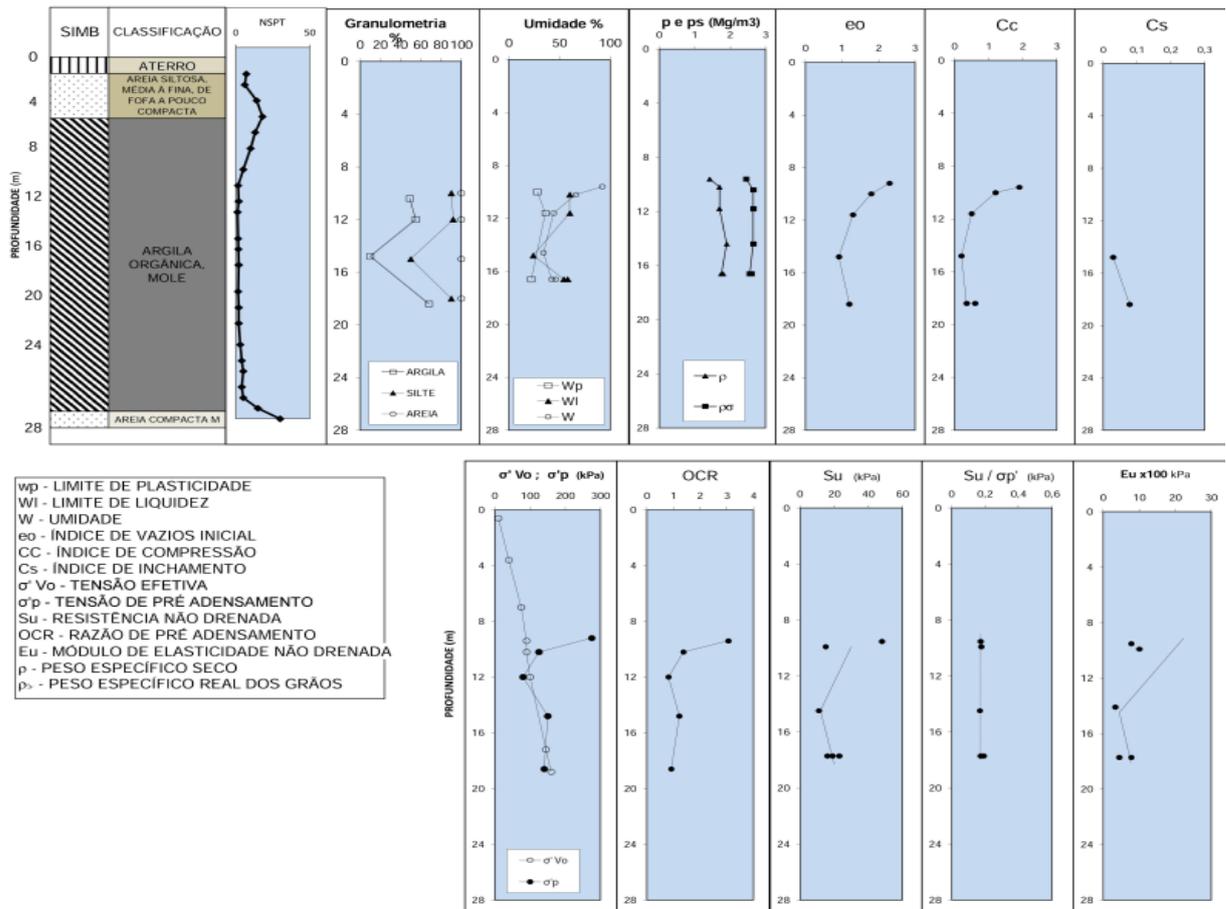
Assim, as areias do subsolo recifense são quase que totalmente provenientes da ação do mar, os rios muito pouco contribuíram para esta formação. Por sua vez, os materiais argilosos e orgânicos foram ação direta dos rios, que por serem partículas mais leves eram levados até a foz outrora, ao sopé (parte inferior da encosta) das barreiras na região hoje denominada Várzea, quando as águas dos rios perdiam velocidade permitindo a sedimentação de todo material.

Ferreira (1982) expondo que em relação ao nível do mar, a altitude da planície recifense varia de dois a onze metros na base da barreira, isto faz com que o nível do lençol freático se encontre muito próximo a superfície, razão pelo qual os depósitos de argila orgânica estejam saturados.

Considera os mangues originários da regressão marinha e explica que a salinidade dessas águas agiram como agentes flocculantes do material argiloso, com a posterior sedimentação.

Ferreira e Coutinho (1988) e Coutinho e Ferreira (1988b) apresentam perfis de solos de vários bairros do Recife nas Figuras 1 a 5.

Figura 1 - Perfis geotécnicos do bairro de Boa Viagem na cidade do Recife.

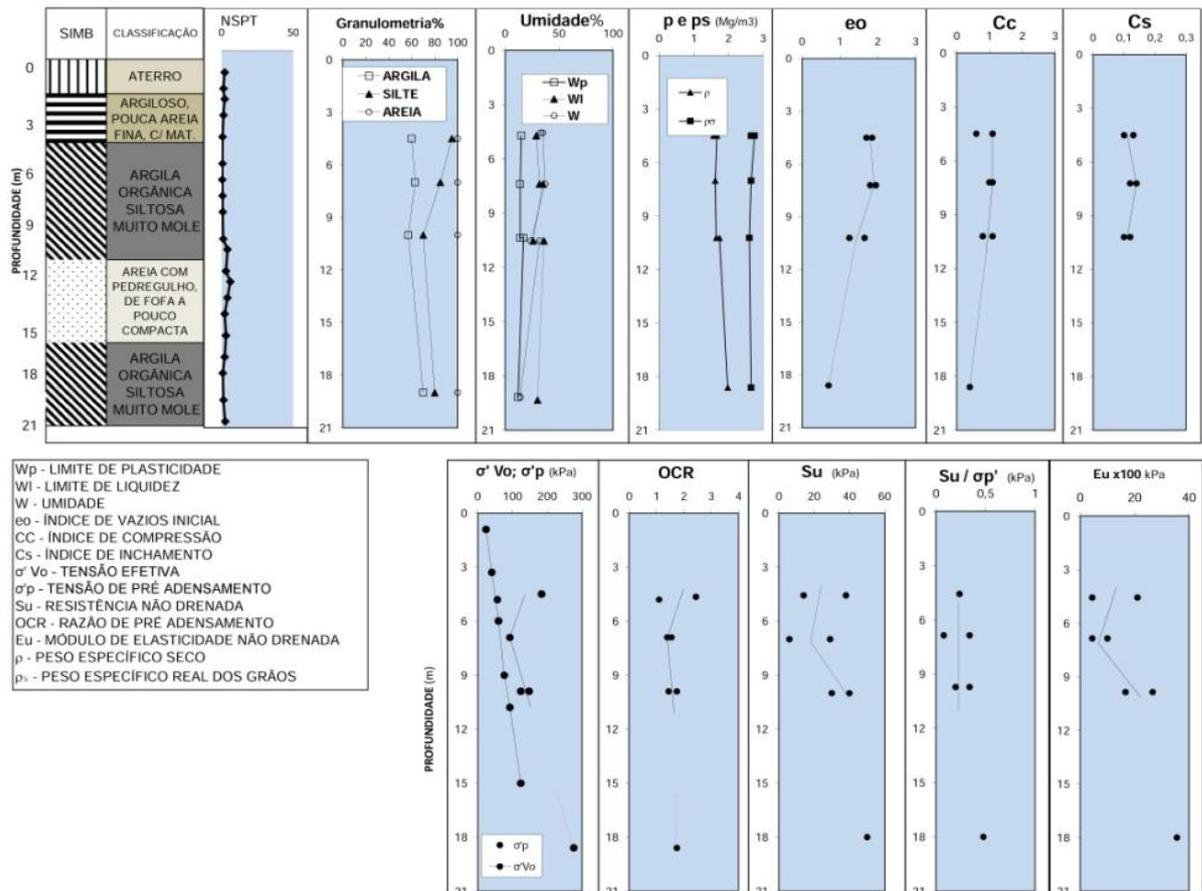


Fonte: Ferreira e Coutinho (1988) e Coutinho e Ferreira (1988b), adaptado por Oliveira (2015).

A Figura 1 apresenta um perfil do bairro de Boa Viagem, podendo-se notar espessa camada de argila orgânica dos 5 aos 27 metros de profundidade e SPT abaixo de 4 golpes. A partir de 12 metros de profundidade destaca-se um percentual de finos entre 40 e 80%; a umidade natural varia em torno dos 50% para essa mesma profundidade, apresentando o Limite de Liquidez próximo ao valor da Umidade Natural o que, para Teixeira (1972) caracteriza uma argila normalmente adensada.

Os índices de vazios diminuíram com o aumento da profundidade, variando entre 2,00 e 1,00; e, com o mesmo comportamento o índice de compressibilidade (C_c) e o OCR, este variando de 3,00 a 1,00, se enquadrando como levemente normalmente adensada após os 12 metros de profundidade.

Figura 2 – Perfis geotécnicos do bairro de Bongi na cidade do Recife.



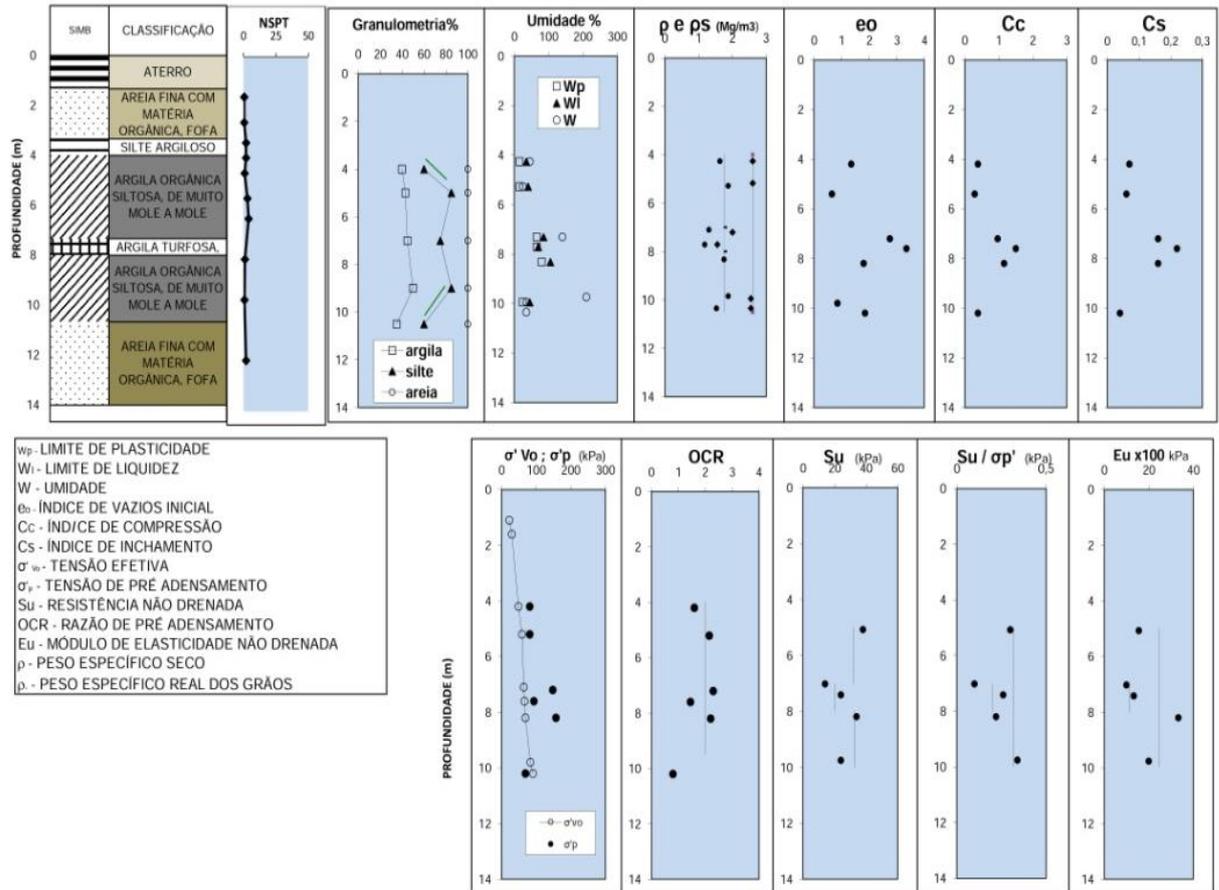
Fonte: Ferreira e Coutinho (1988) e Coutinho e Ferreira (1988b), adaptado por Oliveira (2015).

A Figura 2 representa um perfil do bairro do Bongi, região mais central da cidade do Recife, cortado por canais de drenagem, apresenta, após a camada de aterro, um silte escuro característico dos mangues, seguindo de uma camada de cerca de 7 metros de espessura de argila orgânica, de SPT abaixo de 4 golpes e com percentual de finos entre 60 e 90%, na sequencia uma camada de areia fofa de aproximadamente de 4 metros de espessura e mais uma camada de argila mole com espessura em torno de 6 metros.

O índice de vazios diminuiu com o aumento da profundidade, variando entre 2,00 e 1,00; com o mesmo comportamento o índice de compressibilidade (C_c) e o OCR, este variando de 3,00 a 1,00, com características de ligeiramente pré-adensamento até os 10 metros de profundidade,

enquanto o Limite de Liquidez ficou próximo aos valores da umidade natural a essa profundidade.

Figura 3 - Perfis geotécnicos do bairro da Caxangá na cidade do Recife.



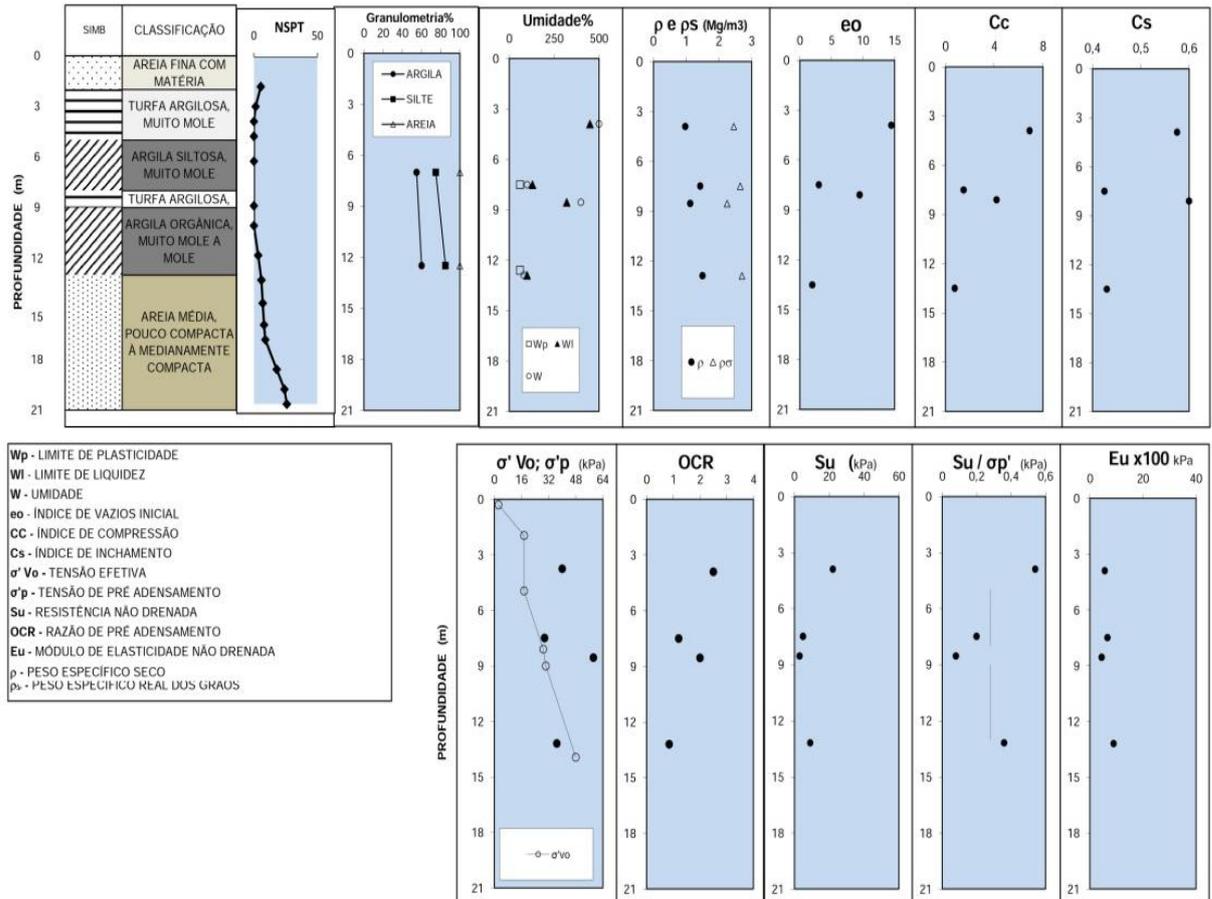
Fonte: Ferreira e Coutinho (1988) e Coutinho e Ferreira (1988b), adaptado por Oliveira (2015).

A Figura 3 refere-se ao perfil do bairro da Caxangá, próximo ao Rio Capibaribe, ao bairro do Bongi e da Madalena, apresentando uma camada de argila orgânica de menor espessura com cerca de 6 metros, entre camadas de areia. A profundidade estudada ficou entre 4 e 10 metros com percentual de fino entre 40 e 80%; umidade natural acima dos 100%. O índice de vazios variou de 4 a 0,5. O OCR entre 1 e 3 considerando-se ligeiramente pré-adensada até os 10 metros.

A Figura 4 refere-se ao perfil do bairro da Estância, vizinho ao Bongi e ao bairro do Jiquiá, apresentando em sua camada superficial uma areia fina com matéria orgânica, seguida de uma camada de 3 metros de turfa de alta umidade e camada de 6 metros de espessura de argila orgânica, de OCR entre 1 – 3 considerando-se também ligeiramente pré-adensada.

A turfa aparentemente também é responsável pelo elevado índice de vazios e de compressibilidade apresentados, condições que muitos se assemelha ao perfil encontrado no bairro da Caxangá para a profundidade em torno dos 8 metros.

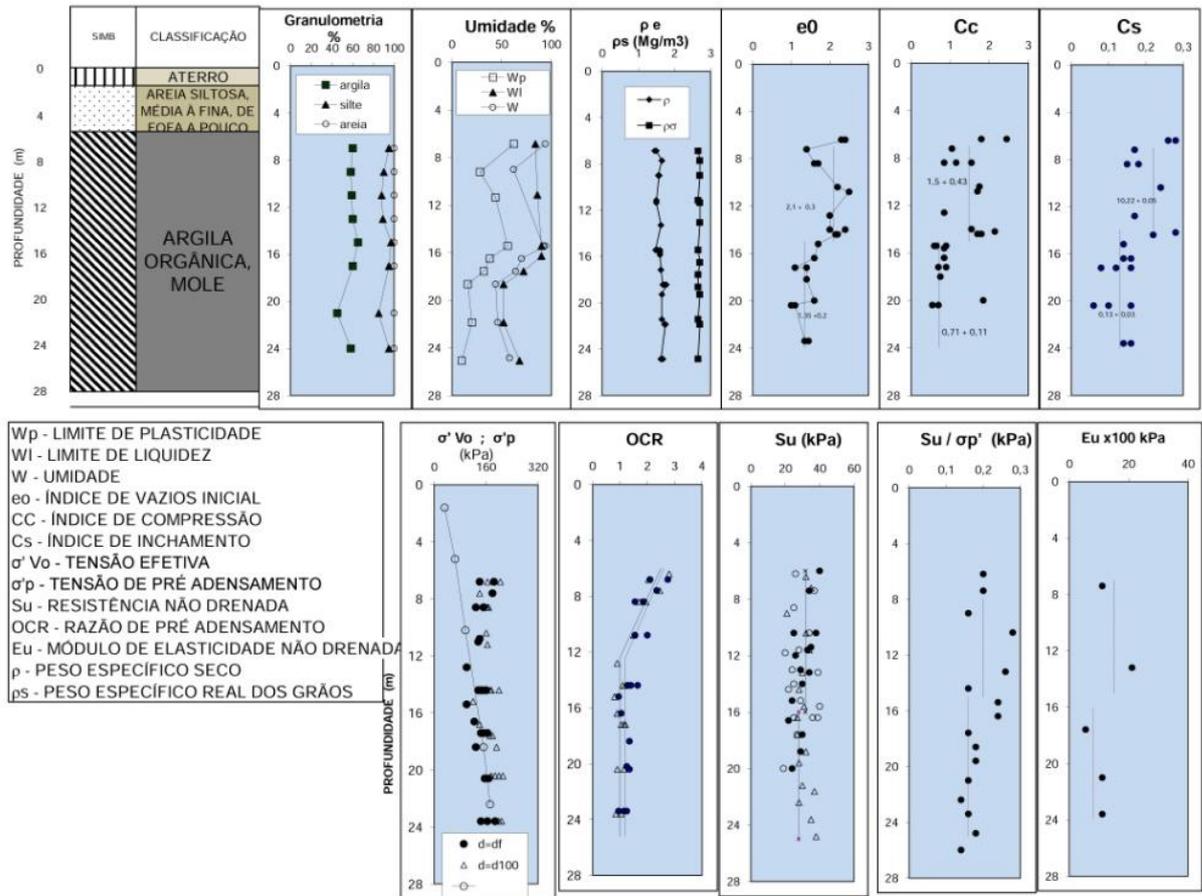
Figura 4 - Perfis geotécnicos do bairro da Estância na cidade do Recife



Fonte: Ferreira e Coutinho (1988) e Coutinho e Ferreira (1988b), adaptado por Oliveira (2015).

A Figura 5 refere-se ao perfil do bairro da Madalena, próximo ao Clube Internacional, Bairro da Caxangá e do Bongi, apresentando cerca de 24 metros de espessura de argila orgânica mole, com alto percentual de finos; valores de umidade e de Limite de Liquidez muito próximos demonstrando ser uma argila normalmente adensada; o depósito aparenta ser constituído por dois tipos de argilas.

Figura 5 - Perfis geotécnicos do bairro da Madalena na cidade do Recife.



Fonte: Ferreira e Coutinho (1988) e Coutinho e Ferreira (1988b), adaptado por Oliveira (2015).

A primeira argila até os 16 metros de profundidade e a outra de características diferentes após essa profundidade, notoriamente pelos valores do índice de vazios, do índice de compressibilidade. O OCR indica que até os 16 metros a primeira camada encontra-se ligeiramente pré-adensada, enquanto a segunda camada após essa profundidade aparenta-se levemente normalmente adensadas.

Após o aterro, camadas de argila orgânica com espessuras de até 20 metros são encontradas, chegando a profundidades de quase 30 metros. No bairro da Madalena, onde está localizado o Clube Internacional, o número de golpes registrados para penetração está entre 2 e 4, que simboliza uma argila classificada como mole, enquanto no bairro de Boa Viagem existe uma camada de argila orgânica que até 6 metros de profundidade apresenta 19 golpes para penetração, rija, porém na sequência, nos próximos 17 metros de profundidade, o número de golpes aplicados ficaram entre 2 a 4 golpes, novamente uma argila mole.

Observa-se ainda que o nível do lençol freático é muito alto, podendo variar de 0,7 a 2 metros a depender da estação do ano, contribuindo com a saturação dos depósitos argilosos.

Todos os perfis apresentados, a exceção do bairro de Boa Viagem, pertencem a uma área central do grande Recife a aproximadamente 12 quilômetros do centro da cidade. Os depósitos de argila mole apresentam resultados de OCR em torno de 1 a 3, a depender da profundidade estudada estão pré ou normalmente adensadas; SPT entre 2 e 5 golpes. Os índices de vazios apresentados aparentam diminuir com a profundidade e no mesmo sentido o índice de compressibilidade.

A umidade aumenta com a proximidade ao Rio Capibaribe e ao Rio Jiquiá, principalmente nos perfis do bairro da Caxangá e Estância, assim como com a presença de resíduos de vegetação, turfas e materiais orgânicos, fato que infere a possibilidade que a vida vegetal esteve presente na paisagem local em tempos outrora, restando agora, apenas de lembrança, poucas águas salobras que insistem manter vivos os mangues.

2.3 MATERIAL ORGÂNICO DO SUBSOLO DO RECIFE

Teixeira (1972) obteve teores de matéria orgânica em depósitos de argila mole do Recife para profundidades 20 a 30 metros da ordem de 0 – 5%, enquanto nas profundidades de 0 a 20 metros encontrou teores de 5 – 10%.

Analisando seus resultados, o autor apresentou três estágios distintos que passa a matéria orgânica nos solos. O primeiro, num nível mais superficial, a matéria orgânica é composta por restos de vegetal e animal, incluindo microrganismos e produtos em fase de decomposição.

Numa faixa intermediária a matéria orgânica apresenta-se em plena decomposição orgânica, onde ácidos, alcoóis, aldeídos e bases orgânicas serão absorvidos ou incorporados às partículas de argila. Por fim, na faixa mais profunda a matéria orgânica está praticamente mineralizada, não por outro motivo, quanto maior a profundidade menor o percentual de TMO.

Segundo Amorim (1975) a matéria orgânica arrancada das margens e leitos dos rios foram transportadas pelas correntezas em grande quantidade e nos mais variados tamanhos, desde partículas coloidais até grandes troncos de árvore, não sendo raro encontrar-se em profundidades apreciáveis restos desses materiais ainda em fase de decomposição.

Em Ferreira (1982) encontra-se que a matéria orgânica é o produto da decomposição de restos de vegetais e animais pela ação de microrganismos, podendo alterar sensivelmente as características do solo. Arrancada das margens e dos leitos de rios de vários tamanhos, às vezes, sob forma coloidal, e transformada por eles, a matéria orgânica se encontra sempre misturada com argilas, constituindo as argilas orgânicas. Este material, nos solos da cidade do Recife, ocorre em camadas das mais variadas espessuras e em diferentes locais.

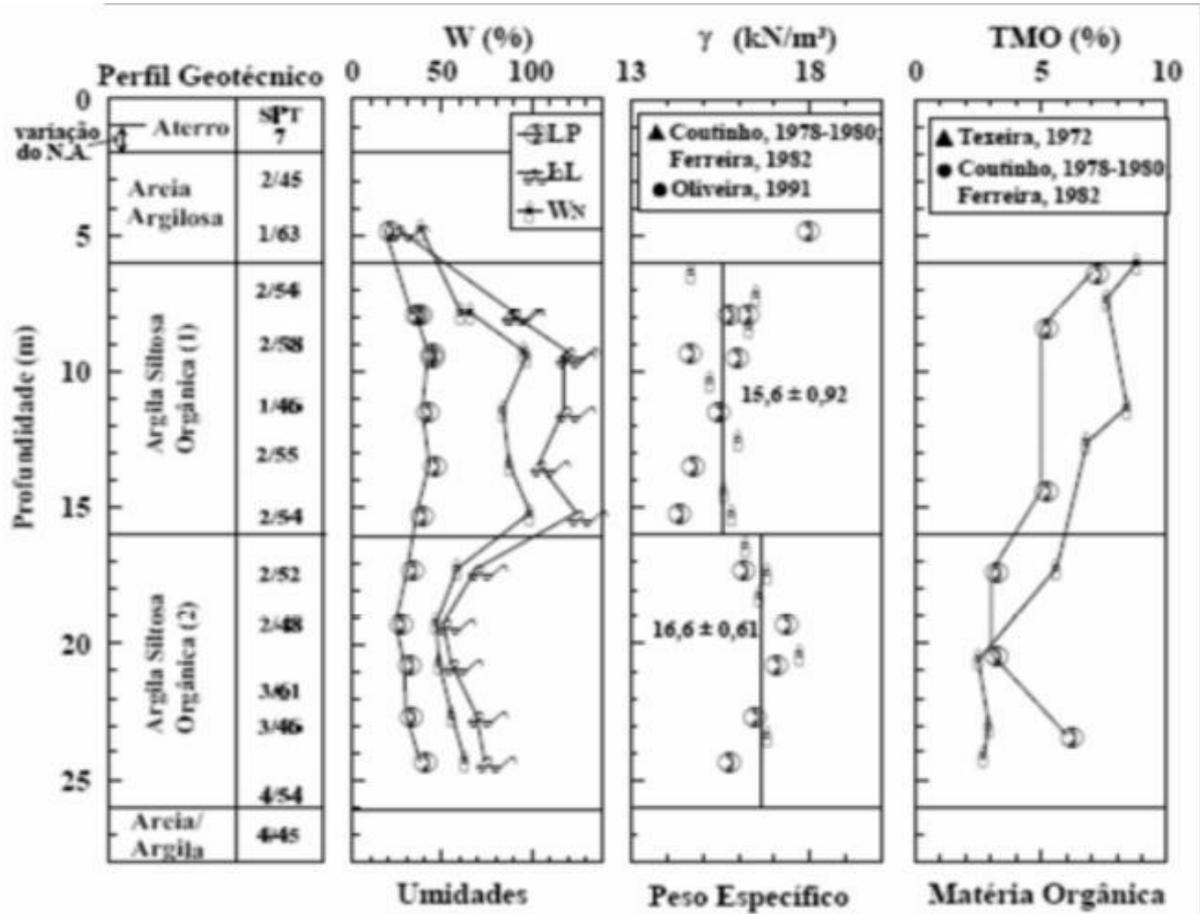
Apresenta ainda a classificação dos solos orgânicos pelo LPC (PERRIN, 1974; MAGNAN, 1968) separados em três grupos: solos pouco orgânicos ($3 < \text{TMO} < 10\%$); solos medianamente orgânicos ($10 < \text{TMO} < 30\%$); e, solos muito orgânicos ($\text{TMO} > 30\%$).

Oliveira (2002) apresenta na Figura 7 o perfil geotécnico com resultados dos ensaios de caracterização e valores de SPT do subsolo do Clube Internacional do Recife. Destaca-se a camada de aterro de aproximadamente 2 m de espessura a partir da superfície, seguido por uma camada de areia argilosa fofa com espessura de aproximadamente 4 metros, encontrando-se logo a seguir um depósito de argila siltosa orgânica mole com espessura de 20 metros.

Dos 6 a 16m de profundidade encontrou-se variação de TMO da ordem de $7 \pm 1,5\%$ e, após essa profundidade até os 26 metros, a camada de argila apresentou um percentual de TMO variando de $3,7 \pm 1,7\%$, demonstrando que o depósito está dividido em duas camadas, sendo a mais profunda com menores teores de matéria orgânica.

Observa-se ainda que a camada até 16 metros apresenta umidade natural (W_n) entre 50 e 100% coincidindo com a faixa de maior percentual de matéria orgânica encontrada, ou seja, quanto maior a quantidade de matéria orgânica maior a umidade. Assim como, o peso específico do solo aumenta na faixa de profundidade depois de 16 metros com a diminuição do teor de matéria orgânica.

Figura 6 - Perfil geotécnico e resultados de ensaios de caracterização com a profundidade no Clube Internacional do Recife.



Fonte: Oliveira (2002)

Bello (2004) destaca que a quantidade (teor) e a qualidade (tipo e grau de decomposição) da matéria orgânica condicionam fortemente o comportamento dos solos orgânicos, sendo a umidade do solo um exemplo dessa influência, aumentando seu percentual na presença de matéria orgânica.

Em sua pesquisa no bairro de Dois Irmãos, às margens do Rio Capibaribe, em terreno localizado nas proximidades da BR 101, encontrou um solo enquadrado na classificação muito orgânico, com TMO em torno de 67% e umidade natural (W_n) de 223%, definindo sua amostra como turfa.

Coutinho (1986) apud Bello (2004) confirma que as argilas moles do Recife, de uma forma geral, apresentam TMO entre 0 a 15%. Para o Bairro do Benfica, especificamente, no Clube Internacional, o solo foi enquadrado como pouco orgânico com TMO variando de 0 – 10% obtido através do método químico dicromato de potássio. Já no Bairro do Ibura, SESI,

utilizando-se os métodos dicromato de potássio e de queima, encontrou-se o percentual de TMO entre 0 – 15%.

2.4 HISTÓRIA DE TENSÕES E TENSÃO DE PRÉ-ADENSAMENTO

Coelho (1997) destaca que o conhecimento do valor da tensão de pré-adensamento representa a fronteira entre deformações relativamente pequenas e muito grandes. Portanto, a razão de pré-adensamento de um solo (RPA) ou OCR (over consolidation ratio) é a relação entre a máxima tensão vertical já experimentada pelo solo e a tensão vertical efetiva atual de campo, ou seja, é a razão entre a tensão de pré-adensamento do solo (obtida convencionalmente em laboratório ou por meio de estimativa de dados de ensaio de campo) e a sua tensão vertical que atua hoje no solo.

Continua o autor que na prática, a relação σ_{vm}/σ_{v0} pode ocorrer de duas maneiras: 1) Solo normalmente adensado - quando o solo nunca foi submetido a uma tensão efetiva vertical maior que a atual (OCR=1); 2) Solo pré-adensado – quando a tensão efetiva de pré-adensamento é maior que a tensão efetiva de campo (OCR > 1).

Oliveira (2000) apud Bello (2004) destaca que em alguns casos especiais, é possível que a determinação da tensão de pré-adensamento forneça um valor inferior à tensão efetiva de campo (OCR <1). As possíveis causas deste subadensamento pode ser a dificuldade da amostragem (má qualidade dos corpos de prova) e/ou a colocação de um aterro recente (últimos 22 – 25 anos), o qual gerou um excesso de poro-pressão, que devido a baixa permeabilidade das camadas argilosas, pode ainda não ter sido totalmente dissipado.

Sempre que ocorrem problemas de amolgamento da amostra nas fases de extração, transporte, armazenamento e preparação do corpo de prova (diâmetro do anel, manuseio, cravação e técnica do ensaio) a curva de compressibilidade tende a ficar mais achatada, não sendo possível identificar a mudança dos trechos de recompressão e compressão virgem.

Coutinho (1986) destaca que para argilas moles/médias e as turfas/solos orgânicos de Recife são ligeiramente pré-adensadas com $OCR \leq 3,0$ ou levemente normalmente adensadas com $OCR < 1,3$. OCR maiores que 3,0 podem ser encontrados na crosta ressecada.

2.5 QUALIDADE DAS AMOSTRAS

Oliveira (2002) destaca que a qualidade das amostras é de fundamental importância na confiabilidade dos valores dos parâmetros geotécnicos obtidos a partir de ensaios de laboratório e que serão utilizados em projetos de engenharia. O efeito quantitativo de uma amostragem de qualidade insatisfatória nos valores dos parâmetros geotécnicos pode trazer consequências desastrosas, tanto técnicas como econômicas.

Hvorslev (1949) apud Oliveira (2002) esclarece que o amolgamento da estrutura do solo consiste no enfraquecimento da adesão entre as partículas ou no rearranjo estrutural dos grãos do solo. Nesse sentido, o solo estruturado apresenta maiores valores de tensão de pré-adensamento, resistência não drenada e rigidez.

O autor classifica o amolgamento em 5 tipos básicos: 1) Variação nas condições de tensão; 2) Variação na umidade e no índice de vazios; 3) Amolgamento da estrutura do solo; 4) Variação química; e, 5) Mistura e separação dos constituintes do solo.

