

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA  
CAMPUS ALEGRETE**

**FLÁVIO VIEIRA DA SILVA JUNIOR**

**EFEITO DA QUALIDADE DE AMOSTRAS DE ARGILAS MOLES NA PREVISÃO  
DE RECALQUES**

**Alegrete  
2015**

**FLÁVIO VIEIRA DA SILVA JUNIOR**

**EFEITO DA QUALIDADE DE AMOSTRAS DE ARGILAS MOLES NA PREVISÃO  
DE RECALQUES**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia Civil  
da Universidade Federal do Pampa, como  
requisito parcial para obtenção do Título  
de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Rodrigo André Klamt

**Alegrete  
2015**

**FLÁVIO VIEIRA DA SILVA JUNIOR**

**EFEITO DA QUALIDADE DE AMOSTRAS DE ARGILAS MOLES NA PREVISÃO  
DE RECALQUES**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia Civil  
da Universidade Federal do Pampa, como  
requisito parcial para obtenção do Título  
de Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 08 de Julho de 2015.

Banca examinadora:



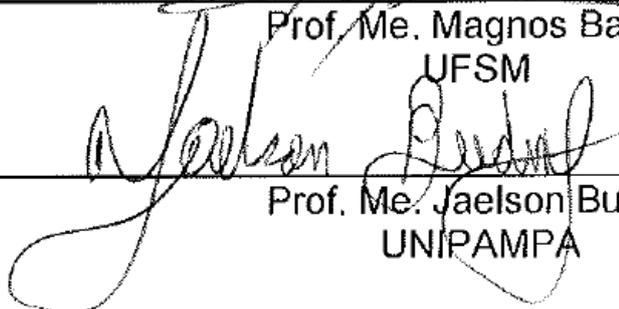
---

Prof. Me. Rodrigo André Klamt  
Orientador  
UNIPAMPA



---

Prof. Me. Magnos Baroni  
UFSM



---

Prof. Me. Jaelson Budny  
UNIPAMPA

## AGRADECIMENTO

Aos meus Pais Flávio e Elenilza, por me proporcionarem os melhores anos da minha vida.

Aos meus Padrinhos Marcos e Marcia, por me apoiarem em um ano de dúvidas e dificuldade, ao qual foi essencial para que eu estivesse aqui hoje.

Ao Professor Magnos Baroni, por me orientar em diversos trabalhos ao longo da graduação. Encarar comigo o desafio que foi executar essa Monografia. E os momentos de descontração que foram essenciais.

Ao Professor Jaelson Budny que sempre esteve à disposição para auxiliar quando necessário.

Ao Professor Rodrigo Klamt por aceitar assumir minha orientação em um momento de transição.

A Professora Adriana Salbego por ter sido a primeira a acreditar no meu potencial me proporcionando meu primeiro contato com a área de pesquisa.

Aos Técnicos de Laboratório Cleber Millani, Jarbas Dalcin e Juliano Duarte pela atenção desprendida a mim nesses anos em que me fiz presente no laboratório.

Ao colega Wagner por me receber no laboratório e me auxiliar no começo da minha vida científica na universidade.

Aos Colegas Deividi e Helena, pela parceria ao longo do curso, as madrugadas de estudos e trabalhos, bem como todos os momentos de descontração.

A Gabriela Casarotto, pela paciência, carinho e amor desprendidos a mim ao longo desses 4 anos.

A todos os colegas da UNIPAMPA que dividiram comigo momentos marcantes ao longo da minha vida acadêmica, onde destacam-se os jantares de longas conversas.

A minha Família por me apoiarem e acreditarem no meu desenvolvimento pessoal e acadêmico.

## RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo estimar e confrontar valores de recalque primário, secundário e total, obtidos através da aplicação de equações e utilização de parâmetros de compressibilidade de diferentes amostras de argila mole extraídas em depósito localizado na Zona Oeste do Rio de Janeiro. Na previsão dos recalques foi considerado um aterro de cota fixa igual à 3m, nível de água na superfície do terreno e o efeito da submersão do aterro. As amostras encontram-se, em diferentes graus de perturbação, sendo divididas em Indeformadas, Amolgadas e Corrigidas. Foi realizado ensaio de adensamento oedométrico em todas as amostras, para a retirada dos parâmetros necessários para a previsão do recalque. Os ensaios em amostras indeformadas foram realizados pelo laboratório de Geotecnia da COPPE – UFRJ, já os ensaios em amostras amolgadas foram realizados no laboratório de Geotecnia e Pavimentação da UNIPAMPA. Foram utilizados, os métodos de Lunne et. al. (2002) e Coutinho (2007), para classificar as amostras analisadas. O método de correção da qualidade de amostras utilizado é o proposto por Coutinho (2007), que utiliza gráficos com ajuste logarítmico para corrigir as Tensões de Pré-Adensamento e Coeficiente de Recompressão das amostras. Através das análises de recalque total foi possível reafirmar que a qualidade tem influência direta na previsão dos recalques e que quanto maior for o grau de amolgamento das amostras, maior será a magnitude dos recalques estimados.

*Palavras Chaves: Classificação da Qualidade das Amostras, Correção da Qualidade das Amostras, Previsão de Recalques.*

## **ABSTRACT**

The project aims to estimate and confront the values of primary, secondary and total settlement. The values were obtained by the application of equations and the utilization of parameters of compressibility of different samples, which were extracted from a place located in the west zone of Rio de Janeiro. In the estimation of the settlement, the embankment was considered of being at 3 meters, the water was located in the ground level, and the effect of the embankment's submergence was also contemplated. The samples are in different levels of perturbation, and they are divided in: undisturbed, disturbed, and corrected. The densification test was realized in all samples in order to obtain the necessarily parameters to preview the settlement. The undisturbed tests were made by the COPPE's Geotechnical Laboratory – UFRJ, while the tests in the disturbed samples were made in the UNIPAMPA's Geotechnical and Paving Laboratory. It was utilized the Lunne et. al. (2002) and Coutinho (2007) methods to classify the analyzed samples. The method to correct the quality of the samples proposed by Coutinho (2007) was applied in this project. This method utilizes logarithmic graphics to correct the pre-consolidation tensions and the recompression coefficient of the samples. From the total settlement's analyzes, it was possible to affirm that the quality directly influences in the settlement's prevision, and that the larger the deformation of the samples, the greater the estimated settlement magnitude.

**Key words:** Classification of the samples' quality, correction of the samples' quality, settlement's prevision.

## LISTA DE SIMBOLOS / ABREVIATURA / SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

$H_o$  – Altura da Subcamada

$h_{at}$  – Altura do aterro

Cc – Índice de Compressão

COPPE – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia

CR – Razão de Compressão

Cs – Índice de Recompressão

CV – Coeficiente de Adensamento Vertical

$e_0$  – Índice de Vazios Inicial da Amostra

$evm$  – Índice de Vazios para a Tensão de Pré-Adensamento

$ey$  – Índice de Vazios para a Tensão de Escoamento da Amostra

ID – Índice de Desestruturação da Amostra

kPa – QuiloPascal

NBR – Normas Brasileiras

NSPT – Resistência a Penetração

OCR – Razão de Pré-Adensamento

$\gamma_{at}$  – Peso Específico do Aterro

$\gamma_{nat}$  – Peso Específico Natural do Solo

$\gamma_{sub}$  – Peso Específico Submerso do Aterro

$r_n$  – Recalque da Camada de Argila da Interação Anterior (Altura do Aterro Submerso)

SPT – Standard Penetration Test

UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

UNIPAMPA – Universidade Federal do Pampa

$\Delta h$  – Recalque Primário

$\Delta h_{sec}$  – Recalque Secundário

$\sigma'_{vm}$  – Tensão de Pré-Adensamento

$\sigma'_{vy}$  – Tensão de Escoamento da Amostra

$\varepsilon_{v0}$  – Deformação Volumétrica Inicial da Amostra

$\varepsilon_{vmax}$  – Deformação Volumétrica Máxima da Amostra

$\sigma'_{v0}$  – Tensão Efetiva Inicial da Amostra

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Perfil Geotécnico do Depósito do SENAC – Barra – Rio de Janeiro .....	22
Figura 2 – Curva Típica de Compressão Oedométrica .....	24
Figura 3 – Tubo Shelby .....	31
Figura 4 – Classificação da Qualidade de Amostras.....	34
Figura 5 – Resultados de típicos de ensaios de adensamento edométrico em laboratório .....	36
Figura 6 – Representação dos trechos característicos da curva de adensamento edométrico proposta por Shmertmann. ....	37
Figura 7 – Correção da Qualidade de Amostras .....	39
Figura 8 – Curva CR X $\varepsilon_{v0}$ .....	40
Figura 9 – Classificação da Qualidade da Amostra e Correção da Tensão de Pré - Adensamento .....	40
Figura 10 – Processo de Amolgamento das Amostras .....	46
Figura 11 – Equipamento de Ensaio de Adensamento Unidimensional.....	48
Figura 12 – Equipamento de Confinamento da Amostra para Ensaio.....	48
Figura 13 – Perfil Típico do Aterro.....	50
Figura 14 – Tensão Vertical x Índice de Vazios – Profundidade 2,25 m .....	52
Figura 15 – Tensão Vertical x Índice de Vazios – Profundidade 2,75m .....	53
Figura 16 – Tensão Vertical x Índice de Vazios – Profundidade 4,25m .....	53
Figura 17 – Tensão Vertical x Índice de Vazios – Profundidade 5,25m .....	54
Figura 18 – Tensão Vertical x Índice de Vazios – Profundidade 8,75m .....	54
Figura 19 – Tensão Vertical x Índice de Vazios – Profundidade 11,25m .....	55
Figura 20 – Tensão Vertical x Índice de Vazios – Profundidade 2,75m .....	56
Figura 21 – Tensão Vertical x Índice de Vazios – Profundidade 5,25m .....	56
Figura 22 – Tensão Vertical x Índice de Vazios – Profundidade 8,75m .....	57
Figura 23 – Tensão Vertical x Índice de Vazios – Profundidade 11,25m .....	57
Figura 24 – Correção da Tensão de Pré-Adensamento.....	60
Figura 25 – Correção da Razão de Compressão .....	61
Figura 26 – Amostra Amolgada – Altura Final do Aterro .....	65
Figura 27 – Amostra Indeformada – Altura Final do Aterro .....	65
Figura 28 – Amostra Corrigida – Altura Final do Aterro.....	66
Figura 29 – Amostra Amolgada – Submersão do Aterro .....	66

Figura 30 – Amostra Indeformada – Submersão do Aterro.....	67
Figura 31 – Amostra Corrigida – Submersão do Aterro .....	67
Figura 32 – Comparação dos Recalques para as Amostras Indeformadas, Amolgadas e Corrigidas .....	68

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Tabela para anotações das alturas da célula em determinados intervalos de tempo. ....	25
Tabela 2 – Critério para a Classificação da Qualidade de Amostras .....	32
Tabela 3 – Critério para a Classificação da Qualidade de Amostras .....	33
Tabela 4 – Parâmetros de Caracterização do Solo .....	47
Tabela 5 – Classificação das Amostras .....	59
Tabela 6 – Correção das Amostras .....	61
Tabela 7 – Calculo do Recalque Primário – Amostra Indeformada.....	62
Tabela 8 – Calculo do Recalque Secundário – Amostra Indeformada .....	62
Tabela 9 – Calculo do Recalque Total – Amostra Indeformada .....	62
Tabela 10 – Calculo do Recalque Primário – Amostra Amolgada.....	63
Tabela 11 – Calculo do Recalque Secundário – Amostra Amolgada .....	63
Tabela 12 – Calculo do Recalque Total – Amostra Amolgada .....	63
Tabela 13 – Calculo do Recalque Primário – Amostra Corrigida .....	64
Tabela 14 – Calculo do Recalque Secundário – Amostra Corrigida.....	64
Tabela 15 – Calculo do Recalque Total – Amostra Corrigida.....	64

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Características Gerais da Argila Mole. ....	21
--	----

## Sumário

1. INTRODUÇÃO .....	16
1.1 Contextualização do tema de pesquisa .....	16
1.2 Definições do problema e da questão de pesquisa.....	17
1.3 Objetivos .....	18
1.3.1 Objetivo geral.....	18
1.3.2 Objetivos específicos .....	18
1.4 Justificativa .....	19
1.5 Estrutura do trabalho.....	19
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	20
2.1 Solos Moles .....	20
2.2 Locais de Ocorrência de Solos Moles .....	21
2.3 Ensaio Para Caracterização de Solos Moles .....	23
2.3.1 Ensaio de Laboratório .....	23
2.3.1.1 Caracterização Física dos Solos.....	23
2.3.1.2 Ensaio de Adensamento Oedométrico .....	23
2.3.1.2.1 Método de Taylor para a determinação do Coeficiente de Adensamento .....	26
2.3.1.2.2 Método de Casagrande para a determinação do Coeficiente de Adensamento.....	27
2.3.1.2.3 Determinação do Índice de Compressão .....	28
2.3.1.2.4 Determinação da tensão de Pré-Adensamento .....	28
2.3.1.2.4.1 Processo de Casagrande .....	28
2.3.1.2.4.2 Processo de Pacheco Silva .....	29
2.3.2 Ensaio de Campo.....	29
2.4 Metodologia de Classificação da Qualidade das amostras.....	29
2.4.1 Influência da Qualidade de Amostras nos Parâmetros de Compressibilidade do Solo .....	30

2.4.1.1 Retirada de Amostras Indeformadas .....	31
2.4.2 Método de Lunne et al. Para a Classificação da Qualidade de Amostras .....	31
2.4.3 Método de Coutinho Para a Classificação da Qualidade de Amostras.....	32
2.4.4 Método de Futai Para a Classificação da Qualidade de Amostras .....	33
2.5 Metodologia de Correção da Curva de Adensamento Oedométrico .....	35
2.5.1 Método de Schmertmann Para a Correção da Curva de Adensamento ....	35
2.5.2 Método de Coutinho Para a Correção da Curva de Adensamento .....	39
2.5.3 Método de Futai Para a Correção da Tensão de Pré-adensamento .....	41
2.6 Previsão de Recalques .....	42
2.6.1 Tipos de Recalque .....	42
2.6.2 Recalque Imediato .....	42
2.6.3 Recalque por Adensamento Primário .....	43
2.6.4 Recalque por Adensamento Secundário .....	44
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	45
3.1 Materiais .....	45
3.1.1 Solo.....	45
3.2 Métodos .....	46
3.2.1 Ensaio de Caracterização do Solo .....	46
3.2.2 Ensaio de Adensamento Oedométrico.....	47
3.2.3 Método de Lunne et al. para Classificação da Qualidade da Amostra .....	49
3.2.4 Método de Coutinho para Classificação da Qualidade da Amostra .....	49
3.2.7 Método de Coutinho para Correção dos Parâmetros de Adensamento.....	49
3.2.8 Previsão de Recalques .....	49
4. DISCUSSÕES E RESULTADOS .....	52
4.1 Curvas de Amostras Indeformadas.....	52
4.2 Curvas de Amostras Amolgadas.....	55
4.3 Classificação das Amostras .....	58

4.4 Correção dos Parâmetros das Amostras Amolgadas .....	60
4.5 Cálculo dos Recalques para Amostras Indeformadas, Amolgadas e Corrigidas .....	61
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS ....	70
5.1 Considerações Finais.....	70
5.2 Sugestões Para Futuros Trabalhos.....	71
REFERÊNCIAS.....	72

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 Contextualização do tema de pesquisa

A capacidade do Homem de modificar o seu ambiente vem, dia após dia, intensificando o processo de urbanização. Devido à falta de conhecimento das características geológicas-geotécnicas do meio físico e à falta de planejamento no momento das ocupações urbanas, inúmeros problemas geotécnicos e socioambientais tais como a erosão, assoreamento, inundações, recalques e outros são vividos com frequência pela população brasileira. Estudos realizados sobre os problemas geológico-geotécnicos decorrentes da expansão urbana desordenada indicam que a ocupação de áreas impróprias resulta em impactos que podem afetar a paisagem urbana e a qualidade de vida da população (BELLO, 2011).

O Brasil possui inúmeras cidades situadas junto à costa, na planície costeira ou às margens de grandes rios. Ao longo de toda a costa brasileira são habitualmente encontrados depósitos de solos moles compressíveis. Na cidade do Recife, mais de 50% da área metropolitana é constituída por depósitos desta natureza (BELLO, 2011).

Depósitos de solos moles são frequentemente encontrados em todo o Brasil, sendo mais comum na área litorânea, mas também ocorrem em ambientes lacustres, não marinhos. As argilas do Rio de Janeiro e da Baixada Santista são frequentemente estudadas devido à ocupação mais antiga e extensa, porém, também há estudos nas regiões Sul, Centro Oeste e Nordeste do país (FUTAI, 2010).

A Barra da Tijuca, bairro localizado na Zona Oeste da cidade do Rio de Janeiro, é atualmente a nova fronteira de ocupação do solo nesta cidade, e vários depósitos de argila muito mole e compressível são encontrados nestes locais (LACERDA; ALMEIDA, 1995; ALMEIDA et al., 2008; 2010).

A necessidade de se obter parâmetros geotécnicos representativos do subsolo tem levado ao desenvolvimento de diferentes técnicas de ensaios de laboratório e de campo. Diversas vezes é preferencial que se execute ensaios "in situ", para estimar-se a variação espacial do depósito, evitando assim as dificuldades decorrentes do amolgamento dos solos no processo de amostragem para os ensaios de laboratório (BARONI, 2010).

O amolgamento de uma amostra diminui a permeabilidade, causando assim a diminuição do coeficiente de adensamento vertical, acarretando em uma avaliação equivocada da evolução dos recalques com o tempo, logo os prazos previstos para a estabilização, com base em amostras amolgadas, podem ser maiores (BELLO, 2011).