Em Ladd (1973) apud Oliveira (2002) o amolgamento afeta a curva de compressão de ensaio edométrico em argilas pré-adensadas da seguinte forma: a) diminui o índice de vazios (ou aumenta a deformação) para um valor de tensão de adensamento; b) torna de difícil definição o ponto de menor raio de curvatura e, conseqüentemente, a determinação da tensão de pré-adensamento; c) diminui o valor da tensão de pré-adensamento; e, d) aumenta a compressibilidade na região de recompressão e diminui na região de compressão virgem.

Continua o autor alertando que a resistência ao cisalhamento não drenada (S_u) diminui com o amolgamento do solo, enquanto a deformação axial na ruptura (ϵ_f) aumenta. Comenta ainda que amostras com alto grau de amolgamento geralmente apresentam valores mais baixos de OCR.

Nesse contexto, Oliveira (2002) apresenta influências e critérios para a avaliação da qualidade das amostras utilizadas, destaca-se: Lunne et al.(1997), Cavalcante et al.(1998) e Hong e Onitsuka (1998).

Nas Tabelas 1 e 2 apresenta-se o critério de avaliação da qualidade da amostra por Lunne et al. (1997) sugerindo a utilização da razão $\Delta e/e_0$, ao invés da deformação volumétrica correspondente às tensões geostáticas no campo (ε_{V0}), para classificar a qualidade das amostras de argila, onde $\Delta e = e_0 - e_{V0}$, considerando e_0 o índice de vazios inicial da amostra e e_{V0} o índice de vazios correspondente à tensão efetiva de campo. Estes autores justificam que uma variação no volume de vazios (Δe) é mais prejudicial à estrutura do solo quanto menor for o índice de vazios inicial (e_0). Assim, quanto menor o valor de $\Delta e/e_0$ melhor a qualidade da amostra.

Tabela 1 - Critério de avaliação de amolgamento/qualidade de amostras ($\Delta e/e_0$).

OCR	$\Delta e/e_0$			
	Muito Boa a Excelente	Boa a Regular	Pobre	Muito Pobre
1 - 2	< 0,04	0,04 – 0,07	0,07 – 0,14	> 0,14
2 - 4	< 0,03	0,03 – 0,05	0,05 – 0,10	> 0,10

Fonte: Lunne et al. (1997) apud Oliveira (2002)

Tabela 2 - Critério de avaliação de qualidade de amostras, em termos de ε_{V0} , para índice de vazios inicial igual a 2,0.

OCR	ε_{V0}			
	Muito Boa a Excelente	Boa a Regular	Pobre	Muito Pobre
1 – 2	< 0,027	0,027 – 0,046	0,046 – 0,092	> 0,092
2 – 4	< 0,02	0,02 – 0,033	0,033 – 0,066	> 0,066

Fonte: Lunne et al.(1997) apud Oliveira (2002)

Em sua análise, Oliveira (2002) comenta que mesmo as amostras da argila do Recife apresentando maior consistência têm qualidade apenas regular perante este critério, o que parece indicar ser muito rigoroso para as argilas brasileiras, pois o aspecto visual e os resultados de laboratório, em muitos casos, indicam se tratar de amostras de alta qualidade.

Coutinho et.al (1998b) apud Oliveira (2002) adaptou o critério de Lunne et al.(1997) para os solos moles do Recife, a saber: a faixa que a Tabela 1 que classifica a qualidade da amostra

como boa e regular foi subdividida em duas faixas: 1) Boa; e, 2) Regular, considerando o valor médio da faixa boa/regular proposta como limite. O mesmo ocorreu para a faixa chamada por pobre passando a ser chamada de Transição Regular/Pobre. A Tabela 3 apresenta essas modificações.

Tabela 3 - Qualidade de amostras para o depósito SESI-Ibura – Recife-Pe (Coutinho et al., 1998 a partir de Lunne et al., 1997)

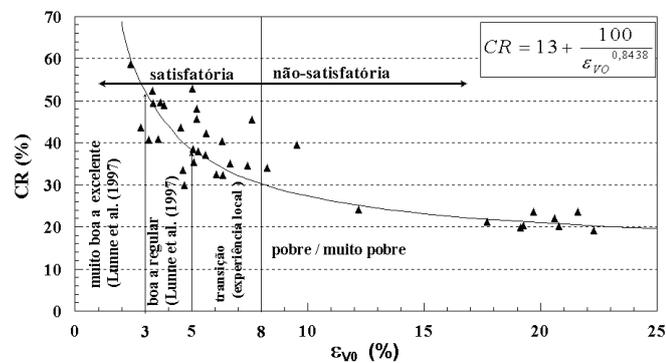
Camada	OCR	ε_{v0}					
		Muito Boa a Excelente	Boa	Regular	Transição Regular/Pobre	Pobre	Muito Pobre
1	1 - 2	< 0,032	0,032 – 0,044	0,044 – 0,056	0,056-0,084	0,084 - 0,112	>0,112
	2 - 4	< 0,024	0,024 – 0,032	0,032 – 0,040	0,040 - 0,060	0,060 - 0,080	>0,080
2	1 - 2	< 0,027	0,027 – 0,038	0,038 – 0,048	0,048 - 0,072	0,072 - 0,095	> 0,095
	2 - 4	< 0,02	0,02 – 0,027	0,027 – 0,034	0,034 - 0,051	0,051 - 0,068	>0,068

Fonte: Oliveira (2002)

Cavalcanti et al (1998) apud Oliveira (2002) traçaram a curva coeficiente de compressão (CR) versus ε_{v0} para o depósito do SESI – IBURA e obtiveram uma correlação com a seguinte expressão: $CR = 13 + (1000/\varepsilon_{v0})^{0,8438}$.

Considerando que a proposta de Lunne et al. (1997) é muito rigorosa para as argilas moles de Recife, Coutinho et al (2000b) apud Oliveira (2002) adaptou as faixas consideradas como de amostras satisfatórias (excelente, muito boa, boa e regular) e não-satisfatórias. Esta modificação foi baseada na experiência local. A Figura 8 ilustra este comentário.

Figura 7 - Curva CR vs. ε_{v0} para o depósito do SESI-Ibura–Recife-PE (Cavalcante et al. (1998) apud Coutinho et al. (2000b)).



Fonte: Oliveira (2002).

Outro critério apresentado por Oliveira (2002) é o de Hong e Onitsuka (1998) que define um índice chamado Grau de Amolgamento (SD%) como sendo a relação entre a inclinação do trecho de recompressão da curva edométrica da amostra natural (C_{CLB}) e a inclinação deste trecho para o solo completamente amolgado (C_{CLR}) na curva $\ln(1+e)-\log \sigma'_v$. Analiticamente pode-se escrever: $SD\% = C_{CLB}/C_{CLR} \times 100\%$

Esses autores comentam que o valor de C_{CLR} pode ser estimado a partir da correlação por eles apresentada como limite de liquidez (WL): $C_{CLR} = -0,390 + 0,332 \log(WL)$. Esta correlação utiliza um banco de dados com vários resultados de ensaios com solos de todo o mundo.

Esse critério baseia-se na comparação entre a inclinação do trecho pré-adensado de uma amostra totalmente remoldada e da amostra natural no ensaio edométrico. Define-se então um grau de amolgamento em percentagem SD%. Quanto menores tais índices melhor a qualidade da amostra.

A Tabela 4 apresenta os valores de SD% para as amostras Sherbrooke obtidas pelo autor, para as argilas do Recife utilizando-se desse critério: de 7 a 14%, com um valor médio de SD igual a 11%. Já os valores de amolgamento para a argila do Rio de Janeiro variavam entre 9 e 29% com valor médio de 21%.

Oliveira (2002) apresenta também uma nota (N) como efeito numérico para atribuir a qualidade de uma amostra utilizando-se da equação matemática $Nota (N) = (100 - SD\%) / 10$. Considera assim, que a amostra com nota de 9 a 10 tem excelente qualidade; de 7 a 9 é considerada boa; de 6 a 7 regular; de 4 a 6 pobre; e, 0 a 4 a qualidade da amostra é muito pobre.

Tabela 4 - Percentagem de amolgamento (SD%) das amostras Sherbrooke – Critério de Hong e Onitsuka(1998) – ensaio edométrico.

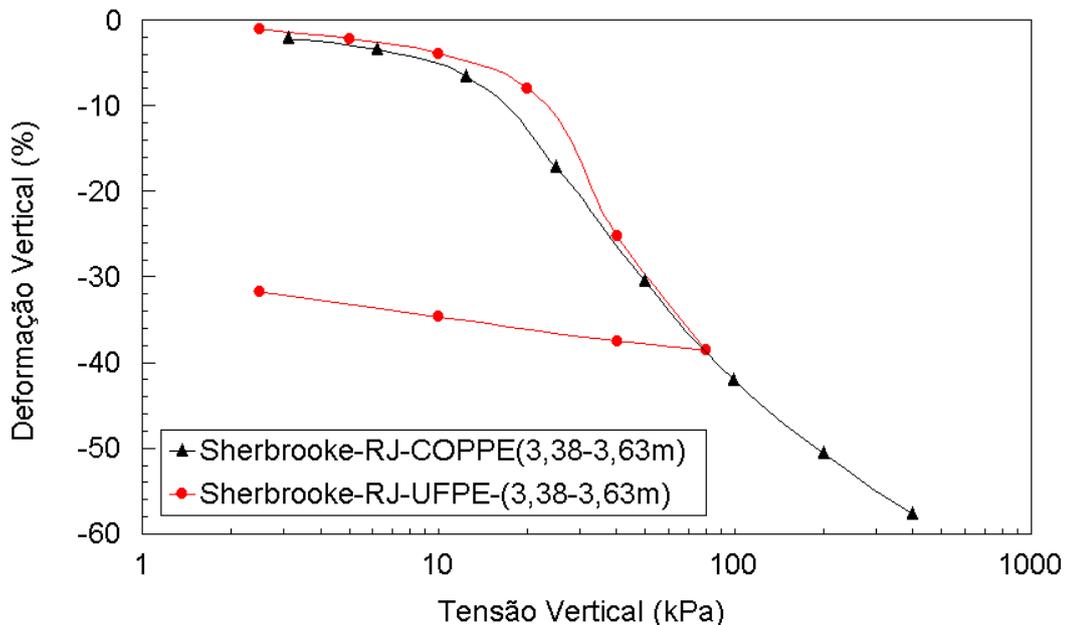
	Amostra	Prof. (m)	Ensaio/anel(mm)	SD (%)
	1	8,80-9,15	UFPE	10
Recife	2	11,90-12,30	UFPE	7
	3	12,90-13,20	UFPE	13
	4	13,70-14,00	UFPE	14

Fonte: Oliveira (2002)

No que tange às influências externas sobre a amostra, Oliveira (2002) ainda destaca que o transporte de suas amostras do Rio de Janeiro para o laboratório da UFPE no Recife, aparentemente, conforme Figura 9, não houve influência significativa em face do formato das curvas índice de vazios *versus* tensão vertical.

A pequena diferença pôde ser creditada à própria heterogeneidade da amostra, sendo o amolgamento causado pelo transporte, em seu estudo particular, pequeno, quase desprezível, e que o amolgamento causado pelo alívio de tensões e técnica de amostragem deveria ser mais relevante.

Figura 8 - Influência do transporte na curva tensão-deformação – amostra 1, Sherbrooke (3,38–3,63m).



Fonte: Oliveira (2002)

Outro fator que pode gerar influência na qualidade da amostra diz respeito ao diâmetro do corpo de prova, porém nos estudos do autor, ocorreram divergências entre os diversos critérios, restando uma limitação de dados que fundamentasse uma conclusão definitiva. Importante destacar, porém, que o critério das notas aumenta levemente com o aumento do diâmetro do corpo de prova.

Outras influências foram estudadas pelo autor: método de amostragem; estruturação e armazenagem. Este último pode causar ressecamento do solo, o que é uma alteração nas suas propriedades naturais, podendo então ser encarado como um amolgamento,

apresentando, em decorrência, alteração na qualidade da amostra. Em seus estudos houve um nítido aumento na tensão de pré-adensamento.

Bello (2011) observa duas propostas de avaliação da qualidade das amostras apresentadas em seu estudo. A primeira por Coutinho (2007) e a segunda por Futai (2010). Para a autora é fundamental avaliar corretamente a qualidade das amostras e se necessário, corrigir os efeitos do amolgamento, obtendo-se parâmetros geotécnicos adequados para serem utilizados nos cálculos de projetos de obras de engenharia.

Importante destacar ainda que Almeida & Marques apud Bello (2011) indicam que o amolgamento de uma amostra diminui a permeabilidade e o coeficiente de adensamento vertical, o que pode causar uma avaliação equivocada da evolução dos recalques com o tempo, ou seja, os prazos previstos para a estabilização com base em amostras amolgadas podem ser maiores.

Quanto ao critério de avaliação da qualidade da amostra Coutinho (2007) apud Bello (2011) sugere que o índice de vazios iniciais não parece ser significativamente influenciado pela qualidade da amostra, então a partir do critério inicial de Coutinho et al (1998a), expresso na Tabela 3, e da modificação sugerida por Oliveira (2002), apresentou na Tabela 5 nova proposta onde são definidas quatro faixas de classificação da qualidade da amostra.

Tabela 5 - Critério de avaliação de amolgamento/qualidade das amostras – Argilas moles do Recife –Coutinho (2007), a partir de Coutinho et al. (1998a); Oliveita (2002).

OCR	$\Delta e/e_0$ Coutinho (2007)					
	Muito Boa a Excelente	Boa a Regular	Pobre	Muito Pobre		
	< 0,05	0,05 – 0,08	0,08 – 0,14	> 0,14		
	< 0,03	0,03 – 0,05	0,05 – 0,10	> 0,10		
1 – 2,5	$\Delta e/e_0$ Coutinho et al. (1998)					
	Muito Boa a Excelente	Boa	Regular	Transição Regular/Pobre	Pobre	Muito Pobre
	<0,04	0,04 - 0,055	0,055 - 0,07	0,07 - 0,010	0,010 - 0,014	>0,014

Fonte: Bello (2011)

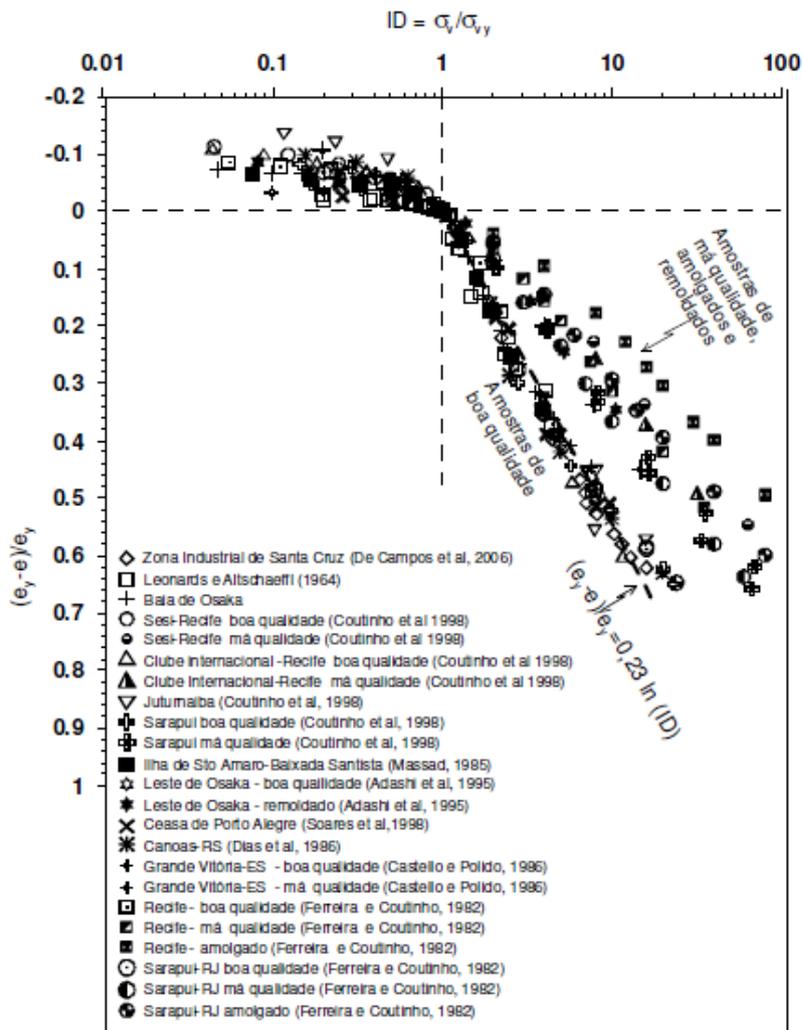
Futai (2010) apud Bello (2011) utilizou dados de vários depósitos brasileiros e apresentou uma proposta para avaliação da qualidade da amostra através da aplicação da curva de compressão normalizada, com a aplicação do índice de desestruturação - ID (Futai 1999,

Futai 2002) como sendo a razão entre a tensão atuante (σ_{V0}) e a tensão de escoamento ou tensão de pré-adensamento ($ID = \sigma_{V0} / \sigma_{Vm}$).

Segundo esta proposta, a curva normalizada ($ID \times (e_y - e) / e_y$) apresentada na Figura 10, onde e_y é o índice de vazios no escoamento, permite avaliar de forma direta a qualidade da amostra, conseguindo-se distinguir bem as amostras de boa ou má qualidade, remoldada ou amolgada, sobretudo para $ID > 1$ (argilas normalmente adensadas).

Assim, um solo com $ID > 1$, significa que o solo foi submetido a um valor de tensão vertical superior a tensão de escoamento. Quando $ID < 1$ o solo está sobreadensado em relação a história de tensões de campo (no caso de solos sedimentares).

Figura 9 - Curvas de compressão normalizadas de curvas de boa e má qualidade por FUTAI (2010).



Fonte: Bello (2011)

2.6 CARACTERIZAÇÃO E COMPRESSIBILIDADE DE ALGUMAS ARGILAS MOLES.

2.6.1 CARACTERIZAÇÃO DE ARGILAS MOLES DA REGIÃO METROPOLITANA RECIFE.

Em função dos problemas da engenharia geotécnica em solos moles várias pesquisas têm sido desenvolvidas na área. A investigação do subsolo através de ensaios de campo e de laboratório produzem diversas informações que permitem uma análise conjunta dos dados obtidos, viabilizando um incremento no grau de confiabilidade dos parâmetros utilizados em projetos de fundações e aterros.

Teixeira (1972) pesquisou amostras indeformadas no bairro do Derby às margens do canal Derby-Tacaruna próximo a praça do Parque Amorim; no bairro da Madalena, especificamente, no Clube Internacional; e, na sede da CHESF, situada no cruzamento da Av. Abdias de Carvalho com a Av. General San Martin.

Observou o autor que, experimentalmente, o teor natural de umidade (W_n) das argilas normalmente adensadas é geralmente próximo ao Limite de Liquidez (WL). Assim, se a umidade é consideravelmente mais baixa que o Limite de Liquidez a sensibilidade da argila será excepcionalmente baixa. Se, por outro lado, a umidade é consideravelmente maior que o Limite de Liquidez a argila apresentará provavelmente alta sensibilidade. Em qualquer caso, as argilas normalmente adensadas são sempre moles a uma profundidade considerável abaixo da superfície. Ademais, o Limite de Liquidez e de Plasticidade (WP) dependem do teor e do tipo de argila, enquanto o índice de plasticidade (IP) parece depender somente da percentagem de argila.

Assim, o índice de plasticidade encontrado por Teixeira (1972) foi da ordem de 30–40% e a umidade da argila se apresentou, até a profundidade de 15 metros, um pouco superior ao Limite de Liquidez, enquanto, após essa profundidade passou a ser menor que o Limite de Liquidez.

A Tabela 6 apresenta o percentual geral granulométrico e a TMO encontrada por Teixeira (1972), muito embora não tenha sido possível fixar com precisão o limite de mudança de camada.

Tabela 6 - Resumo da Granulometria e TMO encontrada em vários bairros do Recife.

Profundidade (m)	Granulometria (%)			TMO (%)
	Argila	Silte	Areia	
7,3	55	41	4	7,6
12,6	69	30	1	6,8
17,2	64	29	7	5,6
20,6	42	37	21	2,5
23,1	49	34	17	2,9
24,1	49	35	16	2,7

Fonte: Teixeira (1972)

Ferreira (1982) fez pesquisas em um depósito de argila mole no bairro da Madalena, especificamente, no Clube Internacional do Recife, tratando-se de um depósito de argila mole de cor cinza com matéria orgânica, conchas e raízes, que se inicia aos 6 metros de profundidade, tendo espessura média de 24 metros.

A Tabela 7 apresenta os resultados de granulometria, enquanto a Tabela 8 indica os resultados para o Limite de Liquidez com e sem secagem prévia do material.

Tabela 7 - Granulometria do depósito de argila orgânica mole no bairro da Madalena.

Profundidade	Composição Granulométrica (%)			
	Areia Grossa (2,0 - 0,2mm)	Areia fina (0,2 - 0,05mm)	Silte (0,05 - 0,002mm)	Argila <(0,002mm)
6,0 - 6,73	-	7	33	60
8,0 - 8,73	-	10	36	54
14,00 - 14,73	-	2	27	71
17,00 - 17,73	-	8	26	66
20,00 - 20,73	-	26	34	40
23,00 - 23,73	-	8	32	60

Fonte: Ferreira (1982)

Observou-se, até os 15 m de profundidade, uma porcentagem média de argila de 66%, enquanto que na faixa de 16 a 24 metros a porcentagem decresce para 54%, indicando a possibilidade de duas camadas. A taxa de matéria orgânica foi de 2 a 6,5%, diminuindo com a profundidade. Em termos médios, a faixa de profundidade de 6 a 15 m é cerca de duas vezes

mais orgânica do que a faixa de 15 a 24 m. Já os valores de pH foram bastante próximos e superiores a 7,0, com exceção da profundidade de 6m que ficou com um valor médio de 8,0.

No início da camada de argila até a profundidade de quinze metros foi constatado restos de madeira em decomposição, fato que levou o pesquisador à conclusão de intensa atividade de vida vegetativa nesta região em épocas passadas. Ademais, o elevado teor salino encontrado e a grande porcentagem de saturação com sódio das amostras em todas as profundidades evidenciaram tratar-se de um sedimento de influência flúvio-marinha, cujo teor de sais solúveis influenciaram propriedades geotécnicas, como por exemplo: o índice de plasticidade, a granulometria, o teor de umidade, a permeabilidade, a resistência etc.

No que tange ao Limite de Liquidez (WL) e de Plasticidade (WP) do depósito foram determinadas evitando-se a secagem prévia das amostras de argila, ou seja, partindo-se da umidade natural (W_n).

Tabela 8 - Limites de Atterberg para o depósito no bairro da Madalena.

Prof.	WL	WP	W _n	IP	WL	WP	W _n	IP	WL	WP	W _n	IP
	Resultados obtidos – ABNT				Resultados anteriores - Sem secagem prévia - 60°C				Resultados anteriores - Sem secagem prévia - 110°C			
6,0 - 6,73	62	85	95	23	100	55	94	45	110	60	96	50
8,0 - 8,73	29	64	65	35	-	-	-	-	-	-	-	-
10,00 - 10,73	45	86	92	41	98	41	90	57	108	46	95	62
14,00 - 14,73	58	92	97	34	92	52	95	40	119	58	99	61
15,00 - 15,40	37	90	71	53	-	-	-	-	-	-	-	-
16,20 - 16,60	33	73	65	40	-	-	-	-	-	-	-	-
17,00 - 17,73	17	50	43	33	48	18	45	30	53	25	40	28
20,00 - 20,73	21	49	45	28	50	20	41	30	61	27	43	34
23,00 - 23,73	30	67	58	37	65	27	52	38	77	38	55	39

Fonte: Ferreira (1982).

Verificou-se em sua pesquisa que o Limite de Liquidez (WL) do solo foi um pouco superior a umidade natural (W_n), tanto para os 60°C como aos 110°C, situação que se inverteu pelos ensaios da ABNT com a secagem prévia do material, o que já era esperado, pois a perda d'água por aquecimento varia dependendo do tratamento térmico adotado. Quando acima de 110°C, além da água o solo perde-se a matéria orgânica nele contida, por oxidação.

Oliveira (1991) também buscou parâmetros da argila mole naquele depósito no Clube Internacional do Recife, coletando 14 amostras, duas na camada de areia argilosa e doze na camada de argila mole, utilizando o amostrador metálico tipo “Shelby” de parede fina com ponta biselada. O diâmetro interno do amostrador foi de 100 cm (4”) e o comprimento em geral de 80 cm.

O perfil do furo de sondagem pode ser visto na Figura 7 apresentando uma camada de aterro com cerca de 2 metros de espessura. O nível da água aparece nesta camada a aproximadamente 1,8m de profundidade. A camada seguinte é de uma areia argilosa fofa com cerca de 5m de espessura. A partir dos 7 metros inicia-se uma camada de argila mole com cerca de 19 metros de espessura, seguida por camadas alternadas de areia e argila de compactidade e consistências variadas. Só a partir de 40 m é que aparece a camada considerada resistente de areia muito compacta, que foi o limite da sondagem.

Foram realizados ensaios de limites de consistência (Liquidez e Plasticidade) sem secagem prévia do material e densidade real dos grãos (picnômetro), retratados na Tabela 9, para confirmar ensaios anteriores. Quanto a granulometria foi aproveitado os dados de pesquisas anteriores: 65% de argila, 25% de silte e aproximadamente 10% de areia fina, podendo ser classificada como argila siltosa.

Tabela 9 - Limites de Atterberg para o Clube Internacional do Recife no bairro da Madalena.

Amostra	Prof.	WL(%)	WP(%)	IP(%)	Peso específico (kN/m³)	Densidade dos grãos (kN/m³)
5	7,45 - 8,20	90,00	33,00	57,00	16,10	24,69
6	9,00 - 9,75	117,50	42,02	75,48	15,20	24,51
7	11,00-11,75	118,00	39,43	78,57	15,10	24,63
8	13,00-13,75	103,50	42,52	60,98	14,80	25,00
9	15,00-15,35	125,40	35,80	89,60	14,40	24,66
10	16,80 - 17,55	68,70	31,38	37,22	16,20	24,87
11	18,85-19,60	50,60	23,50	27,10	17,70	24,75
12	20,30 - 21,05	54,60	29,34	25,26	17,20	25,12
13	22,20 - 22,95	69,00	29,65	39,35	16,70	24,81
14	24,10 - 24,45	74,00	38,30	35,70	16,30	25,37

Fonte: Oliveira (1991).

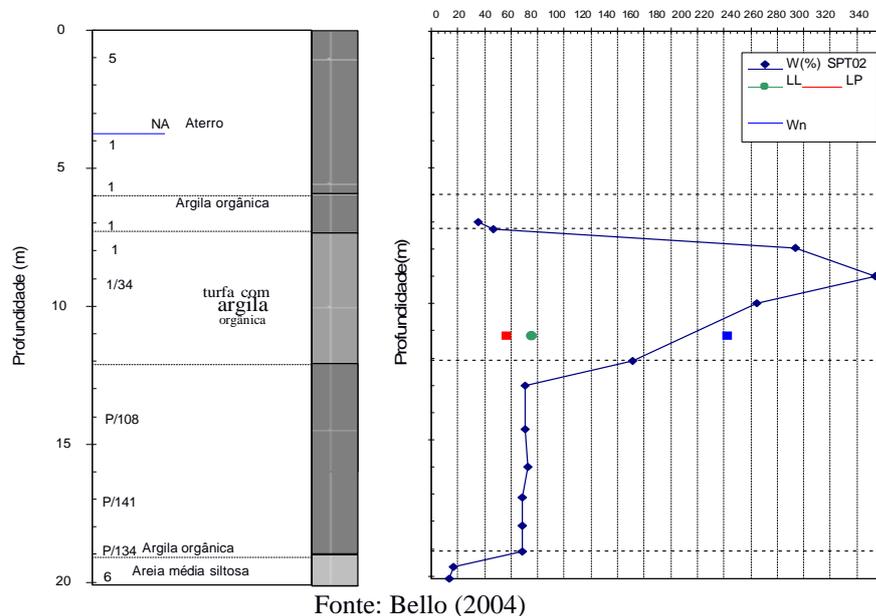
Em seus estudos no Clube Internacional do Recife, Oliveira (1991) detectou que a umidade natural (W_n) para a primeira camada argilosa de 7 a 16m variou de 30 a 110%, com Índice de

Plasticidade (IP) em torno de 70%, enquanto para a segunda camada de 16 a 26 metros a umidade variou de 30 a 60% com Índice de Plasticidade de 30% pela acentuada diminuição do Limite de Liquidez com a profundidade.

O autor observou também o comportamento do peso específico entre as duas camadas, sendo encontrado para a primeira camada o valor médio de 15,1 kN/m³, enquanto na segunda camada apresentou o valor médio de 16,4 kN/m³.

Bello (2004) em estudo do terreno situado na Br 101 no bairro de Dois Irmãos, entre o viaduto que cruza a Av. da Recuperação e o Rio Capibaribe, coletou 01 amostra indeformada em tubo tipo shelby de 4" de diâmetro nas profundidades de 11,00 a 11,40 m para realização de ensaios laboratoriais de caracterização, adensamento e resistência; e, 15 amostras deformadas através do furo de sondagem SP-02 entre as profundidades de 6,00 a 20,10m, para determinação da umidade natural (W_n). O perfil do furo de sondagem do estudo encontra-se na Figura 10.

Figura 10 - Perfil do subsolo na BR 101, bairro de Dois Irmãos.



Os ensaios de caracterização realizados constaram dos seguintes resultados: 1) análise granulométrica com sedimentação: 67% argila, 27% de silte, 4% de areia fina, 1% de areia média e 1% de areia grossa; 2) Limites de Atterberg: Limite de Liquidez (WL) da ordem de

76%, Limite de Plasticidade (WP) de 57%, Índice de Plasticidade de 19%; 3) umidade natural (w_n) ficou em 223%; 4) TMO de 67%; e, 5) pH de 6,66.

Observou a autora que a umidade natural da amostra foi bem superior ao Limite de Liquidez (WL), isto provavelmente ocorreu devido à realização de secagem prévia ao ar livre das amostras de argila orgânica antes da realização dos ensaios de determinação do WL, subestimando assim os resultados.

Bello (2011) destaca investigação geotécnica realizada no primeiro trecho de mangue virgem no Complexo Industrial e Portuário de Suape, referente as amostras indeformadas retiradas nas estacas E98, E103, E112 e E120, sendo coletadas 19 amostras tipo pistão estacionário de paredes finas com tubo de aço-inox com diâmetro de 4 e 4,5". A Tabela 10 apresenta o resumo dos resultados dos ensaios de caracterização física.

A Figura 11 retrata graficamente a estaca E98 apresentando que os valores de w_n (umidade natural) foram relativamente altos na faixa de 136 a 224% com valores próximos ou superiores ao WL (limite de liquidez). Os valores de IP (índice de plasticidade) foram bastante altos e variaram na faixa de 76 a 123%. O TMO apresentou basicamente duas faixas: na parte superior do depósito (0 a 5,0m) 33 e 41% e na parte inferior (6,0 a 10,0m) 16 e 15%. Os valores de γ_{nat} (peso específico) e ρ_{nat} (densidade dos grãos) apresentaram-se baixos em acordo aos resultados anteriores e na faixa de 12,2 a 13,3 kN/m³ e 24,1 a 25,4 kN/m³, respectivamente.

A Figura 12 apresenta graficamente o resultado de caracterização para a estaca E103 onde através dos valores de w_n é possível verificar duas camadas distintas: a primeira camada (0 a 6,0m) apresentando valores entre 154 a 210%; e, a segunda camada (6,0 a 10,0m) apresentando valores entre 63 a 86%. Os valores de IP foram bastante altos na primeira camada variando entre 117 a 136% e na segunda camada variaram de 10 a 45%. Quanto ao TMO, a primeira camada apresentou valores entre 13 e 20% e a segunda camada valores entre 3 e 4%. Os valores de γ_{nat} e ρ_{nat} apresentaram-se na faixa de 13,0 a 14,1 kN/m³ na primeira camada e 15,6 a 17,1 kN/m³ na segunda camada para γ_{nat} e 23,6 a 25,2 kN/m³ na primeira camada e valor constante de 26,2 kN/m³ na segunda camada para ρ_{nat} .

A Figura 13 apresenta graficamente os resultados dos ensaios de caracterização da estaca E112 onde observa-se que os valores de w_n foram relativamente altos na faixa de 74 a 168 % com valores próximos ao WL. Os valores de IP variaram na faixa de 38 a 121%. O TMO apresentou basicamente crescente até os 5m de profundidade (7 a 12%) tornando-se praticamente constante de 6,0 a 11,0m de profundidade (em torno de 10%) a partir daí decrescente até os 18,5m chegando ao valor de 5%. Os valores de γ_{nat} apresentaram-se baixo em acordo aos resultados anteriores e na faixa de 12,6 a 14,5 kN/m³ com exceção na profundidade de 10,0 a 11,0m onde γ_{nat} foi de 18,9 kN/m³. Os valores de ρ_{nat} apresentaram-se coerentes variando na faixa de 24,4 a 26,4 kN/m³.

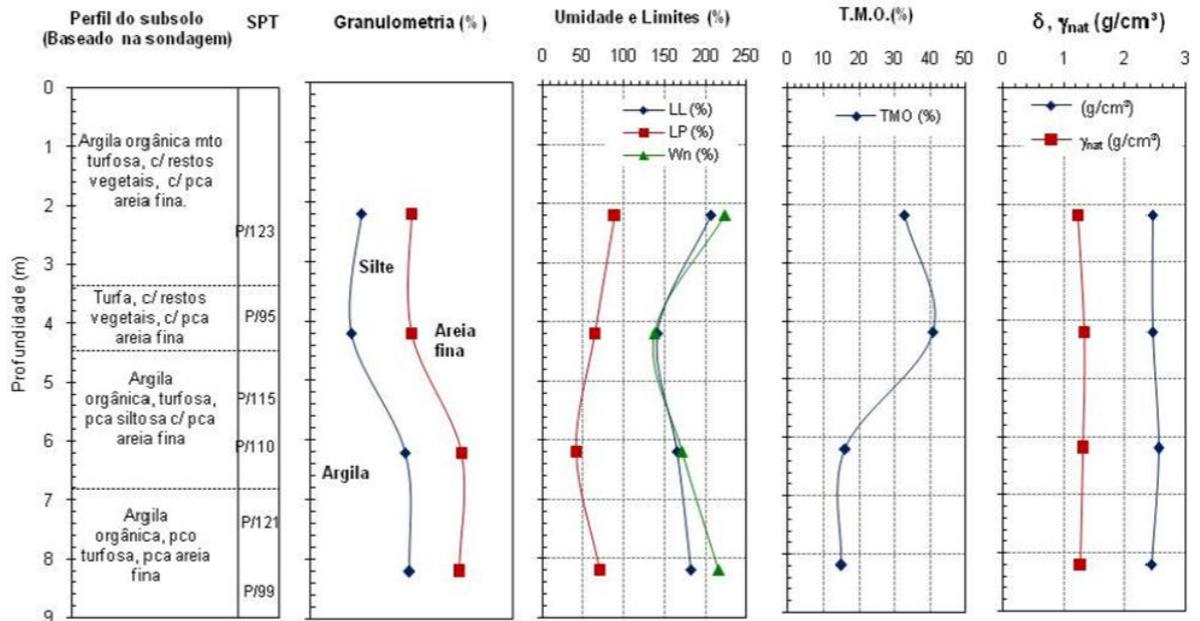
A Figura 14 apresenta graficamente os resultados dos ensaios de caracterização para a estaca E120 cujos valores de w_n foram relativamente altos na faixa de 98 a 189 % com valores próximos ou inferiores ao WL. Os valores de IP foram altos e variaram na faixa de 51 a 120%. O TMO apresentou praticamente constante de 0 a 5,0m de profundidade (em torno de 11%) e de 6,0 a 10,0m de profundidade o TMO decresce de 15 para 8%. Os valores de γ_{nat} e de ρ_{nat} apresentaram-se na faixa de 12,2 a 15,9 kN/m³ e 24,3 a 26,2 kN/m³, respectivamente.

Tabela 10 - Resultados de caracterização física em Suape.

Estaca	Prof. (m)	Wn (%)	WL (%)	WP (%)	IP (%)	TMO (%)	δ (kN/m ³)	γ_{nat} (kN/m ³)
E98	2 a 3	223,61	205,74	89,70	116,04	32,87	24,40	12,20
	4 a 4,74	136,80	140,53	64,62	75,91	12,73	24,40	13,30
	6	171,11	164,76	41,72	123,04	16,12	25,40	13,10
	8 a 9	216,09	181,35	70,80	110,55	15,05	24,10	12,80
E103	2 a 3	154,08	164,17	46,45	117,72	20,11	25,20	14,10
	4,65 a 5,65	210,13	205,56	68,78	136,78	13,87	23,60	13,00
	6,5 a 7,5	63,87	89,76	43,85	45,91	3,38	26,20	17,20
	8,5 a 9,5	86,30	24,98	14,40	10,58	4,64	26,20	15,60
E112	2 a 3	74,53	132,86	80,53	52,33	7,29	25,20	13,10
	4 a 5	125,25	143,53	59,55	83,98	12,48	25,30	12,70
	6 a 7	152,83	158,25	87,14	71,11	11,58	24,90	12,80
	8 a 9	168,02	185,82	64,40	121,42	10,70	24,40	12,60
	10 a 11	108,82	131,22	71,08	60,14	10,93	25,90	18,90
	14 a 15	122,09	104,96	45,99	58,97	8,80	26,40	13,40
	17,5 a 18,5	110,30	83,69	45,09	38,60	5,17	26,30	14,50
E120	2 a 3	154,39	164,42	67,50	96,92	11,43	24,60	13,10
	4 a 5	158,73	157,14	59,58	97,56	11,35	25,00	12,60
	6 a 7	189,77	192,23	72,08	120,15	15,29	24,30	12,30
	9 a 10	98,44	115,20	63,92	51,28	8,57	26,20	15,90

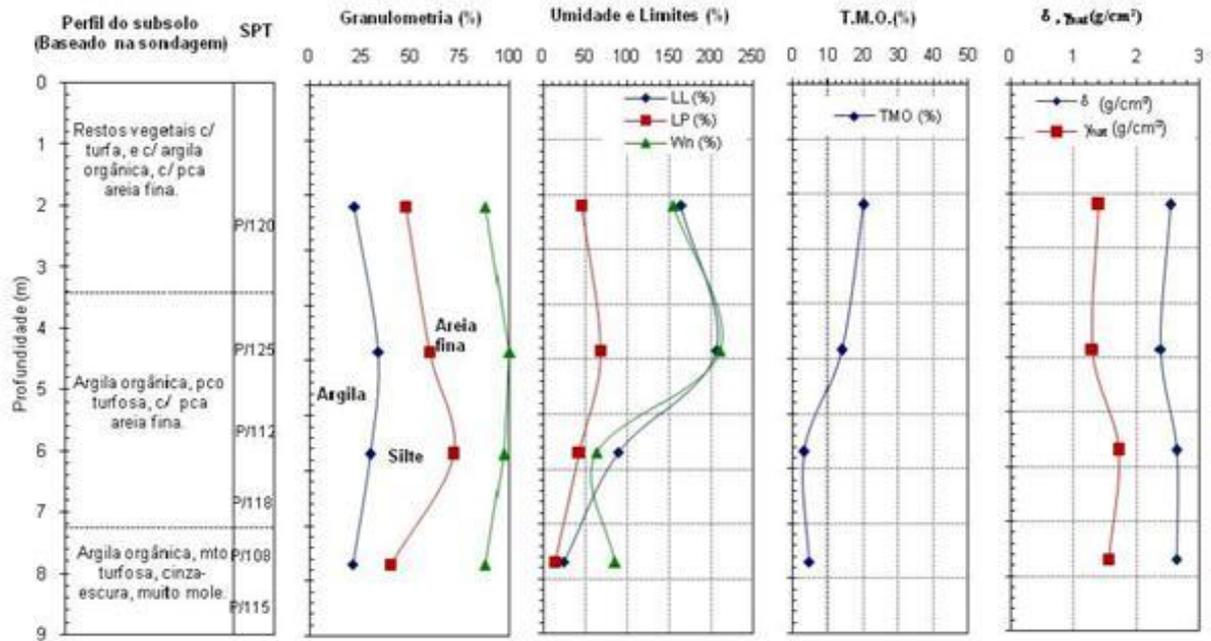
Fonte: Bello (2011)

Figura 11 - Resultados dos ensaios de caracterização do E98 em Suape.



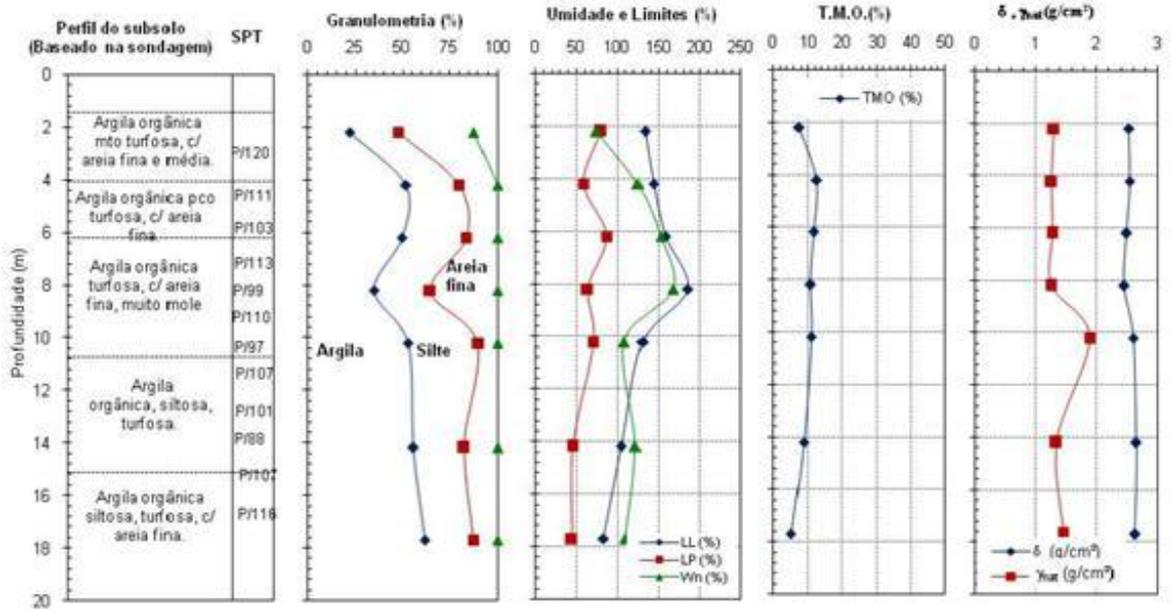
Fonte: Bello (2011)

Figura 12 - Resultados dos ensaios de caracterização do E102 em Suape.



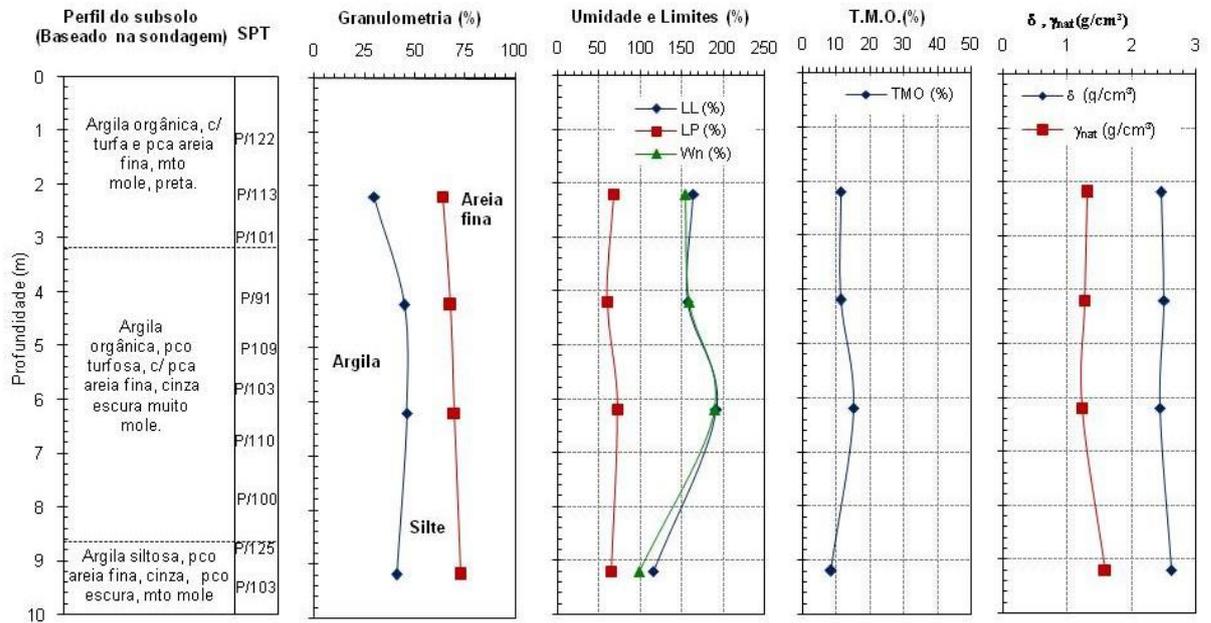
Fonte: Bello (2011)

Figura 13 - Resultados dos ensaios de caracterização do E112 em Suape.



Fonte: Bello (2011)

Figura 14 - Resultados dos ensaios de caracterização do E120 em Suape.



Fonte: Bello (2011)

2.6.2 COMPRESSIBILIDADE DE ARGILAS MOLES DA REGIÃO METROPOLITANA RECIFE E DO RIO DE JANEIRO.

Amorim (1975) realizou ensaios de adensamento vertical em argilas orgânicas do Recife com corpos de prova de diâmetro de 50,8 mm e altura de 19 mm, submetidos a carregamentos em progressão geométrica, de 5 a 3260 kPa, com incremento de carga sempre igual à carga anterior, ($\Delta\sigma_{vc}/\sigma_{vc}=1$).

Para as tensões aplicadas foram observados que as curvas de compressibilidade referentes a profundidades maiores nem sempre estavam a indicar menores índices de vazios em comparação àquelas encontradas para profundidades menores, o que seria de se esperar caso a camada de argila orgânica fosse do mesmo material nos 24 metros de espessura em que foi realizada a pesquisa. A permeabilidade do solo variou de 10^{-7} e 10^{-8} cm/s.

A Tabela 11 apresenta o resultado dos índices de vazios, para algumas amostras, em relação a sua profundidade. Por outro lado, notou-se que, em termos médios, à medida que a profundidade aumentava, diminuía o Índice de Compressão (Cc).

Tabela 11 - Profundidade e índices de vazios.

Profundidade (m)	Índice de Vazios Iniciais	Índice de Vazios Finais
5,9	1,818	0,876
9,7	2,235	1,439
12,6	2,575	1,429
15,6	2,418	1,607
18,5	1,121	0,784
24,1	1,391	0,951

Fonte: Amorim (1975)

Coutinho (1976) realizou estudos em uma argila mole na Baixada Fluminense através dos ensaios de adensamento vertical e radial, proporcionando referência na metodologia e nos procedimentos aplicados; e, nos parâmetros de compressibilidade obtidos.

Para moldagem do corpo de prova, os primeiros 140 mm de solo no interior do tubo shelby foram descartados, procurando-se minimizar o amolgamento. Os anéis de adensamento

utilizados eram de aço inoxidável, possuindo uma relação diâmetro e altura de 2,53 e 3,36, lubrificadas internamente com graxa de silicone para minimizar o atrito lateral quando cravados lentamente no material do amostrador, tomando-se sempre o cuidado de manter o alinhamento do anel com o eixo vertical no centro do tubo de amostragem.

Após retirada e preparação do corpo de prova, suas duas faces (topo e base) foram cobertas com papel filtro fervido em água destilada e esfriadas com jato d'água, para só depois ser fixada na célula de carga (projetadas por J.A.R. Ortigão e fabricadas pela Ronald Top) entre pedras porosas.

Os ensaios de adensamento vertical foram realizados em corpos de prova obtidos em amostras extraídas a profundidade de 5,5 a 8,0 m, com diâmetros de 5,05 cm e 10,09 cm e altura de 20 e 30 mm respectivamente, área de 20 e 80 cm².

A prensa utilizada foi do tipo Bishop de fabricação Wykeham Farrance, sendo a carga inicial de 5 kPa aplicada antes de se adicionar água para assentamento do sistema e obtenção de leitura inicial. Na maioria dos ensaios o incremento de carga utilizado era igual a anterior, ($\Delta\sigma_{vc}/\sigma_{vc}=1$), sendo aplicadas pressões de: 5; 10; 20; 40; 80; 160; 320; 640; 320; 80; 20; 10 kPa, procurando-se evitar qualquer impacto sobre o corpo de prova.

Outros quatro ensaios foram realizados em amostras extraídas da profundidade de 5,5 a 6,0 m, aplicando-se incrementos de cargas menores que a carga aplicada anteriormente, ($\Delta\sigma_{vc}/\sigma_{vc}<1$), visando definir melhor a tensão de pré-adensamento. O tempo de atuação de cada carregamento foi de 24 ou 48 horas, sempre procurando definir trecho retilíneo inicial da compressão secundária. Algumas amostras foram completamente amolgadas em laboratório.

A Tabela 12 apresenta os resultados de Coutinho (1976) para o índice de compressão e de expansão, respectivamente, C_c e C_s ; para a tensão de pré-adensamento determinada pelo método Casagrande; dos índices de vazios iniciais; e, o valor da umidade inicial do ensaio, todos obtidos pelos ensaios edométricos vertical e radial realizados a partir de amostras indeformadas de boa qualidade e amostras completamente amolgadas em laboratório.

Tabela 12 - Parâmetros do Adensamento com amostras indeformadas de boa qualidade e amostras completamente amolgadas em laboratório.

Amostra Ensaio Profundidade	Boa Qualidade Vertical		Boa Qualidade Radial		Má Qualidade Vertical	
	5,5 - 6,0	6,5 - 7,0	5,5 - 6,0	6,5 - 7,0	5,5 - 6,0	6,5 - 7,0
Tensão de pré-adensamento (kPa)	32,00	45,00	36,00	41,00	19,00	15,00
índice de vazios inicial	3,66	3,22	3,48	3,14	3,576	3,204
Cc (80 - 320kPa)	1,596	1,605	1,682	1,561	1,185	0,926
Cs (80 - 320kPa)	0,216	0,177	0,166	0,144	0,200	0,195
Umidade Inicial (%)	148,37	129,19	145,98	132,67	144,45	133,47

Fonte: Coutinho (1976)

Em sua análise, o autor percebeu que o trecho de compressão virgem nas amostras indeformadas de boa qualidade não foram retilíneas, como é encontrado tipicamente nas argilas normalmente adensadas.

Para os cálculos dos coeficientes de adensamento e permeabilidade obtidos pelos ensaios de adensamento vertical e radial foram utilizados o método Casagrande e Taylor, respectivamente, $\log t$ e \sqrt{t} , conforme expressões das Equações 1.

Equações 1 – Equações matemáticas do Coeficiente de Adensamento e Permeabilidade.

1) método de $\log t$ (Casagrande): $C_v = (T_{v50} \times H^2_d) / t_{50} = (0,197 \times H^2_d) / t_{50}$;

$$C_h = (T_{h50} \times d_e^2) / t_{50} = (0,0866 \times d_e^2) / t_{50}.$$

2) método \sqrt{t} (Taylor): $C_v = (T_{v90} \times H^2_d) / t_{90} = (0,848 \times H^2_d) / t_{90}$;

$$C_h = (T_{h90} \times d_e^2) / t_{90} = (0,288 \times d_e^2) / t_{90}.$$

Sendo, $K_v = (C_v \times a_v \times \gamma_w) / (1 + e_m)$ e $K_h = (C_h \times a_v \times \gamma_w) / (1 + e_m)$.

Fonte: Coutinho (1976)

Onde :

 T_{h50} : o fator tempo correspondente a 50% do grau médio de adensamento radial; T_{h90} : o fator tempo correspondente a 90% do grau médio de adensamento radial; H^2_d : a média das semi-espessuras inicial e final – drenagem topo base (cm); d_e^2 é o diâmetro do corpo de prova (cm).Cv: o coeficiente de adensamento com drenagem e compressão vertical (cm²/s);

Ch: o coeficiente de adensamento com drenagem e compressão horizontal (cm^2/s);

Kv: o coeficiente de permeabilidade vertical (cm/s);

Kh: o coeficiente de permeabilidade horizontal (cm/s);

t_{50} : o tempo para ocorrer 50% do adensamento (min);

t_{90} : o tempo para ocorrer 90% do adensamento (min);

$a_v = \Delta e / \Delta \sigma$: coeficiente de compressibilidade (cm^2/s);

γ_w : o peso específico da água (g/cm^3)

e_m : o índice de vazios médio.

Pelo método de Casagrande os valores de Cv na região de recompressão variaram de 30 - 50 x $10^{-4} \text{cm}^2/\text{s}$, enquanto que na região de compressão virgem foi constante, existindo uma oscilação apresentando valores em torno de $1,2 \times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{s}$. Na faixa de descarregamento, Cv foi relativamente grande inicialmente, mas decresceu rapidamente com o descarregamento. A relação $C_v(\sqrt{t}) / C_v(\log t)$ foi de 0,91 a 2,50, com média de 1,50.

O coeficiente de adensamento radial se faz necessário para enfrentar certos problemas de engenharia, entre estes, a instalação de drenos de areia. Para a realização do ensaio de adensamento radial e conseqüente determinação do Ch foi executada mesma metodologia aplicada no ensaio de adensamento vertical, com exceção do anel inoxidável que apresentou a pedra porosa circundando o diâmetro interno da peça, sendo sua cravação auxiliada por anel guia.

Em geral, Ch apresenta valor igual ou superior ao Cv (obtidos em ensaios com compressão e drenagem verticais). Na região de recompressão, os valores de Ch e Cv foram muito próximos, tendo a relação Ch/Cv praticamente igual a um. Na região de compressão virgem Ch foi sempre maior que Cv, variando o valor da relação de 1,5 a 2,5 com média 2,0, dependendo do valor da pressão de adensamento e da profundidade de obtenção das amostras.

Na análise dos resultados obtidos, Coutinho (1976) identifica que inicialmente a forma das curvas do índice de vazios iniciais (e_i) versus log da tensão efetiva de consolidação dos ensaios edométricos com drenagem radial foi idêntica a encontrada nos ensaios com drenagem vertical, assim como, os valores da tensão de Pré-Adensamento, σ_{vm} , e de Cc foram concordantes com os obtidos pelos ensaios edométricos verticais. No caso das amostras

completamente amolgadas em laboratório ficou demonstrado uma grande queda no valor da tensão de pré-adensamento e de C_c , assim como em C_v , Ch , K_v e Kh .

Coutinho (1976) ainda alertou que encontrou em seus ensaios com drenagem radial condição a que chamou de acréscimo "parasita" (ocorrência de drenagem indesejada ou que ocorra em direção diferente da projetada), apenas na parte superior do corpo de prova, sugerindo, em face de outros resultados de Ch obtidos nos ensaios com drenagem radial interna e externa, que esse fenômeno não influenciou nos resultados do ensaio.

Importante frisar Coêlho (1997) que destaca que a maioria dos autores que enfrentam o problema do adensamento unidimensional radial admitem que a avaliação dos valores dos coeficientes de adensamento e de permeabilidade horizontais, respectivamente, Ch e Kh , é uma das tarefas mais difíceis da engenharia geotécnica, onde as incertezas na determinação de tais valores são de tal ordem que o uso dos métodos sofisticados para projetos de drenos verticais não as justificam.

Vargas (1977) correlaciona o Índice de Compressão (C_c) com o Limite de Liquidez (WL). Afirma que a inclinação da reta virgem, o qual é a verdadeira medida de compressibilidade do solo, tende a estar paralela à reta umidade-número de golpes do ensaio de limite de liquidez, já que a compressibilidade do solo varia de acordo com as características mecânicas e físico-químicas do solo, justifica, assim, o costume de se chamar muito compressíveis ou pouco compressíveis os solos cujo WL são, respectivamente, maiores ou menores que 50%.

Nesse sentido, o autor construiu uma correlação entre o C_c e o Limite de Liquidez para argilas de baixa e média sensibilidade, correspondentes ao estado natural indeformado: $C_c = 0,009 \times (LL-10)30\%$. Observa-se que essa correlação não é universal, variando para solos de regiões e origens geológicas diferentes.

Ferreira (1982) fez pesquisas em depósito de argila mole no bairro da Madalena, especificamente, no Clube Internacional do Recife, através do ensaio de adensamento vertical, buscando a caracterização do depósito em complementação a estudos anteriores.

Foram utilizadas prensas do tipo Bishop fabricadas por Ronald Top e células de adensamento, projetadas por J.A.R. Ortigão. Os anéis de adensamento utilizados foram de aço inoxidável,

diâmetro 7,13 cm ($A = 40\text{cm}^2$), com ponta biselada, com relação diâmetro/altura de 3,57, lubrificados internamente com graxa de silicone para minimizar o atrito lateral durante a cravação do anel no procedimento de moldagem do corpo de prova.

Os primeiros 100 mm da amostra do interior do tubo “shelby” foram descartados para evitar o amolgamento da amostra, sendo, entretanto, utilizados para ensaios de caracterização. A drenagem foi feita em ambas as faces da amostra, utilizando-se papel filtro saturado em água destilada entre o corpo de prova e as pedras porosas (topo e base), sendo estas anteriormente fervidas em água destilada e esfriadas com jato d’água.

A tensão inicial aplicada foi de 5 kPa, antes de se adicionar água para assentamento do sistema e obtenção da leitura inicial. Na maioria dos ensaios o incremento de carga utilizado era igual a anterior, ($\Delta\sigma_{vc}/\sigma_{vc}=1$), sendo aplicadas pressões de: 5; 10; 20; 40; 80; 160; 320; 640; 1280 kPa no carregamento e 640; 160 e 40 kPa no descarregamento.

Outros seis ensaios foram realizados aplicando-se incrementos de cargas menores que a carga aplicada anteriormente, ($\Delta\sigma_{vc}/\sigma_{vc}<1$), nas proximidades da tensão de pré-adensamento visando a sua melhor determinação. O tempo de atuação de cada carregamento foi de 24 ou 48 horas, sempre procurando definir trecho retilíneo inicial da compressão secundária. Alguns corpos de prova foram moldados com amostras completamente amolgadas em laboratório, visando obter características do solo nessas condições.

A Tabela 13 e 14 resumizam os valores da tensão de pré-adensamento, determinados pelo método de Casagrande nas curvas de compressão correspondentes ao final da compressão total ($d=df$) e ao final da compressão primária ($d=d_{100}$); dos índices de vazios iniciais; dos índices de compressão e expansão, C_c e C_s ; do peso específico saturado e da umidade inicial dos ensaios; todos obtidos para amostras semi-indeformadas de boa qualidade.

Tabela 13 - Resultados dos parâmetros de compressibilidade encontrados para a profundidade de 6,00 – 15,00 metros nos estudos do solo do bairro da Madalena.

Ensaio	Prof.	Tensão de pré-adensamento (kPa)		Índice de Vazios Iniciais	Cc (160 a 640 kPa)	Cs (160 a 640 kPa)	Peso específico kN/m ³	Umidade Inicial (%)
		d=df	d=d100					
AV 15 - 6P	6,00 - 6,73	185	205	2,36	2,16	0,28	14,70	94,12
AV 1 - 7	7,00 - 7,35	180	185	1,44	1,03	0,17	16,50	57,80
AV 16 - 8	8,00 - 8,73	155	165	1,67	1,48	0,15	16,30	70,61
AV 17 - 10	10,00 - 10,73	140	165	2,22	1,69	0,25	15,20	91,66
AV 8 - 10	10,60 - 10,90	135	160	2,45	1,65	0,25	15,20	92,12
AV 6 - 12	12,30 - 12,70	98	106	1,97	0,80	0,17	16,00	75,00
AV 9 - 14	14,00 - 14,40	160	200	2,39	2,09	0,26	14,80	96,10
AV 28 - 14	14,00 - 14,73	150	175	2,29	1,77	0,23	15,60	97,91

Fonte: Ferreira (1982).

Tabela 14 - Resultados encontrados para parâmetros de compressibilidade a profundidade de 15,00 – 24,00 metros nos estudos do solo do bairro da Madalena.

Ensaio	Prof.	Tensão de pré-adensamento (kPa)		Índice de Vazios Iniciais	Cc (160 a 640 kPa)	Cs (160 a 640 kPa)	Peso específico kN/m ³	Umidade Inicial (%)
		d=df	d=d100					
AV 10 - 15	15,00 - 15,40	95	120	1,76	0,83	0,14	15,80	70,70
AV 11 - 16	16,20 - 16,60	125	140	1,61	0,80	0,16	16,20	65,40
AV 19 - 17	17,00 - 17,73	160	180	1,42	0,66	0,15	16,80	59,16
AV 12 - 18	18,00 - 18,40	130	190	1,42	0,70	0,14	16,60	58,02
AV 13 - 20	20,00 - 20,40	190	205	1,58	1,80	0,16	16,60	68,40
AV 20 - 20	20,00 - 20,73	175	190	1,06	0,56	0,08	17,70	42,87
AV 21 - 23	23,00 - 23,73	185	205	1,42	0,86	0,17	16,70	58,29

Fonte: Ferreira (1982).

Na análise dos seus resultados, Ferreira (1982) observou que nos ensaios onde a tensão máxima atingiu 1280 kPa, o trecho de compressão virgem nas amostras semi-indeformadas de boa qualidade não se mostrou retilíneo, característica típica de argilas normalmente adensadas.

Esse comportamento diferente é encontrado em certos tipos de solos, como argilas muito moles de baixa plasticidade e argilas com alto Índice de Liquidez (WL) e plasticidade. Esse comportamento observado na argila do Recife foi encontrado também por Coutinho (1976) em uma argila mole da Baixada Fluminense, como detalhado alhures.

Os índices de vazios iniciais na faixa de profundidade de 6,00 a 15,00 metros foram da ordem de 1,5 vezes aos correspondentes na faixa de 15,00 a 24 metros. Os valores de Cc foram

maiores nas profundidades onde os teores de argila foram mais elevados (6 a 15 m), assim, conclui Ferreira (1982) que o valor de C_c depende não só da granulometria e da natureza da fração argilosa, como também da composição iônica do fluido intersticial.

Na Tabela 15 apresenta-se os resultados obtidos por Ferreira (1982) para amostras semi – indeformadas de má qualidade e completamente amolgadas em laboratório.

Tabela 15 - Resultados de parâmetros de compressibilidade encontrados para a profundidade de 6,00 – 24,00 metros em amostras de má-qualidade ou amolgadas em laboratório.

Ensaio	Prof.	Tensão de pré-adensamento (kPa)	Índice de Vazios Iniciais	C_c (160 a 640 kPa)	C_s (160 a 640 kPa)	Peso específico kN/m^3	Umidade Inicial (%)
AV 23 - 6	6,00 - 6,73	60,00	2,34	1,440	0,352	15,20	96,03
AV 3 – 8	8,60 - 9,00	45,00	1,65	0,604	0,195	15,90	65,20
AV 7 - 12	10,60 - 10,80	40,00	2,26	0,814	0,194	15,10	93,50
AV 7 - 12	12,30 - 12,70	25,00	1,80	0,601	0,155	16,20	77,30
AV 27 - 14	14,00 - 14,73	50,00	2,45	0,954	0,315	14,70	94,92
AV 14 - 20	20,00 - 20,37	32,00	1,53	0,480	0,150	16,60	64,70
AV 34 - 23	23,00 - 23,73	41,00	1,52	0,448	0,150	16,30	58,70

Fonte: Ferreira (1982).

Observou o autor a diminuição da estimativa do valor da tensão de pré-adensamento pelo método Casagrande e decréscimo da compressibilidade para essas amostras amolgadas. Ademais, considerou que a argila estudada parece ser normalmente adensada devido ao ressecamento desta camada até os 12 metros de profundidade, além do efeito tempo (adensamento secundário) em face do peso próprio do material que compõe a camada.

Ferreira (1982) destacou que a velocidade de adensamento, C_v , na região de recompressão decresceu significativamente à medida que a tensão de adensamento se aproximava da tensão de pré-adensamento, o mesmo foi observado para a permeabilidade, K_v . Para o cálculo dos valores foram utilizadas as mesmas equações em Coutinho (1976), expressos na tabela de Equações 1.

Assim, pelo método de Casagrande, $\log(t)$, os valores de C_v variaram entre 5 e $16 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$. Para tensões maiores, na região de compressão virgem, o coeficiente de adensamento manteve-se aproximadamente constante em torno de $9 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$, ao passo que na fase de expansão o C_v era inicialmente elevado e depois decresceu.

Destaca que com relação ao coeficiente de adensamento calculado pelos métodos de Taylor (\sqrt{t}) e Casagrande ($\log t$) diversos pesquisadores indicam, para argilas moles, a relação: $Cv(\sqrt{t}) = (2 \pm 0,5) \times Cv(\log t)$. Em seu trabalho a relação $Cv(\sqrt{t})/Cv(\log t)$ apresentou resultados entre 0,86 a 2,93, com média de 1,56. A permeabilidade do solo, determinada indiretamente pelo ensaio de adensamento, em termos médios, variou de 10^{-7} e 10^{-8} cm/s.

No quadro Equações 2, destaca-se as correlações encontradas por Ferreira (1982) para as argilas moles encontradas no bairro da Madalena, Clube Internacional do Recife com relação a profundidade.

Equações 2 – Correlações estatísticas com relação a profundidade.

Profundidade $6 \leq z \leq 15$		Profundidade $z > 15$	
Equação	R	Equação	R
$\sigma_{vm} = 19,93 - 0,6z$	0,92	$\sigma_{vm} = 8,43 + 0,41z$	0,86
$e_0 = 1,73 - 0,031z$	0,19	$e_0 = 1,58 - 0,011z$	0,13
$\gamma t = 1,55 + 0,001z$	0,02	$\gamma t = 1,62 + 0,003z$	0,15
$\log Kv = 1,4203Cm - 10,4224$ (método $\log t$)	0,95	$\log Kv = 2,2121Cm - 10,293$ (método $\log t$)	0,86
$\log Kv = 1,4377Cm - 10,2930$ (método raiz t)	0,95	$\log Kv = 2,2144Cm - 10,666$ (método raiz t)	0,89
$w_n = 63 + 2,01z$	0,45	$w_n = 65 - 0,51z$	0,14
$Cc = 1,3 + 0,019z$	0,14	$Cc = 0,94 - 0,007z$	0,06
$Cs = 0,19 + 0,003z$	0,2	$Cs = 0,07 + 0,003z$	0,3

Fonte: Ferreira(1982)

Destaca-se no quadro Equações 3 as correlações encontradas por Ferreira (1982) para as argilas moles encontradas no bairro da Madalena, Clube Internacional do Recife com relação a parâmetros de caracterização.

Costa (1956) apud Ferreira (1982) apresentou também uma correlação entre o Índice de Liquidez (WL) e o Índice de Compressão, $Cc = 0,01 \times (WL-17)$, complementando o trabalho de Amorim (1975).

Equações 3 – Correlações estatísticas com relação aos parâmetros de caracterização.

Correlações entre Parâmetros			
Equação	r	Equação	R
$Cc = 2,48 LL - 60,10$	0,78	$IP = 0,05LL + 30,19$	0,14
$Cr = 0,18LL - 1,7$	0,44	$\gamma_t = 1,94 - 0,005$	0,91
$Cs = 0,33LL - 5,00$	0,92	$e_0 = 0,02w + 0,30$	0,95
$Cc = 2,24w - 39,50$	0,9	$C_{\alpha máx} = 0,83 E0 + 0,20$	0,83
$Cr = 0,16w - 3,2$	0,52	$e_0 = 0,30LL - 0,20$	0,93
$Cs = 0,26w + 0,30$	0,94	$C_{\alpha máx} = 0,03w - 0,14$	0,81
$Cc = 97,90 C0 - 52,10$	0,84	$e_0 = 1,87 - 0,003IP$	0,06

Fonte: Ferreira(1982)

Afirma ainda Ferreira (1982) que estas correlações, mesmo as referentes aos Limites de Liquidez e plasticidade, devem ser utilizadas apenas como estimativa da ordem de grandeza e nunca como substituição dos resultados dos ensaios.

Quanto ao coeficiente de compressibilidade volumétrica, m_v , ocorre em função da tensão média aplicada e atingiu, segundo Ferreira (1982) seu máximo valor imediatamente após a tensão de pré-adensamento, decrescendo até a profundidade de 12m, para posteriormente crescer com a profundidade, sendo calculado conforme tabela de Equações 4.

Equações 4 - Equações matemáticas para a compressibilidade volumétrica, m_v .

$$m_v = \Delta \epsilon_v / \Delta \sigma_{vcm} ; e, \text{ com relação a } a_v, \text{ o coeficiente de compressibilidade, } m_v = a_v / (1 + e_m)$$

Fonte: Ferreira(1982).

No que se refere à compressão secundária, C_α , Ferreira (1982) observou que mesmo após os excessos das pressões nos poros, devido a uma determinada solitação ter sido praticamente dissipada, continuam a ocorrer deformações volumétricas dependentes do tempo, nos casos de argilas muito plásticas, nos solos altamente orgânicos e nos casos em que o adensamento primário ocorre rapidamente (solos de areia).

Esclarece ainda que as causas exatas que determinam essas deformações ainda não são bem conhecidas, mas que Lambe e Whitman (1969) e Ladd (1973) apud Ferreira (1982) sugerem que a compressão secundária é provavelmente causada por uma reorientação contínua das partículas, influenciada pela expulsão da água absorvida (água retirada por forças físico-químicas entre as partículas).

Então define Ferreira (1982) a compressão secundária, C_α , como o decréscimo de volume dependente do tempo, que ocorre com a tensão efetiva de consolidação constante (após todo excesso da pressão dos poros ter-se praticamente dissipado durante o adensamento primário), ou seja, $C_\alpha = \Delta \epsilon_v / \Delta \log(t)$. Assim, a compressão secundária é iniciada após o término da compressão primária. Esta separação, entretanto, é arbitrária, porém conveniente para desenvolver hipóteses de trabalho que possam ser aplicadas na prática.

Na realização dos ensaios, procurou-se para cada estágio de carga a definição da curva deformação *versus* logaritmo do tempo do trecho inicial retilíneo da compressão secundária com pelo menos três pontos, sendo que os valores de C_α obtidos em corpos de prova de

amostras semi-indeformadas de boa qualidade em função da tensão efetiva, para tensões menores que $0,5 \times \sigma_{vm}$, baixos, atingindo um máximo em tensões de 1,5 a $2,5 \times \sigma_{vm}$, decrescendo em seguida com o aumento de tensão.