A partir das afirmativas anteriores é possível destacar a necessidade atual de amostras indeformadas para a retirada de parâmetros reais que serão utilizados em projetos geotécnicos. Sendo assim o presente trabalho irá utilizar curvas de amostras indeformadas retiradas da Zona Oeste do Rio de Janeiro, para aplicar correções matemáticas expostas por Coutinho (2007) em amostras amolgadas a fim de utilizar a curva corrigida para retirar parâmetros para serem utilizados em projetos geotécnicos.

## **1.2 Definições do problema e da questão de pesquisa**

Com a economia brasileira aquecida na última década e a migração cada vez maior do homem do campo para a cidade, a demanda por obras civis em grandes centros urbanos veem crescendo. Faz-se então necessária a construção em áreas cujos solos apresentam baixa capacidade de suporte e alta compressibilidade. Esses depósitos são denominados solos moles ou compressíveis e são comumente encontrados ao longo de toda a costa brasileira, particularmente no estado do Rio de Janeiro (ALMEIDA; MARQUES, 2010; ALMEIDA et al., 2008; COUTINHO, 2008; SCHNAID; ODEBRECHT, 2012).

Através de ensaios de laboratório é possível se obter parâmetros necessários para projetos de aterros sobre solos moles, fundações, barragens e etc. Os ensaios de laboratório permitem condições de drenagem controlada, e as trajetórias de tensões durante o ensaio são conhecidas, bem como é possível identificar a natureza do solo. Porém como principal desvantagem destaca-se o amolgamento do solo, no caso de solos argilosos. Tal problema pode mascarar os resultados obtidos em projetos, podendo a sobrecarga não ser suficiente para os recalques calculados, bem como o tempo para ocorrência do recalque ser menor do que a de projeto (ALMEIDA; MARQUES, 2010; BARONI, 2010; BELLO, 2011).

Desta forma, a pesquisa buscará classificar a qualidade das curvas (índice de vazios x tensão efetiva) de amostras de argila moles, obtidas a partir da realização

de ensaios de adensamento oedométrico. Posteriormente todas as amostras que se mostrarem de má qualidade serão corrigidas através de métodos propostos na literatura.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo geral**

Realizar a previsão de recalques primários, secundário e totais, a partir de parâmetros de compressibilidade obtidos em amostras de argila mole, nas condições indeformadas, amolgadas e corrigidas com o método proposto por Coutinho (2007).

#### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Realizar no laboratório de Geotecnia e Pavimentação da UNIPAMPA, ensaios de adensamento oedométricos em amostras de argilas amolgadas, extraídas no Bairro da Barra da Tijuca, RJ;
- Analisar as curvas obtidas através do ensaio de adensamento oedométrico, em amostras indeformadas. Ensaio realizado no Laboratório de Geotecnia da COPPE- UFRJ;
- Comparar as curvas obtidas de amostras amolgadas, com as curvas características de amostras indeformadas;
- Classificar as amostras amolgadas e indeformadas, através dos métodos de Lunne et. al. (1997) e Coutinho (2007);
- Corrigir as amostras de má qualidade, através do método de Coutinho (2007);
- Realizar a previsão de recalque primário, secundário e total, para as amostras indeformadas, amolgadas e corrigidas, adotando um aterro de cota fixa,  $h=3m$ , nível de água na superfície do terreno e considerando ainda a submersão do aterro.

## 1.4 Justificativa

O tema do trabalho foi escolhido, devido a grande dificuldade que se tem de obter amostras de boa qualidade, principalmente de argilas moles, e conseqüentemente na dificuldade de obter parâmetros de compressibilidade representativos destas amostras. Devido a isso, é necessária utilização de métodos matemáticos, para a correção das curvas oriundas dos ensaios de adensamento oedométricos, para que o erro em projeto de aterros seja minimizado.

## 1.5 Estrutura do trabalho

O trabalho está dividido em cinco capítulos, como descrito abaixo:

**Capítulo 1** – Apresenta a introdução, o tema, delimitação do tema, problema, objetivo geral, objetivos específicos e a estrutura do trabalho.

**Capítulo 2** – Consta a revisão bibliográfica desenvolvida para o embasamento teórico na realização das atividades da pesquisa.

**Capítulo 3** – Apresenta os métodos aplicados para o desenvolvimento da pesquisa e os materiais utilizados.

**Capítulo 4** – Apresenta os resultados obtidos da pesquisa.

**Capítulo 5** – Apresenta as considerações finais.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Solos Moles

Caracterizam-se como argilas moles ou solos moles aqueles que possuem resistência não drenada inferiores a 25 kPa ou, índice de consistência menor que 0,5 ou ainda NSPT menor que 2. Ainda assim é comum a ocorrência de depósitos de solo muito moles, que é caracterizado pelo NSPT zero ou ainda com o amostrador descendo com o peso próprio da composição. Nesses casos, é difícil a definição dos parâmetros do solo através de uma sondagem simples e, muitas vezes a denominação de argilas moles ou solos moles é utilizado de forma genérica e sem se observar as características geotécnicas do solo (FUTAI, 2010).

Para Massad (2010) solos moles são aqueles caracterizados como solos sedimentares com baixa resistência a penetração (valores de SPT não superiores a 4 golpes), em que a fração argila imprime as características de solo coesivo e compressível.

Futai (2010) define que os solos moles são caracterizados por baixa resistência mecânica e alta compressibilidade. A baixa permeabilidade do solo exerce influência sobre sua resistência, pois o carregamento rápido origina uma pressão neutra e por isso, a resistência é dita não drenada.

O estudo do comportamento de solos moles é um tema tratado desde o início da Mecânica dos Solos. O Princípio das Tensões Efetivas e a Teoria do Adensamento foi fundamental para a existência da Mecânica dos Solos, e ainda são básicos para quem estuda ou projeta obras em solos moles (FUTAI, 2010). O Quadro 1 a seguir apresenta de forma concisa as características gerais de uma argila mole.

Quadro 1 – Características Gerais da Argila Mole.

Nº	Argilas Moles
1.	O volume de vazios pode atingir 98% do volume total.
2.	Contraem-se ao secar.
3.	Apresentam coesão marcante, dependendo da umidade.
4.	São materiais plásticos.
5.	Comprimem-se lentamente, sob a aplicação de cargas superficiais.
6.	São muito Compressíveis.
7.	Má permeabilidade a praticamente impermeáveis.
8.	Condição de drenagem de fraca a má.
9.	Resistência ao cisalhamento às cargas aplicadas dependendo da coesão, e, portanto da umidade e condições de drenagem.

Fonte: Adaptado de Gusmão Filho (2008, p.13).

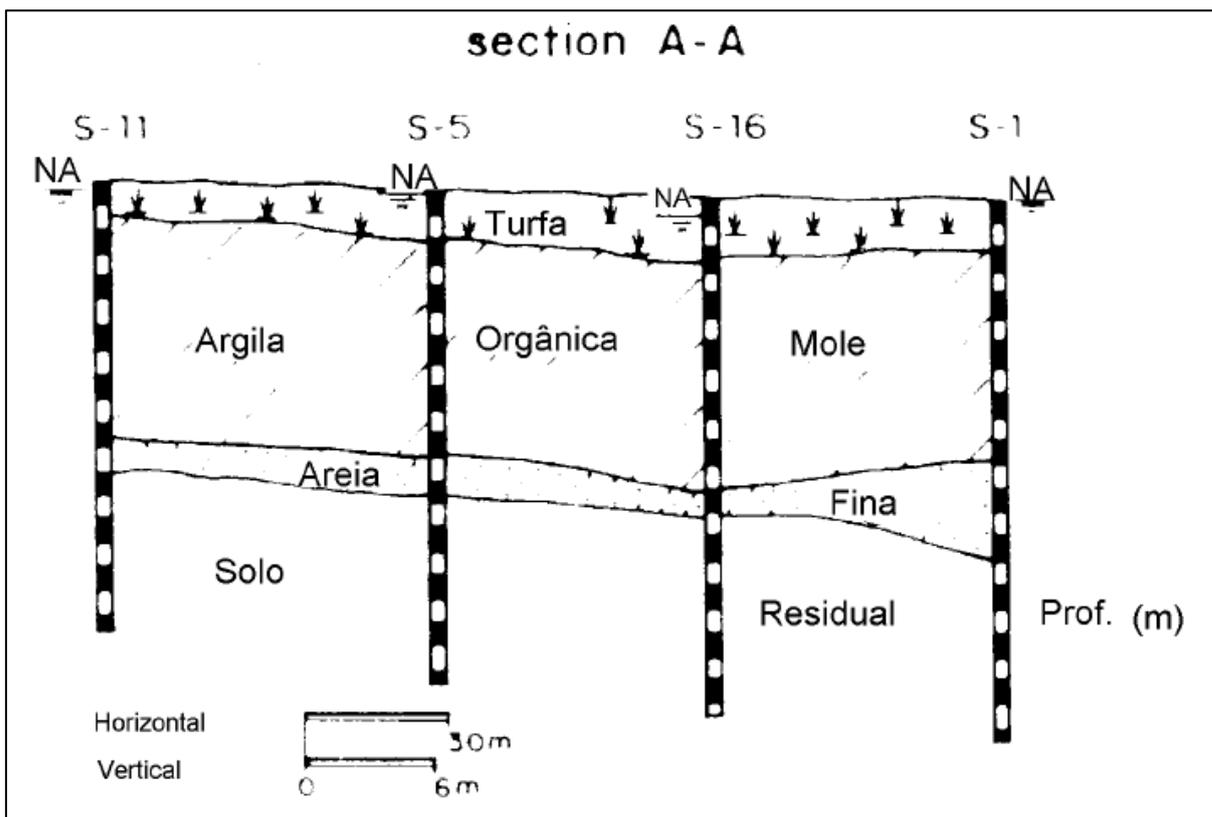
## 2.2 Locais de Ocorrência de Solos Moles

A crescente migração do homem do campo para cidade acarretou na necessidade de expansão das demandas de obras civis em grandes centros urbanos (BARONI, 2010).

O solo que será estudado nesse trabalho é proveniente da Barra da Tijuca, bairro da zona Oeste do Rio de Janeiro. O solo do local pode ser descrito como uma argila cinza muito mole, de origem fluvio-marinha, apresentando fragmentos de conchas e com uma camada superior de turfa (ALMEIDA et.al., 2000).

Ainda segundo Almeida et. al. (2000) há uma camada de areia aluvial que aparece abaixo do solo mole, sendo seguida por uma camada de solo residual. Essa ocorrência pode ser vista na Figura1.

Figura 1– Perfil Geotécnico do Depósito do SENAC – Barra – Rio de Janeiro



Fonte: Almeida (1998, p.962)

Depósitos de solos moles ou compressíveis são comumente encontrados ao longo de toda a costa brasileira, particularmente no estado do Rio de Janeiro (ALMEIDA; MARQUES, 2002; ALMEIDA et al., 2008; COUTINHO, 2008; SCHNAID, 2009).

A Barra da Tijuca e o Recreio dos Bandeirantes, bairros localizados na zona Oeste do Rio de Janeiro, são locais cuja ocupação vem crescendo, e vários depósitos de argila muito mole e compressível têm sido encontrados (LACERDA; ALMEIDA, 1995; ALMEIDA et al., 2008; 2010).

De acordo com Futai (2010), há ocorrência de depósitos de argilas moles em toda a faixa litorânea do Brasil e também em áreas de ambiente não marinho. Ainda segundo Futai (2010), as argilas do Rio de Janeiro e da baixada Santista foram amplamente estudadas devido à ocupação antiga e extensa, porém hoje há estudos também nas regiões Sul, Centro Oeste e Nordeste do país.

Na praia da Boa Viagem localizada na cidade de Recife são frequentes os depósitos de argila siltosa com muita matéria orgânica de consistência muito mole a

mole, alta compressibilidade e espessura acima de 25m (COUTINHO; FERREIRA, 1988).

## **2.3 Ensaios Para Caracterização de Solos Moles**

### **2.3.1 Ensaios de Laboratório**

#### **2.3.1.1 Caracterização Física dos Solos**

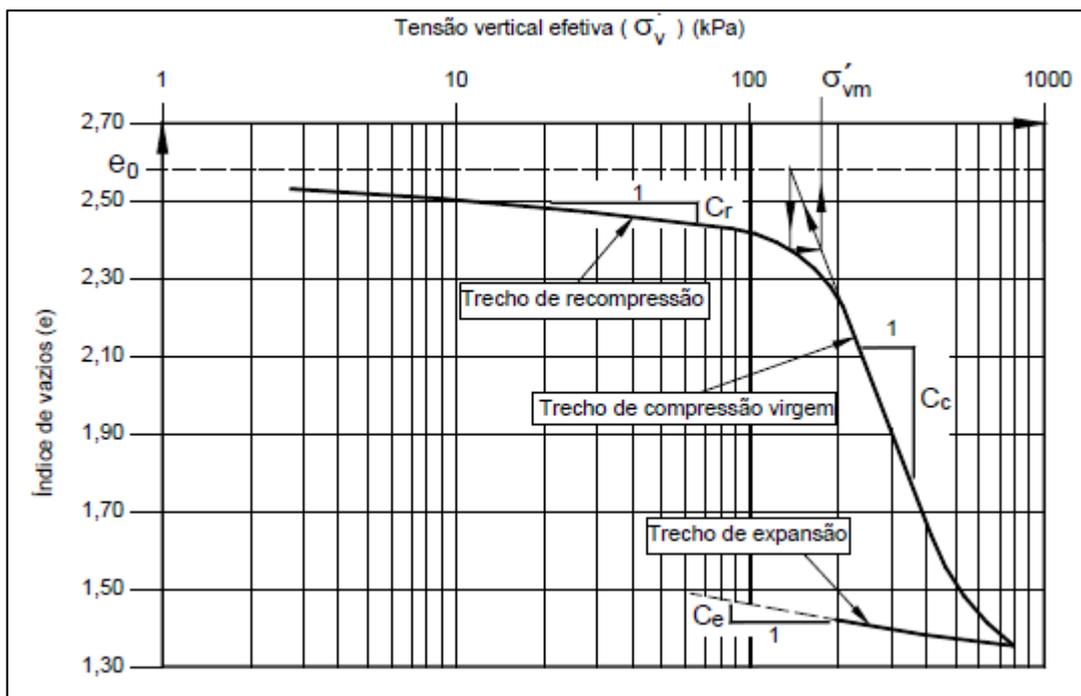
Os ensaios realizados em laboratório para a caracterização física dos solos moles são: análise granulométrica (NBR – 7181), limites de Atteberg (NBR – 6459; NBR – 7180), umidade natural, peso específico natural e dos grãos (NBR – 6508) e teor de matéria orgânica.

#### **2.3.1.2 Ensaio de Adensamento Oedométrico**

Para o presente estudo esse é o principal ensaio, dado que a partir dele é possível se extrair os parâmetros necessários para a classificação e correção da qualidade de amostra.

Os parâmetros obtidos com o ensaio são: Tensão de pré-adensamento, definida como a tensão correspondente ao maior carregamento que um solo esteve submetido na sua vida geológica; pressão efetiva inicial, definida como sendo a pressão vertical total que se desenvolve no esqueleto granular dos solos pelo contato grão-a-grão; razão de pré-adensamento, expressão do histórico de tensões do solo; índice de vazios inicial; índice de compressão e índice de recompressão. Tais parâmetros são fundamentais no cálculo de recalques primários e secundários, sendo também informações imprescindíveis para obras executadas sobre solos moles. Tais parâmetros podem ser observados na curva característica do ensaio exposto na Figura 2.

Figura 2 – Curva Típica de Compressão Oedométrica



Fonte: Oliveira (2011, p.6)

O ensaio é realizado segundo a NBR 12007 (ABNT, 1990). Após o início do carregamento, é necessário que se anote os deslocamentos sofridos pela amostra, tais anotações foram feitas como mostra a Tabela 1.

Tabela 1– Tabela para anotações das alturas da célula em determinados intervalos de tempo.

Tempo	Leitura (mm)
7s	
15s	
30s	
1 min	
2 min	
4 min	
8 min	
15 min	
30 min	
1h	
2h	
4h	
8h	
24h	

Fonte: Elaboração Própria.

Após realização dos ensaios, deve-se calcular a altura dos sólidos do corpo de prova pela Equação 1:

$$H_s = \frac{H_i}{1 + e_i} \quad \dots (1)$$

Onde:  $H_s$  é a altura dos sólidos em cm;  $H_i$  é a altura inicial do corpo de prova em cm;  $e_i$  é o índice de vazios inicial da amostra.

O índice de vazios ao final de cada estágio de pressão deve ser calculado através da equação 2.

$$e = \frac{H}{H_s} - 1 \quad \dots (2)$$

Onde:  $e$  é o índice de vazios ao final de cada estágio de pressão;  $H$  é a altura do corpo de prova ao final de cada estágio em cm;  $H_s$  é a altura dos sólidos em cm.

Depois de calculado o índice de vazios, é obtido o grau de saturação final do corpo de prova através da equação 3.

$$S_f = \frac{H_f \cdot \delta}{e_f \cdot \gamma_f} \quad \dots (3)$$

Onde:  $S_f$  é o grau de saturação final, em %;  $\delta$  é a massa específica dos grãos, em g/cm<sup>3</sup>;  $h_f$  é o teor de umidade final, em %;  $e_f$  é o índice de vazios final;  $\gamma_f$  é a massa específica da água, em g/cm<sup>3</sup>.

Calculados esses índices, é obtido o coeficiente de adensamento pelos métodos de Taylor e de Casagrande.

### **2.3.1.2.1 Método de Taylor para a determinação do Coeficiente de Adensamento**

No método de Taylor, para cada incremento de carga, deve-se construir a curva de adensamento, marcando-se no eixo das ordenadas a altura do CP e no eixo das abscissas a raiz quadrada do tempo. Determina-se o ponto correspondente a 0% do adensamento primário prolongando a reta definida pelos pontos iniciais da curva de adensamento até o eixo das ordenadas. Traça-se, por esse ponto, uma reta com coeficiente angular igual a 1,15 vezes o coeficiente angular da reta obtida para determinação do ponto de 0% de adensamento primário. A intersecção dessa reta com a curva de adensamento irá definir o ponto correspondente a 90% do adensamento primário, obtendo-se os valores de  $t_{90}$  e  $H_{90}$ .

A altura do CP correspondente a 50% do adensamento primário ( $H_{50}$ ) é obtida pela equação 4 e o coeficiente de adensamento através da equação 5.

$$H_{50} = H_0 \cdot \frac{5}{9} \cdot (H_0 - H_{90}) \quad \dots (4)$$

$$C_v = \frac{0,848 \cdot (0,5 H_{90})^2}{t_{90}} \quad \dots (5)$$

Podendo o valor de  $C_v$  ser expresso em  $m^2/\text{dia}$  ou  $m^2/\text{ano}$ .

### 2.3.1.2.2 Método de Casagrande para a determinação do Coeficiente de Adensamento

Pelo método de Casagrande, assim como no método de Taylor, para cada incremento de carga aplicado sobre o solo, deve se construir a curva de adensamento, marcando-se no eixo das ordenadas a altura do CP e no eixo das abcissas o logaritmo do tempo. Determina-se então o ponto correspondente a 100% do adensamento primário através da intersecção das retas tangentes aos ramos da curva que definem as compressões primária e secundárias. O ponto encontrado deve ser marcado no eixo das ordenadas como  $H_{100}$ .

Para encontrar o ponto correspondente a 0% do adensamento primário, seleciona-se duas alturas  $H_1$  e  $H_2$ , correspondentes aos tempos  $t_1$  e  $t_2$ , cuja divisão de  $t_2$  por  $t_1$  seja igual a 4. A altura correspondente a 0% será calculada pela equação 6.

$$H_0 = H_1 + (H_1 - H_2) \quad \dots (6)$$

A altura do CP correspondente a 50% do adensamento primário ( $H_{50}$ ) é obtida através da equação 7.

$$H_{50} = \frac{H_0 + H_{100}}{2} \quad \dots (7)$$

O tempo  $t_{50}$ , corresponde a 50% do adensamento primário, é obtido pela abcissa do ponto da curva correspondente a  $H_{50}$ .

A partir daí, calcula-se então o coeficiente de adensamento ( $C_v$ ) através da equação 8.

$$C_v = \frac{0,197 \cdot (0,5 H_{100})^2}{t_{50}} \quad \dots (8)$$

### 2.3.1.2.3 Determinação do Índice de Compressão

Para calcular o índice de compressão, deve-se traçar a curva de índice de vazios em função do logaritmo da pressão aplicada, sendo o índice de vazios obtido em cada estágio de pressão. O trecho dessa curva, posterior a pressão de pré-adensamento, é denominada reta virgem e pode ou não ser retilíneo.

Sendo retilíneo o trecho virgem, determina-se o índice de compressão através da inclinação da reta com a equação 9.

$$C_c = \frac{e_1 - e_2}{\log p_2 - \log p_1} \quad \dots (9)$$

Onde:  $C_c$  é o índice de compressão;  $e_1$  e  $e_2$  são os índices de vazios, correspondentes a dois pontos quaisquer do trecho virgem;  $p_1$  e  $p_2$  são pressões associadas aos índices de vazios  $e_1$  e  $e_2$ .

### 2.3.1.2.4 Determinação da tensão de Pré-Adensamento

A tensão de pré-adensamento deve ser calculada pelos processos de Casagrande e Pacheco Silva, descritos nos itens 2.3.1.2.4.1 e 2.3.1.2.4.2

#### 2.3.1.2.4.1 Processo de Casagrande

Esse processo consiste em obter na curva utilizada para se obter o índice de compressão, o ponto do raio de curvatura mínimo e, por ele, traçar uma paralela ao eixo das abcissas e uma tangente à curva. Deve-se traçar a bissetriz do ângulo formado por essas retas. A abscissa correspondente ao ponto de intersecção da bissetriz com o prolongamento do trecho virgem corresponde à tensão de pré-adensamento.

#### **2.3.1.2.4.2 Processo de Pacheco Silva**

Traçar uma reta horizontal, passando pela ordenada correspondente ao índice de vazios inicial ( $e_i$ ), prolongar o trecho virgem e determinar seu ponto de intersecção com essa reta.

Através desse ponto de intersecção, traçar uma reta vertical até interceptar a curva. Por esse ponto, traçar uma reta horizontal, determinando-se a sua intersecção com o prolongamento da reta virgem. A abcissa desse ponto irá definir a tensão de pré-adensamento.

#### **2.3.2 Ensaio de Campo**

Inicialmente é realizado o ensaio de SPT no solo. Não sendo possível a determinação do NSPT, ou seu valor estando muito baixo,  $NSPT < 2$ , deve-se ser adotado outros ensaios que possam ser eficientes. Nesse sentido pode-se citar: Ensaio de Palheta, NBR – 3122, para obtenção dos parâmetros de resistência não-drenada do solo; E ensaio de Piezocone Sísmico, para a determinação da estratigrafia e classificação do solo, estimativa de resistência não-drenada, histórico de tensões e coeficiente de adensamento horizontal, Futai (2010).

#### **2.4 Metodologia de Classificação da Qualidade das amostras**

A qualidade da amostra influencia diretamente os resultados dos parâmetros de compressibilidade e resistência obtidos nos ensaios de laboratório. Para se estudar o comportamento dos solos moles por meio de ensaios de laboratório, é de fundamental importância avaliar corretamente a qualidade das amostras e se necessário, corrigir os efeitos do amolgamento, e conseqüentemente obter parâmetros geotécnicos adequados para serem utilizados nos cálculos de projetos de obras de engenharia e no desenvolvimento de correlações estatísticas. O efeito quantitativo de uma amostragem de qualidade insatisfatória pode ser muito grande e trazer sérias conseqüências técnicas e econômicas (SKEMPTON, 1969; BELLO, 2011).

Neste trabalho serão apresentadas três propostas de classificação da qualidade das amostras: Lunne et al. (1997), Coutinho (1998; 2007) e Futai (2010).

### 2.4.1 Influência da Qualidade de Amostras nos Parâmetros de Compressibilidade do Solo

A qualidade de amostra influencia diretamente nos resultados obtidos através do ensaio de compressão edométrica.

Skempton (1969) após analisar 20 argilas de diferentes litologias submetidos a uma mesma tensão vertical  $\sigma'_{v0}$  (normalmente adensada), observou que o índice de vazios pode ser correlacionado com limites de liquidez, plasticidade e profundidade, e concluiu que:

- i. A relação entre  $e_0$  e  $\log \sigma'_{v0}$  é essencialmente linear;
- ii. Para um certo valor de  $(\sigma'_{v0}, e_0)$  normalmente adensado, depende fundamentalmente da natureza e mineralogia das argilas, podendo ser representada pelo limite de liquidez;
- iii. As curvas de compressibilidade tendem a convergir;
- iv. A utilização do índice de liquidez diminui a dispersão.

Martins (1983) após analisar os ensaios de Coutinho (1976) e Ferreira (1982), enumerou alguns efeitos causados pelo amolgamento da amostra na curva de compressibilidade edométrica:

- i. Independente de  $\sigma'_{v0}$  o índice de vazios é menor na amostra amolgada;
- ii. A tensão de pré – adensamento é mascarada;
- iii. Diminuição da tensão de pré – adensamento;
- iv. Aumento da compressibilidade na região de recompressão;
- v. Decréscimo da compressibilidade no trecho virgem.

Almeida e Marques (2010) indicam que uma amostra de má qualidade apresentará menos tensão de sobre-adensamento, e que a variação do índice de vazios, referente a uma variação da tensão efetiva, é alterada com o amolgamento, o que acarretará em recalques previstos diferentes dos reais e valores de volumes de terraplanagem equivocados em projeto cuja sobrecarga aplicada não será suficiente para a compensação desses recalques.

Segundo Bello (2011) o amolgamento de uma amostra diminui a permeabilidade, causando assim a diminuição do coeficiente de adensamento vertical, acarretando em uma avaliação equivocada da evolução dos recalques com

o tempo, sendo assim, os prazos previstos para a estabilização, com base em amostras amolgadas, podem ser maiores.

#### 2.4.1.1 Retirada de Amostras Indeformadas

Para a obtenção de amostras de boa qualidade, é imprescindível que se tome todos os cuidados para manter a indeformabilidade da amostra. A retirada de amostras indeformadas é realizada a partir da cravação do Tubo Shelby, e posterior selagem de suas extremidades com parafina, a fim de manter sua indeformabilidade. A figura 3 mostra o tubo shelby com a proteção de parafina nas extremidades.

Figura 3 – Tubo Shelby



Fonte: Baroni (2010, p.39).

#### 2.4.2 Método de Lunne et al. Para a Classificação da Qualidade de Amostras

Baseado nas informações obtidas em diversas amostras Lunne et al. (1997), propõe um critério de avaliação do grau de amolgamento, com base na diferença entre o índice de vazios inicial da amostra e o índice de vazios correspondente ao nível de tensão efetiva vertical de campo.

Segundo Lunne et al. (1997), o Norwegian Institute of Geotechnics (NGI) utiliza a deformação volumétrica ( $\epsilon_v0$ ) correspondente às tensões geostáticas no campo ( $\sigma'_{v0}$ ) como indicador de amolgamento e conseqüentemente da qualidade de amostras argilosas. A deformação volumétrica é calculada de acordo com a equação 10.

$$\varepsilon\sigma'v_0 = \frac{e_0 - e\sigma'v_0}{1 + e_0} \quad \dots (10)$$

Onde:  $e_0$  é o índice de vazios inicial da amostra;  $e\sigma'v_0$  é o índice de vazios correspondente à tensão efetiva de campo,  $\sigma'v_0$ .

Lunne et al. (1997), afirma que a variação no volume de vazios ( $\Delta e$ ) é mais prejudicial a estrutura do solo quanto menos for o índice de vazios inicial ( $e_0$ ), sugerindo então a utilização de  $\Delta e/e_0$ . Através da experiência do NGI os autores propuseram um critério de avaliação em termos de  $\varepsilon v_0$ , para uma argila particular, multiplicando-se  $\Delta e/e_0$  por  $e_0/(1+e_0)$ , correspondente para um índice de vazios inicial igual a 2,0. Tal critério é observado na tabela 2.

Tabela 2 – Critério para a Classificação da Qualidade de Amostras

Razão de Pré - Adensamento (OCR)	$\Delta e/e_0$			
	Excelente a Muito Bom	Boa a Aceitável	Ruim	Muito Ruim
1 - 2	<0,04	0,04 – 0,07	0,07 – 0,14	>0,14
2 - 4	<0,03	0,03 – 0,05	0,05 – 0,1	>0,1

Onde  $\Delta e = e_0 - e(\sigma'v_0)$ ;  $e_0$  – Índice de vazios da amostra;  $e(\sigma'v_0)$  – Índice de vazios para  $\sigma'v_0$ .

Fonte: Adaptada de Baroni (2010)

Através da experiência adquirida ao longo de inúmeros ensaios, Coutinho (1998, 2007), Futai (2010) propuseram modificações nos valores limites das faixas de variação da qualidade das amostras, considerando que a proposta de Lunne *et al.*, (1997) é muito rigorosa para as argilas plásticas brasileiras. Tais modificações estão expostas em outros itens desse capítulo.

#### 2.4.3 Método de Coutinho Para a Classificação da Qualidade de Amostras

A partir do proposto por Lunne et. al. (1997) e Coutinho et. al. (1998), Coutinho (2007) apresenta a proposta que leva em consideração a relação da variação no volume de vazios com o índice de vazios inicial,  $\Delta e/e_0$ .

Coutinho (2007), analisando os critérios adotados por Lunne et al. (1997), conclui que para as argilas do Recife a proposta de Lunne et al. (1997), é deveras

rigorosa, tomando para si necessária a adaptação das faixas consideradas como amostras satisfatórias (excelente, muito boa, boa e regular) e não satisfatória. A faixa de classificação Boa a regular foi subdividida em duas faixas: Boa e Regular, considerando o valor médio da faixa boa / regular proposta como limite. O mesmo ocorreu para a faixa chamada de pobre por Lunne et al. (1997), que pelas adaptações passou a ser chamada de transição Regular / Pobre e Pobre propriamente dita, utilizando o mesmo critério anterior (média da faixa inicial). Após todas as modificações o critério final de avaliação do amolgamento proposto por Coutinho (2007) pode ser observado na tabela 3.

Tabela 3 – Critério para a Classificação da Qualidade de Amostras

	Excelente a Muito Bom	Boa a Aceitável	Ruim	Muito Ruim
$\Delta e/e_0$	<0,05	0,05 – 0,08	0,08 – 0,14	>0,14

Fonte: Adaptada de Baroni (2010)

#### 2.4.4 Método de Futai Para a Classificação da Qualidade de Amostras

Futai (2010), após profunda análise em diversos depósitos de argilas do Brasil, propõe a aplicação da curva de compressão normalizada para a classificação das amostras. A proposta implica na utilização do índice ID, que é a razão entre a tensão atuante e a tensão de escoamento, para representar a desestruturação ou reestruturação do solo. Assim se  $ID > 1$ , o solo foi submetido a valores de tensão vertical superiores a tensão de escoamento. Quando  $ID < 1$ , o solo está sobreadensado em relação a história de tensões de campo.

Ainda é proposto por Futai (2010), que os parâmetros  $\Delta e/e_0$  seja utilizado para representar a deformação do solo, que em essência é a deformação volumétrica normalizada. Ou seja, é a razão entre a deformação volumétrica e a deformação volumétrica máxima teórica ( $\varepsilon_{vmax}$ ) admitindo-se, de forma idealizada que todos os vazios possam ser expulsos por compressão. A deformação volumétrica máxima é dada pela equação 11.

$$\varepsilon_{vmax} = \frac{e_0}{1 + e_0} = n \quad \dots (11)$$

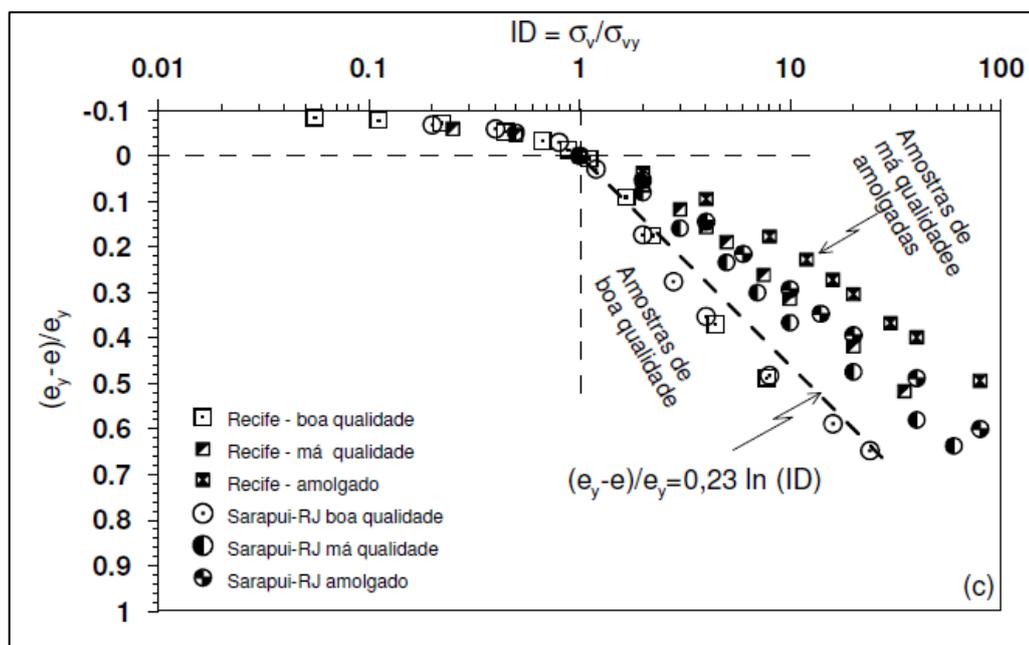
Essa relação é a própria definição de porosidade do solo. A partir dessa relação, pode-se obter a deformação volumétrica normalizada, definida como sendo a relação entre a deformação volumétrica e a deformação volumétrica máxima.

Para tanto, como a tensão vertical está sendo normalizada pela tensão de escoamento, é preciso também tomar como referencial o índice de vazios no escoamento,  $e_y$ . A equação 12 é utilizada para a construção da curva normalizada que pode ser observada na figura 4.

$$\varepsilon_{vn} = \frac{e_y - e}{e_y} \quad \dots(12)$$

Após a construção da curva normalizada é possível verificar que quanto pior for a qualidade da amostra mais acima da curva normalizada ela irá se situar, como pode ser visto na Figura 4.

Figura 4 – Classificação da Qualidade de Amostras



Fonte: Futai (2010, p.14).