Na região de compressão virgem $C\alpha$ permanece quase constante ou decresce ligeiramente para solos com Cc constante. Para solos que exibem um marcante decréscimo de Cc com o aumento de tensão, a compressão secundária também decresce. Os valores de $C\alpha$ no descarregamento diminuem rapidamente atingindo valores mínimos, com o decréscimo da tensão aumentam ligeiramente, sendo este comportamento de grande importância na técnica de pré-compressão de aterros.

Os valores máximos obtidos por $C\alpha$ nos ensaios realizados em corpos de prova completamente amolgados e nos indeformados de má-qualidade foram bem menores que nos de boa qualidade. Pôde-se também observar que os valores obtidos para $C\alpha$ nos corpos de prova amolgados crescem em região de recompressão e decrescem na região de compressão virgem, em relação aos valores obtidos nos corpos de prova semi-indeformados de boa qualidade. O que leva o Autor a concluir que para definir o máximo valor de $C\alpha$ é importante utilizar-se de corpos de prova de boa qualidade.

Alerta ainda o autor que a compressão secundária é sempre de interesse prático em solos de altamente orgânicos e nos casos onde o adensamento primário ocorre rapidamente, tais como nas instalações de drenos de areia.

Oliveira (1991) realizou ensaios edométricos convencionais com drenagem vertical em estudo no Clube Internacional do Recife obtendo parâmetros de compressibilidade e de adensamento com o tempo, bem como, determinação da variação da pressão de pré-adensamento (σ_{vm}) e do OCR com a profundidade. Foram utilizados anéis com diâmetro de 87,4 mm e altura de 2cm e prensa Bishop. A carga inicial foi de 5 kPa indo até 1280 kPa, sendo descarregado até 40kPa, o carregamento e descarregamento foi feito em estágios de 24 horas e acréscimo de carga igual à carga anterior ($\Delta\sigma_{vc}/\sigma_{vc}=1$). A Tabela 16 apresenta o resumo dos resultados obtidos por Oliveira (1991).

Tabela 16 - Parâmetros encontrados através do Ensaio de Adensamento Vertical.

Amostra	Prof.	Cc		Cs	Índice de Vazios Iniciais	Tensão de pré-adensamento (kPa)	OCR
		1º TR	2º TR				
3	7,50 - 8,15	1,800	0,638	0,140	1,660	175	2,08
4	9,00 - 9,50	1,785	0,855	0,195	2,284	140	1,52
5	7,45 - 8,20	1,080	0,630	0,120	1,463	140	1,67
6	9,00- 9,75	1,620	0,855	0,202	2,425	100	1,09
7	11,00 - 11,75	1,080	0,658	0,144	1,770	133	1,30
8	13,00- 13,75	1,770	0,900	0,210	2,205	180	1,59
9	15,00 - 15,35	2,213	0,910	0,230	2,472	170	1,37
10	16,80 - 17,55	0,660	-	0,105	1,465	56*	0,42
11	18,85 - 19,60	0,595	0,490	0,075	1,114	150	1,03
12	20,30 - 21,05	0,610	0,572	0,110	1,208	140	0,90
13	22,20 - 22,95	0,730	0,565	0,137	1,367	150	0,89
14	24,10 - 24,45	0,820	-	0,160	1,646	200	1,12

Fonte: Oliveira (1991)

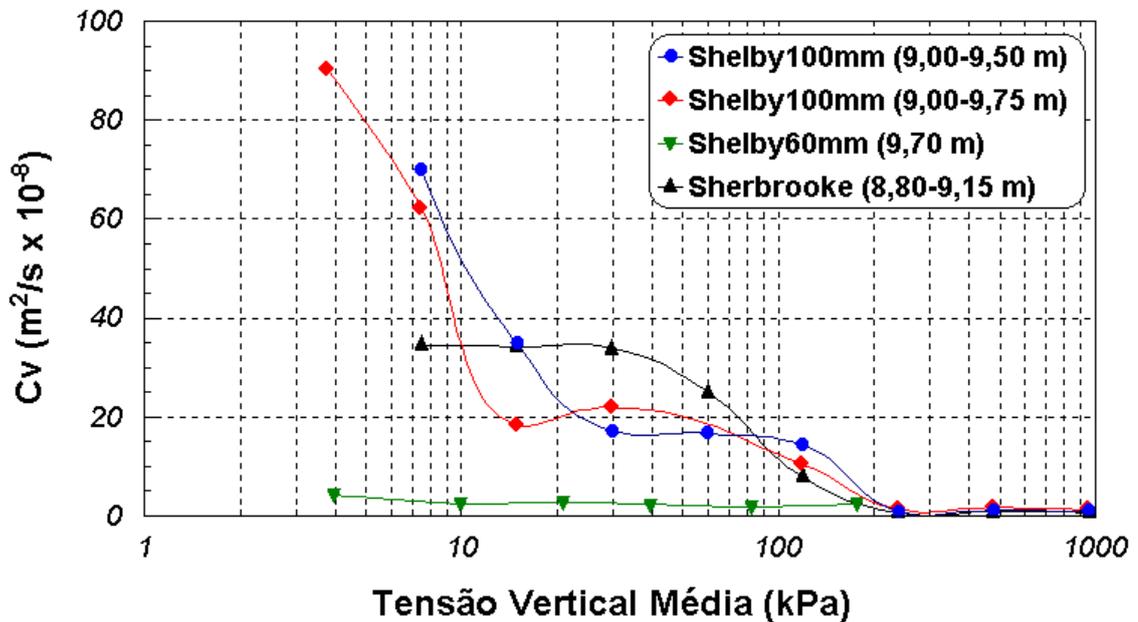
Conclui Oliveira (1991) que até a profundidade de 16 metros, referente a primeira camada, o índice de compressão (Cc) do trecho reto (TR) apresenta valores bastante significativos e aproximadamente igual ao dobro do índice do segundo trecho. Após 16 metros de profundidade, referente a segunda camada, o valor do Cc do primeiro trecho reto é significativamente menor em relação à primeira camada e a diferença em relação ao segundo trecho é bastante reduzida.

A amostra nº 9, referente a profundidade de 15 metros, apresentou o maior valor de Cc (2,213), o que pode indicar a presença de uma pequena camada de um material mais compressível que a argila orgânica. Já a amostra nº 10 apresentou um valor de pré-adensamento muito inferior ao esperado, fugindo a tendência dos demais pontos, podendo ser um indicativo de má qualidade da amostra.

Conclui Oliveira (1991) que a primeira camada de argila apresenta-se levemente pré-adensada ($OCR \leq 2$) com o valor do OCR diminuindo com o aumento da profundidade, até atingir o valor unitário, argila normalmente adensada, na 2ª camada, permanecendo constante com a profundidade.

Oliveira (2002) apresenta resultados do Coeficiente de Adensamento Vertical (Cv) para argilas moles do Rio de Janeiro e Recife com uso do amostrador Sherbrooke, destacando-se na Figura 15 gráfico de Cv encontradas no Recife.

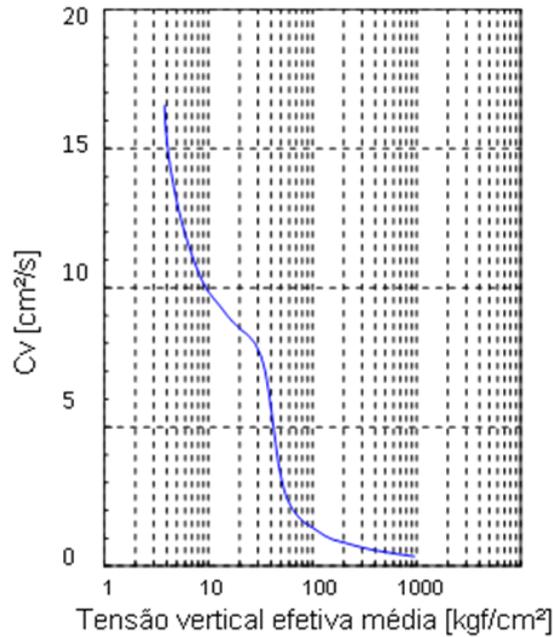
Figura 15 - Resultado gráfico da Curva do Coeficiente de Adensamento Vertical, C_v , no Recife.



Fonte: Oliveira (2002)

Bello (2004) em estudo realizado em terreno às margens da BR 101 no bairro de Dois Irmãos no Recife realizou ensaio de adensamento com drenagem vertical em amostra indeformada retirada aos 11,0m de profundidade, com corpos de prova de diâmetro 8,74 cm, área de 60 cm² e altura 2cm, equipamento tipo Bishop e anel fixo. Foram aplicados estágios de carregamento de 5 kPa a 320 kPa com razão de incremento de tensão igual a carga anterior ($\Delta\sigma_{vc}/\sigma_{vc}=1$), durante 24 horas.

Encontrou índice de vazios inicial, e_0 , da ordem de 4,564 com e_f de 1,768; C_c de 1,9; C_s de 0,30; e , tensão de pré-adensamento, σ_{vm} , de 42,5 kPa. Os valores de C_v , Coeficiente de Adensamento, variaram entre 0,35 e 16,55 x 10⁻⁸ m²/s, ou seja, na fase de expansão apresentou valores elevados, enquanto na região de compressão virgem decresceu. Os valores de K_v , Coeficiente de Permeabilidade, apresentaram as mesmas características, variando de 0,01 e 6,8 x 10⁻⁸m²/s, decrescendo com o incremento de tensão. A Figura 16 apresenta a curva de C_v versus Tensão efetiva de consolidação trazida por Bello (2004).

Figura 16 - Curva do Coeficiente de Adensamento (C_v) na BR 101, bairro de Dois Irmãos

Fonte: Bello (2004)

As tensões efetivas de consolidação foram calculadas considerando-se o peso específico de cada camada e admitindo a sobrecarga do aterro e o nível d'água, resultando em σ_{v0} igual a 59,8 kPa. Assim, observou Bello (2004) o efeito do amolgamento na amostra com a σ_{vm} se apresentando inferior à tensão vertical efetiva, fato que indica um falso subadensamento da argila e OCR (σ_{vm}/σ_{v0}) igual a 0,71.

Destacou Bello (2004) que a obtenção de amostras de boa qualidade é de fundamental importância para estimativa de parâmetros coerentes com a realidade do solo. Amostras de má qualidade podem causar a subestimativa de parâmetros de compressibilidade e de parâmetros de resistência (S_u), como demonstrado por Oliveira (2002).

Em Coutinho e Bello (2005) encontra-se um banco de dados desenvolvido pelo Grupo de Engenharia Geotécnica de Encostas e Planície (GEPEP) da UFPE, sob a coordenação do prof. Roberto Quental, contendo informações geotécnicas de cinquenta locais na cidade do Recife, com apresentação de resultados de identificação, caracterização, adensamento e resistência desses solos, estando também inclusas correlações estatísticas gerais dos parâmetros geotécnicos dos solos de Recife. A Tabela 17 simplifica a leitura dessas experiências ao longo da planície do Recife.

Tabela 17 - Índices de Atterberg e parâmetros do solo do Recife.

	Argilas moles/médias	Solos orgânicos
Limite de Liquidez (WL)	23 - 235 %	175 - 235 %
Índice de Plasticidade (IP)	5 - 148 %	40 - 120 %
Umidade Natural (W _n)	18 - 215 %	180 - 800%
Índices de vazios iniciais (e)	0,5 - 5,25	3,45 - 14,4
Índice de Compressão - C _c	0,1 - 2,8	1,4 - 6,8
Índice de Recompressão - C _s	0,02 - 0,46	0,11 - 0,85
Coefficiente de Consolidação vertical (C _v) - trecho pré-adensado	20 - 70 x 10 m ² /s	-
Coefficiente de Consolidação vertical (C _v) - trecho normalmente adensado	0,5 - 10 x 10 m ² /s	-
Resistência não-drenada (S _u)	10 - 55 kPa	-
Densidade do solo (Y)	10 - 20 kN/m ³	-
Densidade do Sólido (Y _s)	20 - 30 kN/m ³	-
Taxa de Matéria Orgânica (TMO)	0 - 15%	-

Fonte: Coutinho e Bello (2005)

Segundo os autores mencionados, as correlações estatísticas apresentadas na Tabela 18 foram desenvolvidas utilizando todos os resultados do banco de dados levantados pelo GEGEP – UFPE. Observou-se que as argilas apresentam coeficientes de correlação muito altos e menores desvios padrões (dispersão mais baixa) que as correlações para turfas e solos orgânicos. Este fato decorre da maior dificuldade de obtenção de amostras de boa qualidade, junto com uma maior variabilidade desses solos.

Tabela 18 - Correlações Gerais.

Solo	Correlações	Equações	r ²	Desvio Padrão
Argilas/Argilas orgânicas	e_0 vs. W _n (%)	$e_0 = 0,024W_n + 0,141$	0,98	0,14
$w \leq 200\%$	C _c vs. W _n (%)	$C_c = 0,014W_n - 0,094$	0,82	0,26
$e_0 \leq 4,0$	C _c vs. e_0	$C_c = 0,586e_0 - 0,165$	0,84	0,25
	C _s vs. W _n (%)	$C_s = 0,0019W_n + 0,0043$	0,80	0,04
	C _s vs. e_0	$C_s = 0,084e_0 - 0,0086$	0,81	0,04

Fonte: Coutinho e Bello (2005).

Bello (2011) estudou as argilas de Suape para a determinação das características de compressibilidade através do ensaio de adensamento com drenagem vertical, em equipamento do tipo Bishop, com anel fixo. O carregamento e o descarregamento foram feitos em estágios de 24 horas de duração, com acréscimo de carga igual à carga anterior, ou seja, $\Delta\sigma/\sigma = 1$.

O valor da tensão de pré-adensamento, σ_{vm} , foi obtido pelo método de Casagrande utilizando-se as deformações finais de cada estágio do ensaio. Na estimativa de C_v e C_h (coeficiente de adensamento vertical e radial) foi utilizado o método de Taylor, segundo as equações apresentadas em Coutinho (1976).

A Tabela 19 apresenta os resultados tensão de pré-adensamento; a tensão efetiva inicial (σ_{vo}); OCR; índice de vazios inicial (e_o); índice de compressão (C_c); índice de recompressão (C_s); e, a variação $\Delta e/e_o$ com respectiva classificação de qualidade da amostra segundo critério de Coutinho (2007). Já a Tabela 20 nos apresenta os resultados de C_v e C_h encontrados pela autora, sendo que para a condição normalmente adensada, os valores estiveram entre 0,64 a $6,8 \times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{s}$. Os valores de $C_{\alpha\varepsilon}$ variaram de 0,006 a 0,018.

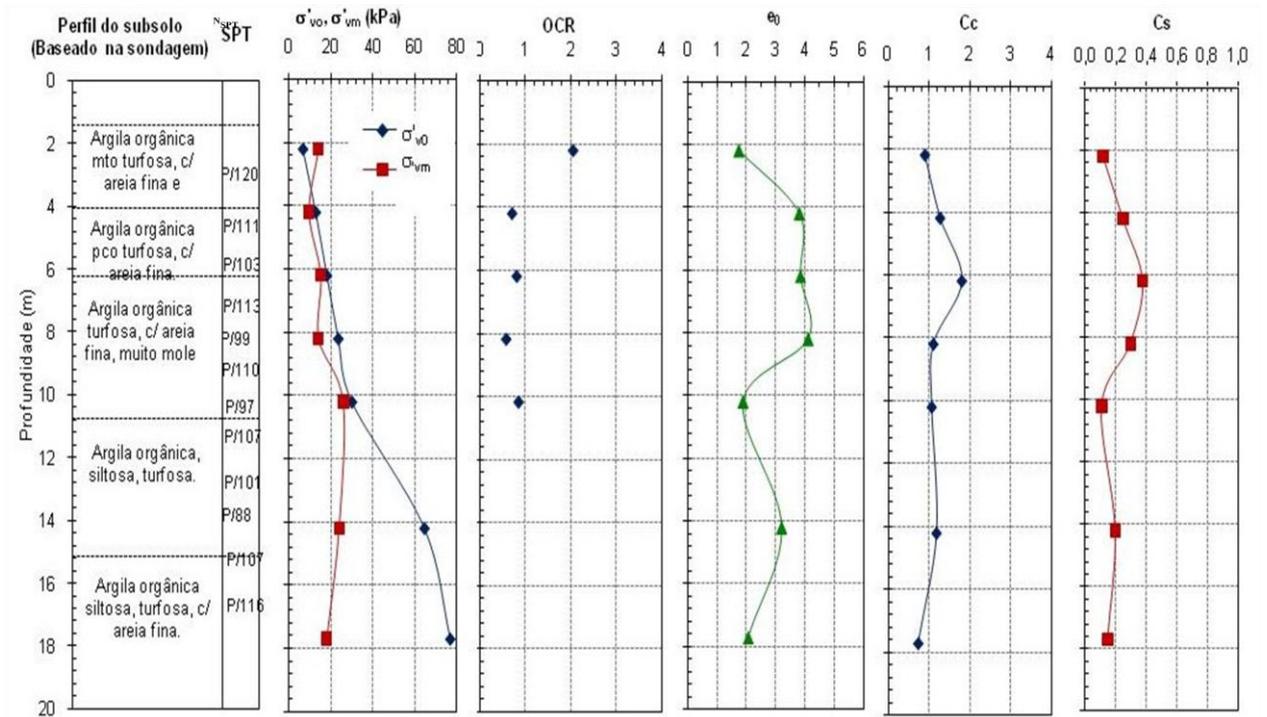
As Figuras 17 e 18 resumem graficamente os resultados dos parâmetros de compressibilidade obtidos das amostras E98 e E112 em Suape.

Tabela 19 - Resultados de σ_{vm} ; σ_{vo} ; OCR; e_o ; C_c ; C_s ; variação $\Delta e/e_o$ e classificação de qualidade das amostras das estacas do 1º Trecho: E98, E102, E112 e E120 em Suape.

Estaca	prof.(m)	e_o	σ_{vo} (kPa)	σ_{vm} (kPa)	OCR	C_c	C_s	$\Delta e/e_o$	Classificação amostra (Coutinho 2007)
E98	2,50	4,90	4,84	9,00	1,86	3,60	0,39	0,11	Pobre
	4,50	3,20	9,49	7,00	0,74	2,46	0,21	0,16	Muito Pobre
	6,50	3,60	16,02	4,00	0,25	1,18	0,25	0,06	Boa à regular
	8,50	5,00	22,17	6,00	0,27	2,48	0,41	0,04	Excelente
E103	2,50	3,80	9,00	7,00	0,78	1,14	0,65	0,24	Muito Pobre
	5,20	4,60	19,70	9,90	0,50	1,47	0,45	0,17	Muito Pobre
	7,00	1,40	26,12	11,00	0,42	0,51	0,12	0,10	Pobre
	9,0	1,60	40,14	10,00	0,25	0,44	0,15	0,10	Pobre
E112	2,50	1,80	6,78	14,00	2,07	0,89	0,12	0,11	Pobre
	4,50	3,80	12,85	9,30	0,72	1,27	0,25	0,11	Pobre
	6,50	3,80	18,18	15,00	0,82	1,81	0,38	0,10	Pobre
	8,50	4,10	23,60	14,00	0,59	1,10	0,30	0,07	Boa à regular
	10,50	1,90	30,08	26,00	0,86	1,06	0,11	0,10	Pobre
	14,50	3,20	64,67	24,00	0,37	1,18	0,20	0,03	Excelente
E120	18,00	2,10	76,96	18,00	0,23	0,72	0,15	0,13	Pobre
	2,50	3,70	6,75	17,00	2,58	1,26	0,26	0,07	Boa à regular
	4,50	3,30	12,80	11,00	0,86	1,27	0,27	0,06	Boa à regular
	6,50	4,70	17,97	11,50	0,64	2,41	0,36	0,06	Boa à regular
	9,50	2,20	25,51	13,00	0,51	1,33	0,12	0,05	Boa à regular

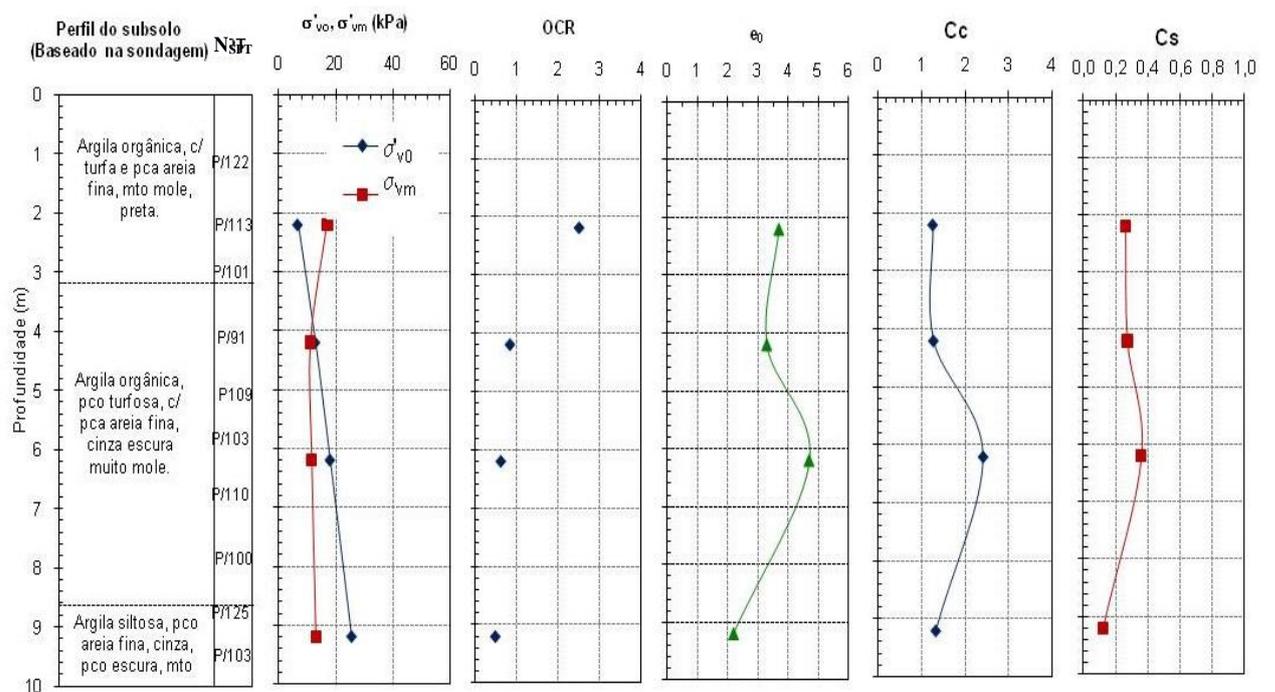
Fonte: Bello (2011)

Figura 17 - Resultados dos ensaios de adensamento vertical com a profundidade do E112 em Suape.



Fonte: Bello (2011)

Figura 18 - Resultados dos ensaios de adensamento vertical com a profundidade do E120 em Suape.



Fonte: Bello (2011)

Tabela 20- Resultados de Cv; Ch e C α para as amostras das estacas: E98, E102, E112 e E120 em Suape

Estacas	Profundidade	Cv(m²/s x 10⁻⁴)	Ch (m²/sx10⁻⁴)	Cα
E98	2 a 3	1,46	1,26	0,015
	4 a 4,74	1,42	1,34	0,013
E103	2 a 3	2,15	30,22	0,014
	4,65 a 5,65	1,51	10,36	0,016
E112	6 a 7	2,75	32,02	0,011
	10 a 11	4,99	29,19	0,012
	17,5 a 18,5	2,54	33,06	0,010
E120	4 a 5	1,41	12,58	0,017
	6 a 7	8,53	13,61	0,017

Fonte: Bello (2011)

2.7 RESULTADO DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO E ADENSAMENTO REALIZADO EM 2014 NO BAIRRO CHÃO DE ESTRELAS.

Estudos anteriores foram realizados no bairro de Chão de Estrelas da Cidade do Recife para o desenvolvimento de projeto de construção de uma via que será construída na marginal direita do Rio Beberibe com cerca de 1.400 m de extensão, 7,0 m de largura para o tráfego de veículos, ciclovia com 2,5 m de largura, além de um passeio com largura de 2,5 m.

O projeto de terraplenagem previa um greide praticamente colado no terreno atual. Havendo, no entanto, locais em que haveria aterro com até 3 m de espessura, rebaixamento do subleito existente na largura da pista e execução do pavimento. O projeto ainda previa que o pavimento da via marginal teria 83 cm de espessura contemplando revestimento, base e sub-base. Ademais, era previsto a substituição adicional do subleito por material arenoso de 1 m.

As amostras foram extraídas de dois pontos do percurso da via. O primeiro ponto foi denominado Ilha 1 e corresponde ao furo de sondagem 203A, localizado às margens do Rio Beberibe em frente à rua Colorado, local que já contempla uma parte do projeto viário. O segundo ponto, chamado Ilha 2, corresponde ao furo de sondagem 208A, encontrando-se um pouco adentro do bairro, também às margens do Rio Beberibe, em frente à rua vereador Nivaldo Cavalcanti, porém ainda não contemplado pelo projeto viário.

Cadete (2016) apresenta os resultados ensaios de caracterização e adensamento. A Tabela 21 demonstra os resultados de Granulometria, Limites de Atterberg e TMO, enquanto a Tabela 22 apresenta a umidade natural (W_n), peso específico úmido γ_t , índice de vazios (e_0), índice de compressão (C_c) e expansão (C_s) e tensão de pré-adensamento (σ_{vm}) de acordo com as profundidades estudadas.

As Figuras 19 e 20 apresentam as curvas de compressibilidade – Índice de vazios vs. logaritmo da tensão efetiva de consolidação em relação às suas respectivas profundidades encontradas nos ensaios realizados para as Ilhas 1 e 2 no bairro de Chão de Estrelas. A Figura 21 apresenta o gráfico do coeficiente de adensamento (C_v) para as mesmas condições estudadas.

A Figura 22 e 23 traz as sondagens efetuadas no local, furo 203A e 208A, respectivamente, Ilha 1 e Ilha 2. Observa-se a variação do perfil apresentado e a predominância de SPT abaixo de 5 golpes até a profundidade de 12 metros. A Figura 24 apresenta a localização dos furos de sondagem.

Tabela 21 - Resultados de granulometria, Limites de Atterberg e TMO.

Amostra	Prof.	Pedregulho	Areia grossa	Areia média	Areia fina	Silte	Argila	WL	WP	IP	Teor de matéria orgânica (TMO)
	(m)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
ILHA - 1	2	0	0	10	37	16	37	38	26	12	10,52
ILHA - 1	4	0	0	0	60	18	22	NL	NP	NP	62,59
ILHA - 1	8	0	0	0	3	33	64	68	41	27	14,71
ILHA - 1	11	0	0	0	46	10	44	25	16	9	5,09
ILHA - 2	2	0	0	12	17	11	60	55	32	23	8,95
ILHA - 2	7	0	0	37	52	3	8	NL	NP	NP	1,41
ILHA - 2	8	0	0	0	1	26	73	65	37	28	12,47

Fonte: Cadete (2016).

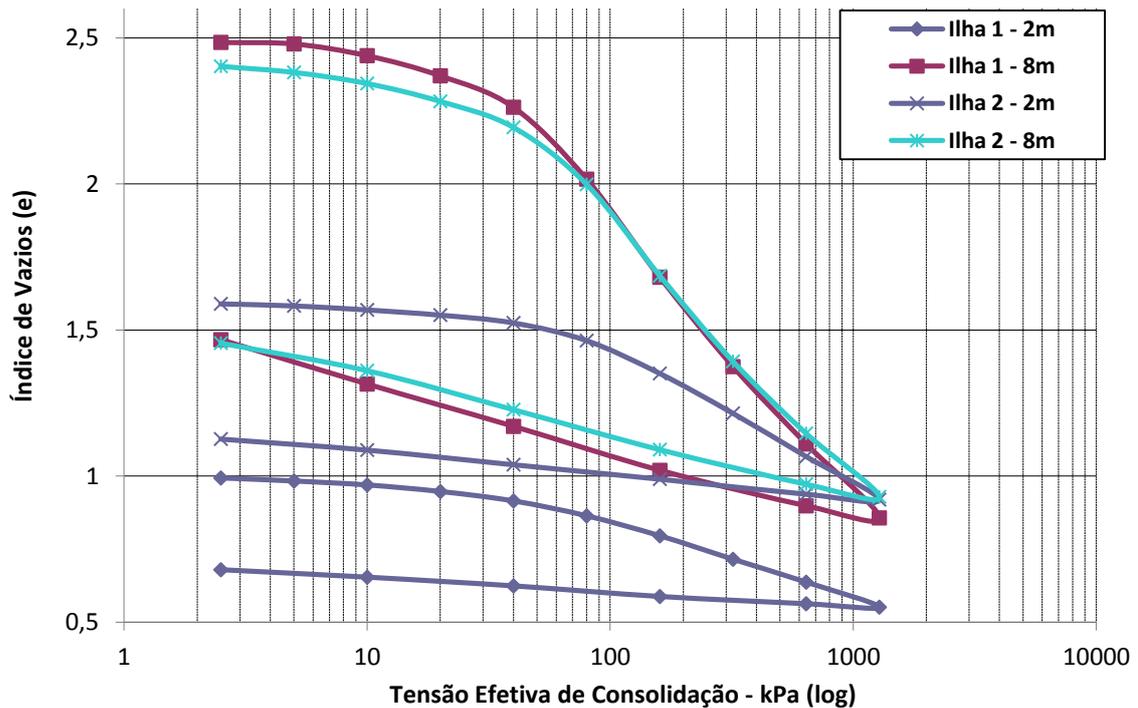
Tabela 22 - Resultados da umidade natural (W_n), peso específico, índice de vazios, índice de compressão (C_c) e expansão (C_s) e Tensão de Pré-adensamento (σ_{vm}).

Amostra	Prof.	W_n	Peso específico inicial úmido	Índice de vazios inicial	Índice de compressão	Índice de recompressão	Tensão de pré-adensamento
ILHA - 1	2	41	17,85	1,006	0,26	0,05	42
ILHA - 1	4	442,5	10,22	8,075	4,36	0,43	40
ILHA - 1	8	90,2	14,11	2,492	1,08	0,24	40
ILHA - 1	11	24,6	19,34	0,701	0,17	0,04	45
ILHA - 2	2	53,9	15,32	1,603	0,47	0,08	70
ILHA - 2	7	26,0	18,92	0,772	0,08	0,04	20
ILHA - 2	8	85,7	14,05	2,423	1,00	0,22	50

Fonte: Cadete (2016).

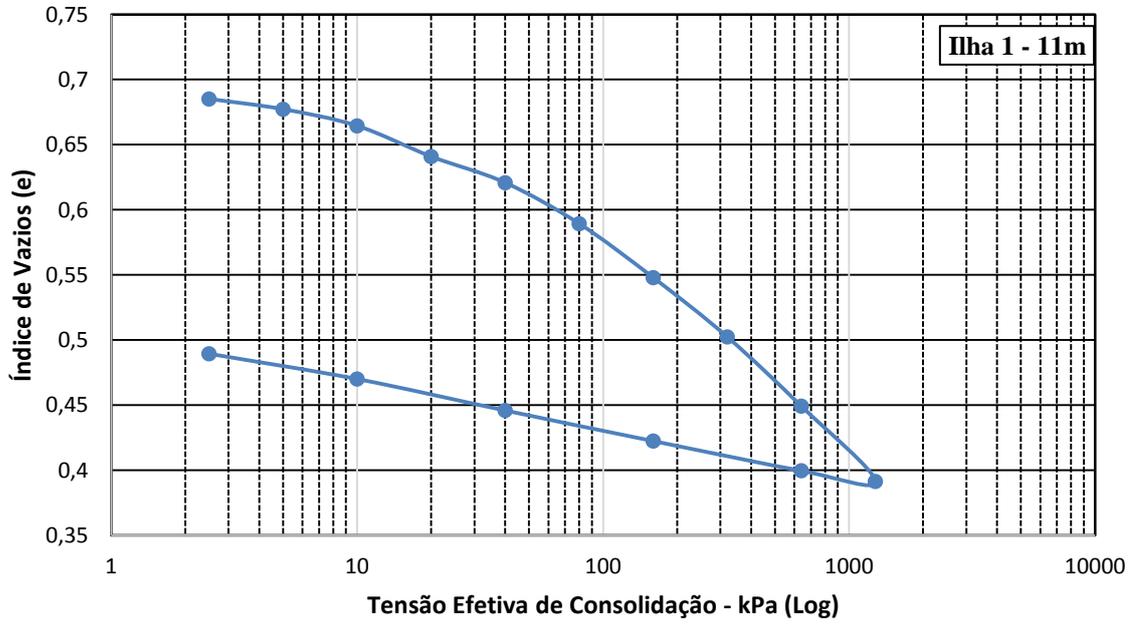
Observe-se que a faixa de 8 metros da Ilha 1 contém 97% de finos (argila e silte), enquanto a Ilha 2 apresenta 99%. A profundidade de 11 metros apresenta uma redução considerável na taxa de matéria orgânica em sua composição. Destaca-se que quanto maior a taxa de matéria orgânica maior será a umidade natural (W_n) e o índice de compressibilidade e menor será o peso específico dos grãos.

Figura 19 - Curva de Compressibilidade para Ilha 1 e 2, profundidade de 2m e 8m.



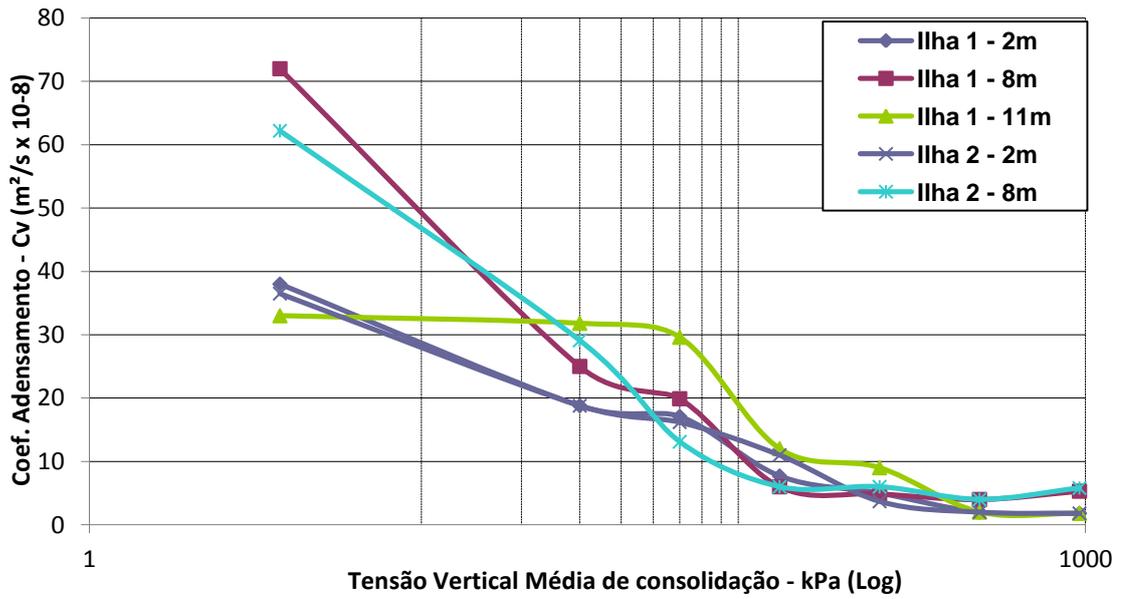
Fonte: Cadete (2016).