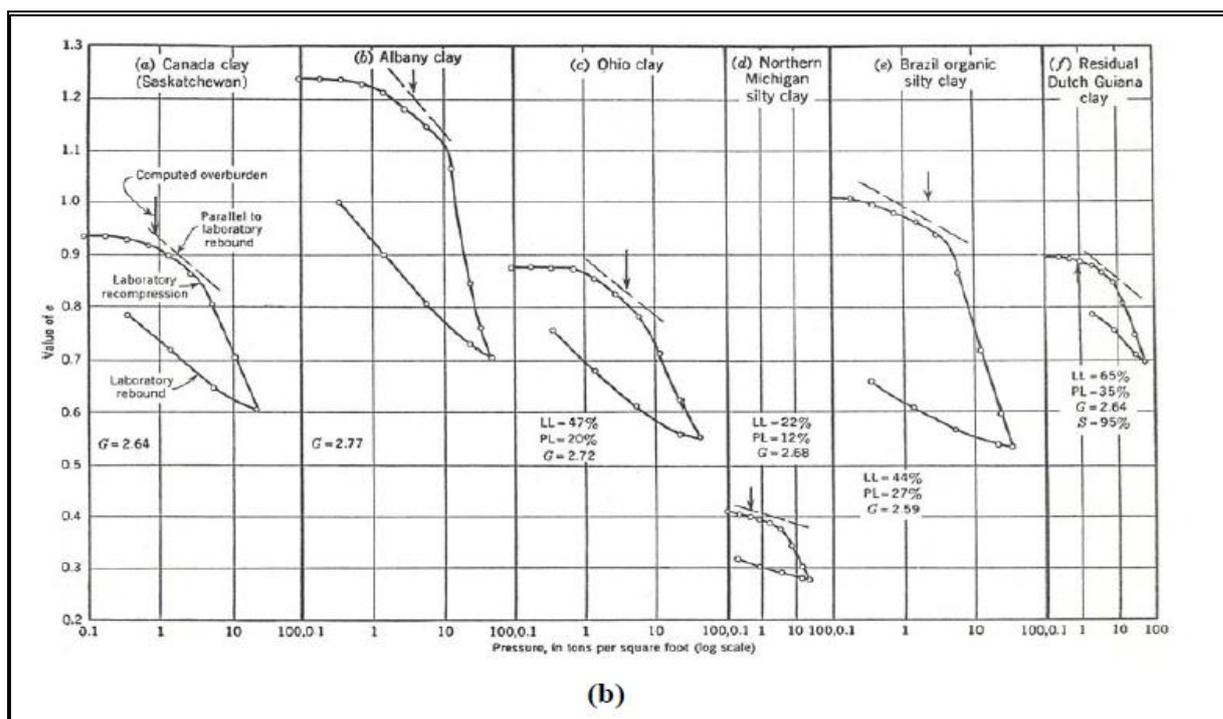
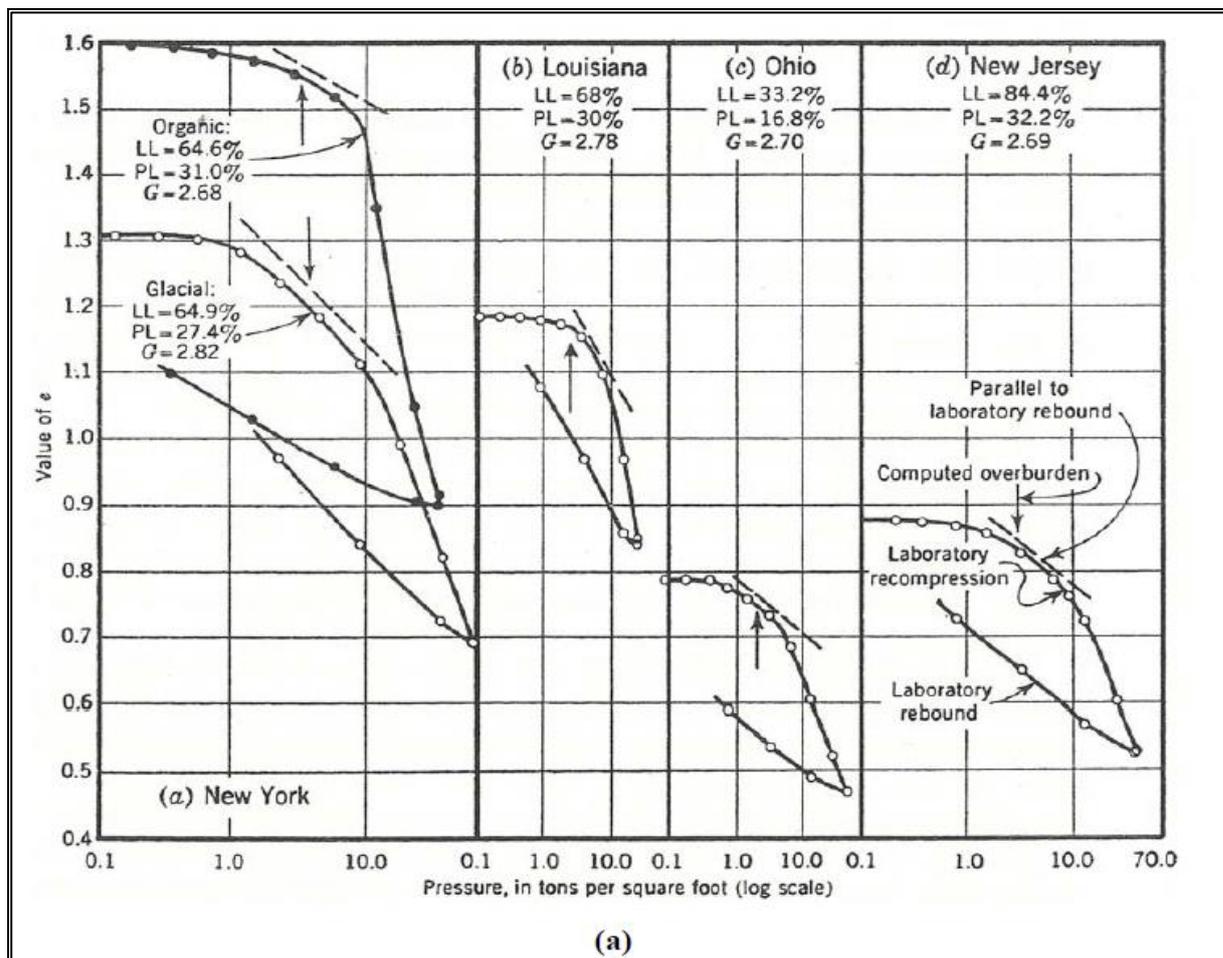
## **2.5 Metodologia de Correção da Curva de Adensamento Oedométrico**

Para o presente estudo são mostrados três métodos para a correção da qualidade das amostras que são: correção da tensão de pré-adensamento, segundo proposta de Schmertmann (1955), correção de parâmetros de adensamento segundo proposta de Coutinho (2007) e correção dos valores da tensão de pré-adensamento proposta por Futai (2010). Sendo o método proposto por Coutinho (2007), o escolhido para obtenção dos resultados.

### **2.5.1 Método de Schmertmann Para a Correção da Curva de Adensamento**

Para a aplicação do método de Schmertmann (1955) primeiro é necessário conhecer o comportamento das amostras indeformadas, para tanto Schmertmann expõe em seu trabalho as curvas expostas nas figuras 5a e 5b, com resultados típicos de ensaios com amostras indeformadas realizadas em laboratório.

Figura 5 – Resultados de típicos de ensaios de adensamento edométrico em laboratório

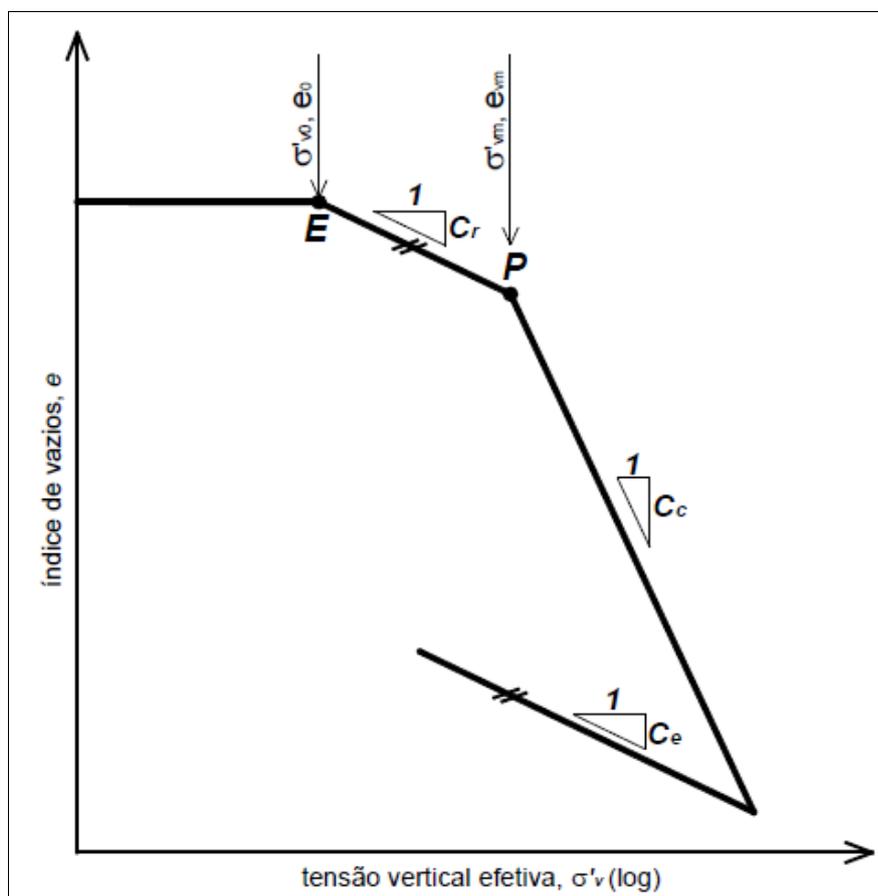


Fonte: Schmertmann (1955 p.1217).

Schmertmann ao analisar as curvas percebeu que elas podem ser divididas em três trechos característicos, que é ilustrado pela Figura 6, que são:

- i. Por uma linha de índice de vazios aproximadamente constantes durante o intervalo de carregamento no qual a expansão do corpo de prova foi impedida, ou seja, até o ponto correspondente à tensão geostática ( $\sigma'_{v0}$ ) e ao índice de vazios de campo ( $e_0$ ), que aqui convencionou-se chamar de ponto E.
- ii. Por uma curva de recompressão nítida, começando no ponto E e indo até o ponto P de pré-adensamento ( $\sigma'_{vm}$ ,  $e_{vm}$ ).
- iii. Finalmente, começando no ponto P, tem-se a curva de compressão virgem, que se distingue das demais por sua inclinação bem superior.

Figura 6 – Representação dos trechos característicos da curva de adensamento edométrico proposta por Schmertmann.



Fonte: Schmertmann (1955, p.1223)

O método de estimativa proposto por Schmertmann está baseado em uma série de hipóteses como pode ser visto a seguir:

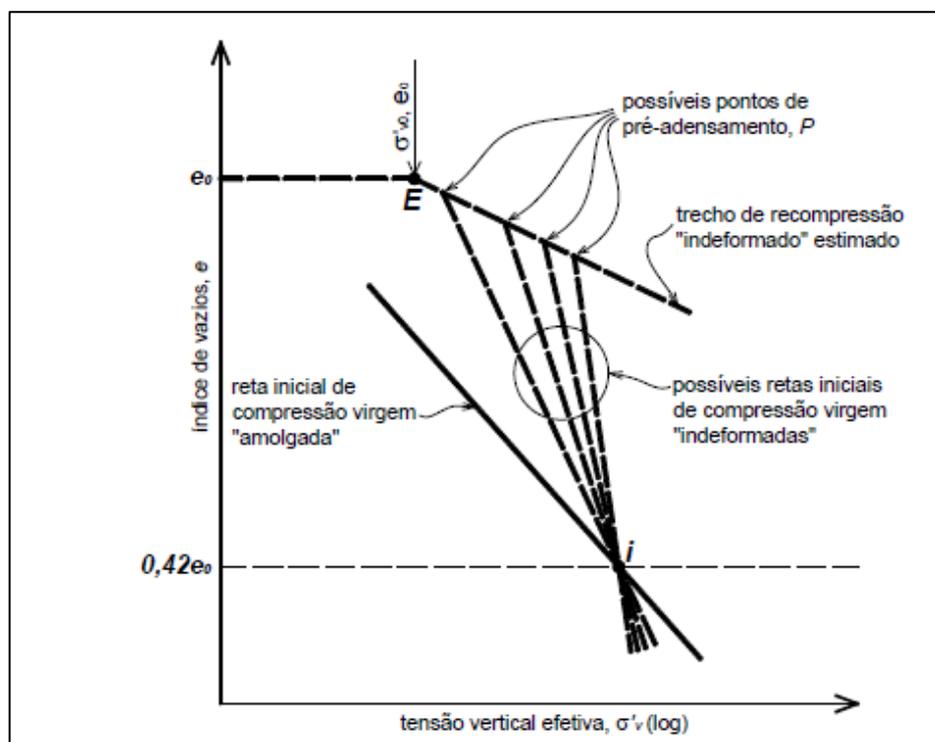
- i. O índice de descompressão não é afetado pela perturbação da amostra ( $C_e = C_{e \text{ amolg}}$ );
- ii. O índice de recompressão é igual ao índice de descompressão obtido do descarregamento ao final do ensaio de adensamento edométrico ( $C_r = C_e$ );
- iii. As retas que ligam os dois primeiros pontos de ensaio do trecho de compressão virgem (reta inicial de compressão virgem) de amostras de uma mesma argila com qualquer grau de perturbação se interceptam num índice de vazios igual 42% de  $e_0$ ;
- iv. Curvas de compressibilidade de amostras com variados graus de perturbação apresentam um padrão de redução do índice de vazios aproximadamente simétrico em relação à tensão de pré-adensamento da amostra indeformada.

Considerando as hipóteses de Schmertmann (1955), é possível traçar a nova curva de argila amolgada para se obter a curva de campo através das seguintes etapas:

- i. A partir do índice de vazios inicial ( $e_0$ ) traçar uma reta horizontal até atingir a tensão vertical efetiva de campo ( $\sigma'_{v0}$ );
- ii. Traçar uma paralela ao trecho de descarregamento do ensaio passando pelo ponto ( $e_0, \sigma'_{v0}$ );
- iii. Adotar um valor da tensão de pré-adensamento ( $\sigma'_{vm}$ ) igual ou superior ao obtido no ensaio e marcar este valor na reta paralela da etapa ii;
- iv. Traçar uma linha reta a partir do ponto marcado na etapa iii até o ponto da curva ou seu prolongamento correspondente ao índice de vazios igual a 42%  $e_0$ ;
- v. Calcular as diferenças entre os índices de vazios da curva experimental e corrigida, plotando os valores em função do  $\log \sigma'_v$ . Se o valor da tensão de pré-adensamento estiver correto o gráfico da diferença será simétrico em relação à  $\sigma'_{vm}$ . Caso contrário adotar outro valor para  $\sigma'_{vm}$  e repetir as etapas iii a v.

O método para determinação da nova tensão de pré-adensamento proposta por Schmertmann (1955), é mostrada na Figura 7.

Figura 7 – Correção da Qualidade de Amostras



Fonte: Oliveira (2011, p.18)

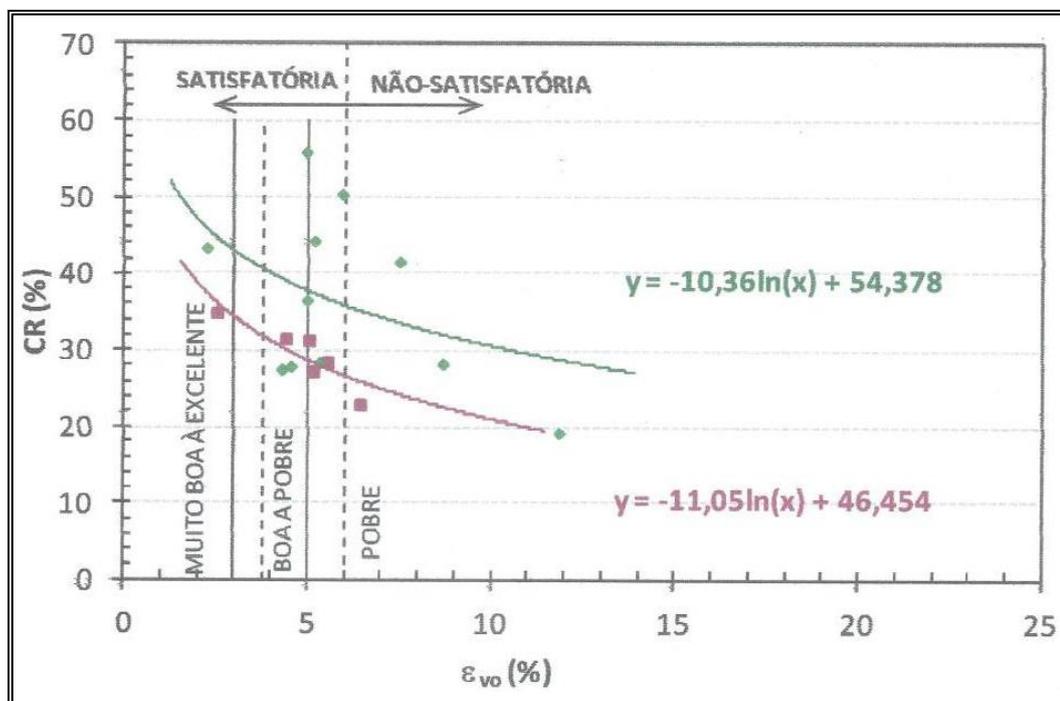
### 2.5.2 Método de Coutinho Para a Correção da Curva de Adensamento

Para a correção da curva de adensamento edométrico Coutinho (2007) utiliza as curvas de avaliação da qualidade da amostra, onde através do ajuste logarítmico dos gráficos,  $(CR(\%) \times \varepsilon_{v0}$  e  $\sigma'_{vm} \times \varepsilon_{v0}$ ) é possível se extrair os valores corrigidos de tensão de pré-adensamento ( $\sigma'_{vm}$ ) e razão de compressão (CR). Para tanto para a construção do gráfico é necessário que se tenham também amostras de boa qualidade, para que tais amostras sirvam de gabarito para as amostras de má qualidade, como pode ser visto nas figuras 8 e 9.

Coutinho (2007) verifica que os valores de CR e OCR diminuem fortemente quando  $\varepsilon_{v0}$  aumenta, e que existe um limite mínimo para valores de CR (20%) e para os valores de OCR (0,25), onde as amostras estão totalmente amolgadas. O autor

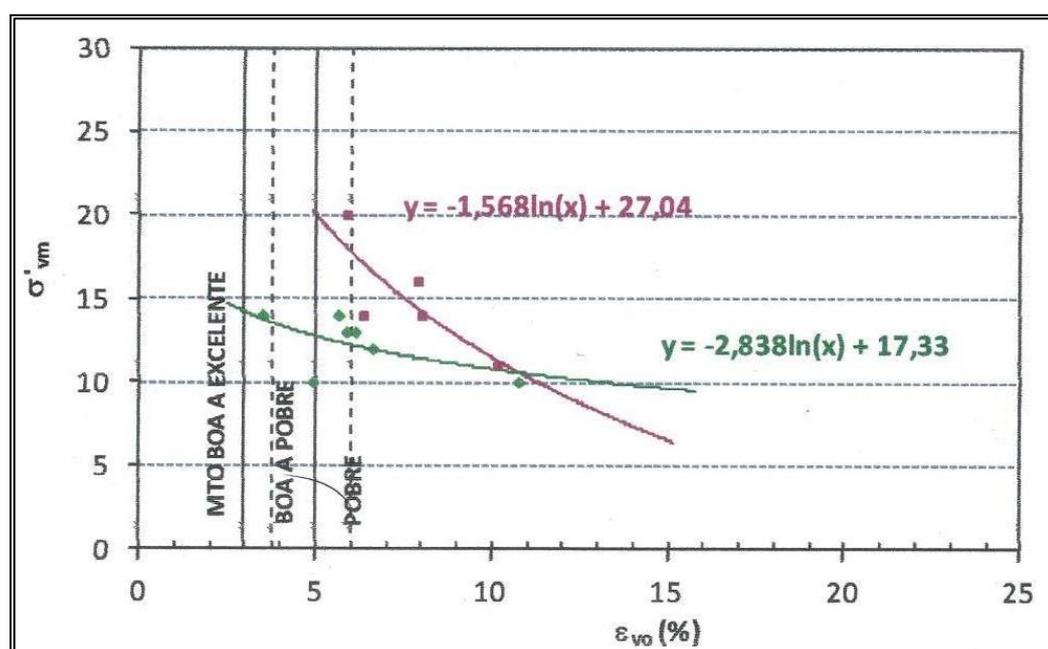
ressalta que este tipo de correção é útil para a correção aproximada do valor de  $\sigma'_{vm}$  de amostras em projetos práticos.

Figura 8 – Curva CR X  $\varepsilon_{vo}$



Fonte: Adaptada de Coutinho et al. (1998)

Figura 9 – Classificação da Qualidade da Amostra e Correção da Tensão de Pré - Adensamento



Fonte: Adaptada de Coutinho et al.(1998)

Assim a partir das equações oriundas do ajuste logarítmico é possível a determinação de valores corrigidos de CR e  $\sigma'_{vm}$ .

### 2.5.3 Método de Futai Para a Correção da Tensão de Pré-adensamento

Futai (2010), propõe a normalização das curvas de compressão edométricas. Para tanto ele considerou 2 trechos:  $ID > 1$  (normalmente adensada), e  $ID < 1$  (tensão vertical final maior que a tensão de escoamento). A curva de compressão normalizada, para  $ID > 1$ , pode ser representada por uma função logarítmica, apresentada na equação 12. No trecho com  $ID < 1$ , a relação é linear, e o índice de vazios de campo é usado como referencia como é possível ver na equação 13.

$$e = e_y * (1 - (\varepsilon * \ln(ID))) \quad \dots (12)$$

$$\frac{(e_y - e)}{e_y} = \chi * (ID_o - 1) \quad \dots (13)$$

Onde:  $\varepsilon$  é um coeficiente de ajuste igual a 0,23, e  $\chi$  o coeficiente angular da reta igual a 0,06.

E assim é possível calcular o índice de vazios referente ao escoamento, equação 14.

$$e_y = \frac{e_0}{1,06 - (0,06 * ID_o)} \quad \dots (14)$$

Onde:  $ID_o$  é a relação da tensão vertical efetiva de campo ( $\sigma'_{v0}$ ) com a tensão de escoamento ( $\sigma'_{vy}$ ).

Baseado nesses critérios as amostras podem ser corrigidas para obter-se um novo valor da tensão de escoamento ( $\sigma'_{vy}$ ). Na equação 6, os parâmetros  $e_0$ ,  $ID_o$  e  $\sigma'_{v0}$  são conhecidos, bem como  $\sigma'_{vy}$  obtido diretamente do ensaio, assim se obtém  $e_y$  de forma simples. Na segunda etapa do procedimento, a equação 4 seria utilizada, visto que se trata de referencia para amostras de boa qualidade. O índice

de vazios utilizado seria o correspondente a pressão final do carregamento, onde coincide com a reta de referencia. Assim, desenvolvendo a equação, chega-se ao valor da tensão de escoamento. E a partir da tensão de escoamento é obtido a tensão de pré-adensamento.

## 2.6 Previsão de Recalques

### 2.6.1 Tipos de Recalque

Os recalques são frequentemente divididos em recalques imediatos ( $\Delta h_i$ ), recalques por adensamento primário ( $\Delta h$ ) e recalques por compressão secundária ( $\Delta h_{sec}$ ) (ALMEIDA; MARQUES, 2010).

Leroueil (1994) classifica os recalques em construtivos e de longo prazo. Os recalques construtivos são a soma dos recalques imediatos e dos recalques por recompressão primária. Já os recalques de longo prazo são formados pela soma dos recalques por adensamento primário virgem e dos recalques por compressão secundária.

### 2.6.2 Recalque Imediato

Almeida; Marques (2010) definem que o recalque imediato decorre do carregamento instantâneo e sem variação de volume da argila. Por conseguinte, é também denominado recalque não drenado, elástico ou distorcional, e calculado, em geral, para o centro do aterro pela Teoria da Elasticidade, através da equação 15.

$$\Delta h_i = \frac{2 * \Delta \sigma_v * b * (1 - \nu^2)}{E} \quad \dots (15)$$

Onde:  $b$  é um dado geométrico do aterro;  $\nu = \nu_u = 0,5$  é o coeficiente de Poisson para a condição não drenada;  $E = E_u$  é o módulo de elasticidade também para a condição não drenada;  $\Delta \sigma_v$  é o acréscimo de tensão devido à carga de aterro.

### 2.6.3 Recalque por Adensamento Primário

O cálculo de recalques para considerar o efeito de submersão deve ser iterativo. Calcula-se inicialmente o valor de recalque sem consideração de submersão do aterro, correspondente à primeira iteração “n”.

Admitindo-se o nível de água coincidente com o nível do terreno, a altura de aterro se divide em duas, uma correspondente ao trecho não submerso e a outra correspondente ao trecho submerso. Calcula-se então através da equação 16 o recalque para a segunda iteração  $r_{n+1}$ .

Os cálculos devem ser refeitos até a convergência, ou seja, até que o recalque  $r_{n+1}$  coincida com o recalque  $r_n$  da iteração anterior. No caso de haver subcamadas, este cálculo deve ser feito para todas elas até que ocorra a convergência, obtendo-se assim, o recalque primário total (ALMEIDAS; MARQUES, 2010).

$$r_{n+1} = H_o \cdot \left[ \frac{C_s}{1+e_{vo}} \cdot \log \frac{\sigma'_{vm}}{\sigma'_{vo}} + \frac{C_c}{1+e_{vo}} \cdot \log \frac{\sigma'_{vo} + (h_{at} - r_n) \cdot \gamma_{at} + r_n \cdot \gamma_{sub}}{\sigma'_{vm}} \right] \quad \dots (16)$$

Onde:  $H_o$  – Altura da subcamada

$C_s$  – Índice de recompressão

$C_c$  – Índice de compressão

$e_{vo}$  – Índice de vazios

$\sigma'_{vm}$  – Tensão de pré-adensamento

$\sigma'_{vo}$  – Tensão inicial efetiva

$h_{at}$  – Altura do aterro

$r_n$  – Recalque da camada de argila da iteração anterior (altura do aterro submerso)

$\gamma_{at}$  – Peso específico do aterro

$\gamma_{sub}$  – Peso específico submerso do aterro.

#### 2.6.4 Recalque por Adensamento Secundário

O adensamento secundário corresponde à variação adicional de volume, que se processa após total dissipação do excesso da poropressão gerado por um carregamento, isto é, a variação de volume que ocorre a um valor constante de tensão efetiva (seria o “creep” no solo). É uma variação de volume que começa durante o adensamento primário (Adensamento de Terzaghi) e usualmente ocorre a uma velocidade muito mais lenta.

Em campo, é difícil separar os adensamentos primário e secundário, pois ambos podem ocorrer simultaneamente, e isto é mais acentuado quanto maior for à espessura da camada. O solo mais próximo das camadas drenantes estará sofrendo compressão secundária enquanto que, no meio, o solo estará ainda com baixos graus de adensamento.

Baseado em evidências experimentais, Martins (2005) propõem que o recalque máximo por adensamento secundário é aquele correspondente à variação de deformabilidade vertical da condição de fim de primário ( $OCR = 1$ ) para a reta  $OCR = 1,5$ , para uma dada tensão efetiva vertical atuante na argila mole. Esta condição pode ser associada ao cálculo de recalque por adensamento primário, admitindo-se compressão até a tensão  $1,5 \sigma'_{vf}$ , seguido de descarregamento até  $\sigma'_{vf}$ .

Assim, considerando  $CR = \frac{C_c}{1+ev_0}$ , temos que:

$$\Delta h_{sec} = \frac{C_s}{C_c} * CR * h \text{ arg} \quad \dots (17)$$

Para camadas de argila com espessuras superiores à 10m, os recalques por adensamento secundário variam entre 0,4 e 0,75m, tornando-se, portanto, importante sua consideração na estimativa do recalque total.

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.1 Materiais**

Os materiais que foram utilizados na pesquisa são solo e água. A água utilizada é previamente destilada no laboratório de Geotecnia e Pavimentação da UNIPAMPA e o solo conforme especificações a seguir.

##### **3.1.1 Solo**

O solo que foi utilizado na pesquisa foi coletado em depósito de argila mole localizado em Itanhaguá, bairro da Barra da Tijuca, zona Oeste da cidade do Rio de Janeiro, RJ. As amostras foram retiradas pelos laboratoristas e técnicos da UFRJ, seguindo as especificações detalhadas em Aguiar (2008) e Baroni (2010).

Os ensaios de adensamento oedométrico em amostras de solo indeformado, foram realizados no laboratório de Geotecnia da COPPE – UFRJ. Os ensaios realizados nas amostras de solo amolgado foram realizados no laboratório de Geotecnia e Pavimentação da Universidade Federal do Pampa – UNIPAMPA.

Na Figura 10 (a), encontra-se a amostra em grau inicial de amolgamento, onde ela apresenta textura argilosa.

Com o armazenamento da amostra tanto no Laboratório de Geotecnia da COPPE, quanto no Laboratório de Geotecnia e Pavimentação da UNIPAMPA, houve uma leve perda de umidade natural do solo. Para que as amostras voltassem à umidade natural, foi inicialmente retirada uma parcela da amostra para determinar a umidade antes do ensaio, e depois adicionada água para regularização da umidade das amostras.

A Figura 10 (b) é a representação da amostra com textura pastosa após regularização da umidade onde a amostra foi misturada com o auxílio de uma espátula para maior desestruturação da amostra.

Figura 10 – Processo de Amolgamento das Amostras



Fonte: Autoria Própria

## 3.2 Métodos

### 3.2.1 Ensaios de Caracterização do Solo

O processo de secagem do solo para determinação da umidade natural do solo, bem como para a determinação do peso específico natural do solo foram realizados no laboratório de Geotecnia da COPPE – UFRJ. O ensaio de determinação da Massa Específica Real dos Grãos foi realizado de acordo com a NBR 6508/84, no laboratório de Geotecnia da COPPE – UFRJ. Os valores de umidade, peso específico natural do solo e massa específica real dos grãos, são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros de Caracterização do Solo

Amostra	Profundidade (m)	Umidade %	$\gamma_{nat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	Massa Específica Real dos Grãos (g/cm <sup>3</sup> )
Indeformada	2,25 - 2,75	206,58	11,92	2,00
	2,75 - 3,25	229,08	11,30	2,37
	4,25 - 4,75	196,28	11,53	2,46
	5,25 - 5,75	221,66	11,52	2,40
	8,75 - 9,25	203,65	11,89	2,40
	11,25 - 11,75	159,38	12,07	2,43
Amolgada	2,75 - 3,25	228,87	11,30	2,37
	5,25 - 5,75	219,30	11,52	2,40
	8,75 - 9,25	203,10	11,89	2,40
	11,25 - 11,75	155,46	12,07	2,43

Fonte: Elaboração Própria.

### 3.2.2 Ensaios de Adensamento Oedométrico

O ensaio de adensamento unidimensional foi realizado em amostras amolgadas no laboratório de Geotecnia e Pavimentação da UNIPAMPA no equipamento da empresa Conteco, como mostra a Figura 12. Foram ensaiadas 4 amostras de solo amolgadas, com ciclos de carregamento de 1,5 kPa, 3,125 kPa, 6,25 kPa, 12,5 kPa, 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa, 400 kPa, e 2 ciclos de descarregamento seguindo a sequência de 200 kPa e 50 kPa.

As amostras foram amolgadas como ilustrado na Figura 10. O ensaio foi realizado conforme a norma NBR 12007 (ABNT, 1990). A amostra foi pesada com precisão de 0,1g e então foi preparada a célula de adensamento obedecendo a seguinte sequência: base rígida, pedra porosa inferior, papel-filtro, corpo de prova contido no anel, papel-filtro e pedra porosa superior. A Figura 12 mostra o equipamento montado já na máquina para o início do ensaio.

As amostras indeformadas foram ensaiadas no laboratório de Geotecnia da COPPE – UFRJ, seguindo a mesma sequência de ciclos de carregamento e descarregamento que foram utilizados nas amostras amolgadas. Os resultados das 6 amostras indeformadas obtidas no laboratório da COPPE – UFRJ serão utilizadas nesse trabalho como parâmetro para a correção das amostras amolgadas.

Figura 11 – Equipamento de Ensaio de Adensamento Unidimensional



Fonte: Autorial Própria

Figura 12 – Equipamento de Confinamento da Amostra para Ensaio.



Fonte: Autorial Própria

A tensão de Pré-Adensamento, bem como os valores de  $C_c$  e  $C_s$  foram obtidos a partir do método proposto por Pacheco e Silva, que é demonstrado no item 2.3.1.2.4.2.2 desse trabalho.

### **3.2.3 Método de Lunne et al. para Classificação da Qualidade da Amostra**

As amostras indeformadas obtidas junto ao laboratório de Geotecnia da COPPE – UFRJ e as amostras amolgadas ensaiadas no laboratório de Geotecnia e Pavimentação da UNIPAMPA, foram classificadas pelo método de Lunneet al., de acordo com a Tabela 2 desse trabalho.

### **3.2.4 Método de Coutinho para Classificação da Qualidade da Amostra**

As amostras indeformadas obtidas junto ao laboratório de Geotecnia da COPPE – UFRJ e as amostras amolgadas ensaiadas no laboratório de Geotecnia e Pavimentação da UNIPAMPA, foram classificadas pelo método de Coutinho, de acordo com a Tabela 3 desse trabalho.