Figura 20 - Curva Compressibilidade para Ilha 1, profundidade de 11m.



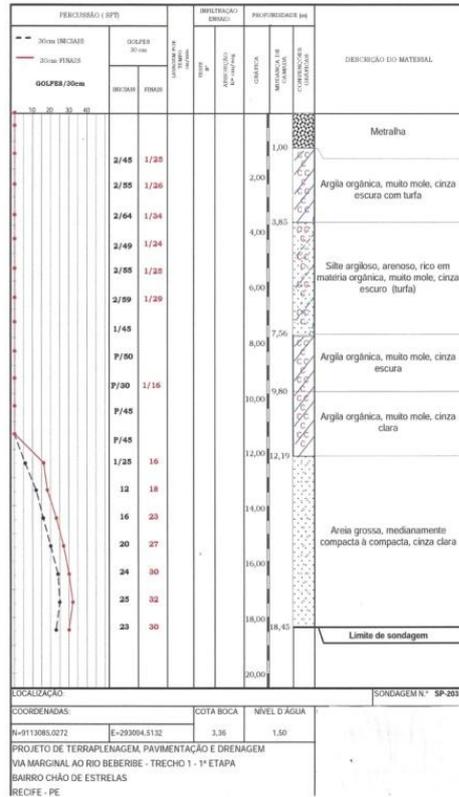
Fonte: Cadete(2016).

Figura 21 - Gráfico do Coeficiente de Adensamento (C_v) vs. Logaritmo da Tensão Vertical Média de Consolidação.



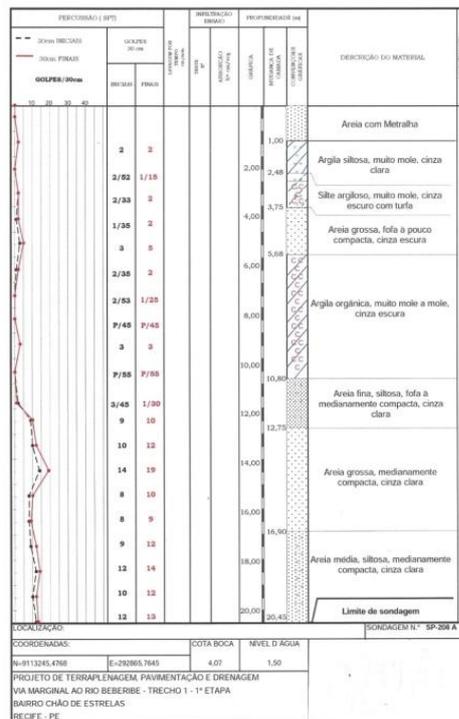
Fonte: Cadete (2016).

Figura 22 - Gráficos das sondagens do furo 203A, referente a Ilha 1.



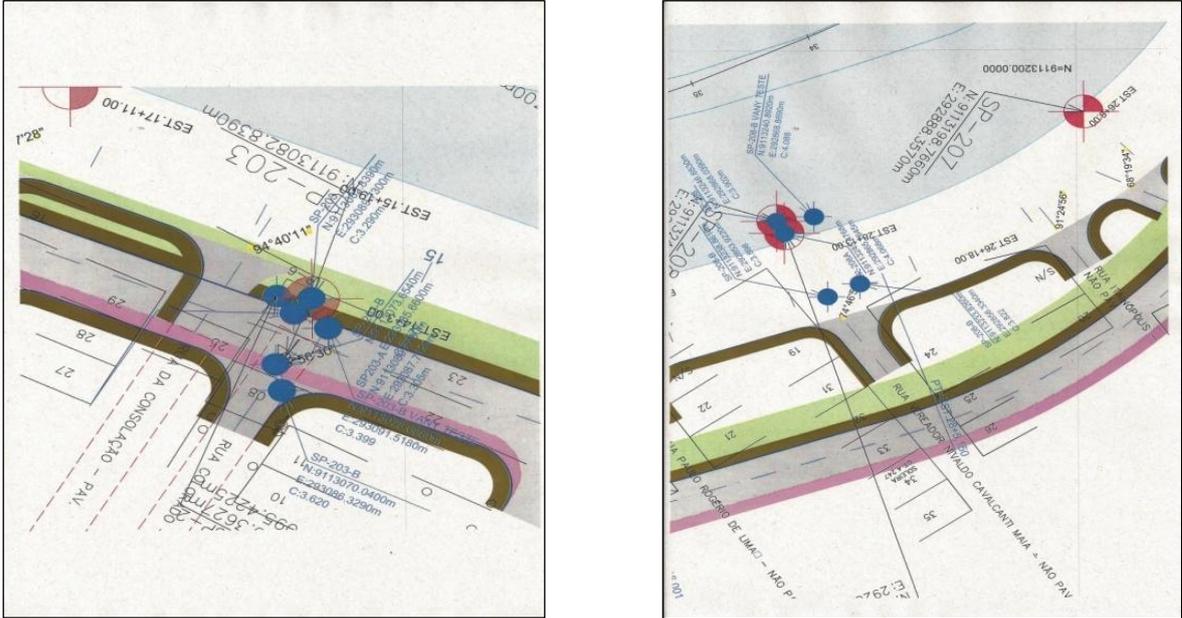
Fonte: Cadete (2016).

Figura 23 - Gráficos das sondagens do furo 208A, referente a Ilha 2.



Fonte: Cadete (2016).

Figura 24 - Localização dos furos de sondagens do furo 203A e 208A, respectivamente.



Fonte: Cadete (2016).

CAPÍTULO 3

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. INTRODUÇÃO

O local para a pesquisa está situado no bairro de Chão de Estrelas, limite com o bairro Campina do Barreto, Arruda e bairro Beberibe na zona norte da capital pernambucana. Este depósito tem origem flúvio-marinha.

Para o programa de investigação do projeto da via de tráfego de automotores, bicicletas e pedestres, foram realizados dois furos de sondagem, o 203 A e o 208 A às margens do rio Beberibe, o primeiro com acesso pela rua Colorado, enquanto o segundo, de acesso mais limitado, pela rua Vereador Nivaldo Cavalcanti. As amostras coletadas nos Furos determinados, respectivamente, deram origem às denominadas Ilha 1 e Ilha 2, limitando assim a região estudada da 1ª etapa do trecho 1 do projeto de terraplanagem, pavimentação e drenagem do bairro Chão de Estrelas, Recife/PE.

Durante a prospecção do solo executado, em setembro e outubro de 2014, foram coletadas sete amostras tipo shelbys, amostrador metálico de parede fina e ponta biselada, com diâmetro interno de 100 mm (4”) e comprimento em geral de 0,8 m, que foram armazenadas na câmara úmida no Laboratório de Solos da UFPE.

Do total das amostras utilizadas, três são provenientes da Ilha 1 coletadas a profundidades de 2 m, 8m e 11m, enquanto as outras duas amostras da Ilha 2 foram coletadas a profundidades de 2m e 8m. As Figuras 25 e 26 demonstram as fotos atualizadas da localização das ilhas no bairro de Chão de Estrelas, enquanto a Tabela 23 apresenta os ensaios que foram realizados na presente pesquisa com suas respectivas finalidades. Os resultados desses ensaios serão comparados com os resultados dos ensaios realizados para o projeto da via de tráfego.

Tabela 23- Tipos de ensaios realizados, finalidade e quantidade.

Ensaio	Finalidade	Quantidade
Limites de Atterberg sem secagem prévia da amostra	Analisar a influência da secagem prévia nos valores dos limites de Atterberg	5
Adensamento com drenagem vertical com $\Delta\sigma/\sigma < 1$, próximo a tensão de pré-adensamento	Obter com melhor precisão a tensão de pré-adensamento	5
Adensamento em amostra amolgada proveniente em laboratório	Avaliar a qualidade da amostra coletada	1
Adensamento com drenagem radial	Obter o Coeficiente de Adensamento Radial	5

O presente trabalho teve-se a realização dos ensaios de caracterização física dos Limites de Atterberg sem secagem prévia da amostra; e, ensaio de adensamento com drenagem vertical e radial para melhor definir a tensão de pré-adensamento do solo usando incrementos de carga menores que a carga anterior a partir da tensão de 40kPa até 80kPa. Para a amostra amolgada foi realizada a reconstrução da curva de compressibilidade do campo pela comparação com uma amostra de qualidade estimada.

Figura 25 - Foto atualizada do local do furo 203A referente a Ilha 1 em frente a rua Colorado.



Figura 26 – Localização e fotos atualizadas do local do furo 208A referente a Ilha 2.



3.2 PROCEDIMENTO DO ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO WL E WP

Com o objetivo de obter mais informações sobre o depósito estudado e a influência da matéria orgânica foram realizados ensaios sem secagem prévia do solo. A Figura 27 traz fotos dos ensaios efetuados, destacando-se a coloração das amostras retiradas da Ilha 1 a profundidade de 8 e 11 metros.

O material excedente do entorno ao anel de moldagem do corpo de prova era coletado para determinar os Limites de Liquidez (WL) e Plasticidade (WP) seguindo procedimentos regulamentados pela Norma Brasileira, porém os materiais não foram previamente secos sendo o Limite de liquidez pela ABNT NBR-6459/84 (método Casagrande), enquanto o Limite de Plasticidade segundo a ABNT NBR 7180/84.

Partindo da amostra na umidade em que se encontrava foi homogeneizada e colocada no aparelho de Casagrande para se obter o primeiro número de golpes. Se este fosse maior que 25 golpes e menor do que 50 golpes anotava-se o valor, adicionando água necessária para se obter valores de umidade correspondente ou entorno de 50, 30, 20 e 10 golpes como recomenda a norma.

Caso no primeiro ponto obtido, o número de golpes fosse menor que 25 golpes e maior que 10 golpes adicionava água ou deixava o solo perder água no ambiente do laboratório para se obter as umidades correspondentes a 10, 20, 30 e 50 golpes como é recomendado pela Norma.

Figura 27 – Ensaio de densidade e Casagrande para a amostras da referente a Ilha 1.



3.3 PROCEDIMENTO DO ENSAIO DE ADENSAMENTO VERTICAL E EQUIPAMENTOS

O procedimento do ensaio edométrico vertical está determinado pela ABNT-NBR 12007/90, se constituindo um método de determinação das propriedades de adensamento do solo, apresentando como características a velocidade e as deformações.

Os equipamentos utilizados foram prensas do tipo Bishop, Figura 28, e células de adensamento, ambas fabricadas por Ronald Top, fornecidos pelo Laboratório de Solos e

Instrumentação da UFPE, local da realização dos ensaios. Para a aplicação da carga vertical, constante em cada estágio do ensaio, foi utilizado pesos previamente aferidos, apoiados em um braço de alavanca de 10:1, parte componente das prensas.

Figura 28 - Registro fotográfico da prensa tipo Bishop.



As prensas utilizadas possuíam dispositivo que permitia, a qualquer momento, a recuperação da horizontalidade do braço de alavanca, sem causar danos ao corpo de prova, considerando-se que tal procedimento representava um cuidado especial na obtenção da boa precisão das cargas aplicadas.

Os extensômetros são instrumentos que medem a variação de altura dos corpos de prova com o tempo para leituras após a aplicação de uma determinada carga. Permitiram uma precisão de 0,01mm nas medidas.

Verificado os equipamentos, o procedimento seguinte era a coleta da amostra dos shelys selecionados previamente, acondicionados em câmara úmida. Com o auxílio do extrator da amostra, o shelby era posicionado de maneira que, através do acionamento de engrenagens

mecânicas, o solo argiloso de dentro do tudo metálico era lentamente e gradativamente exposto.

Os primeiros 0,10 m de material retirado do interior do tubo amostrador eram descartados, procurando-se dessa maneira evitar proporcionar um possível amolgamento da amostra, entretanto, esse solo resultante do início do shelby era utilizado para ensaios de caracterização.

O anel utilizado na primeira cravação no material do amostrador shelby também era em aço inoxidável, com ponta biselada, com 20 mm de altura e relação diâmetro/altura de 4,37, lubrificadas internamente com graxa de silicone, para minimizar o atrito lateral entre o anel e o solo.

Como os ensaios de adensamento realizados contemplavam uma drenagem vertical e outra radial, usou-se o anel de 20 mm de diâmetro acima descrito para servir também como guia a um outro anel, este com pedra porosa radial com 30 mm de altura utilizado no ensaio de adensamento radial, sobreposto ao primeiro, conforme se verifica na Figura 29.

Figura 29 - Registro fotográfico dos anéis de moldagem dos corpos de prova



Essa técnica de moldagem serviu para facilitar a cravação, introdução ou moldagem do corpo de prova com drenagem radial, minimizando assim o atrito lateral interno deste anel. A

cravação do primeiro anel se deu no centro do material, procurando-se manter a excentricidade, prumo e alinhamento da penetração. Essa localização aparentemente era a região de melhor qualidade da amostra, tentando-se ainda evitar a presença de conchas e restos de vegetais.

Como o tubo amostrador shelby apresenta um diâmetro de 100 mm e o anel com ponta biselda 87,42 mm, o material excedente do entorno era cuidadosamente cortado com ferramenta de corte específica, minimizando o diâmetro do material do amostrador e, conseqüentemente, facilitando a cravação e a moldagem do corpo de prova, além de minimizar o atrito lateral entre o material e o anel em seu percurso de cravação.

Finalizada o preenchimento dos corpos de prova em seus respectivos anéis, o material era cortado horizontalmente separando o primeiro anel guia do segundo anel sobreposto a este, e na sequência, este era separado do material restante do amostrador. O anel guia preenchido iria ser usado como corpo de prova do ensaio de adensamento vertical, enquanto o sobreposto a ele no ensaio de adensamento radial.

Uma vez com o corpo de prova limpo e com as faces horizontalmente niveladas era pesado e montado no interior das células de adensamento, que consiste de uma base rígida, pedras porosas e um cabeçote rígido de carregamento, conforme Figura 30. Sua função era proporcionar a transferência da aplicação de cargas verticais ao corpo de prova, de modo que se mantenha lateralmente confinado, drenado e verticalmente carregado.

Figura 30 - Registro fotográfico das células de adensamento.



A montagem do corpo de prova na célula de adensamento específica à drenagem vertical apresentou outros componentes auxiliares ao processo, sendo instaladas em ambas as faces da amostra (topo e base), entre a amostra propriamente dita e o dispositivo de carga, papel filtro saturado e sobre eles, pedras porosas, anteriormente fervidas em água destilada e esfriadas com jato d'água.

Com a célula de adensamento pronta, o procedimento para execução do ensaio foi iniciado com a colocação da célula de adensamento na prensa mecânica, ajustando-se a horizontalidade da alavanca. Posteriormente, foi aplicado ao sistema uma carga de 5 kPa por um período aproximado de 5 minutos, quando ao final, iniciava-se a aplicação da primeira carga pré-determinada, com adição de água para assentamento do sistema, seguindo-se de leituras no extensômetro da variação da altura do corpo de prova para cada intervalo de tempo também pré-estabelecido.

Diariamente, era aplicado um novo incremento de carga ao sistema, restando que o período de cada estágio de tensão aplicado no corpo de prova foi de 24 horas aproximadamente, pois se preservou a intenção de obter pelos menos três pontos no gráfico da curva de deformação *versus* Log do tempo no estágio retilíneo de compressão secundária.

Assim, determinou-se *a priori* que o carregamento inicial do sistema seria com 10 kPa com leituras da variação da altura nos intervalos de tempo de 0,1; 0,25; 0,5; 1; 2; 4; 8; 15; 30; 60; 120; 240; 480 e 1440 min., o que na prática significava 6s, 15s, 30s, 60s e assim por diante. Importante destacar que em todos os incrementos de cargas ocorridos tanto para os ensaios de adensamento vertical procurava-se evitar impacto sobre o corpo de prova, travando-se o equipamento durante a operação de carga, sendo aos poucos liberando a carga aplicada.

Sequencialmente, o incremento de carga foi igual à carga anterior ($\Delta\sigma_{vc}/\sigma_{vc}=1$), ou seja, 20kPa e 40kPa, com o registro de todas as variações de altura do corpo de prova nos intervalos de tempo determinados.

Como o estudo se propôs a determinar com maior precisão a tensão de pré-adensamento, considerando os resultados dos ensaios para o projeto da via, foi determinado que a tensão aplicada posterior a 40 kPa seria com incrementos de 10 kPa, ou seja, com relação da variação de tensão pela tensão efetiva de consolidação menor que a unidade ($\Delta\sigma_{vc}/\sigma_{vc}<1$).

Foi registrado a variação de altura do corpo de prova nas tensões de 50, 60, 70 e 80kPa. A partir desta última tensão a curva do índice de vazios *versus* a tensão vertical efetiva de consolidação tenderia a estabelecer a forma retilínea da compressão virgem, característica das argilas normalmente adensadas.

Dessa forma, após a tensão efetiva de 80 kPa, retornou-se ao incremento de carga igual à carga anterior ($\Delta\sigma_{vc}/\sigma_{vc}=1$), aplicando, sequencialmente, as tensões de 160, 320, 640 e 1280 kPa para completar o ciclo de carregamento. Na Figura 31 apresenta-se o conjunto do sistema prensa célula de adensamento e, em outro momento, a prensa completamente carregada.

Figura 31 - Registro fotográfico do conjunto prensa, célula de adensamento e carregamentos.



Com o devido registro da variação de altura do corpo de prova nas 24 horas de carregamento da tensão de 1280 kPa, iniciou-se o procedimento de descarregamento do corpo de prova utilizando-se do mesmo intervalo de tempo e das mesmas técnicas, só que, para cada estágio de tensão, foi utilizado a seguinte sequencia de descarregamento: 640, 160, 40 e 10 kPa, perfazendo um total de 15 dias do ciclo de carregamento e descarregamento do corpo de prova.

Observa-se que após a última leitura de descarregamento do corpo de prova, após o período mínimo de 24 horas, a célula era liberada do sistema de prensa, passando por uma drenagem de toda água injetada sobre e dentro da célula, para posteriormente ser desmontada cuidadosamente. O corpo de prova, conjunto anel/solo, uma vez livre, era pesado.

Após o procedimento de pesagem, a amostra era retirada do molde do anel metálico, dividida em partes e direcionada a obtenção da umidade final, após o ensaio concluído. Não se verificou, nesse momento, a existência de fragmentos de concha ou madeiras na amostra estudada, porém no momento da cravação dos anéis no solo argiloso do amostrador para moldagem do corpo de prova percebeu-se, não raramente, pequenos fragmentos de conchas.

Observa-se que foram coletadas dois corpos de prova para cada amostrador shelby, referente às duas Ilhas. A Ilha 1 foi contemplada com 6 corpos de prova, duas referente a profundidade de dois metros, duas para 8 metros e duas para 11m. Portanto, um corpo de prova foi usado para a realização do ensaio de adensamento vertical e o outro corpo de prova foi usado para o ensaio de adensamento radial.

A Ilha 2 foi contemplada com 5 corpos de prova, dois para a profundidade de 2 metros, desses um corpo de prova foi utilizado no ensaio de adensamento vertical e outro para o ensaio de adensamento radial. Para a profundidade de 8 metros foi retirado também dois corpos de prova, que da mesma forma do procedimento anterior, um foi para o ensaio de adensamento vertical e outro para o ensaio de adensamento radial.

Com o excedente desse material que sobrou da cravação e moldagem desses dois corpos de prova referente aos 8 metros de profundidade da Ilha 2 foi moldado um outro corpo de prova, com a amostra completamente amolgada em laboratório. Esse procedimento serve para desorganizar a estrutura interna do solo estudado, permanecendo-se com o mesmo índice de vazios iniciais e o mesmo peso da amostra referêcia.

O corpo de prova denominado Ilha 2 - 8 m amolgado foi submetido ao ensaio de adensamento vertical seguindo os mesmos procedimentos, técnicas e cronograma estabelecidos para os demais corpos de prova, visando obter os mesmos parâmetros de compressibilidade do solo nessas condições.

Para o cálculo da velocidade de adensamento entre outros (C_v , a_v , m_v) foi lançado as leituras obtidas e seus respectivos tempos para a determinação da curva de deformação *versus* log do tempo, gráfico necessário para a determinação do t_{50} e do t_{90} , referente ao tempo de adensamento a 50% e a 90%, respectivamente, determinados pelo método Casagrande, Log (t); e, pelo método de Taylor, \sqrt{t} .

3.4 PROCEDIMENTO DO ENSAIO DE ADENSAMENTO RADIAL E EQUIPAMENTOS

O procedimento do ensaio de adensamento também orientado pela ABNT-NBR 12007/90, se utilizou dos mesmos equipamentos, procedimentos, técnicas e cronograma do ensaio de adensamento vertical, observa-se, porém que a célula de adensamento e o anel utilizados apresentam ligeira diferença.

As dimensões do anel são iguais em diâmetro e área quando comparados aos anéis utilizados no ensaio de adensamento vertical. A divergência está na altura dos anéis, pois no ensaio de adensamento radial o anel apresenta altura de 30 mm, enquanto a célula de carga contem apenas um dispositivo de travamento interno. A Figura 32 traz um registro fotográfico da célula e do anel utilizado para o ensaio de drenagem radial.

Conforme detalhado no item anterior, 3.3, o anel utilizado para o ensaio de adensamento radial apresenta ainda a pedra porosa radial compondo o próprio anel, isso faz com que ele se apresente com uma espessura maior e para minimizar o atrito interno e externo entre o solo e o dispositivo na moldagem do corpo de prova, um anel biselado foi utilizado como guia no procedimento de cravação no corpo do material do amostrador shelby.

Essa técnica de cravação tenta também minimizar amolgar a amostra coletada, por isso foi executada lentamente, sendo cravado primeiro o anel guia e na sequencia o anel com pedra porosa radial. Dessa forma, foi possível moldar dois corpos de prova ao mesmo tempo, o primeiro com a amostra para o ensaio de adensamento vertical, enquanto o segundo com a amostra do ensaio de adensamento radial.

Na montagem da célula de adensamento radial foi utilizada uma peça de acrílico com formato circular e dimensões semelhantes à amostra, de forma que a transmissão das tensões aplicadas ocorresse igualmente por toda a área da amostra. A peça era introduzida na célula entre a amostra e a tampa da célula de carga.

Foi possível assim obter a comparação entre os resultados obtidos nos dois tipos de ensaio de adensamento, vertical e radial, verificando o comportamento de um solo argiloso natural quando se encontra faticamente com drenagem lateral, ao invés de se apresentar entre camadas drenantes superiores ou inferiores.

Figura 32 – Registro fotográfico do conjunto anel com pedra porosa radial e célula de carga.



CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Serão apresentados e discutidos os resultados dos ensaios de caracterização física e de compressibilidade com adensamento vertical e radial.

4.1 LIMITES DE LIQUIDEZ E PLASTICIDADE OBTIDOS SEM SECAGEM PRÉVIA DA AMOSTRA.

A Tabela 24 apresenta os resultados dos ensaios obtidos da amostra Ilha 1 e Ilha 2 nas profundidades, respectivamente 2, 8 e 11 m; e, 2 e 8m coletadas na moldagem do corpo de prova, utilizando-se do procedimento normativo descrito na NBR – 6459/84 para o Limite de Liquidez (WL) e NBR – 7180/84 para o Limite de Plasticidade (WP), sem a secagem prévia do material.

Observa-se que como a moldagem dos corpos de prova tanto para o ensaio de adensamento vertical como para o ensaio de adensamento radial foram executados sequencialmente, utilizando-se o anel biselado de 20 mm de altura como guia do anel com pedra porosa na radial de altura igual a 30 mm, o material em estudo, ou seja, o solo argiloso contido em cada amostrador é o mesmo, de forma que os resultados de caracterização ora apresentados são comuns a ambos os ensaios.

Tabela 24 - Resultado dos Limites de Atterberg, sem secagem prévia.

Amostra	Ensaio	Profundidade (m)	WL (%)	WP (%)	IP (%)
Ilha 1	Vertical/Radial	2	49,70	36,90	12,80
		8	95,00	57,88	37,12
		11	27,70	17,49	10,21
Ilha 2	Vertical/Radial	2	50,90	41,29	9,61
		8	78,80	49,61	29,19

4.2 ENSAIO DE ADENSAMENTO VERTICAL

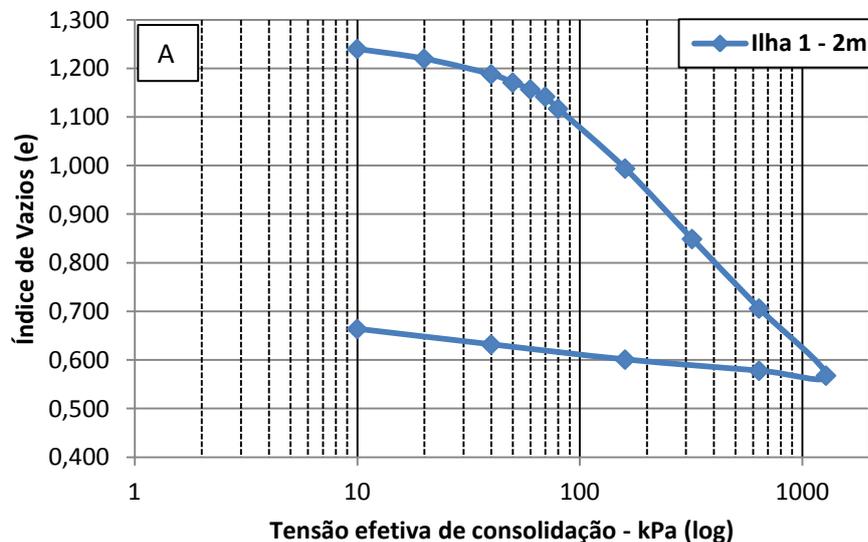
Os resultados dos índices físicos do solo obtidos a partir de amostras do ensaio de adensamento vertical referente a umidade natural (W_n); Peso Específico úmido, seco inicial e final; e Peso específico real dos grãos estão apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 - Resultados obtidos em ensaios de adensamento vertical realizados em amostras semi-indeformadas de boa qualidade.

Amostra	ENSAIOS	INDICES						
		Prof. (m)	W_n (%)	Peso esp. úmido inicial (kN/m ³)	Peso esp. Seco inicial (kN/m ³)	Peso esp. seco final (kN/m ³)	Peso específico real grãos (kN/m ³)	
Indeformada	Ilha 1	Vertical	2	54,73	13,870	6,971	10,274	24,36
			8	79,84	15,220	8,462	12,298	26,01
			11	22,72	19,440	15,837	17,836	26,38
	Ilha 2	Vertical	2	49,50	16,110	10,778	14,748	24,54
			8	67,61	15,560	9,282	12,740	24,78

As Curvas de Compressibilidade de índice de vazios iniciais *versus* o logaritmo da tensão vertical efetiva de consolidação, obtidas para cada amostra das Ilhas 1 e 2 são apresentadas nas Figuras 33 e 34, respectivamente.

Figura 33 - Curva de Compressibilidade para amostras da Ilha 1 do ensaio de adensamento vertical, sendo A) profundidade 2 metros; B) profundidade 8 metros; e, C). profundidade 11 metros.



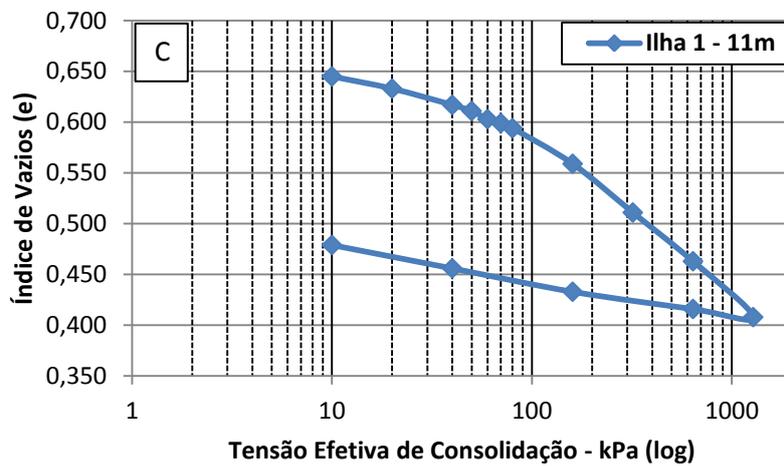
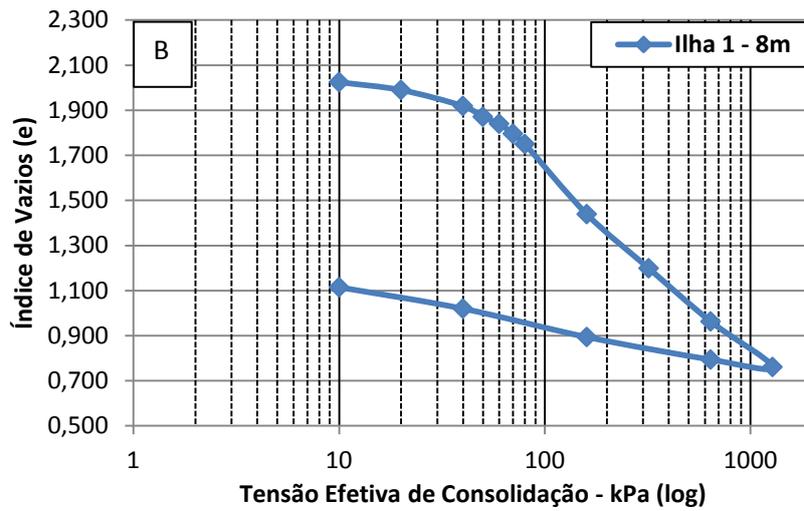
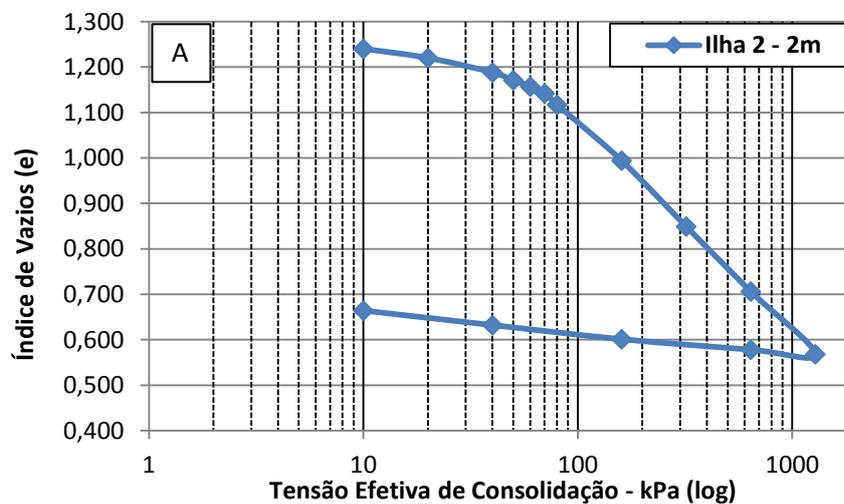
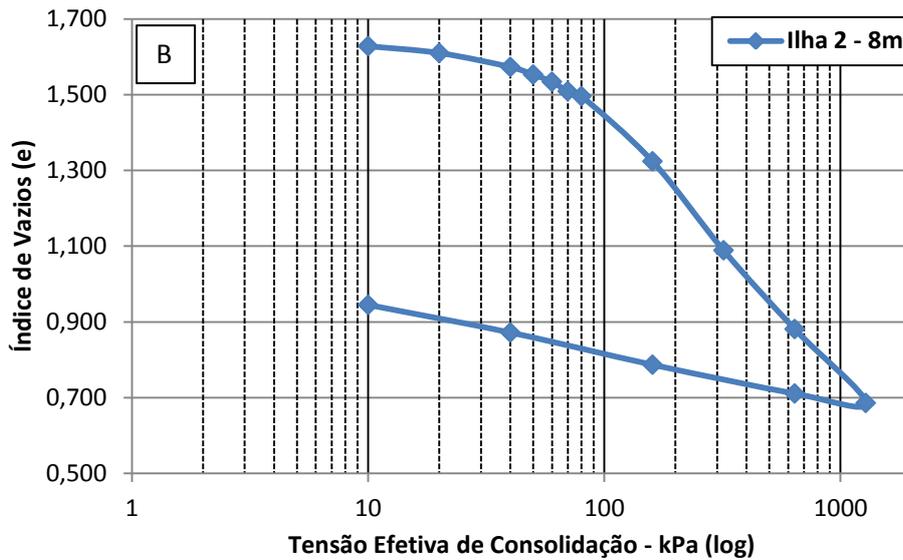


Figura 34 – Curva de Compressibilidade para amostras da Ilha 2 do ensaio de adensamento vertical, sendo A) profundidade 2 metros; e, B) profundidade 8 metros.





A partir dessas Curvas de Compressibilidade e utilizando-se dos métodos de Pacheco e Casagrande foram determinadas as Tensões de Pré-Adensamento (σ_{vm}). Na Tabela 26 apresentam-se os resultados encontrados para a Tensão de Pré-adensamento, do Índice de Compressibilidade do material (C_c), o Índice de Expansão (C_s) e Índice de Vazios Iniciais (e_0).

Observa-se ainda que para encontrar a tensão de pré-adensamento do solo estudado foi feito incrementos de carga no intervalo antes da reta de compressão virgem, com a aplicação de tensão menor que a anterior, ($\Delta\sigma_{vc}/\sigma_{vc} < 1$), dessa forma, procurou-se melhorar a definição desse valor.

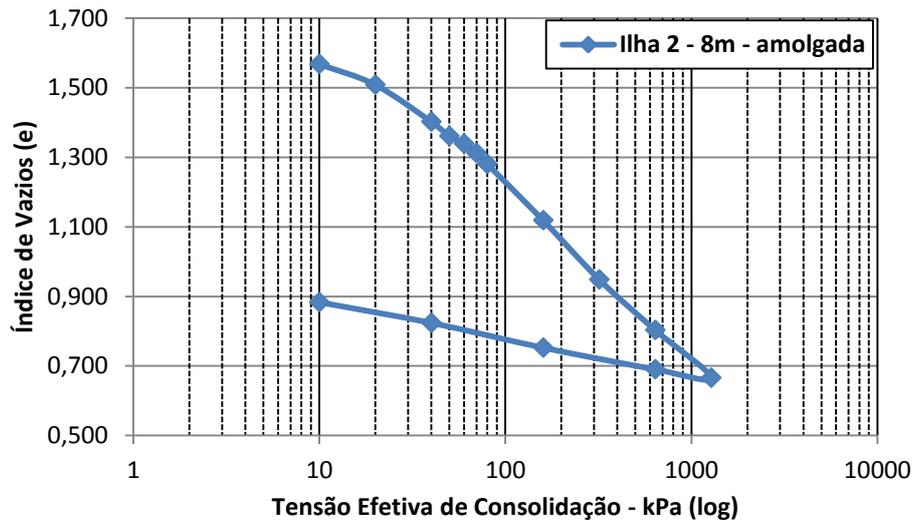
Tabela 26 - Resultados para σ_{vm} , C_c , C_s e e_0 para amostra indeformada de boa qualidade.