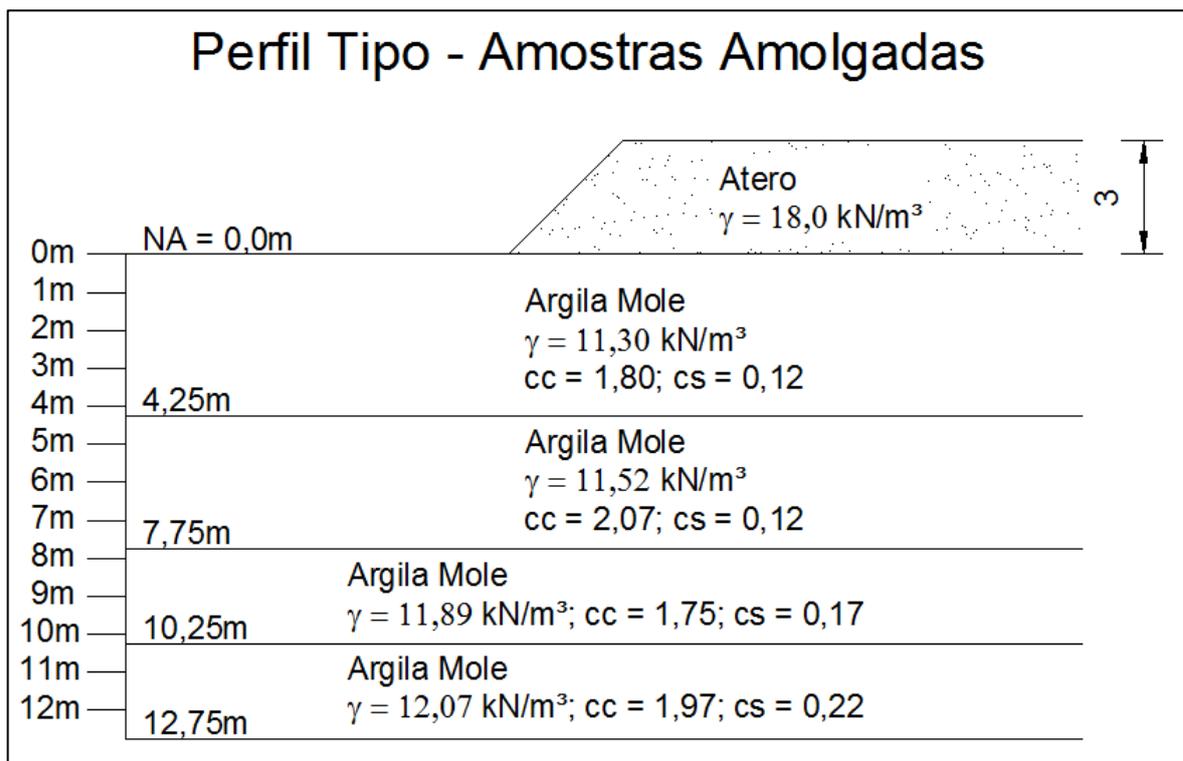
### **3.2.7 Método de Coutinho para Correção dos Parâmetros de Adensamento**

A correção da curva de adensamento proposta por Coutinho (2007) foi aplicada nas amostras amolgadas, ensaiadas no laboratório de Pavimentação e Geotecnia da UNIPAMPA, classificadas como Ruim ou Muito Ruim de acordo com a Tabela 3. O método de correção logarítmica foi utilizado como exposto no item 2.5.2 desse trabalho para a correção dessas amostras.

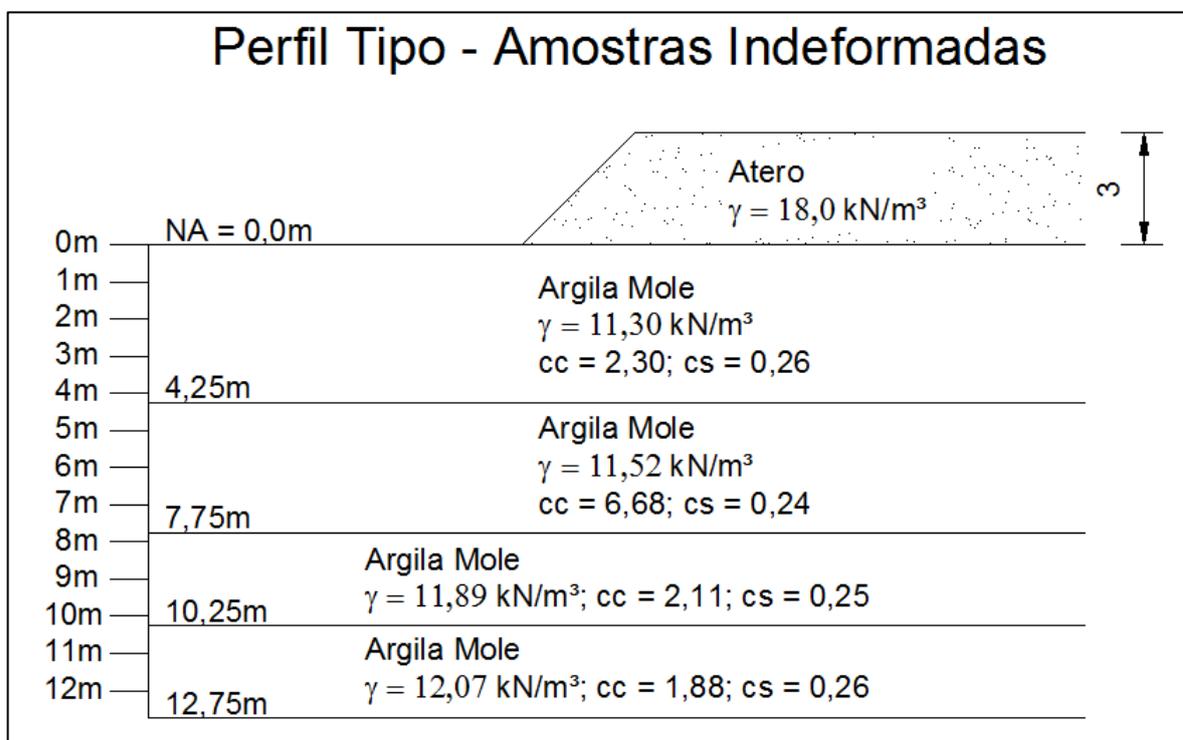
### **3.2.8 Previsão de Recalques**

Para a realização da previsão de recalques, foi inicialmente elaborado um aterro fictício de largura  $\infty$  e altura “h” = 3m, com Nível d’água na superfície, como ilustrado na Figura 13a, 13b e 13c.

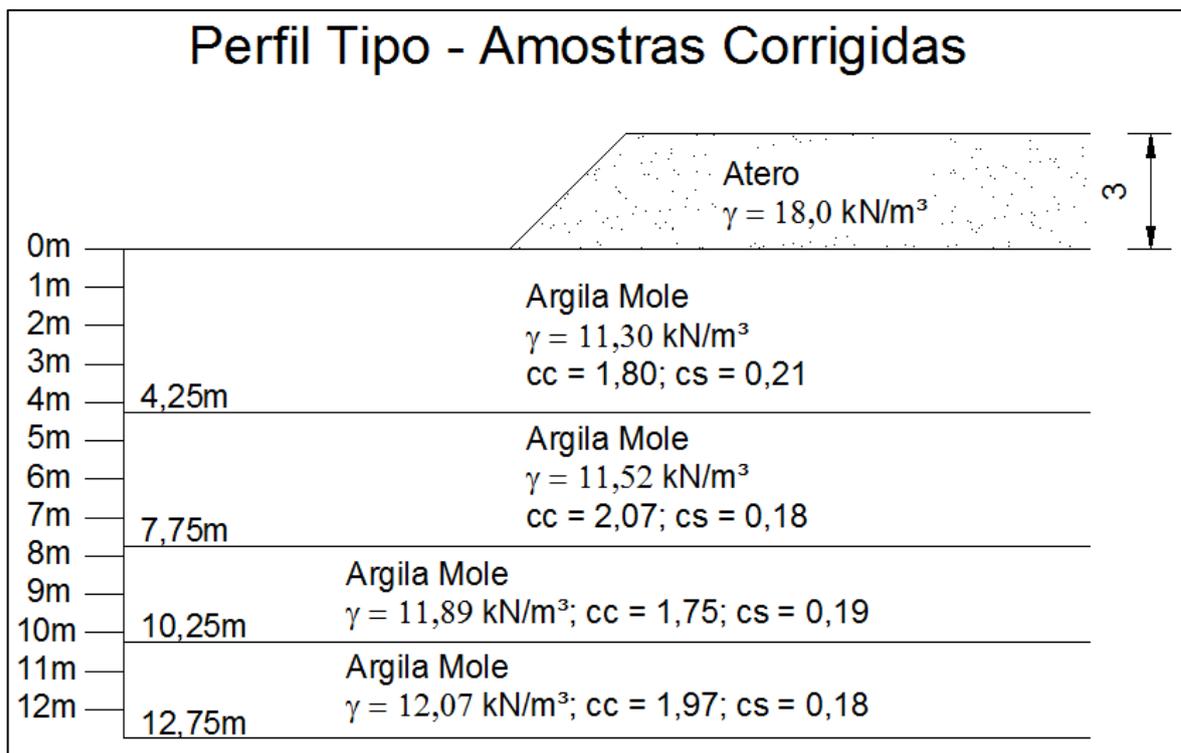
Figura 13 – Perfil Típico do Aterro



(a)



(b)



(c)

Fonte: Elaboração Própria

Após a classificação das amostras indeformadas, constatou-se que as amostras de “boa – qualidade” se limitam as camadas superficiais até uma profundidade não superior à 4m. Porém devido à camada de argila ser superior à 10m foi considerado além do recalque primário calculado através da equação 16, o recalque secundário, calculado utilizando-se a equação 17 desse trabalho.

O mesmo procedimento foi realizado para as amostras amolgadas e posteriormente para as amostras corrigidas pelo Método de Coutinho (2007), para a comparação do recalque causado nos três tipos de amostra.

No calculo do recalque total foi considerado um aterro de cota fixa e com efeito de submersão do aterro devido ao adensamento. Sendo o recalque total um somatório do recalque primário com o secundário.

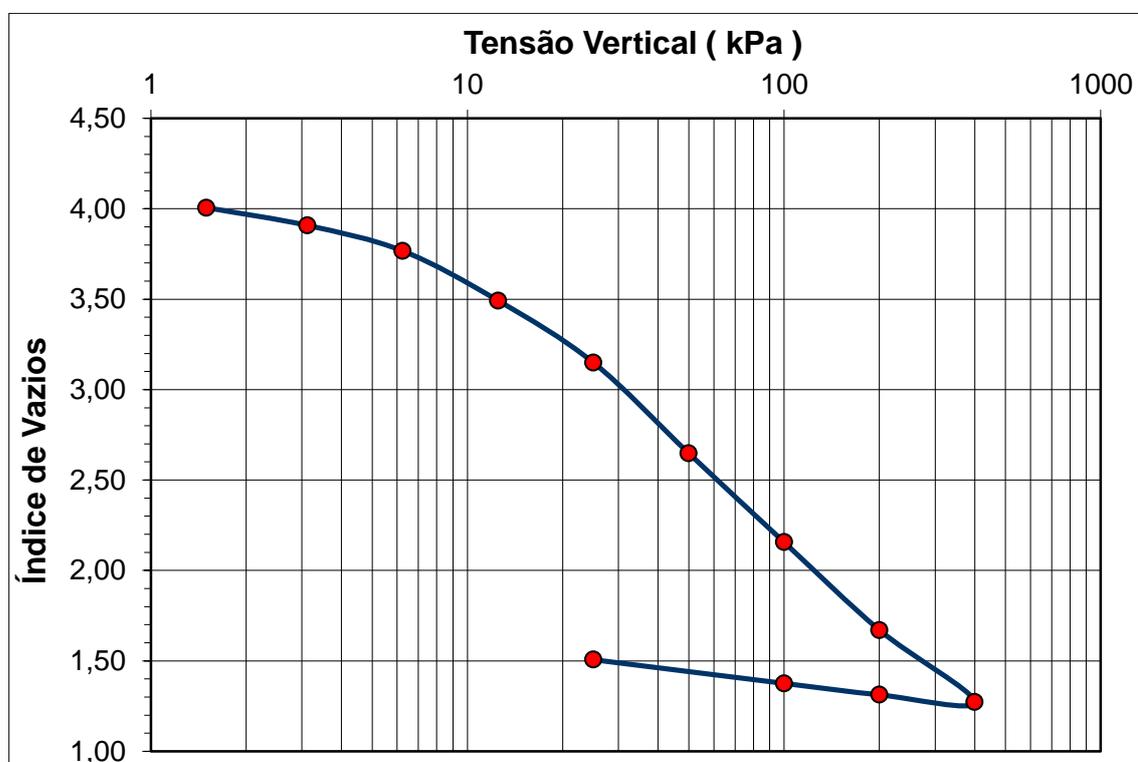
## 4. DISCUSSÕES E RESULTADOS

### 4.1 Curvas de Amostras Indeformadas

As curvas índice de vazios ( $e$ ) x tensão vertical ( $\sigma$ ), adquiridas junto ao laboratório de Geotecnia da COPPE – UFRJ são apresentadas nas Figuras 14 a 19.

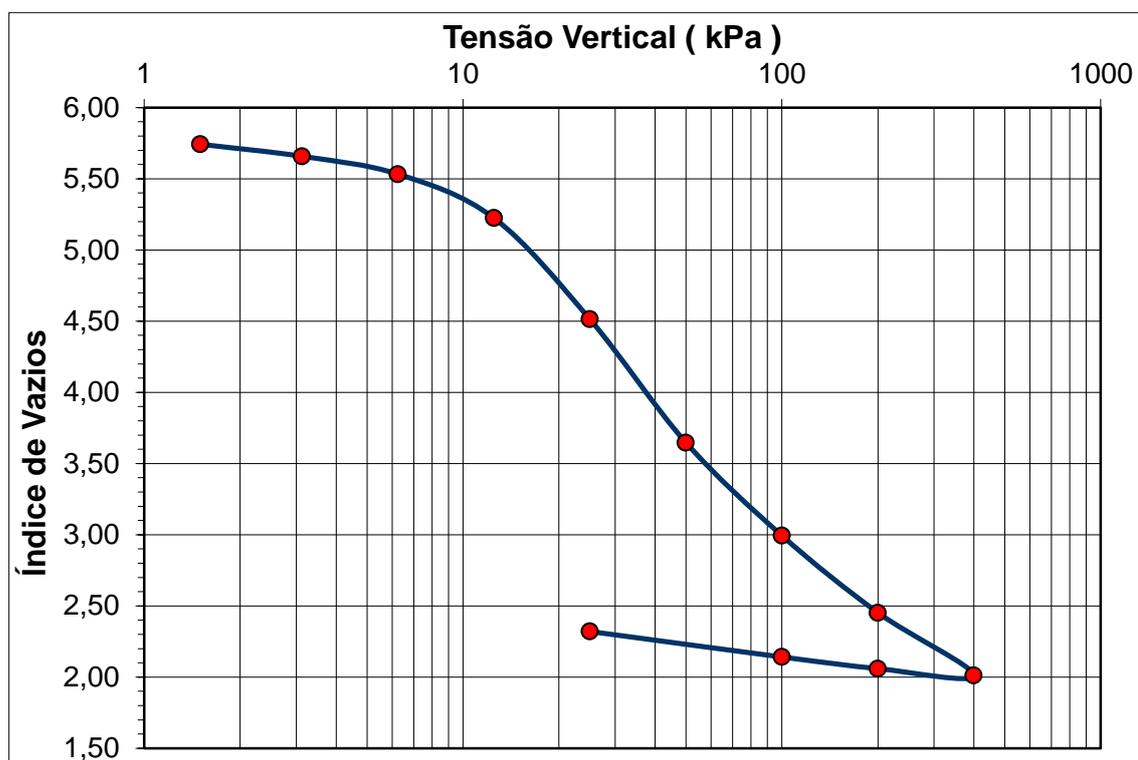
Através das curvas dos dados obtidos das amostras indeformadas foi possível realizar a correção proposta nesse trabalho.

Figura 14 – Tensão Vertical x Índice de Vazios – Profundidade 2,25 m



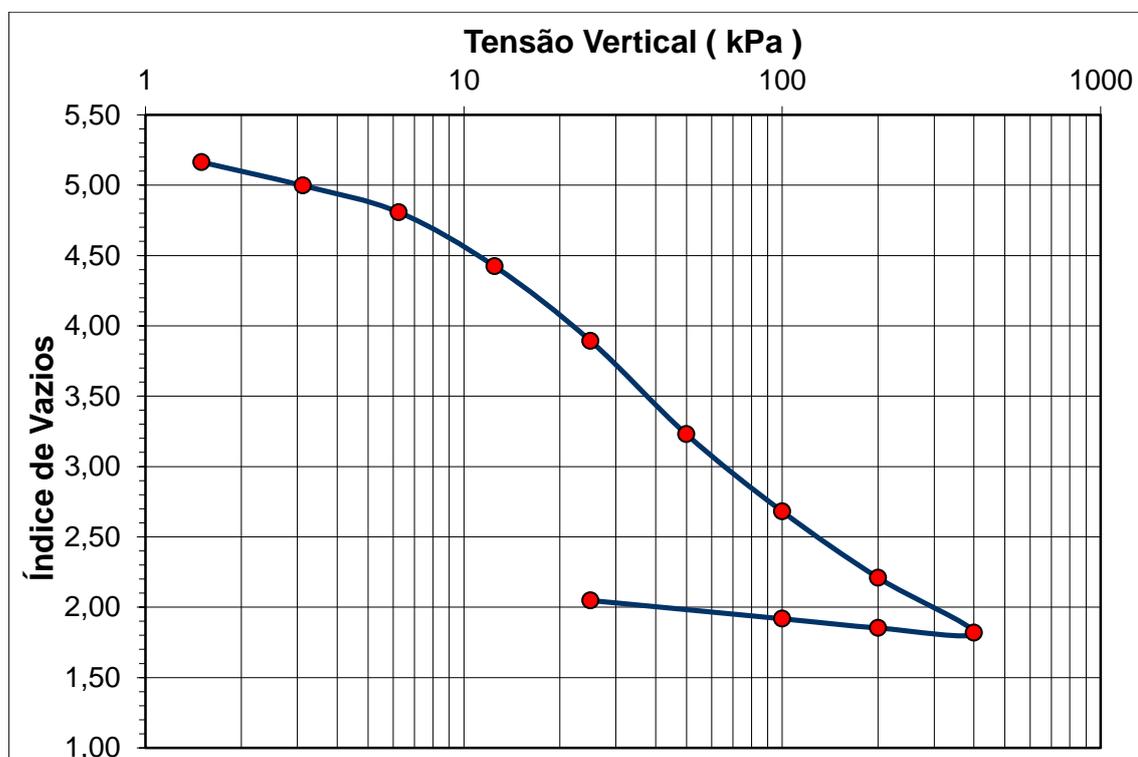
Fonte: COPPE – UFRJ.