ENSAIOS	Trecho Reto	Prof.(m)	Índices					
			Índice vazios iniciais (e_i)	Tensão pré-adensamento - kPa (Pacheco Silva)	Tensão pré-adensamento - kPa (Casagrande)	C_c - índice compressão	C_s - índice expansão	
Ilha 1	Vertical	único	2,494	90,00	95,00	0,914	0,105	
		1°				0,915		
		2°	8	2,074	45,00	54,00	0,728	0,188
Ilha 2	Vertical	único	11	0,666	67,00	80,00	0,159	0,035
		único	2	1,277	60,00	67,00	0,478	0,048
		1°					0,676	
		2°	8	1,670	66,00	76,00	0,649	0,129

Na amostra de solo da Ilha 2, na profundidade de 8m, foi executada, com o excedente do material cortado no momento da moldagem da amostra, o amolgamento do material, ou seja, tentou-se desestruturar as partículas no seu estado natural, visando conhecer o comportamento dessa amostra sob essa condição. No ensaio da amostra amolgada tentou-se preservar o peso da amostra e o número de vazios iniciais.

A Figura 35 apresenta a Curva de Compressibilidade da amostra amolgada, assim como a Tabela 27 e 28 apresentam, respectivamente, Umidade natural (W_n); Peso específico úmido, seco inicial e Peso específico real dos grãos; e, os resultados encontrados para a Tensão de Pré-adensamento, do Índice de Compressibilidade do material (C_c), o Índice de Expansão (C_s) e Índice de Vazios Iniciais (e_0) para a amostra sob as condições naturais modificadas.

Figura 35 – Curva de Compressibilidade da Ilha 2 com 8 metros de profundidade com amostra amolgada em laboratório.



Observa-se que a curva de compressibilidade para a amostra amolgada diminuiu o índice de vazio final em relação à amostra referência de boa qualidade, ademais se tornou difícil definir o ponto de menor raio de curvatura que possibilitasse uma determinação mais precisa da tensão de pré-adensamento, de forma que seu valor foi reduzido, além de diminuir o grau da curva no trecho de compressão virgem.

Tabela 27 - Parâmetros físicos obtidos de amostra amolgada em laboratório e amostra de boa qualidade pelo adensamento com drenagem vertical e radial, para a Ilha 2 aos 8 metros de profundidade.

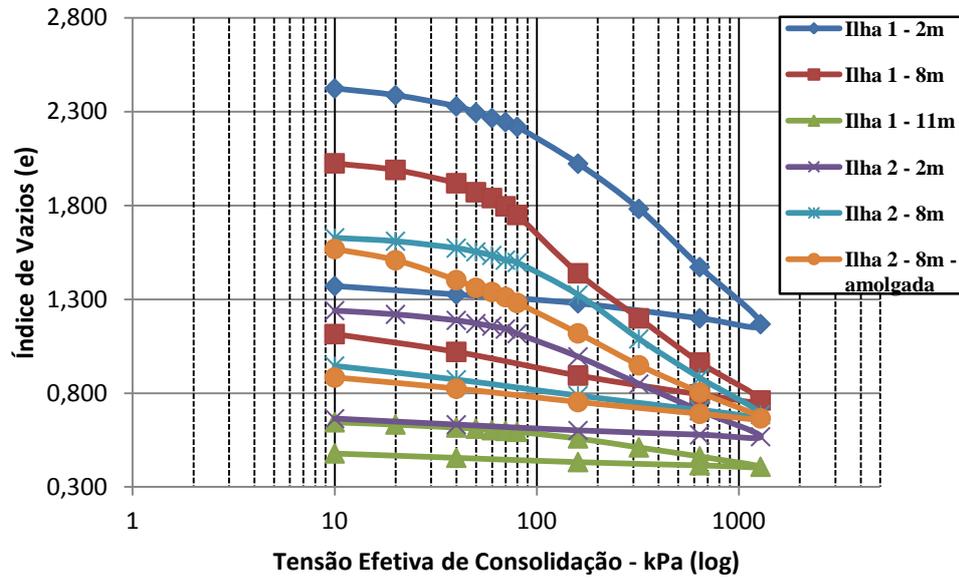
INDICES							
Amostra	Ensaio	Prof. (m)	Wn (%)	Peso esp. úmido inicial (kN/m ³)	Peso esp. Seco inicial (kN/m ³)	Peso esp. seco final (kN/m ³)	Peso específico grãos (KN/m ³)
Amolgada	Vertical	8	67,61	-	9,467	13,563	25,54
Indeformada de boa qualidade	Vertical	8	67,61	15,560	9,282	12,740	24,78
Indeformada de boa qualidade	Radial	8	67,61	15,750	9,397	13,035	24,78

Tabela 28 – Parâmetros de compressibilidade, σ_{vm} , Cc, Cs e e_0 , obtidos de amostra amolgada em laboratório e amostra de boa qualidade pelo adensamento com drenagem vertical e radial, para a Ilha 2 aos 8 metros de profundidade.

INDICES								
Amostra	Ensaio		Prof.(m)	Índice vazios iniciais (e_0)	Pré-adensamento -kPa (Pacheco Silva)	Pré-adensamento - kPa (Casagrande)	Cc - Índice compressão	Cs - Índice expansão
Amolgada	Vertical	Trecho único	8	1,698	23,00	50,00	0,524	0,107
Indeformada de boa qualidade	Vertical	1º trecho	8	1,670	66,00	76,00	0,676	0,129
		2º trecho					0,649	
Indeformada de boa qualidade	Radial	1º trecho	8	1,637	66,00	69,00	0,677	0,102
		2º trecho					0,618	

A Figura 36 apresenta as Curvas de Compressibilidade obtidas no ensaio de adensamento vertical para todas as profundidades das amostras coletadas na Ilha 1 e Ilha 2.

Figura 36 – Curvas de Compressibilidade para todas as profundidades das amostras coletadas na Ilha 1 e 2.



Outros coeficientes também foram estudados nesse ensaio, como o Coeficiente de Adensamento vertical (C_v); o Coeficiente de Compressibilidade Volumétrica (m_v); a Permeabilidade (K_v); e, o Coeficiente de Compressão Secundária, C_{α} . A Figura 37 apresenta a forma do gráfico resultante para o C_v . A Figura 38 demonstra m_v . A Figura 39 e a Figura 40 o C_{α} .

Figura 37 - Gráfico resultante do Ensaio de Adensamento Vertical para o Coeficiente de Adensamento C_v referente às Ilha 1 e Ilha 2.

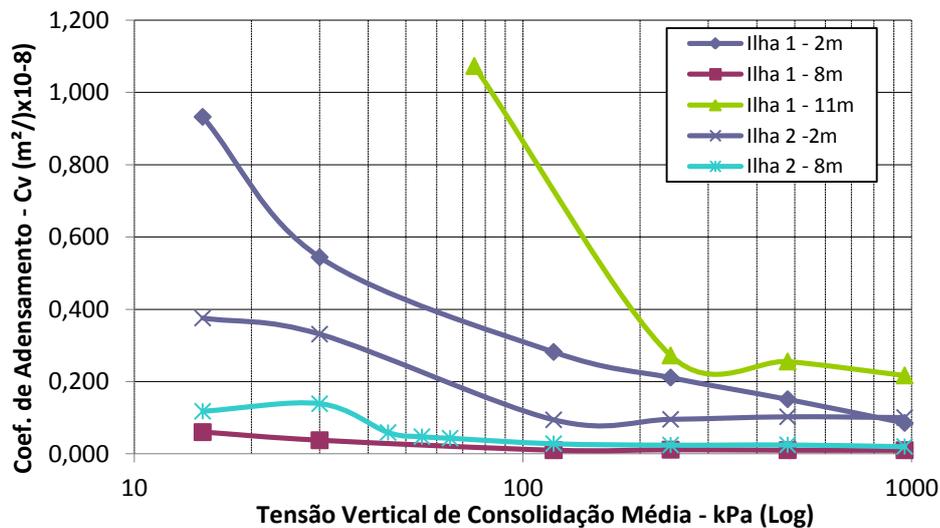


Figura 38 - Gráfico resultante do Ensaio de Adensamento Vertical para o Coeficiente de Compressibilidade Volumétrica (mv) referente às Ilha 1 e Ilha 2.

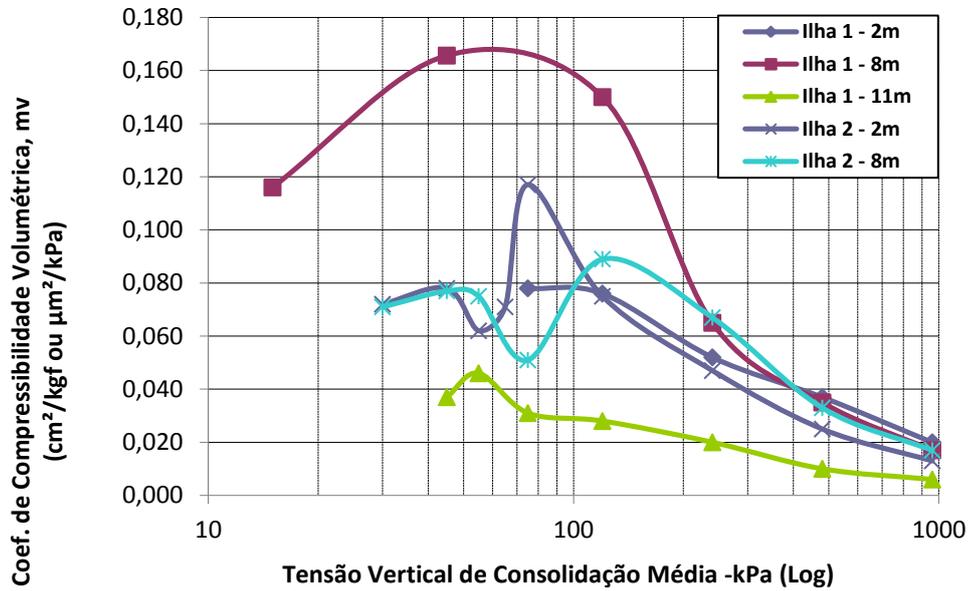


Figura 39 - Gráfico resultante do Ensaio de Adensamento Vertical para o Coeficiente de Permeabilidade (Kv) referente às Ilha 1 e Ilha 2.

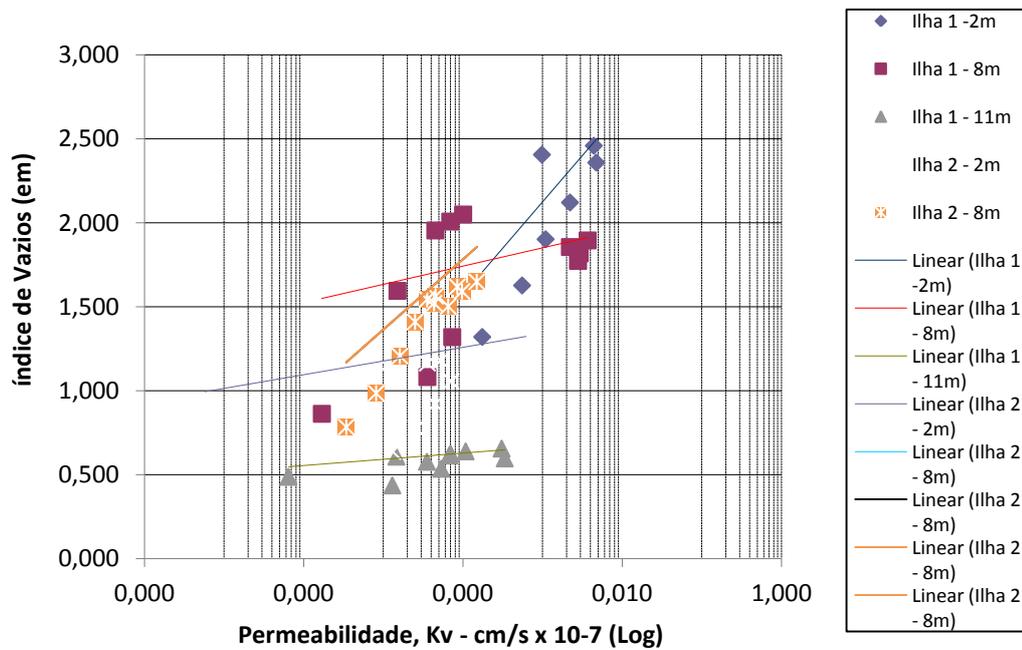
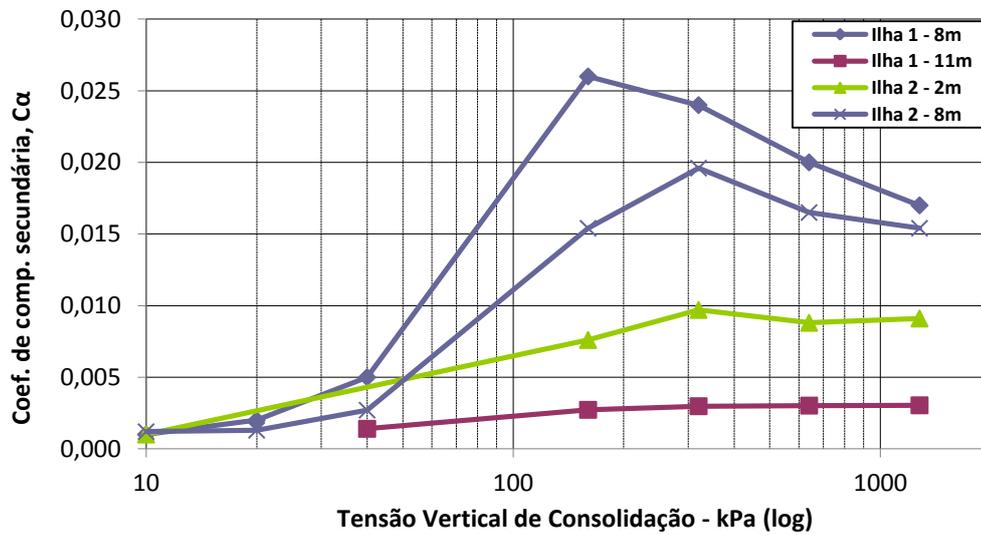


Figura 40 - Gráfico resultante do Ensaio de Adensamento Vertical para o Coeficiente de Compressibilidade Secundária ($C\alpha$) referente às Ilhas 1 e 2.



4.3 ENSAIO DE ADENSAMENTO RADIAL

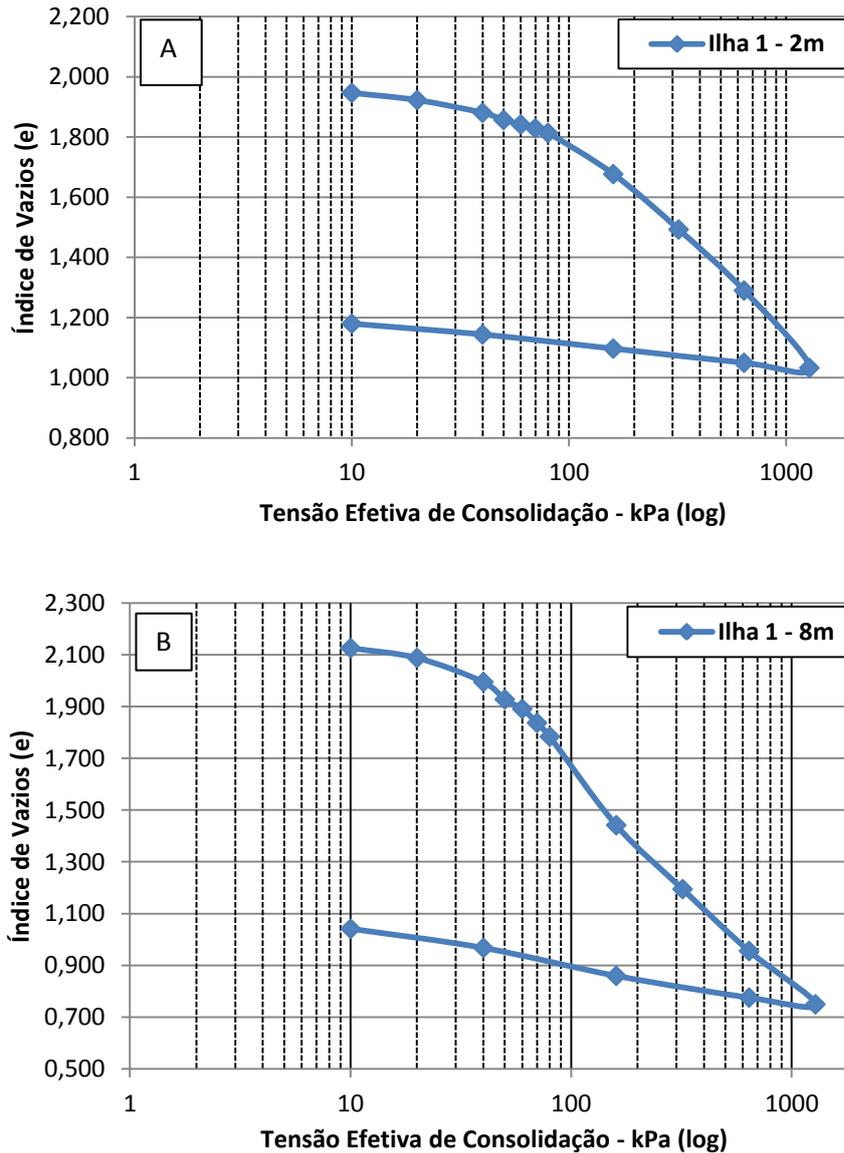
Os resultados do ensaio de adensamento com drenagem radial referente a Umidade natural (W_n); Peso Específico úmido, seco inicial e final; e Peso Específico real dos grãos estão apresentados na Tabela 29.

Tabela 29 - Resultados obtidos em ensaios de adensamento radial realizados em amostras semi-indeformadas de boa qualidade

ENSAIOS		INDICES					
		Prof. (m)	W_n (%)	Peso esp. úmido inicial (kN/m^3)	Peso esp. Seco inicial (kN/m^3)	Peso esp. seco final (kN/m^3)	Peso específico real grãos (KN/m^3)
Ilha 1	Radial	2	54,73	12,650	8,173	11,174	24,36
		8	79,84	14,770	9,150	12,738	26,01
		11	22,72	19,950	16,254	18,269	26,38
Ilha 2	Radial	2	49,50	16,090	10,760	14,792	24,54
		8	67,61	15,750	9,397	13,035	24,78

As Curvas de Compressibilidade de índice de vazios iniciais versus o logaritmo da tensão vertical efetiva de consolidação obtidas para cada amostra das Ilhas 1 e 2 são apresentadas nas Figuras 41 e 42, respectivamente.

Figura 41 – Curva de Compressibilidade para amostras da Ilha 1 do ensaio de adensamento radial, sendo A) profundidade 2 metros; B) profundidade 8 metros; e, C). profundidade 11 metros.



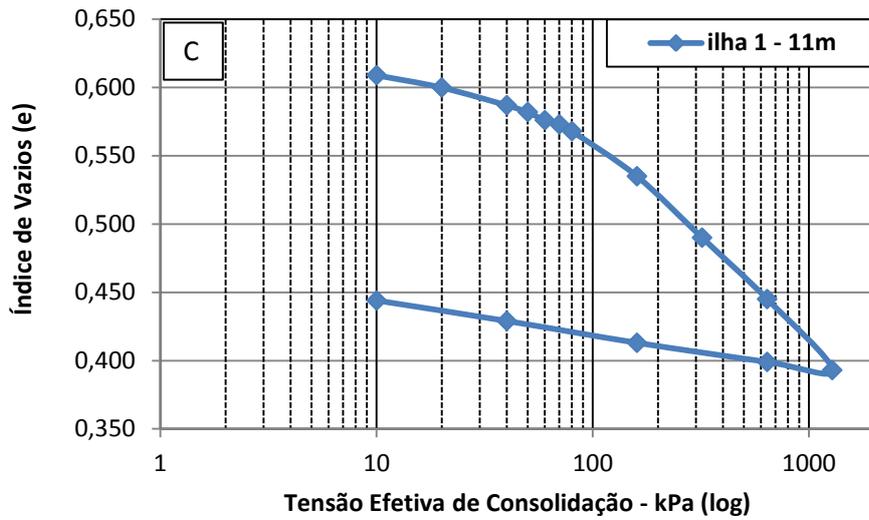
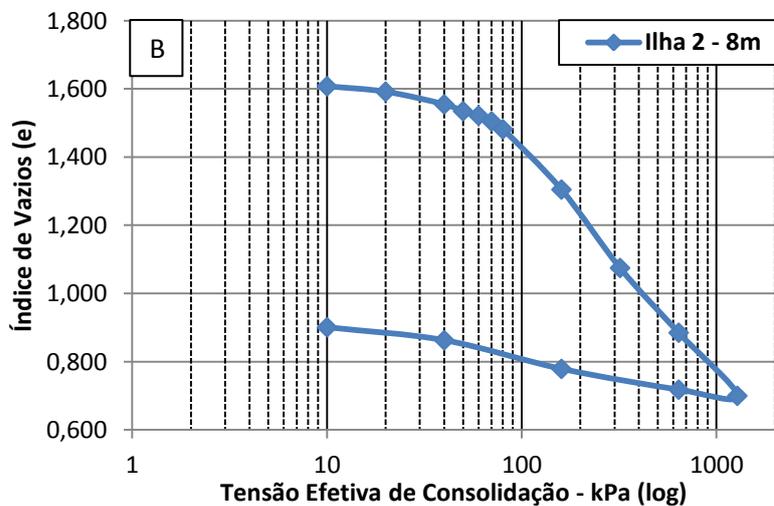
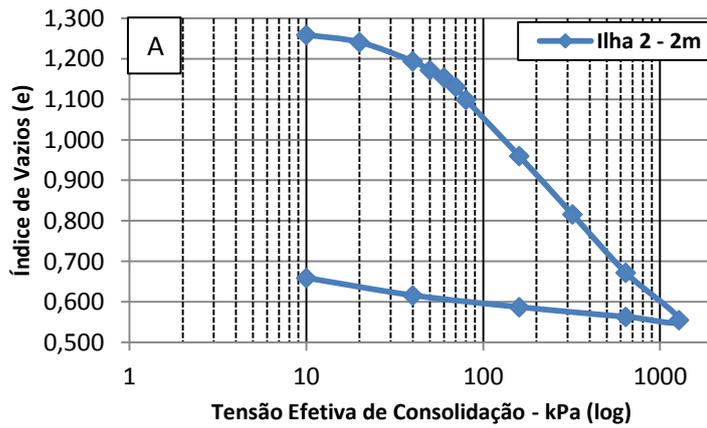


Figura 42 - Curva de Compressibilidade para amostras da Ilha 2 do ensaio de adensamento radial, sendo A) profundidade 2 metros; e, B) profundidade 8 metros.



A partir dessas Curvas de Compressibilidade e utilizando-se dos métodos de Pacheco e Casagrande foram determinadas as Tensões de Pré-Adensamento (σ_{vm}). Na Tabela 30 apresenta-se os resultados encontrados para a Tensão de Pré-adensamento, do Índice de Compressibilidade do material (C_c), o Índice de Expansão (C_s) e Índice de Vazios Iniciais.

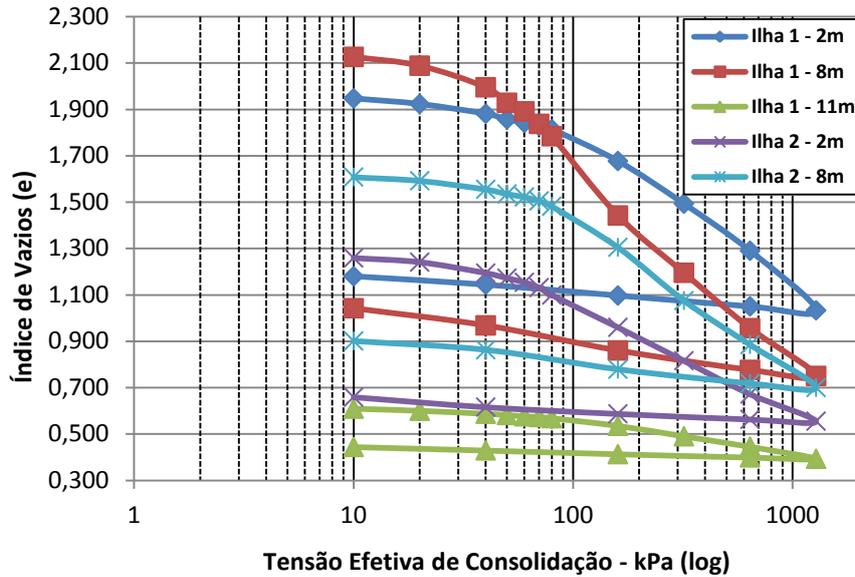
Observa-se ainda que para encontrar a Tensão de Pré-Adensamento do solo estudado foi feito incrementos de carga no intervalo antes da reta de compressão virgem, com a aplicação de tensão menor que a anterior, ($\Delta\sigma_{vc}/\sigma_{vc} < 1$), dessa forma, procurou-se melhorar a definição desse valor.

Tabela 30 - Resultados para σ_{vm} , C_c , C_s e e_0 para amostra indeformada de boa qualidade.

		INDICES						
ENSAIOS	Trecho Reto	Prof.(m)	Índice vazios iniciais (e_0)	Tensão pré-adensamento -kPa (Pacheco Silva)	Tensão pré-adensamento - kPa (Casagrande)	C_c - Índice compressão	C_s - Índice expansão	
Ilha 1	Radial	único	2	1,981	100,00	100,00	0,642	0,070
		1°	8	2,168	40,00	48,00	0,978	0,151
		2°						
		único	11	0,623	75,00	83,00	0,150	0,026
Ilha 2	Radial	único	2	1,281	44,00	53,00	0,477	0,060
		1°	8	1,637	66,00	69,00	0,677	0,102
		2°						

A Figura 43 apresenta as Curvas de Compressibilidade obtidas no ensaio de adensamento radial para todas as profundidades das amostras coletadas na Ilha 1 e Ilha 2.

Figura 43 - Curvas de Compressibilidade para todas as profundidades das amostras coletadas na Ilha 1 e 2.



Outros coeficientes também foram estudados nesse ensaio, como o Coeficiente de Adensamento (Ch); o Coeficiente de Compressibilidade Volumétrica (m_v); a Permeabilidade (Kh); e, o Coeficiente de Compressão Secundária, C_α ; assim a Figura 44 apresenta a forma do gráfico resultante para o Ch ; enquanto a Figura 45 demonstra m_v ; na sequência a Figura 46 e a Figura 47 o C_α .

Figura 44 - Gráfico resultante do Ensaio de Adensamento Radial para o Coeficiente de Adensamento (Ch) referente às Ilha 1 e Ilha 2.

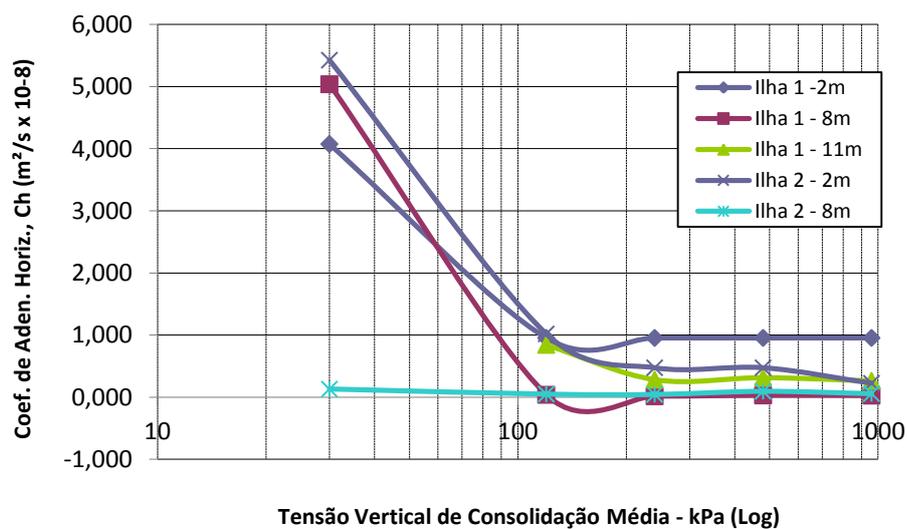


Figura 45 - Gráfico resultante do Ensaio de Adensamento Radial para o Coeficiente de Compressibilidade Volumétrica referente às Ilha 1 e Ilha 2.

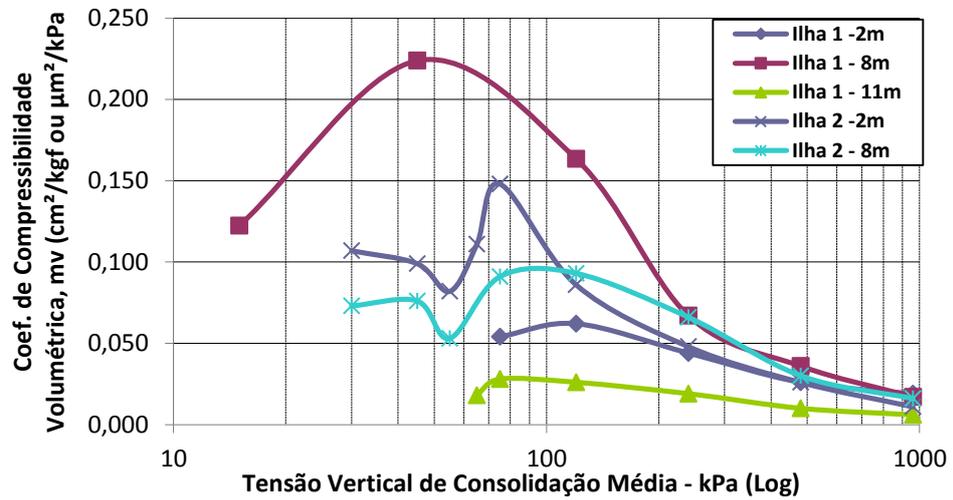


Figura 46 - Gráfico resultante do Ensaio de Adensamento Radial para o Coeficiente de Permeabilidade (K_h) referente às Ilha 1 e Ilha 2.

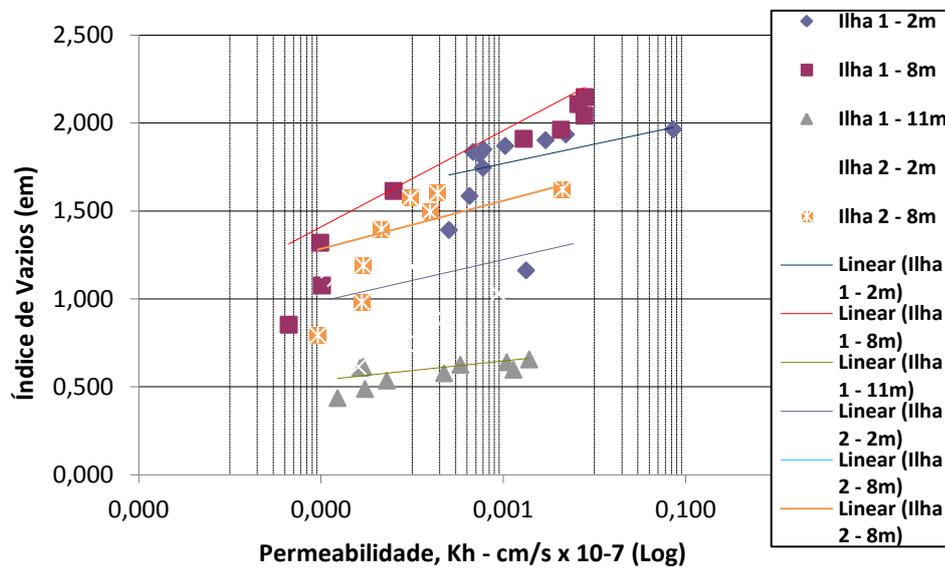
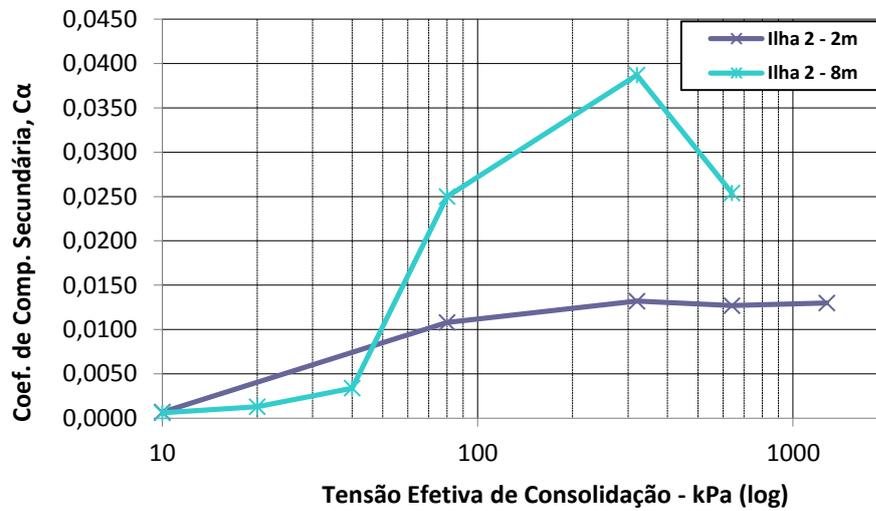


Figura 47 - Gráfico resultante do Ensaio de Adensamento Radial para o Coeficiente de Compressibilidade Secundária ($C\alpha$) referente à Ilha 2.



4.4 HISTÓRICO DE TENSÕES DO SOLO

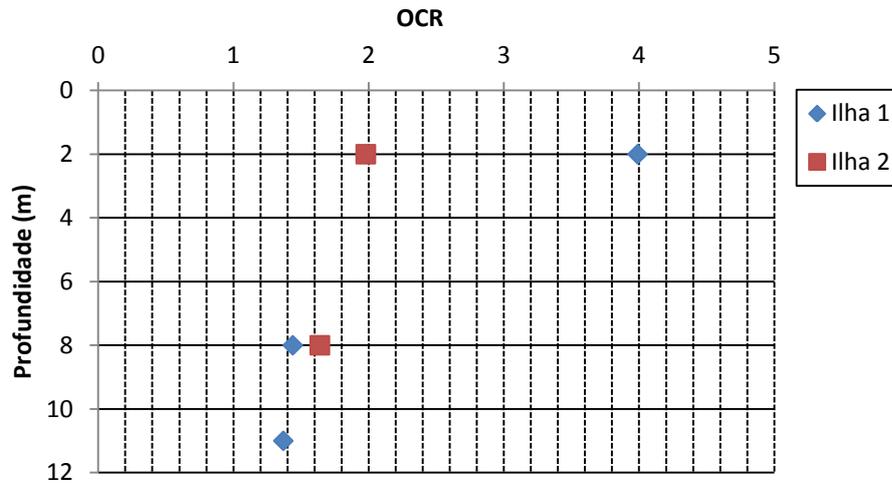
A relação entre a Tensão de Pré-adensamento e a Tensão Efetiva de campo, OCR, proporciona o resultado do histórico de tensões do depósito, assim as Tabelas 31 e 32 apresentam os valores de OCR. A Figura 48 apresenta os resultados de OCR *versus* profundidade (m).

Tabela 31 - Resultado do OCR (Over Consolidation Ratio) para a Ilha 1.

Ilha 1			
Prof. (m)	Tensão Efetiva de Campo (kPa)	Tensão de pré-adenamento (kPa)	OCR
2	23,80	95,00	3,99
8	37,60	54,00	1,44
11	58,40	80,00	1,37

Tabela 32 - Resultado do OCR (Over Consolidation Ratio) para a Ilha 2.

Ilha 2			
Prof. (m)	Tensão Efetiva de Campo (kPa)	Tensão de pré-adenamento (kPa)	OCR
2	33,90	67,00	1,98
8	46,50	76,00	1,63

Figura 48 - Resultados de OCR *versus* profundidade (m).

O depósito estudado encontra-se em estado ligeiramente pré-adensado ou normalmente adensado, com exceção da profundidade de 2 metros na Ilha 1, principalmente por se tratar de uma camada superficial, pode ter sofrido algum ressecamento decorrente a oscilação do lençol freático ou devido à existência de aterros anteriores ou camadas subjacentes que devem ter produzido alguma sobrecarga. Esta característica é típica de depósitos de argilas moles do Recife como foi observado por Coutinho e Ferreira (1988), Ferreira (1982) e Oliveira (1991) em argilas moles do bairro da Madalena e por Bello (2004) no bairro de Dois Irmãos.

4.5 QUALIDADE DAS AMOSTRAS DO PRESENTE ESTUDO

A qualidade das amostras desse trabalho foi verificada sob os critérios sugeridos por Oliveira (2002) e Bello (2011). Na Tabela 33 e 34 apresenta-se os resultados da análise da qualidade das amostras por: Lunne et al (1997) e o de Hong & Onitsuka (1998), sendo ao final determinado uma nota sugerida por Oliveira (2002), que de forma objetiva e direta sinaliza a qualidade da amostra.

Nas Tabelas 35 e 36 apresenta-se o critério de Coutinho (2007) que a partir do critério inicial de Coutinho et al. (1998a) e da modificação sugerida por Oliveira(2002) define quatro faixas de classificação: Muito boa a excelente; Boa a regular; Pobre, e Muito pobre.

Tabela 33 - Resultados da qualidade da amostra da Ilha 1, por Lunne et al (1997) e Hong & Onitsuka (1998).

Classificação - Ilha 1									
Prof. (m)	Crítério Lunne			Crítério Hong & Onitsuka				Nota proposta por Oliveira (2002)	
	OCR	$\Delta e/e$	Classificação	WL	CLR	CLB	SD%	(N) = (100-SD%)/10	Classificação
2	3,99	0,051	Boa a regular	1,696	0,17	0,047	27,14	7,29	Boa
8	1,44	0,071	Boa a regular	1,978	0,27	0,059	22,13	7,79	Boa
11	1,37	0,093	Pobre	1,442	0,09	0,029	32,62	6,74	Regular

A amostra da Ilha 1 a 2 metros de profundidade para o critério Lunne et al (1997) foi classificada como boa a regular, enquanto para o critério das Notas por Oliveira (2002), a partir de Hong & Onitsuka (1998), a amostra foi classificada como boa. Para Coutinho (2007) a amostra foi classificada de boa a regular, porém ressalte-se que o critério de Coutinho (2007) limitou o OCR a 2,5, enquanto para essa amostra específica o OCR foi superior a 3,5, portanto, o critério mais adequado para essa amostra seria o de Notas por Oliveira (2002), a partir de Hong & Onitsuka (1998), classificada como de boa qualidade.

Tabela 34 - Resultados da qualidade da amostra da Ilha 2, por Lunne et al (1997) e Hong & Onitsuka (1998).

Classificação - Ilha 2									
Prof. (m)	Crítério Lunne			Crítério Hong & Onitsuka				Nota proposta por Oliveira (2002)	
	OCR	$\Delta e/e$	Classificação	WL	CLR	CLB	SD%	(N) = (100-SD%)/10	Classificação
2	1,98	0,072	Boa a regular	1,707	0,18	0,039	22,08	7,79	Boa
8	1,64	0,048	Boa a regular	1,897	0,24	0,035	14,60	8,54	Boa

Tabela 35 - Resultados da qualidade da amostra da Ilha 1, por Coutinho (2007).

Classificação - Ilha 1					
Prof. (m)	Crítério Coutinho (1998a)			Crítério Coutinho (2007)	
	OCR	$\Delta e/e$	Classificação	Classificação	
2	3,99	0,051	Boa	Boa a Regular	
8	1,44	0,071	Regular	Boa a Regular	
11	1,37	0,093	Transição R/P	Pobre	

Tabela 36 - Resultados da qualidade da amostra da Ilha 2, por Coutinho (2007).

Classificação - Ilha 2					
Prof. (m)	Crítério Coutinho (1998a)			Crítério Coutinho (2007)	
	OCR	$\Delta e/e$	Classificação	Classificação	
2	1,98	0,072	Regular	Boa a Regular	
8	1,64	0,048	Boa	Muito Boa a Excelente	

A amostra da Ilha 1 para 8 metros de profundidade pelo critério Lunne et al (1997) foi classificada como boa a regular, enquanto para o critério das Notas por Oliveira (2002), a partir de Hong & Onitsuka (1998), a amostra foi classificada como boa. Para Coutinho (2007) a amostra foi classificada de boa a regular.

Para a amostra da Ilha 1 aos 11 metros de profundidade o critério Lunne et al (1997) a classificou como pobre, enquanto para o critério das Notas por Oliveira (2002), a partir de Hong & Onitsuka (1998), a amostra foi classificada como regular. Para Coutinho (2007) a amostra foi como pobre.

Para a amostra da Ilha 2 a 2 metros de profundidade o critério Lunne et al (1997) a classificou como boa a regular, enquanto para o critério das Notas por Oliveira (2002), a partir de Hong & Onitsuka (1998), a amostra foi classificada como boa. Para Coutinho (2007) a amostra foi classificada como boa a regular.

Para a amostra da Ilha 2 a 8 metros de profundidade o critério Lunne et al (1997) a classificou como boa a regular, enquanto para o critério das Notas por Oliveira (2002), a partir de Hong & Onitsuka (1998), a amostra foi classificada como boa. Para Coutinho (2007) a amostra foi classificada como muito boa a excelente.

A qualidade das amostras estudadas pelos dois critérios trazidos por Oliveira (2002) são coerentes, diferindo na classificação. Assim o que é “boa a regular” para o critério Lunne et al (1997) foi classificado como “bom” para Hong & Onitsuka (1998); o que era “pobre” para o critério Lunne et al (1997) foi classificado como “Regular” para Hong & Onitsuka (1998).

Portanto, considerando o critério Lunne et al (1997) muito rigoroso para as argilas do Recife segundo Oliveira (2002), as amostras estudadas foram classificadas de boa a regular, com valores médios, do grau de amolgamento, a partir do critério de Hong & Onitsuka (1998) em torno de 23,71%. De fato este resultado está bem acima do apresentado por Oliveira (2002) para amostras do Sherbrooke, com média aproximada a 11%, pois quanto menores tais índices melhor a qualidade da amostra, mas em conformidade com o tipo de amostrador de 100mm.

O critério de Coutinho (2007) apresentou uma classificação ponderada frente aos critérios de Lunne et al (1997) e das Notas sugeridas por Oliveira (2002), a partir do critério de Hong & Onitsuka (1998). Para a Ilha 1 a amostra de 11 metros foi classificada pelo seu critério como pobre, em acordo com Lunne et al (1997); enquanto as demais amostras foram classificadas de boa a regular, conciliando os critérios de Lunne et al (1997) e Hong & Onitsuka (1998).

Para a Ilha 2 a amostra de 2 metros foi classificada por Coutinho (1997) como boa a regular conciliando a classificação de Lunne et al (1997), boa a regular, com a de Oliveira (2002), a partir do critério de Hong & Onitsuka (1998), classificada como boa. Para a amostra retirada a 8 metros de profundidade, Coutinho (2007) a classificou como de boa a excelente, mais uma vez conciliando os critérios anteriores.

De uma forma geral, pelos três critérios analisados as amostras do estudo foram classificadas como boa a regular, com exceção da amostra da Ilha 1 aos 11 metros que foi classificada por dois critérios como pobre, fato que possivelmente também foi sugerido pela análise da forma da curva de compressibilidade apresentada pela amostra na Figura 42 C.

No que tange ao histórico das tensões enfrentadas pelo depósito estudado os resultados de OCR apresentado foram maiores que 1 e menores que 4, o que de acordo com a classificação de Coutinho e Bello (2005), até a profundidade estudada, o depósito estaria ligeiramente pré-adensado, com exceção a amostra de 2 metros da Ilha 1 que apresenta características de uma crosta ressecada, confirmando estudos anteriores.

4.6 COMPARAÇÃO DAS CURVAS DE COMPRESSIBILIDADE OBTIDAS POR MEIO DE ENSAIOS DE ADENSAMENTO VERTICAL E RADIAL.

A Figura 49, referente à Ilha 1, e a Figura 50 referente a Ilha 2, mostram que as Curvas de Compressibilidade, e_0 versus \log da σ_{vc} , obtidas tanto no ensaio de adensamento vertical como no radial são bem semelhantes e quase que superpostas. Isto se deve as condições de moldagem de corpo de prova serem muito próximas no shelby.

Figura 49 - Curvas de Compressibilidade do solo da Ilha 1.

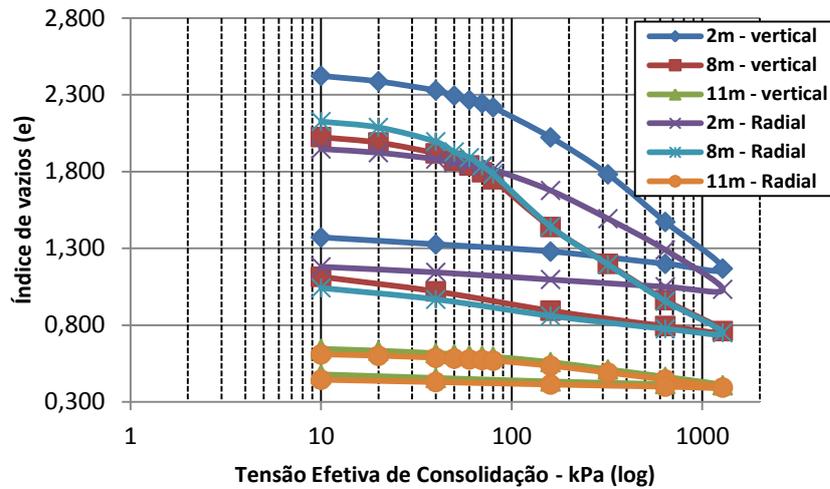
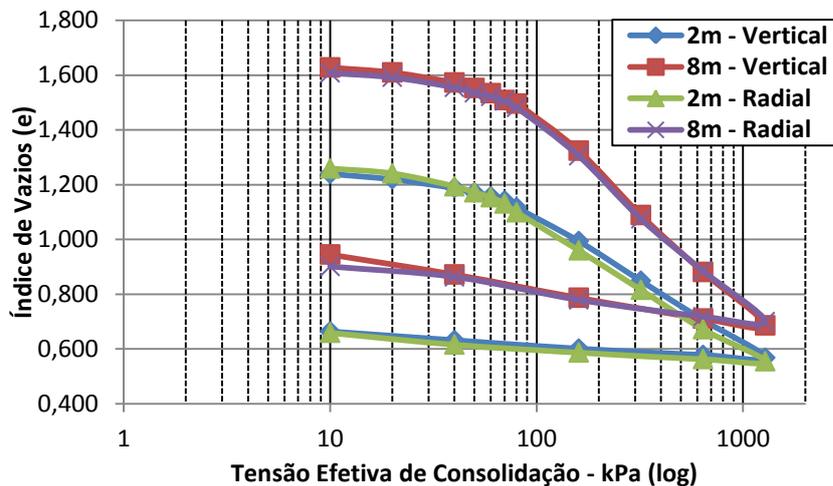


Figura 50 - Curvas de Compressibilidade do solo da Ilha 2.



Observa-se, entretanto, que a curva de compressibilidade da Ilha 1 na profundidade de 2 metros apresentaram-se um pouco diferentes, sendo a uma a exceção das curvas de compressibilidade dos ensaios, principalmente, quanto aos índices de vazios iniciais que as duas amostras apresentaram com diferença entre elas de pouco mais de 27%. O índice de vazios da primeira amostra, aquela que foi cravada primeiramente no material do shelby, servindo como guia para o segundo anel com drenagem radial, apresentou 2,494, enquanto a mais superficial utilizado no ensaio de adensamento radial apresentou “ e_0 ” igual a 1,961.

Sugere-se que a camada mais profunda do shelby pode ter apresentado lentes de um solo permeável, isso explicaria que o índice de compressão dessa amostra tenha o valor de 0,914 frente a amostra utilizada no ensaio de adensamento radial que apresentou o valor de 0,642, ou seja, 42% de diferença. A umidade natural da amostra foi de 54,73%, porém a umidade

final, após a realização do ensaio de adensamento, foi de 73,74% para o ensaio com drenagem vertical, enquanto foi de 62,52% para o ensaio de drenagem radial. O TMO da camada ficou em 10,52%. Lembra-se ainda que o valor de OCR determinado para esta camada foi de 3,99, podendo ter apresentado ressecamento.

Os resultados dos índices de vazios; a tensão de pré-adensamento (σ_{vm}) calculada pelo método de Pacheco Silva e pelo método de Casagrande; o índice de compressibilidade (Cc); e, o índice de expansão (Cs) de cada amostra referente aos ensaios de adensamento vertical e radial, apresentados na Tabela 37 e 38, que demonstram a similaridade dos parâmetros encontrados em ambos os ensaios.

Tabela 37 - Resultados dos índices de vazios, tensão de pré-adensamento, Cc e Cs da Ilha 1.

Ilha 1								
Prof. (m)	2		8		8		11	
	Vertical	Radial	Vertical		Radial		Vertical	Radial
Ensaio			1º trecho	2º trecho	1º trecho	2º trecho		
Trecho Reto								
Índice vazios iniciais (ei)	2,494	1,981	2,074		2,168		0,666	0,623
Pré-adensamento - kPa (Pacheco Silva)	90,00	100,00	45,00		40,00		67,00	75,00
Pré-adensamento - kPa (Casagrande)	95,00	100,00	54,00		48,00		80,00	83,00
Cc - índice compressão	0,914	0,642	0,915	0,728	0,978	0,740	0,159	0,150
Cs - índice expansão	0,105	0,070	0,188		0,151		0,035	0,026

Tabela 38 - Resultados dos índices de vazios, tensão de pré-adensamento, Cc e Cs da Ilha 2.

Ilha 2								
Prof. (m)	2		8		8			
	Vertical	Radial	Vertical		Radial			
Ensaio			1º trecho	2º trecho	1º trecho	2º trecho		
Trecho Reto								
Índice vazios iniciais (ei)	1,277		1,281		1,670		1,637	
Pré-adensamento - kPa (Pacheco Silva)	60,00		44,00		66,00		66,00	
Pré-adensamento - kPa (Casagrande)	67,00		53,00		76,00		69,00	
Cc - índice compressão	0,478	0,677	0,676	0,649	0,677	0,618		
Cs - índice expansão	0,048	0,060	0,129		0,102			

Importante frisar que a amostra de 8 m em ambas as Ilhas apresentam o trecho de compressão virgem não retilíneo, que segundo Ferreira (1982) é encontrado tipicamente nas argilas normalmente adensadas. Este comportamento diferente, segundo Ladd (1973) apud Ferreira (1982) é característico de certos tipos de solos, como argilas muito sensíveis de baixa plasticidade e argilas com Índice de Liquidez alto e altamente plásticas.

Nessa profundidade de 8 metros, em ambas as Ilhas, a curva “ e_0 ” versus $\log \sigma_{vc}$, chamadas curvas de compressibilidade, tanto no ensaio vertical como no adensamento por drenagem radial, quase que se confundem em sua forma. Assim como para a mesma profundidade as amostras da Ilha 2 se apresentam com o mesmo trecho de compressão livre, de onde se conclui que ambos os ensaios chegariam a resultados bem equivalentes.

No que tange aos índices de compressibilidade em função da profundidade, observou-se uma diferença nos resultados do adensamento vertical e do adensamento radial apenas para a profundidade de 2 m, enquanto no restante os resultados são concordantes. Esse fato foi comentado alhures. As amostras da Ilha 1 como da Ilha 2 apresentaram uma tendência para o decréscimo de C_c com a profundidade, o que era de se esperar em face da tensão das terras.

A amostra de 8 metros, tanto para a Ilha 1 como para a Ilha 2, apresentavam, respectivamente, 97 e 99 % de material fino, por isso mesmo os valores de C_c são maiores, confirmando a tese de Bolt (1956) apud Ferreira (1982) que o valor de C_c depende não só da granulometria e da natureza da fração argilosa, como também da composição iônica do fluido intersticial.

A fração argilosa da camada de 2 m da Ilha 1 apresentou 53% de material fino (silte e argila) e a mesma profundidade da Ilha 2 apresentava 71% do mesmo material, mas o índice de compressibilidade, C_c , foi maior para a Ilha 1 (0,915) que para a Ilha 2 (0,478) para o ensaio de adensamento vertical; e, equivalentes para o ensaio de adensamento radial, o que se pode concluir que a compressibilidade não é um fenômeno puramente mecânico, intervindo também fatores físico-químicos, conforme Ferreira (1982).

Os resultados obtidos através do método de Pacheco Silva (1953) para o cálculo da Tensão de Pré-adensamento (σ_{vm}) se mostraram de 15 a 20% inferiores aos valores encontrados pelo método Casagrande.

A amostra completamente amolgada em laboratório apresentou decréscimo na tensão de pré-adensamento da ordem de 34% quando comparado pelo método Casagrande; e, quase o triplo quando comparado pelo método de Pacheco Silva (1953).

No que se refere ao Coeficiente de Adensamento (C_v e C_h), assim como o Coeficiente de Permeabilidade (K_v e K_h) seus valores decrescem com a profundidade, com valores na ordem de 10^{-8} .

A forma da curva de C_v apresentada está de acordo com o que foi encontrado por Oliveira (2002). Ademais, C_v e C_h apresentam semelhança nas formas das curvas tanto para o ensaio de adensamento vertical como para o ensaio de adensamento radial. A relação C_h/C_v na região de compressão virgem apresentou C_h sempre maior que C_v variando de 1,03 a 11,17 com média de 3,94, com a relação decrescendo com a profundidade. Destaca-se que a Ilha 1 aos 8 metros apresentou relação C_h/C_v de 1,29 a 3,79, enquanto a camada da Ilha 2 também aos 8 metros de profundidade apresentou relação C_h/C_v de 1,76 a 3,76.

A relação encontrada entre as metodologias aplicadas ao cálculo de coeficiente de adensamento foi, para o ensaio de adensamento vertical, Ilha 1, $C_v(\sqrt{t})/C_v(\log t) = 0,63$ a $1,56$ com média de $1,10$ e a Ilha 2 de $0,50$ a $1,74$, com média $1,12$.

O resultado encontrado converge aos encontrados por Ferreira (1982) em seu trabalho para o depósito argiloso no Clube Internacional do Recife a relação $C_v(\sqrt{t})/C_v(\log t) = 0,86$ a $2,93$; com média de $1,56$. Enquanto Coutinho (1976) encontrou para argila da Baixada Fluminense a relação $C_v(\sqrt{t})/C_v(\log t) = 0,9$ a $2,50$ com média de $1,50$.

Importante se faz destacar que a determinação do valor de C_v e C_h são influenciados pelo histórico de tensões do solo, procedimento do ensaio e pelo método de cálculo.

As Figuras 38 e 45 trazem os resultados em forma de gráfico do coeficiente de compressibilidade volumétrica, m_v , que em ambos os ensaios, o seu máximo valor estão situados após a pressão de pré-adensamento. Na Figura 51 apresenta-se a curva invertida do coeficiente de compressibilidade volumétrica, chamado Módulo Edométrico para a Ilha 1,

enquanto a Figura 52 faz referência aos resultados da Ilha 2, cuja ambas as formas se assemelham as apresentada por Oliveira (2002).

Figura 51 - Curva do Módulo Edométrico das amostras da Ilha 1.

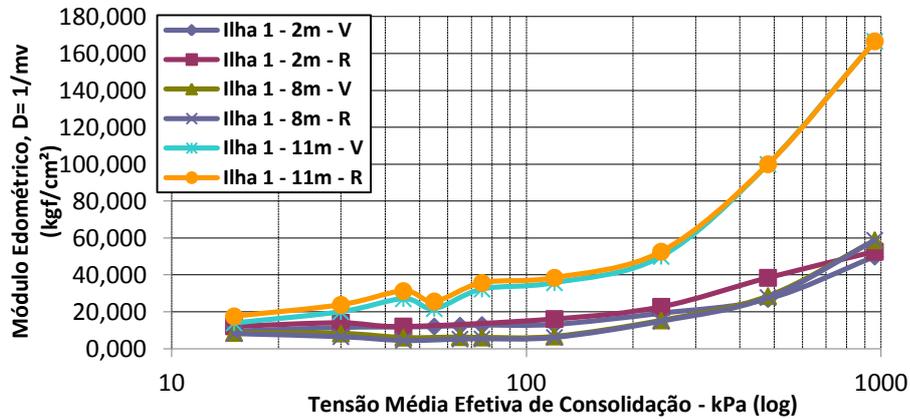
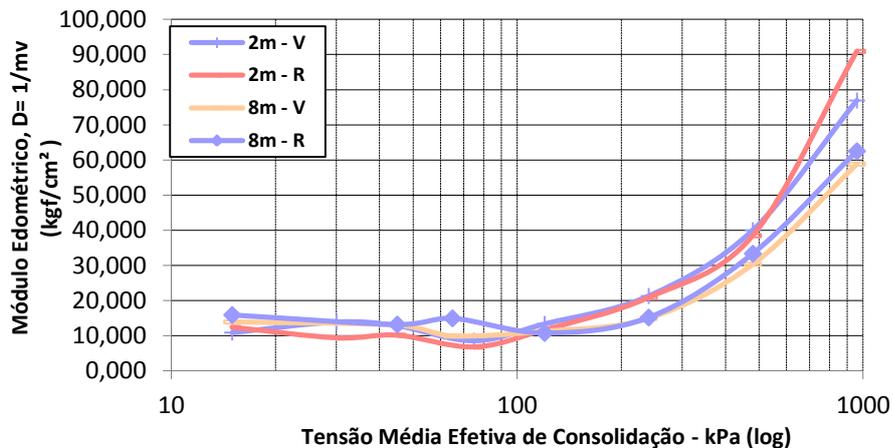


Figura 52 - Curva do Módulo Edométrico das amostras da Ilha 2.



No que tange aos valores de permeabilidade, K_v e K_h , em função do índice de vazios médios, e_m , observou-se que a permeabilidade decresce com a com a profundidade e com o incremento de carga. As Figuras 53 e 54 trazem, respectivamente, a permeabilidade referente aos solos da Ilha 1 e 2.

Importante a reflexão que detalhes geológicos como fissuras e materiais orgânicos podem aumentar a permeabilidade da argila de várias ordens de grandezas, exigindo amostras de grandes dimensões para a obtenção de resultados confiáveis.

Figura 53 - Linha de Tendência da permeabilidade da Ilha 1.

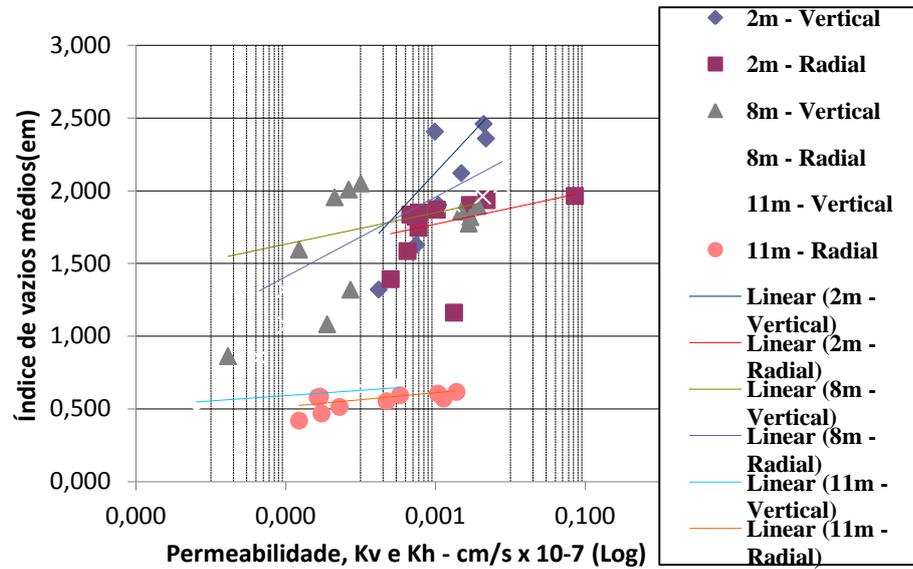
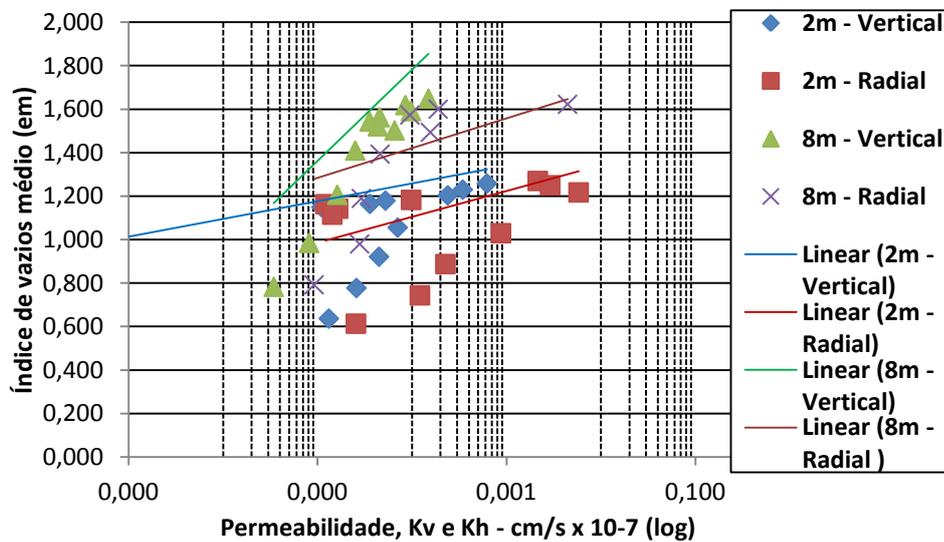


Figura 54 - Linha de Tendência da permeabilidade da Ilha 2.

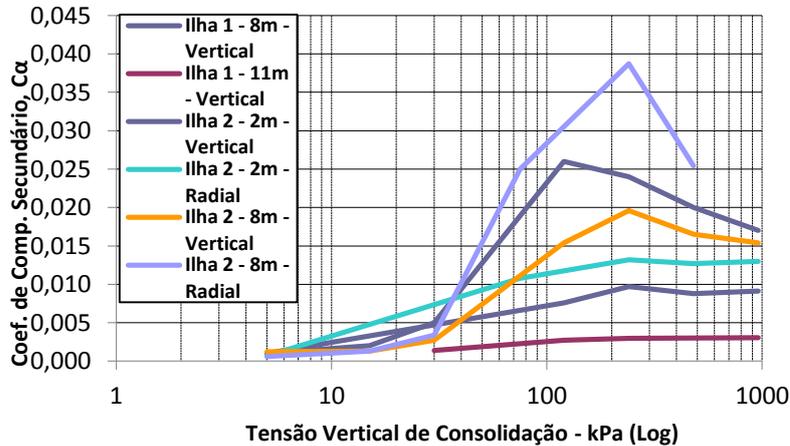


O Coeficiente de Compressão Secundária, $C\alpha$, notou-se que as amostras estudadas necessitariam de mais tempo sob uma tensão efetiva de consolidação constante para a determinação da compressão secundária. A Figura 55 apresenta a curva de compressão secundária para as Ilha 1 e 2, a partir dos 8 metros de profundidade.

Observou-se ainda que os valores de $C\alpha$ obtidos nos ensaios de adensamento realizados em corpos de prova de amostras de boa qualidade em função da tensão efetiva atinge um máximo

em tensões de $2,5$ a $4,2 \times \sigma_{vm}$, decrescendo em seguida, com o aumento de tensão, divergindo assim dos resultados de Ferreira (1982) que atingiram o máximo no intervalo de $1,5$ a $2,5 \times \sigma_{vm}$.

Figura 55 - Curvas da Compressão Secundária – Ilha 1 e 2.



4.7 RECONSTRUÇÃO DA CURVA DE COMPRESSIBILIDADE DA AMOSTRA AMOLGADA EM LABORATÓRIO.

No presente estudo foi amolgada em laboratório uma amostra da Ilha 2 a profundidade de 8 metros para comparar seu comportamento e características com os resultados da amostra indeformada, da mesma Ilha e profundidade, classificada de boa a excelente pelo critério de Coutinho (2007), classificada como de boa qualidade pelo método Hong & Onitsuka (1998) e obteve a nota 8,52 por Oliveira (2002), essa curva de compressibilidade está representada na Figura 34B.

A amostra completamente amolgada em laboratório teve sua curva de compressibilidade apresentada na Figura 35. Observa-se a correção dessa curva de compressibilidade da amostra amolgada pelo método proposto por Oliveira (2002) e por Schmertmann (1955). O primeiro se utiliza de um ábaco construído com dados de curvas equivalentes às de boa qualidade experimentais, que não estão livres de amolgamentos mesmo que muito insipientes, estimando uma curva de compressibilidade de boa qualidade para a amostra estudada.

O método de Schmertmann (1955) tem o objetivo de obter a curva de compressibilidade de campo, cujo procedimento seguiu as seguintes etapas: 1) a partir do índice de vazios iniciais

foi traçada uma reta horizontal até atingir a tensão vertical efetiva de campo no valor de 46 kPa; 2) foi traçada uma reta paralela ao trecho de descarregamento do ensaio passando pelos pontos do índice de vazios iniciais e da tensão efetiva de campo; 3) foi adotada uma tensão de pré-adensamento e verificada pela variação do índice de vazios entre a curva do ensaio e a de reconstrução até obter uma variação simétrica do $\Delta e \times \log \sigma$. O valor obtido foi de 76 kPa; 4) foi traçada uma reta entre este ponto e o ponto correspondente a 42% do índice de vazios iniciais, conforme Figura 56.

A Metodologia do ábaco, proposta por Oliveira (2002), foi adotar o índice de vazios iniciais da amostra natural como informação de entrada e de acordo com um banco de dados acumulados de ensaios com amostras de boa qualidade criar uma curva de compressibilidade estimada. Dessa forma, a proposta do ábaco não substitui uma investigação geotécnica detalhada, mas a complementa ou aperfeiçoa. A curva de $e \times \log \sigma$, obtida pelo ábaco proposto por Oliveira (2002) encontra-se na Figura 57.

A Figura 59 apresenta as curvas de variação do índice de vazios com a tensão vertical de consolidação obtida a partir de dados experimentais em amostras de boa qualidade, amolgadas em laboratório, reconstituída as condições de campo pelo método de Schmertmann (1955) e pelo ábaco proposto por Oliveira (2002).

Figura 56 – Curva de reconstrução de campo pelo método de Schmertmann (1955) para a profundidade de 8 m.

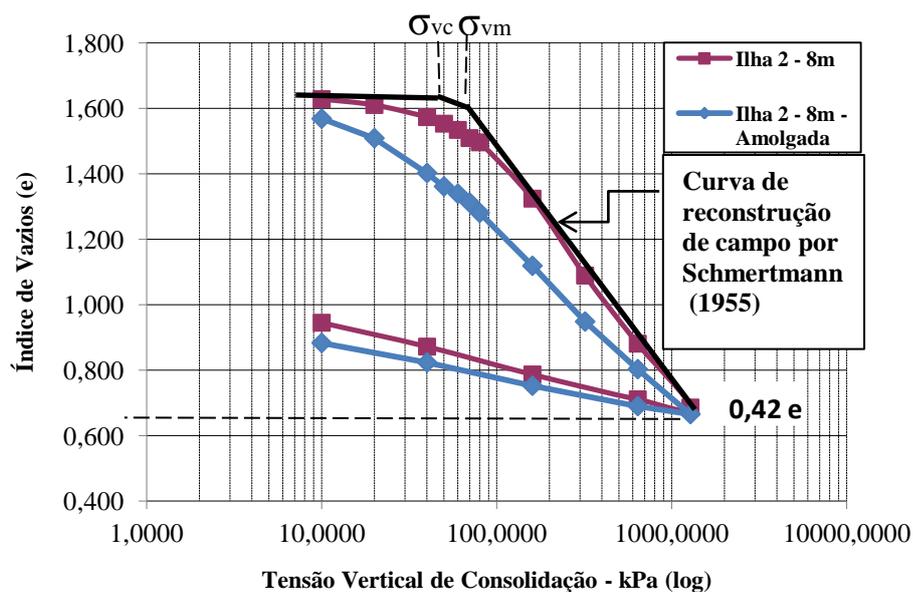


Figura 57 – Curvas experimentais de amostras de boa qualidade, amolgada em laboratório e estimada pelo ábaco proposto por Oliveira (2002) para a profundidade de 8 m.

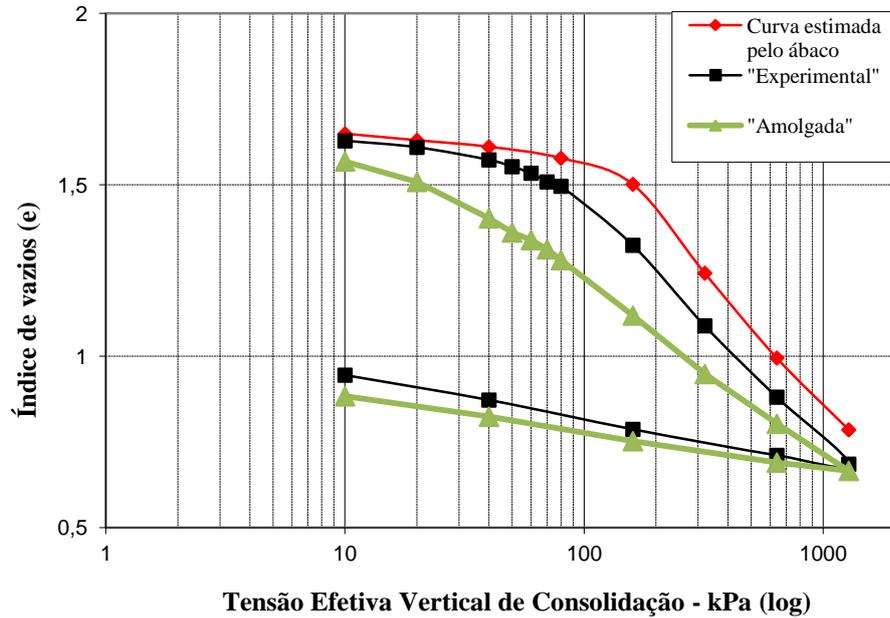
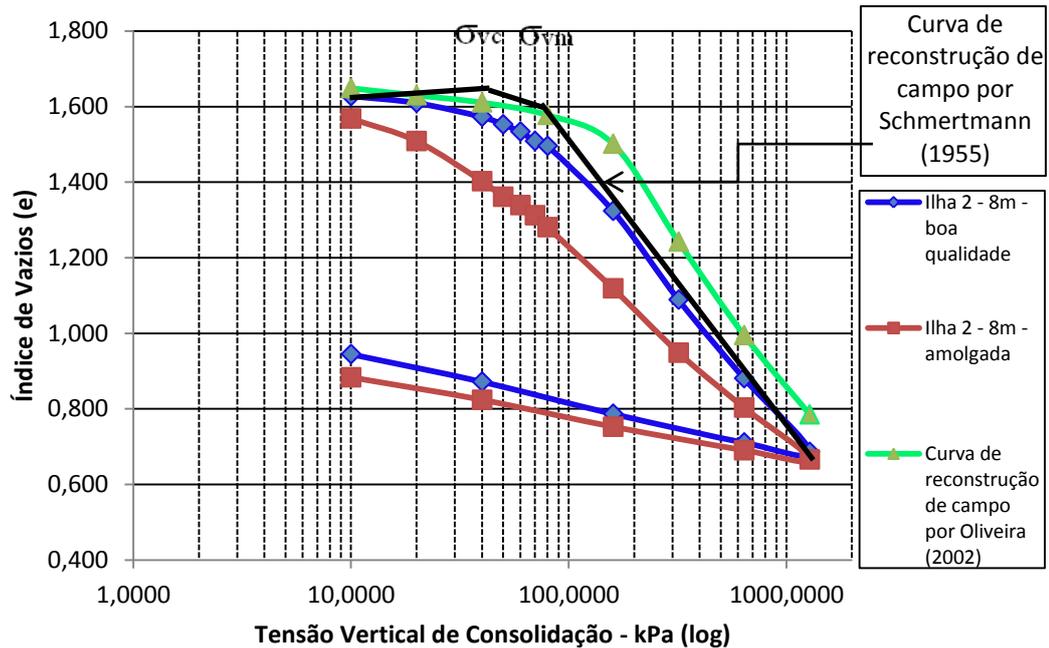


Figura 58 – Curvas e $\times \text{Log } \sigma$ experimentais das amostras de boa qualidade, amolgadas em laboratório, reconstituição pelo método de Schmertmann (1955) e estimada pelo ábaco proposto por Oliveira (2002).