Figura 15 – Tensão Vertical x Índice de Vazios – Profundidade 2,75m



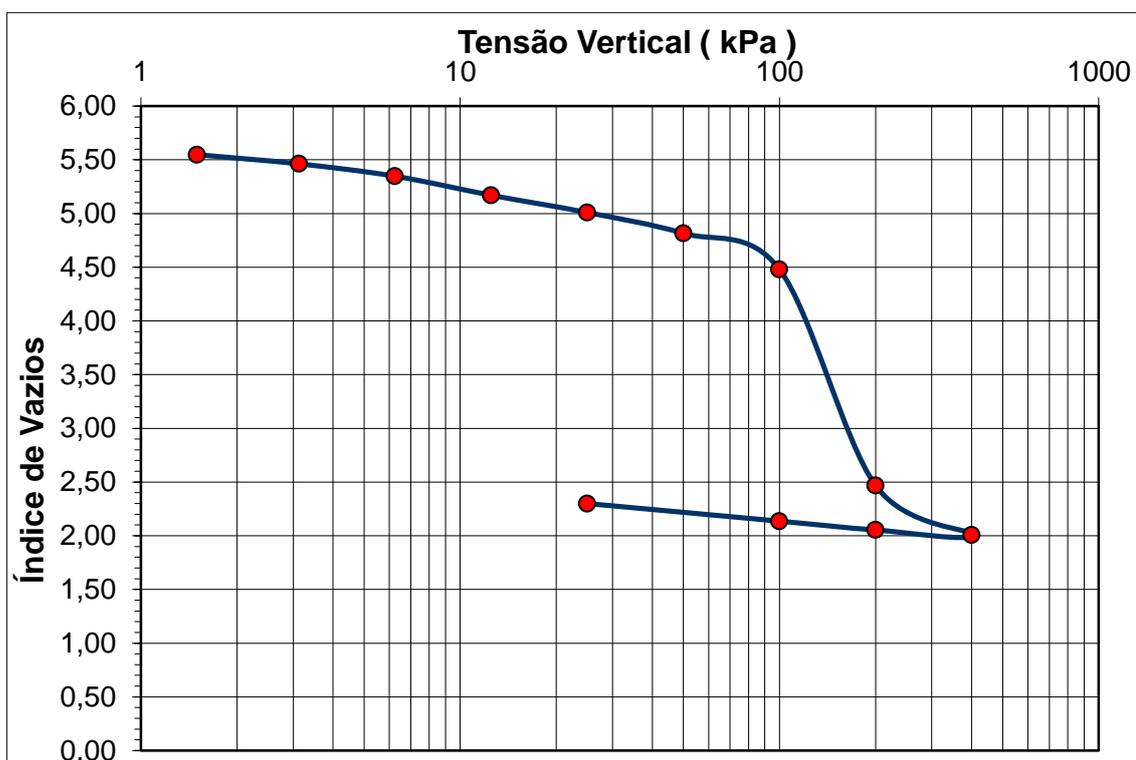
Fonte: COPPE – UFRJ.

Figura 16 – Tensão Vertical x Índice de Vazios – Profundidade 4,25m



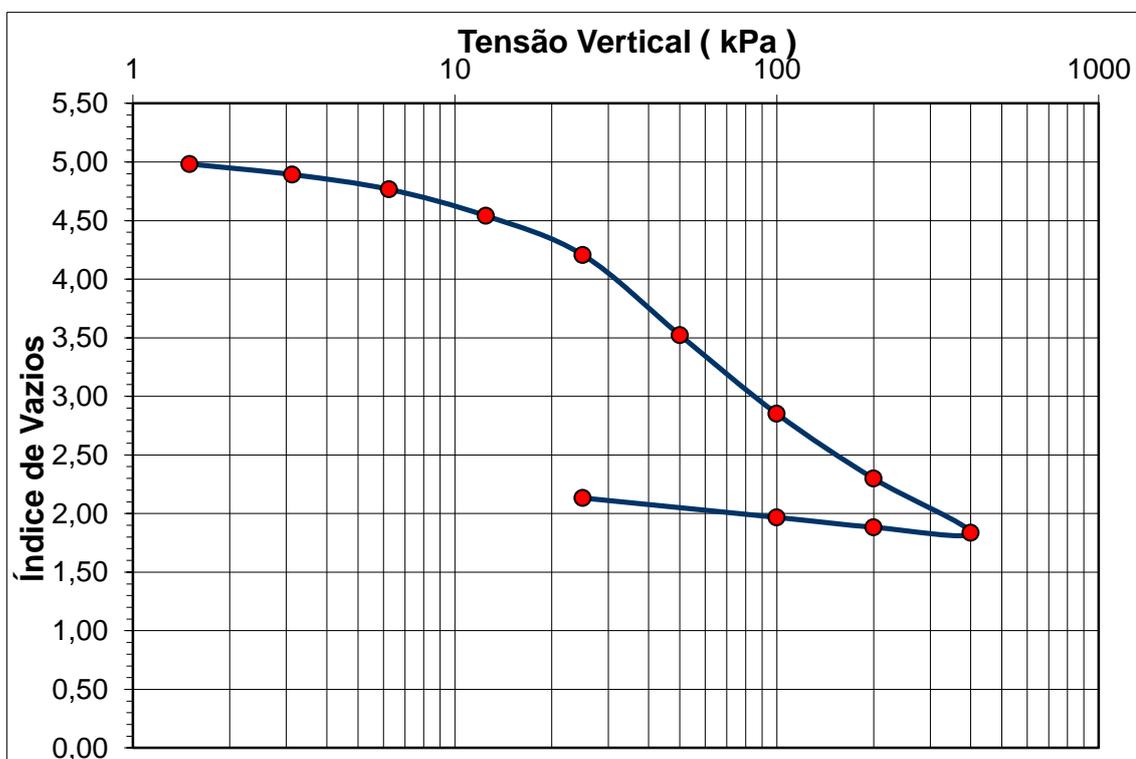
Fonte: COPPE – UFRJ.

Figura 17 – Tensão Vertical x Índice de Vazios – Profundidade 5,25m



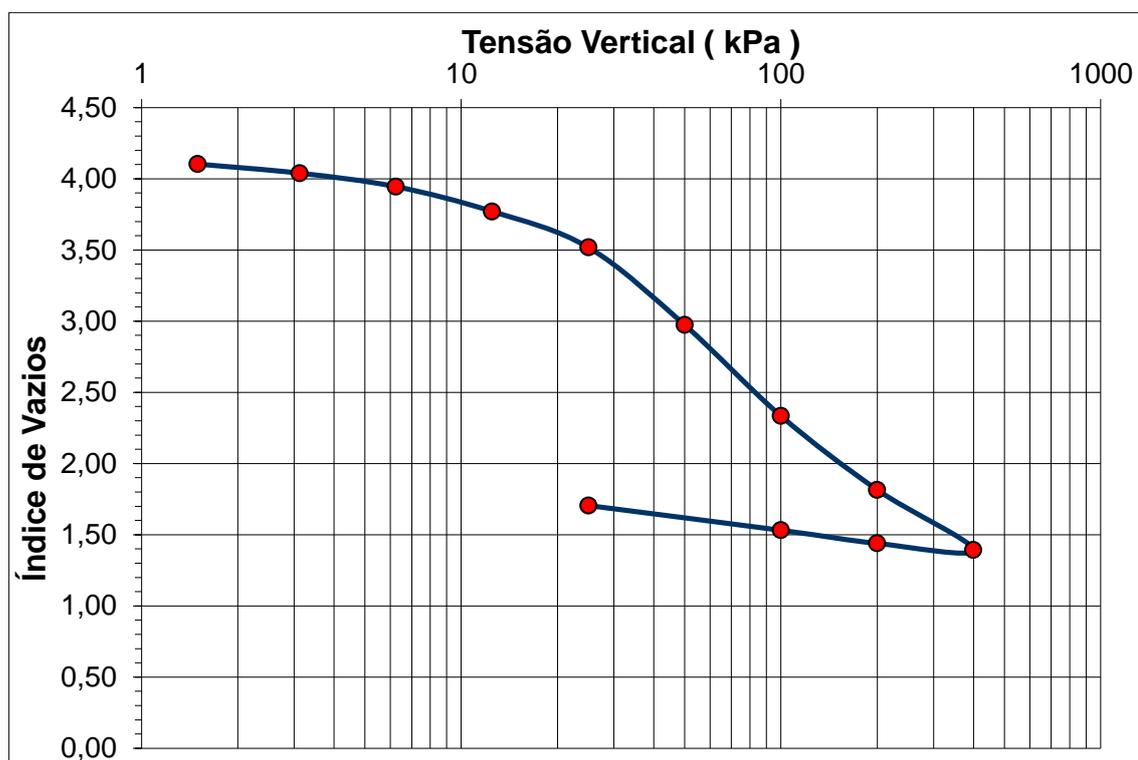
Fonte: COPPE – UFRJ.

Figura 18 – Tensão Vertical x Índice de Vazios – Profundidade 8,75m



Fonte: COPPE – UFRJ

Figura 19 – Tensão Vertical x Índice de Vazios – Profundidade 11,25m

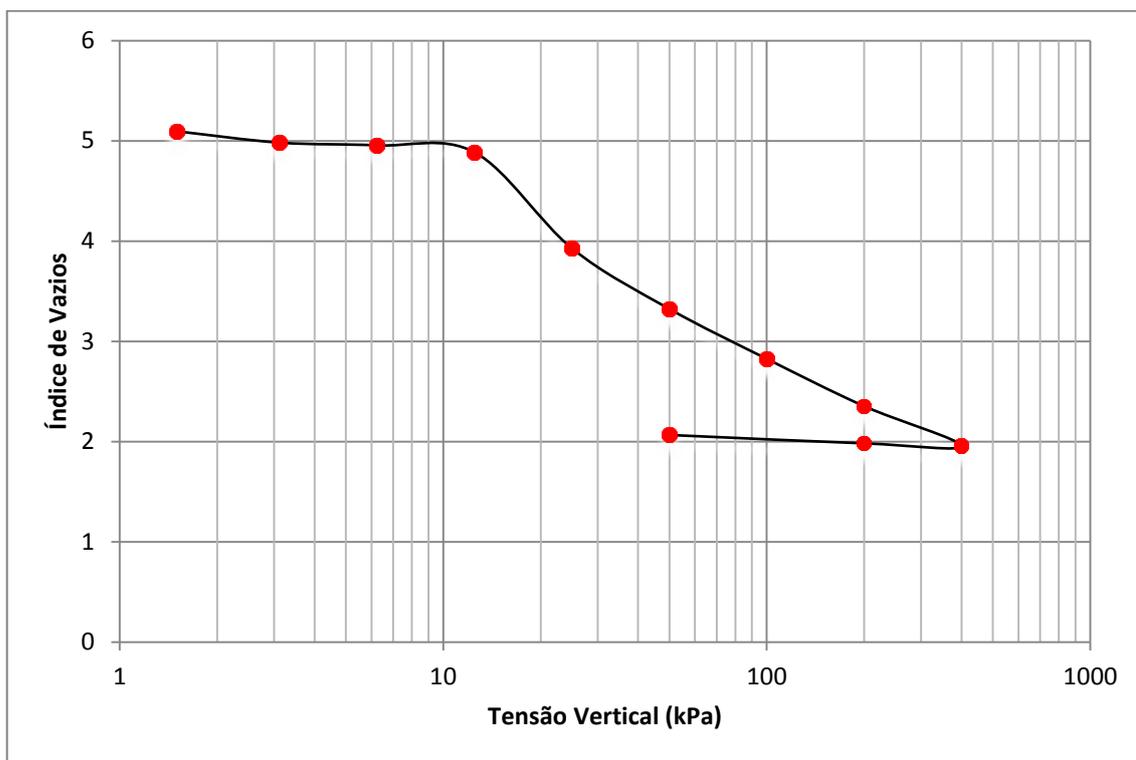


Fonte: COPPE – UFRJ.

## 4.2 Curvas de Amostras Amolgadas

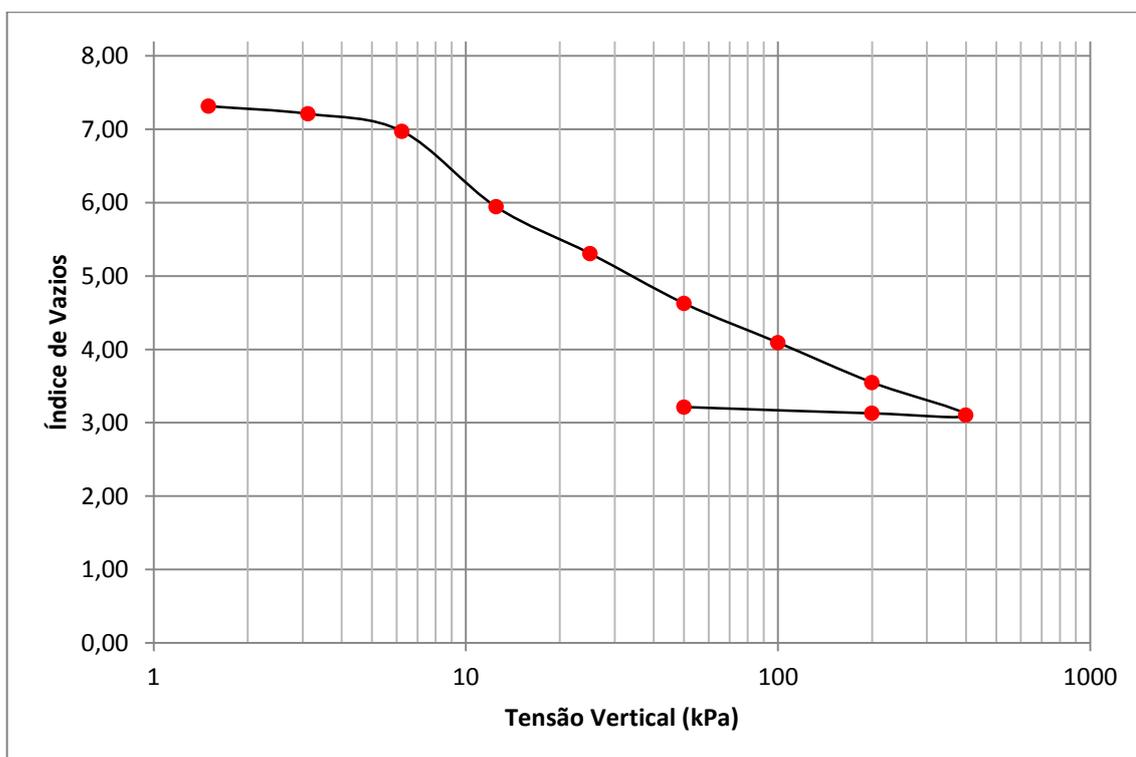
Nesse item do trabalho estão apresentadas as curvas índice de vazios x tensão vertical, das amostras amolgadas. Considerando que os parâmetros obtidos a partir dessas amostras não são confiáveis para a utilização em projeto, trazendo resultados inverídicos, esses parâmetros foram corrigidos para a utilização no projeto proposto. As curvas de amostras amolgadas estão expostas nas Figuras 20 a 23.

Figura 20 – Tensão Vertical x Índice de Vazios – Profundidade 2,75m



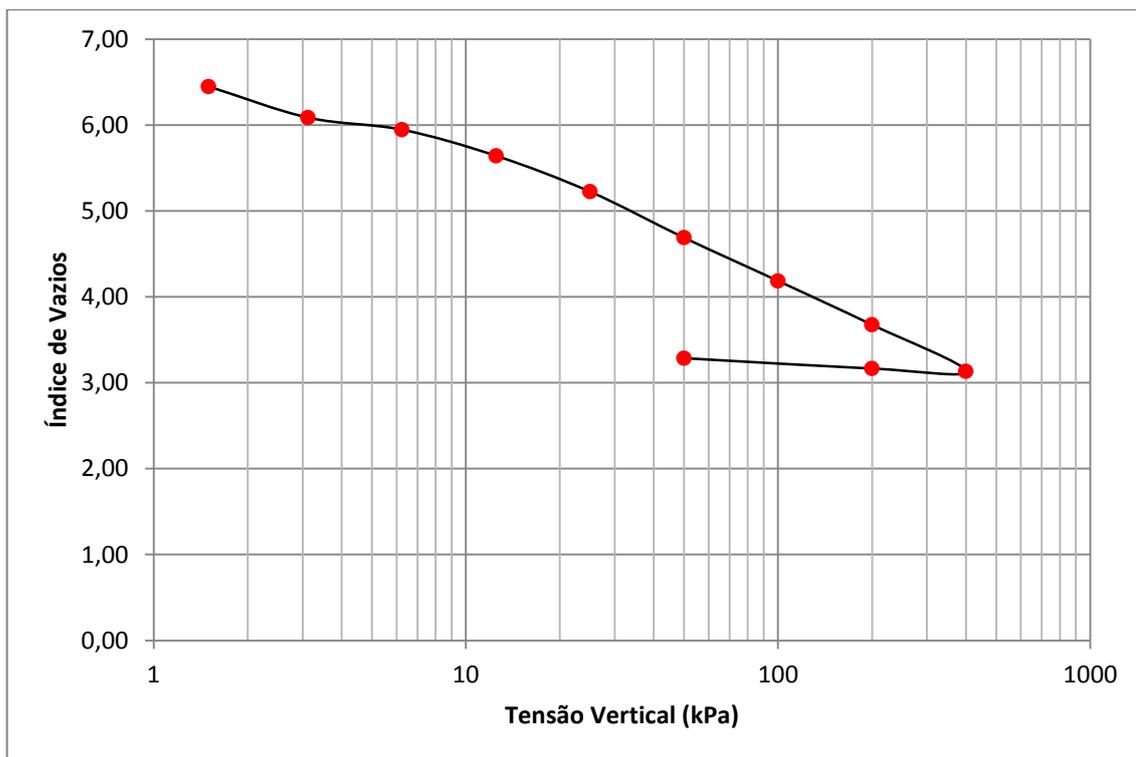
Fonte: Elaboração Própria.