Observa-se que o efeito do amolgamento diminui a tensão de pré-adensamento, consequentemente, a correção de parâmetros de compressibilidade se faz necessária, pois pode influenciar no projeto de cálculo dos recalques por adensamento em determinada obra. Assim, a proposta de correção pelo ábaco por Oliveira (2002) disponibiliza ao projetista duas curvas: a experimental e a estimada, de modo que poderia decidir qual seria utilizada.

Portanto, além de se analisar qualitativamente a amostra é preciso uma correção quantitativa nos parâmetros de compressibilidade, principalmente no que tange a tensão de pré-adensamento e o índice de compressibilidade.

Jamiolkowski et al. (1985) apud Bello (2011) citam que a correção aumenta tipicamente o valor do índice de compressão, C_c , entre 10 e 20%, enquanto Oliveira (2002) para as argilas estudadas encontrou a faixa, para amostras de qualidade, entre 8 e 16%.

Oliveira (2002) também propôs a correção da tensão de pré-adensamento em função do Grau de Amolgamento ($SD\%$), por Hong e Onitsuka (1998). Assim, apresentou a expressão onde a tensão de pré-adensamento do campo (p_{YF}) é igual ao somatório da tensão de pré-adensamento da amostra natural (p_{CL}) com o produto de 84% do Grau de Amolgamento ($SD\%$), $p_{YF} = p_{CL} + 0,84.SD\%$.

No caso em estudo, o critério de Hong e Onitsuka (1998) classificou a amostra da Ilha 2 aos 8 metros com $SD\%$ igual a 14,60%, quase próximo aos 11% de média encontrados por Oliveira (2002) para amostras do Sherbrooke (Lembra-se que quanto menor essa porcentagem, melhor a qualidade da amostra), conforme Tabela 39. Ademais, o critério de Coutinho (2007) classificou essa mesma amostra com a qualidade de boa a excelente e Oliveira (2002) como boa.

Tabela 39 - Resultados do Grau de Amolgamento encontrados por Oliveira (2002) para o bairro da Madalena.

Resultados pelo Critério Hong e Onitsuka (1998)	SD%
Presente Tese: Ilha 2 - 8 metros .	14,60
Referência Oliveira (2002) para amostras do amostrador Sherbrooke no bairro da Madalena	11,00

Dessa forma, conforme Tabelas 40 e 41, trata-se da análise de uma amostra de qualidade considerável, cuja tensão de pré-adensamento ficou em torno de 76 kPa, concluindo-se que a tensão de pré-adensamento do campo estaria em torno de 88,26 kPa, calculado pela equação de correção da tensão de pré-adensamento do campo proposta por Oliveira (2002), um acréscimo de quase 16% de correção. Oliveira (2002) comenta que a correção da tensão de pré-adensamento obtidas no ensaio e corrigidas varia entre 12 e 47% do

valor obtido experimentalmente, enquanto Bello (2011) apresenta as correções médias de 25% para mais e faixa de 8 a 39%.

Tabela 40 - Proposta de correção da tensão de pré-adensamento por Oliveira (2002) e resultado para a presente Tese.

Proposta de correção da tensão de pré-adensamento por Oliveira (2002)	$p_{YF} = p_{CL} + 0,84 SD\%$	
Tensão de pré-adensamento para amostra de boa qualidade na presente Tese referente a Ilha 2 - 8m	p_{CL}	76 kPa
Correção da σ_{vm} proposta por Oliveira (2002)	p_{YF}	88,26 kPa

Tabela 41 - Resultado da variação da correção da tensão de pré-adensamento da presente Tese e intervalos encontrados por Oliveira (2002) e Bello (2011).

Varição na correção da tensão de pré-adensamento	%
Presente Tese	16%
Oliveira (2002) para o bairro da Madalena	12 - 47%
Bello (2011) para Suape	8 - 39%

Com a tensão de pré-adensamento corrigida, os valores dos recalques medidos e estimados se aproximam, ou seja, a correção faz com que ocorra uma diminuição do recalque estimado, levando a deformações menores, pois parte deste recalque estaria situado agora no trecho pré-adensado. No caso da estimativa sem a correção, leva-se o projeto a condição de normalmente adensada.

4.8 ANÁLISE DOS RESULTADOS DA PESQUISA COM OS VALORES UTILIZADOS NO PROJETO DA VIA DE TRÁFEGO.

As amostras utilizadas na presente pesquisa foram as mesmas que serviram de base para projeto de uma via (perimetral) no bairro de Chão de Estrelas, nas marginais do Rio Beberibe, na cidade do Recife. Os resultados da pesquisa anterior foi apresentado no Capítulo 2, item 2.7 desta pesquisa e serão aqui comparados.

4.8.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE LIMITE DE LIQUIDEZ E PLASTICIDADE SEM E COM SECAGEM PRÉVIA DO MATERIAL.

A Tabela 42 apresenta valores do Limite de Liquidez e de Plasticidade com secagem prévia pela NBR 6459/84 e NBR 7180/84 utilizado no projeto da via perimetral e sem secagem prévia e com temperatura de 65°C até constância de peso.

Tabela 42 - Resultados do WL e WP sem e com secagem prévia para as Ilhas 1 e 2.

	Sem secagem prévia	Com secagem prévia								
	Ilha 1	Ilha 1	Ilha 2	Ilha 2	Ilha 1	Ilha 1	Ilha 2	Ilha 2	Ilha 1	Ilha 1
Prof.(m)	2				8				11	
WL (%)	49,70	38,00	50,90	55,00	95,00	68,00	78,80	65,00	27,70	25,00
WP (%)	36,90	26,00	41,29	32,00	57,88	41,00	49,61	37,00	17,49	16,00
IP (%)	12,80	12,00	9,61	23,00	37,12	27,00	29,19	28,00	10,21	9,00

Observa-se que os ensaios de caracterização de Limite de Liquidez sem secagem prévia para a Ilha 1 variam a maior por cerca de 10,8% a 39.71% comparado aos valores extraídos com secagem prévia do material. No caso do Limite de Plasticidade o procedimento sem secagem prévia do material apresentou variação de 9% a 34% a maior comparado o procedimento com secagem prévia, acompanhando o Limite de Liquidez.

Na Ilha 2 a profundidade de 2 m apresentou o WL, sem secagem prévia, de quase 8% inferior ao apresentado com secagem prévia, o que não era esperado. Observe-se que a umidade natural desta amostra era inicialmente de 53,90%. Para a profundidade de 8 metros o WL variou um pouco mais de 21%. O Limite de Plasticidade (WP) variou de 12 a 29%.

Assim, o Limite de Liquidez em ambas as Ilhas apresentaram diferença nos procedimentos dentro do intervalo de 10 a 40%, enquanto o Limite de Plasticidade apresentou variação de 9 a 34%. Portanto, a Figura 59 e 60 apresenta que o IP do material sofreu pouca influência do procedimento utilizado na obtenção desses parâmetros, variando de 4 a 38%, excluindo-se a Ilha 2 a 2 metros.

Os valores dessa pesquisa estão abaixo da variação apresentada por Ferreira (1986) que comparou seus dados com os de Teixeira (1972) apresentando uma variação de 12,2 – 93,20 % à maior do sem secagem prévia para o com secagem prévia.

Figura 59 - Gráfico Índice de Plasticidade versus Profundidade (m) para Ilha 1

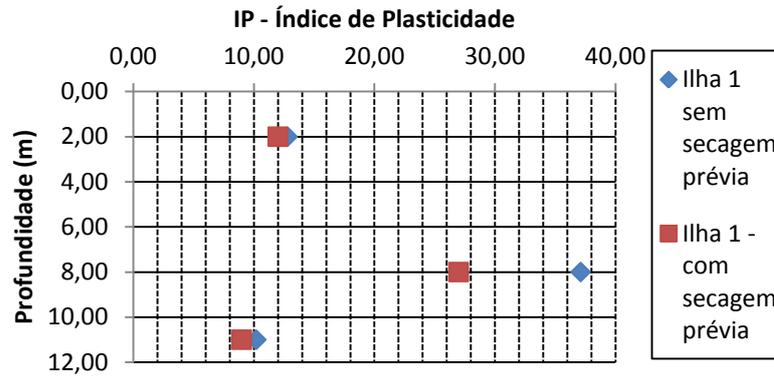
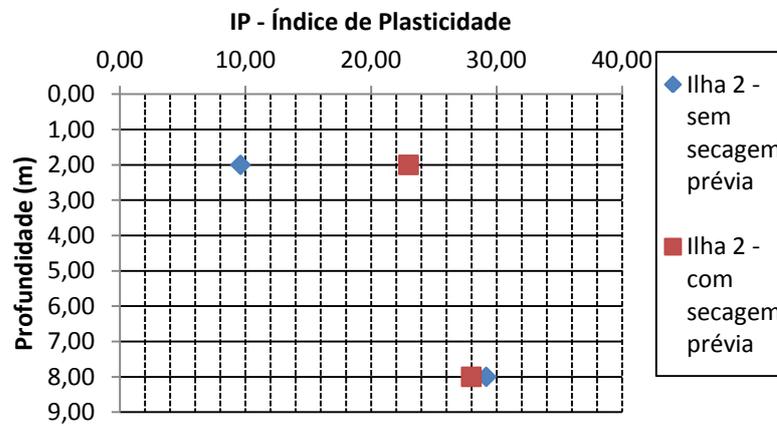


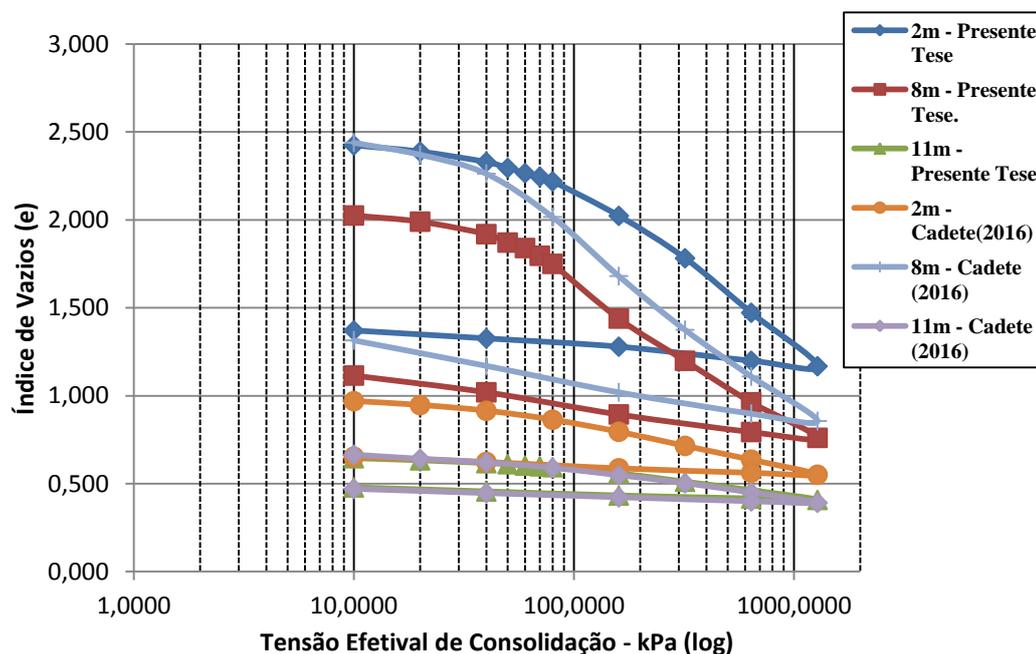
Figura 60 - Gráfico Índice de Plasticidade versus Profundidade (m) para Ilha 2.



4.8.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS CURVAS DE COMPRESSIBILIDADE

Na Figura 61 apresenta as Curvas de Compressibilidade da Ilha 1 obtidas em Cadete (2016) conjuntamente com as Curvas de Compressibilidade encontradas na Presente Tese. As Curvas de Compressibilidade da Ilha 2 estão representadas na Figura 62, cuja legenda obedece o mesmo padrão.

Figura 61 - Curvas de Compressibilidade da Ilha 1.



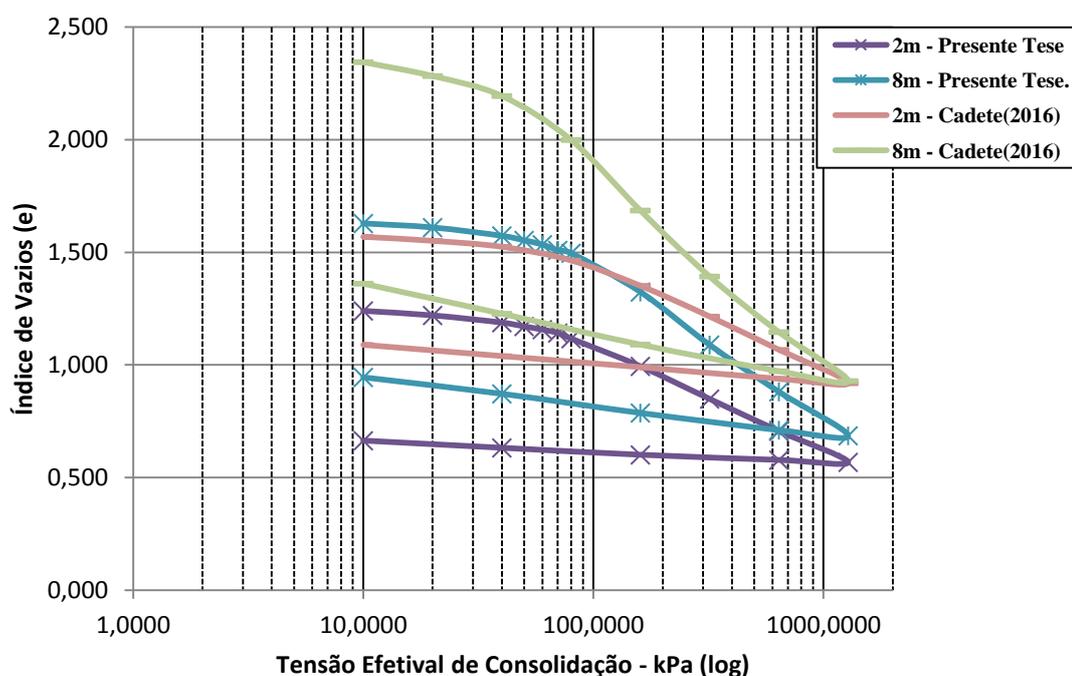
.Fonte: Cadete (2016)

Cadete (2016) informa que o estudo realizado na Ilha 1 aos 2 metros partiu de um índice de vazios iniciais de 1,006, cuja forma da curva de compressibilidade, mesmo em escala maiores, aparenta qualidade inferior ao da amostra utilizada nesse trabalho, avaliada pelo critério de Lunne et al (1997) como regular e por Oliveira (2002), a partir de Hong & Onitsuka (1998), como boa.

As curvas da Ilha 1 aos 8 metros em ambos os ensaios realizados aparentam certa similaridade nas suas formas. No caso da forma das curvas de compressibilidade da Ilha 1 aos 11 metros de profundidade quase que se confundem, tornando até difícil diferenciá-las. Lembra-se que essa amostra foi classificada como pobre por Lunne et al (1997) e Coutinho (2007) e como regular pelo critério de Hong & Onitsuka (1998), mas em todo caso se mostram com comportamentos semelhantes. Importante frisar que Oliveira (2002) afirma que o amolgamento aumenta com a profundidade. Nesse sentido, aparentemente houve concordância entre as duas amostras do mesmo shelby.

No que tange a Ilha 2, as curvas de compressibilidade apresentadas em ambos os resultados se mostraram semelhantes. Observa-se que as amostras utilizadas nesse trabalho foram classificadas como de boa qualidade em quase todos os critérios utilizados.

Figura 62 - Curvas de Compressibilidade da Ilha 2.



Fonte: Cadete (2016).

A amostra de 8 metros de profundidade na Ilha 2 apresentou cerca de 99% de materiais finos (argila e siltes) e foi classificada pelo critério de qualidade de Coutinho (2007) como muito boa a excelente. O trecho de compressibilidade virgem da curva de compressibilidade também não apresentou a forma retilínea em nenhum dos dois ensaios realizados.

Na Tabela 43 apresenta-se os valores de Umidade natural (W_n), peso específico úmido (γ_t), Índice de vazios iniciais (e_0), Índice de Compressibilidade (C_c), e Tensão de Pré-adensamento (σ_{vm}), respectivamente, do ensaio anterior contido no Certificado UFPE nº 900/2014 e os resultados referentes a esse estudo no bairro de Chão de Estrelas.

Tabela 43 - Parâmetros compilados dos ensaios atuais e anteriores, no mesmo local do presente estudo por Cadete (2016)

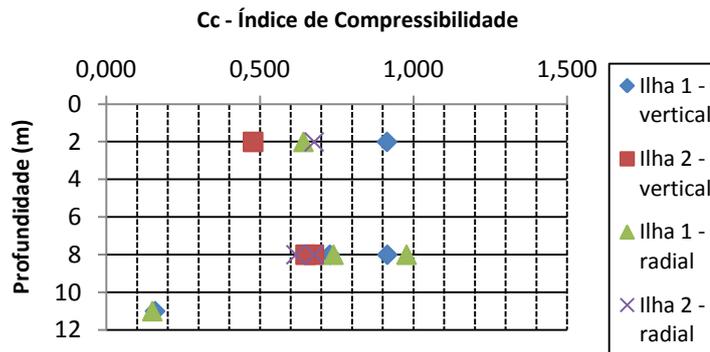
Amostra	Prof. (m)	Cadete (2016)	Autor	Cadete (2016)	Autor	Cadete (2016)	Autor	Cadete (2016)	Autor	Cadete (2016)	Autor
		Wn (%)	Wn (%)	γ_t (kN/m ³)	γ_t (kN/m ³)	e_0	e_0	Cc	Cc	σ_{vm} (kPa)	σ_{vm} (kPa)
ILHA - 1	2	41	54,73	17,850	10,790	1,006	2,494	0,26	0,914	42	95
ILHA - 1	8	90,2	79,84	14,110	15,220	2,492	2,074	1,08	0,915 0,728	40	54
ILHA - 1	11	24,6	22,72	19,340	19,440	0,701	0,666	0,17	0,159	45	80
ILHA - 2	2	53,9	49,50	15,320	16,110	1,603	1,277	0,47	0,478	70	67
ILHA - 2	8	85,7	67,61	14,050	15,560	2,423	1,670	1,00	0,676 0,649	50	76

No que tange a Ilha 1 para a profundidade de 2m: A umidade inicial anterior foi cerca de 34% o valor da amostra usada nesse estudo e que ficou guardada em câmara úmida. Ademais, a amostra anterior apresentou baixo índice de vazios e índice de compressibilidade em relação aos estudos atuais. Destaca-se ainda que pelo formato da curva de compressibilidade da amostra da pesquisa anterior, Figura 62, e a baixa tensão de pré-adensamento apresentada, possivelmente, essa amostra tenha sofrido algum amolgamento.

Para a Ilha 1 na profundidade de 8m: a amostra desse estudo foi classificada como de boa qualidade por todos os três critérios avaliados e apresentou-se compatíveis com o estudo anterior. Destaca-se apenas que a umidade inicial da amostra anterior apresentou-se bem superior aos da pesquisa atual, isso era de se esperar, pois a amostra usada nesse estudo pode ter sofrido alguma perda de umidade durante o período que esteve em camada úmida. Ademais, lembra-se que a camada de 4m anterior a desta amostragem nos 8 metros tratava-se de praticamente uma turfa com 442% de umidade, 62% de matéria orgânica e Cc de 4,36.

Importante destacar ainda que o trecho de compressibilidade virgem da curva de compressibilidade aos 8 metros não se apresentou de forma retilínea, característica típica de argilas normalmente adensadas segundo Ferreira (1982), ou seja, demonstrou variação de dois trechos, com o valor do índice de compressibilidade do primeiro trecho superior ao segundo trecho, como era de se esperar, já que o Cc diminui com a profundidade, conforme Figura 63, inferindo-se assim o ligeiro pré-adensamento da argila estudada em acordo com o $OCR > 1$ encontrado, Tabela 33.

Figura 63 - Gráfico Índice de Compressibilidade versus profundidade (m) para as Ilhas 1 e 2.



A amostra de 11m ainda na Ilha 1 foi classificada como de qualidade regular pela Nota proposta por Oliveira (2002) e como pobre por Coutinho (2007) e Lunne et al (1997), porém manteve resultados similares aos da amostra analisada anteriormente por Cadete (2016). Destaca-se apenas uma diferença considerável na tensão de pré-adensamento, o que era de se esperar já que nesse estudo, justamente na região anterior a curva de compressão virgem, foi utilizado incrementos de carga menores à carga anterior, de forma que foi possível resultados mais precisos da tensão de pré-adensamento naquela região.

No que se refere a Ilha 2, a amostra de 2 metros apresentou resultados de umidade, peso específico, índices de vazios e compressibilidade, e tensão de pré-adensamento bem compatíveis entre os estudos da pesquisa dessa dissertação e os ensaios realizados anteriormente. Observa-se que a qualidade dessa amostra foi classificada como boa a regular por todos os critérios estudados.

A amostra de 8 metros de profundidade na Ilha 2 apresentou Cc anterior por Cadete (2016) com uma diferença de cerca de 48% a maior que a do primeiro trecho da amostra deste estudo. A tensão de pré-adensamento deste estudo, realizado com incrementos de carga menores que a carga anterior, resultou em um valor de σ_{vm} cerca de 52% superior ao valor encontrado na pesquisa anterior.

Destaca-se ainda que a umidade inicial da amostra proveniente do estudo anterior apresentou-se bem superior aos da pesquisa atual, isso era de se esperar, já que o shelby, mesmo acondicionado em câmara úmida, pode ter sofrido alguma perda de umidade ou ter sofrido alguma espécie de amolgamento.

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISAS

5.1 CONCLUSÕES

O objetivo principal dessa pesquisa foi analisar a compressibilidade de uma argila orgânica mole na cidade do Recife, através de resultados obtidos nos ensaios de laboratório (caracterização e adensamento vertical e radial); e, em especial, a influência da secagem prévia na obtenção da umidade das amostras; a qualidade das amostras pelos critérios de Lunne et al (1997), Hong e Onitsuka (1998), Oliveira (2002) e Coutinho (2007); a proposição da correção da curva de compressibilidade de campo pelo método de Schmertmann (1955) e a curva estimada pelo ábaco proposto por Oliveira (2002) com base em dados de amostras de argilas de boa qualidade pelo amostrador Sherbrooke; a comparação dos resultados e parâmetros de compressibilidade encontrados na presente Tese com os resultados já catalogados para o mesmo local oriundos de estudo anterior e para a planície do Recife; a determinação mais precisa da tensão de pré-adensamento; e, a análise dos parâmetros de compressibilidade de uma amostra completamente amolgada em laboratório com outra amostra indeformada de boa qualidade de mesma referência e profundidade. Assim, os resultados da presente Tese contribuem para o acervo da literatura sobre o tema, apresentando suas principais conclusões na sequência.

Primeiramente, o método de obtenção do Limite de Liquidez e de Plasticidade sem secagem prévia do material influencia nos seus resultados. O limite de liquidez encontrado variou dentro do intervalo de 10 a 40%, faixa menor que a encontrada pela literatura.

O solo estudado apresentou características de ligeiramente pré-adensado.

A qualidade das amostras foram classificadas como boa e regular por três critérios (Hong e Onitsuka (1998), Oliveira (2002) e Coutinho (2007)). A exceção foi a amostra da Ilha 1 aos

11 metros de profundidade classificada como pobre por dois critérios (Lunne et al (1997) e Coutinho (2007)).

As formas das curvas de compressibilidades apresentadas nos ensaios de adensamento, vertical e radial, foram semelhantes.

Os resultados dos parâmetros de compressibilidade da Ilha 1 indicaram tratar-se uma argila orgânica mole com características diferentes, uma de 7,56 a 9,80 metros e a outra de 9,80 a 12,19 metros, sem, no entanto poder definir claramente os limites.

A camada aos 8 metros contém cerca de 97% de argila, enquanto aos 11 metros apenas 54%. A umidade inicial dessa amostra foi de cerca de 3,5 vezes superior a umidade da camada de 11 metros. As texturas se mostram diferentes também, sendo a amostra de 8 metros mais escura que a amostra de 11 metros, conforme Figura 27. O peso específico úmido da argila a 11 metros de profundidade foi superior cerca de 28% com relação a amostra de 8 metros, assim como o índice de vazios dessa amostra aos 11 metros foi 3 vezes inferior ao da camada de 8 metros de profundidade.

A relação Ch/C_v apresentou média de 3,94. O cálculo do coeficiente de adensamento, C_v e C_h , são passíveis de erros de concepção, o que dificulta uma padronização, obrigatória para análises comparativas de resultados. Ocorre que esses resultados devem ser analisados a luz de outros parâmetros, mas não isoladamente, conforme destaca a literatura.

O coeficiente de compressibilidade volumétrica, m_v , demonstrou a ocorrência do seu máximo valor logo após a pressão de pré-adensamento em ambos os ensaios.

O cálculo da tensão de pré-adensamento por Pacheco Silva (1953) revelou resultados inferiores de 15 a 20% em relação aos valores obtidos pelo método de Casagrande.

A amostra completamente amolgada em laboratório, referente a Ilha 2 aos 8 metros de profundidade, apresentou decréscimo na tensão de pré-adensamento da ordem de 34% quando comparado à amostra indeformada de boa qualidade pelo método Casagrande; e, quase três vezes inferior quando comparado pelo método de Pacheco Silva (1953), confirmando a indicação da literatura.

A argila estudada provavelmente necessitaria de mais tempo sob altas tensões para a obtenção de melhores parâmetros de realização da curva de compressão secundária. Ou seja, o tempo em torno de 24 horas por carregamento foi aparentemente curto para uma definição mais concisa do C_{α} .

No que se refere aos valores de tensão de pré-adensamento encontrados na pesquisa anterior responsável pelos dados de projeto viário no bairro de Chão de Estrelas foram apresentados resultados bem inferiores aos encontrados por essa Dissertação. O que era de se esperar, já que nesse estudo foram utilizados incrementos de cargas menores à carga anterior no trecho anterior à curva de compressão virgem, de modo a definir com maior precisão a tensão de pré-adensamento.

O valor da tensão de pré-adensamento da Ilha 2 aos 8 metros de profundidade, 50 kPa, obtido em Cadete (2016) foi igual ao valor da tensão de pré-adensamento encontrada nesse estudo para a amostra completamente amolgada em laboratório calculada pelo método de Casagrande, conforme Tabela 28, de modo que o resultado mais preciso da tensão de pré-adensamento seja o encontrado nesse estudo, 76 kPa.

A partir da análise da qualidade das amostras usadas nesse trabalho, observou-se que toda amostra sempre apresentará um certo grau de amolgamento, pelas condições de operação de obtenção da sondagem, diâmetro, acondicionamento, transporte e estocagem.

O próprio manuseio no laboratório, os procedimentos dos ensaios e a forma como se executa os ensaios podem gerar o amolgamento da amostra, levando a erros de interpretação quanto ao solo estudado.

As correções das curvas de compressibilidade apresentadas demonstraram a necessidade de adequação da tensão de pré-adensamento, mesmo em amostras classificadas como de boa qualidade.

5.2 SUGESTÕES PARA PRÓXIMAS PESQUISAS

Tendo em vista o desenvolvimento do assunto aqui abordado, com base nas análises e observações realizadas no presente trabalho, em face da importância dos depósitos de argila mole da cidade do Recife, recomenda-se o aprofundamento nos seguintes temas:

- 1) Ampliar o modelo de 24 horas por tensão aplicada ao corpo de prova de forma a acompanhar claramente o término da compressão primária e o registro dos pontos sugeridos para a definição da linha de compressão secundária.
- 2) Ampliar os estudos sobre possíveis perdas de material nas amostras de corpos de prova dos ensaios de adensamento radial.
- 3) Ampliar o estudo das amostras amolgadas para compreender melhor os efeitos causados pelo fenômeno e assim evitá-lo.
- 4) Estudar a deformação de compatibilidade dos solos moles com a aplicação de geogrelhas.
- 5) Estudar a viabilidade de parâmetros de velocidades da onda com o uso de ultrassom para servir como referência de qualidade das amostras estudadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, M.S.S. Aterros sobre solos moles: da concepção à avaliação do desempenho. Rio de Janeiro, Editora UFRJ, 1996.
- AMORIM JR., W.M. Contribuição Ao Estudo das Argilas Orgânicas de Pernambuco. 1975. Dissertação de Mestrado – COPPE/ UFRJ, Rio de Janeiro, 1975.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Amostras de Solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização – Método de ensaio - NBR 6457. Rio de Janeiro, 1986.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da Massa Específica – Método de ensaio - NBR 6508. Rio de Janeiro, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Solo – Determinação do Limite de Liquidez – Método de ensaio - NBR 6459, Rio de Janeiro, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Solo – Determinação de Limite de Plasticidade – Método de ensaio - NBR 7180. Rio de Janeiro, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Solo – Ensaio de Adensamento Unidimensional – Método de ensaio - NBR 12007. Rio de Janeiro, 1990.
- BELLO, M.I.M. Estudo de Ruptura em Aterros sobre Solos Moles: Aterro do Galpão Localizado na BR 101 – PE. 1997. Dissertação de Mestrado – UFPE. Pernambuco, 2004.
- BELLO, M.I.M. Parâmetros Geotécnicos e Banco de Dados de Argilas Moles: O Caso de Suape. 2011. Tese de Doutorado – UFPE. Pernambuco, 2011.
- CADETE, A.N.M. Avaliação da Resistência Não Drenada de uma Argila Orgânica Mole do Bairro de Chão de Estrelas em Recife-PE. 2016. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. No Prelo.
- CAPUTO, H.P. Mecânica dos Solos e suas aplicações. Rio de Janeiro, Editora JCEditora, 1998.
- COELHO, L.B.M. Considerações a Respeito de um Ensaio Alternativo para a Determinação de Adensamento Horizontal dos Solos. 1997. Dissertação de Mestrado – COPPE/ UFRJ. Rio de Janeiro, 1997.
- COUTINHO, R.Q. Características de Adensamento com Drenagem Vertical e Radial em Argila Mole da Baixada Fluminense. 1976. Dissertação de Mestrado – COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 1976.
- COUTINHO, R.Q. Aterro Experimental Instrumentado Levado à Ruptura Sobre Solos Orgânicos – Argilas Moles da Barragem de Juturnaíba. 1986. Tese D. Sc. – COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 1986.
- COUTINHO, R.Q.; BELLO, M.I.M. 2005. Aterro sobre Solo Mole. Geotecnia no Nordeste. Capítulo 3. Pernambuco, Editora UFPE, 2005.
- COUTINHO, R.Q. & FERREIRA, S.R.M. Argilas orgânicas do Recife - Estudos de caracterização e de Compressibilidade em Seis Depósitos. In: Simp. Depósitos Quaternários das Baixadas Litorâneas brasileiras - SIDEQUA, 1988 v. 01. p. 3.35-3.54. 1988b.
- COUTINHO, R.Q.; OLIVEIRA, J.T.R. & OLIVEIRA, A.T.J.. Estudo Quantitativo da Qualidade de Amostras de Argilas Moles Brasileiras - Recife e Rio de Janeiro. In: XI COBRAMSEG - Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, ABMS. Brasília, v. 02. p. 927-936. 1998a.
- DER (Brasil). Projeto de Terraplanagem:IP-DE-Q00/001. São Paulo, 2006.
- DNER(Brasil). Projeto de Aterro sobre Solos Moles para Obras Viárias: Procedimento. São Paulo, 1998.

FERREIRA, S.R.M. Compressibilidade de uma Argila Mole do Recife. 1982. Dissertação de Mestrado – COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 1982.

FERREIRA, S.R.M.; AMORIM JR, W.N. e COUTINHO, R.Q. Argila Orgânica do Recife – Contribuição ao Banco de Dados. Anais do VIII Cong. Bras. Mec. Solos e Eng. De Fund. Porto Alegre, vol. I, p. 183 – 197. 1986.

FERREIRA, S.R.M. & COUTINHO, R.Q. Quantificação do Efeito do Amolgamento nas Características de Compressibilidade de Argila Mole - Rio de Janeiro e Recife. In: Simp. Depósitos Quaternários das Baixadas Litorâneas Brasileiras - SIDEQUA, v. 01. p. 3.55-3.69. 1988.

GUSMÃO FILHO, J. A. A experiência em encostas ocupadas do Recife: Integração técnica, institucional e comunitária. Rev. IG. São Paulo, Volume Especial, 1995.

MELO, M.P.B. Caracterização Geotécnica e Análise do Comportamento de Aterros sobre Solos Moles para Construção do Novo Acesso do Complexo de SUAPE. 2011. Dissertação de Mestrado – UNICAP. Pernambuco, 2011.

OLIVEIRA, J.T.R. Ensaios Piezocones em um depósito de Argila Mole na Cidade do Recife. 1991. Dissertação de Mestrado - COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 1991.

OLIVEIRA, J.T.R. A Influência da Qualidade da Amostra no Comportamento Tensão-Deformação – Resistência de Argilas Moles. 2002. Tese de Doutorado - COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2002.

OLIVEIRA, M.S. Solos da planície do Recife– uma visão panorâmica. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso – UNICAP. Pernambuco, 2015.

OLIVEIRA, O.C. Contribuição à Obtenção de Resistência de Argilas Moles por ensaio in situ. 1997. Dissertação de Mestrado – COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 1997.

ORTIGÃO, J.A.R. Contribuição ao Estudo das Propriedades Geotécnicas de um Depósito de Argila Mole da Baixada Fluminense. 1975. Dissertação de Mestrado – COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 1975.

PACHECO Silva, F. Shearing Strength of a Soft Clay Deposit near Rio de Janeiro. Geotechnique, v.3, pp. 300-306. 1953.

TEIXEIRA, D.C.L. Características Geotécnicas dos Depósitos de Argila Mole do Recife à Influência da Matéria Orgânica. 1972. Dissertação de Mestrado – COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 1972.

VARGAS, M. Introdução à mecânica dos solos. São Paulo, Editora USP, 1997.