Figura 21 – Tensão Vertical x Índice de Vazios – Profundidade 5,25m



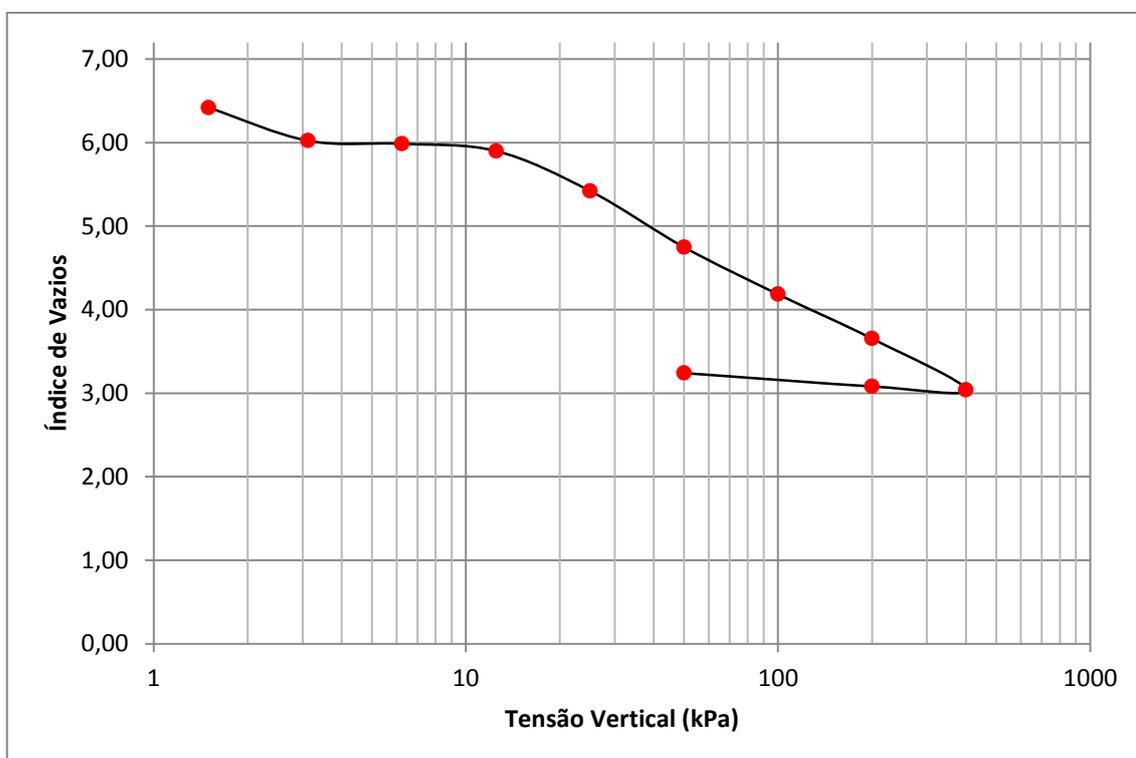
Fonte: Elaboração Própria.

Figura 22 – Tensão Vertical x Índice de Vazios – Profundidade 8,75m



Fonte: Elaboração Própria.

Figura 23 – Tensão Vertical x Índice de Vazios – Profundidade 11,25m



Fonte: Elaboração Própria.

### **4.3 Classificação das Amostras**

A classificação das amostras foi feita obedecendo aos critérios propostos por Lunne et al (1997) e Coutinho (2007), expostos nas Tabelas 2 e 3 desse trabalho. A Tabela 5 exhibe as classificações das amostras indeformadas e amolgadas.

A partir da Tabela 5, é possível verificar que mesmo em amostras antes dadas como de “boa qualidade” (indeformadas) a classificação de Lunne et al (1997) e Coutinho (2007) comprovam a grande dificuldade de manipulação dessas amostras. Contudo apenas para as amostras que se encontram mais próximas da superfície foi possível a classificação como amostras de boa qualidade.

Tabela 5 – Classificação das Amostras

Amostra	Profundidade (m)	$\sigma'_{vm}$ (kPa)	$\sigma'_{v0}$ (kPa)	OCR	$e_0$	$e(\sigma'_{v0})$	$\Delta e/e_0$	Lune et al. (1997)	Coutinho (2007)
Indeformada	2,25 - 2,75	12,00	7,11	1,69	4,04	3,75	0,07	Ruim	Boa a Aceitável
	2,75 - 3,25	10,00	6,27	1,59	5,77	5,55	0,04	Excelente a Muito Bom	Excelente a Muito Bom
	4,25 - 4,75	8,00	9,23	0,87	5,20	4,60	0,12	Ruim	Ruim
	5,25 - 5,75	90,00	10,86	8,29	5,57	5,20	0,07	Ruim	Ruim
	8,75 - 9,25	16,00	19,32	0,83	5,02	4,40	0,12	Ruim	Ruim
	11,25 - 11,75	21,00	26,10	0,80	4,11	3,52	0,14	Muito Ruim	Muito Ruim
Amolgada	2,75 - 3,25	6,50	6,27	1,04	5,43	4,90	0,10	Ruim	Ruim
	5,25 - 5,75	3,00	10,86	0,28	8,06	6,20	0,23	Muito Ruim	Muito Ruim
	8,75 - 9,25	7,00	19,32	0,36	6,79	5,50	0,19	Muito Ruim	Muito Ruim
	11,25 - 11,75	12,50	26,10	0,48	7,16	5,40	0,25	Muito Ruim	Muito Ruim

Onde:  $\sigma'_{vm}$  = Tensão de Pré-Adensamento;  $\sigma'_{v0}$  = Tensão Efetiva Inicial; OCR = Razão de Pré-Adensamento;  $e_0$  = Índice de Vazios Inicial da Amostra;  $e(\sigma'_{v0})$  = Índice de Vazios para a Tensão Efetiva do Solo;  $\Delta e = (e_0 - e(\sigma'_{v0}))$ .

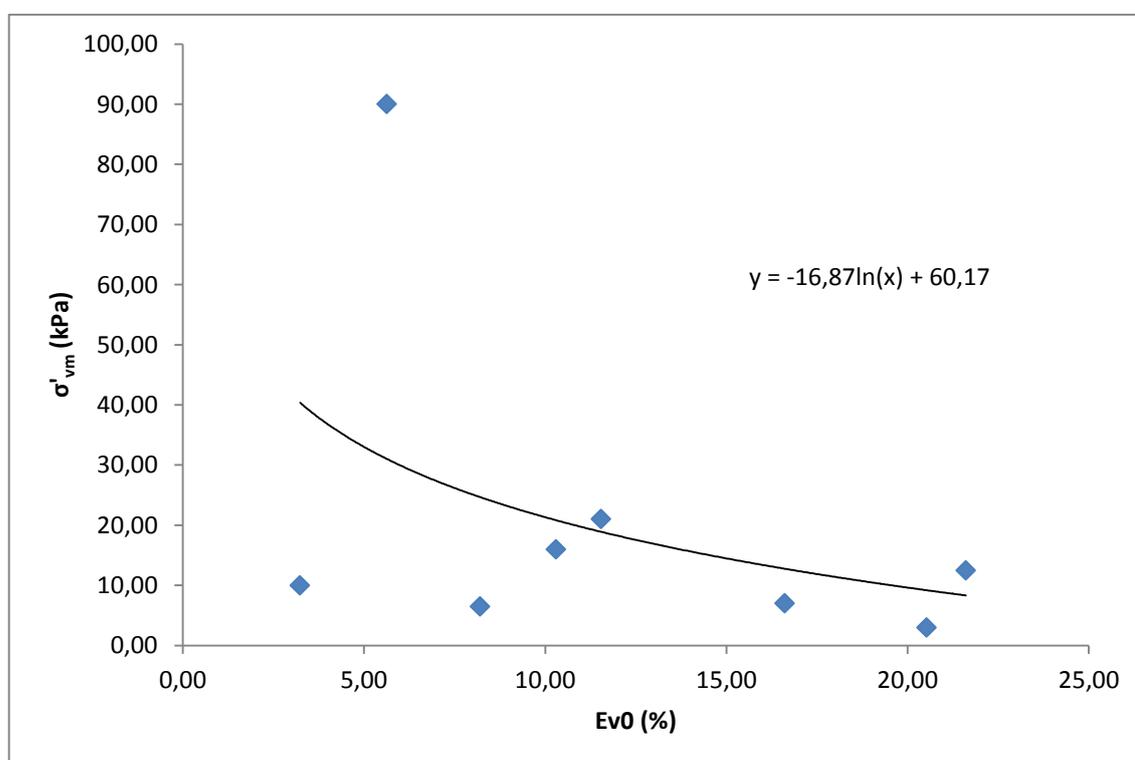
Fonte: Elaboração Própria.

#### 4.4 Correção dos Parâmetros das Amostras Amolgadas

Nesse trabalho optou-se por apresentar a proposta de Coutinho (2007), para correção das amostras amolgadas. Porém devido ao número reduzido de amostras de "boa qualidade", a confiabilidade nos dados adquiridos se torna ameaçado. Em um ajuste logarítmico proposto por Coutinho (2007), quando o número de amostras de "má qualidade" é superior aos de "boa qualidade", a tendência é que as amostras de "má qualidade", "corrijam" as de "boa qualidade".

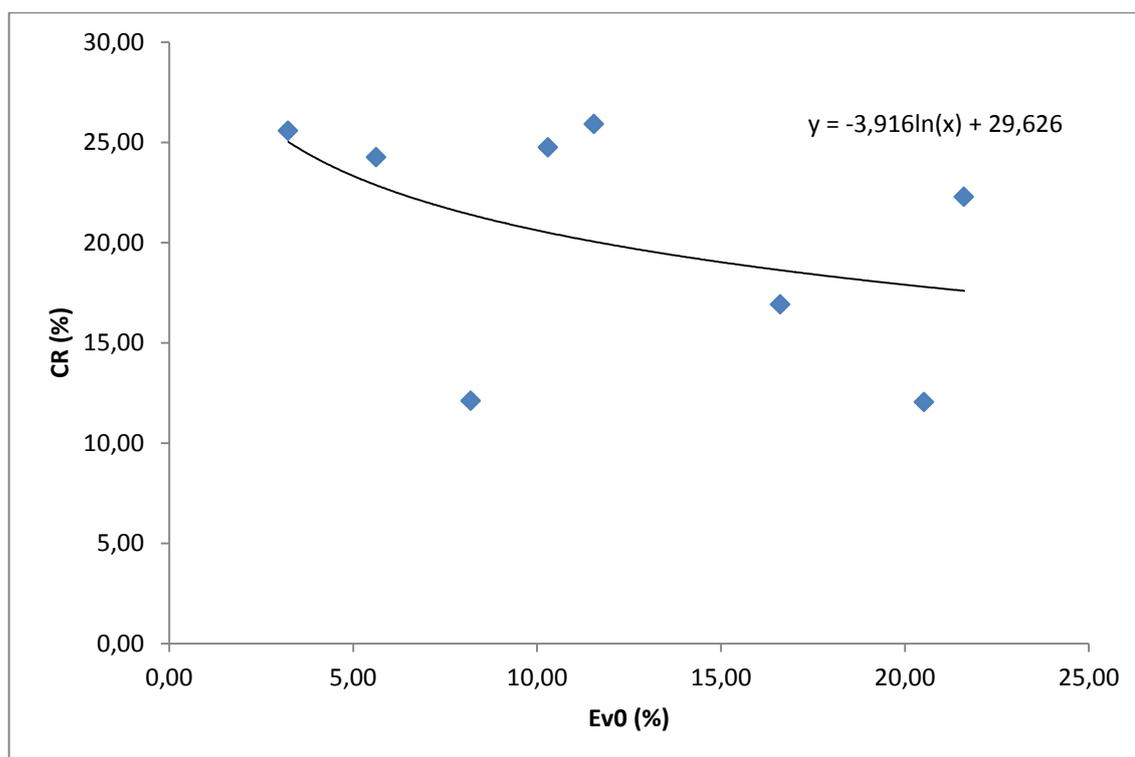
Para confrontar essa afirmação foram realizados os cálculos de recalque para amostras indeformadas, amolgadas e corrigidas. Almeida; Marques (2010), afirmam que em amostras amolgadas o recalque é maior do que em amostras de "boa qualidade", o que gera aterros maiores, no caso de aterros de cota fixa, o que faz necessária a correção da amostra amolgada para um resultado mais fidedigno de recalque. As Figuras 24 e 25 apresentam os gráficos de correção da tensão de pré-adensamento e razão de compressão. A Tabela 5 apresenta os resultados corrigidos.

Figura 24 – Correção da Tensão de Pré-Adensamento



Fonte: Elaboração Própria.

Figura 25 – Correção da Razão de Compressão



Fonte: Elaboração Própria.

Tabela 6 – Correção das Amostras

Amostra	Profundidade (m)	$\sigma'_{vm}$ (kPa)	$\sigma'_{vm}$ (kPa) (Corrigida)	Ev0 (%)	CR (%)	CR (%) (Corrigido)
Amolgada	2,75 - 3,25	6,50	24,67	8,20	12,10	21,39
	5,25 - 5,75	3,00	9,19	20,53	12,04	17,79
	8,75 - 9,25	7,00	12,76	16,61	16,92	18,62
	11,25 - 11,75	12,50	8,33	21,61	22,28	17,59

Legenda: Evo = Deformação Volumétrica Inicial da Amostra; CR = Razão de Compressão.

Fonte: Elaboração Própria.

#### 4.5 Cálculo dos Recalques para Amostras Indeformadas, Amolgadas e Corrigidas

Os valores dos recalques primários, secundários e totais, foram calculados segundo descrito no Capítulo 2 desse trabalho. Os resultados dos recalques para as amostras Indeformadas são mostrados nas Tabelas 7, 8 e 9, os resultados das amostras amolgadas estão nas Tabelas 10, 11 e 12, os resultados obtidos a partir da correção das amostras estão nas Tabelas 13, 14 e 15. As Figuras 26 a 32 sintetizam a comparação dos valores de recalques para as três amostras.

Tabela 7 – Calculo do Recalque Primário – Amostra Indeformada

Calculo do recalque primário para as camadas 1, 2, 3 e 4 (m)						
Tentativa	Camada	h aterro	r n total estimado	r n calculado	r n total calculado	r n total estimado - r n total calculado
1	1	3	0,800	1,094	1,668	-0,868
	2			-0,538		
	3			0,693		
	4			0,418		
2	1	3	1,000	1,069	1,567	-0,567
	2			-0,588		
	3			0,677		
	4			0,409		
3	1	3	1,371	1,020	1,371	0,000
	2			-0,687		
	3			0,647		
	4			0,390		

Legenda: r n = Altura de Recalque.

Fonte: Elaboração Própria

Tabela 8 – Calculo do Recalque Secundário – Amostra Indeformada

Calculo do recalque secundário para as camadas 1, 2, 3 e 4 (m)	
1	0,167
2	0,116
3	0,137
4	0,111
Total	0,530

Fonte: Elaboração Própria

Tabela 9 – Calculo do Recalque Total – Amostra Indeformada

Calculo do recalque total (m)	
Recalque Primário + Recalque Secundário	1,901

Fonte: Elaboração Própria

Tabela 10 – Calculo do Recalque Primário – Amostra Amolgada

Calculo do recalque primário para as camadas 1, 2, 3 e 4 (m)						
Tentativa	Camada	h aterro	r n total estimado	r n calculado	r n total calculado	r n total estimado - r n total calculado
1	1	3	1,000	1,120	3,313	-2,313
	2			1,050		
	3			0,720		
	4			0,424		
2	1	3	2,500	0,926	2,846	-0,346
	2			0,931		
	3			0,627		
	4			0,362		
3	1	3	2,7515	0,885	2,752	0,000
	2			0,907		
	3			0,609		
	4			0,350		

Fonte: Elaboração Própria

Tabela 11 – Calculo do Recalque Secundário – Amostra Amolgada

Calculo do recalque secundário para as camadas 1, 2, 3 e 4 (m)	
1	0,086
2	0,050
3	0,077
4	0,067
Total	0,280

Fonte: Elaboração Própria

Tabela 12 – Calculo do Recalque Total – Amostra Amolgada

Calculo do recalque total (m)	
Recalque Primário + Recalque Secundário	3,032

Fonte: Elaboração Própria

Tabela 13 – Calculo do Recalque Primário – Amostra Corrigida

Calculo do recalque primário para as camadas 1, 2, 3 e 4 (m)						
Tentativa	Camada	h aterro	r n total estimado	r n calculado	r n total calculado	r n total estimado - r n total calculado
1	1	3	1,000	0,596	2,167	-1,167
	2			0,581		
	3			0,514		
	4			0,476		
2	1	3	1,500	0,522	2,017	-0,517
	2			0,550		
	3			0,487		
	4			0,458		
3	1	3	1,889	0,458	1,889	0,000
	2			0,523		
	3			0,464		
	4			0,444		

Fonte: Elaboração Própria

Tabela 14 – Calculo do Recalque Secundário – Amostra Corrigida

Calculo do recalque secundário para as camadas 1, 2, 3 e 4 (m)	
1	0,152
2	0,074
3	0,085
4	0,053
Total	0,364

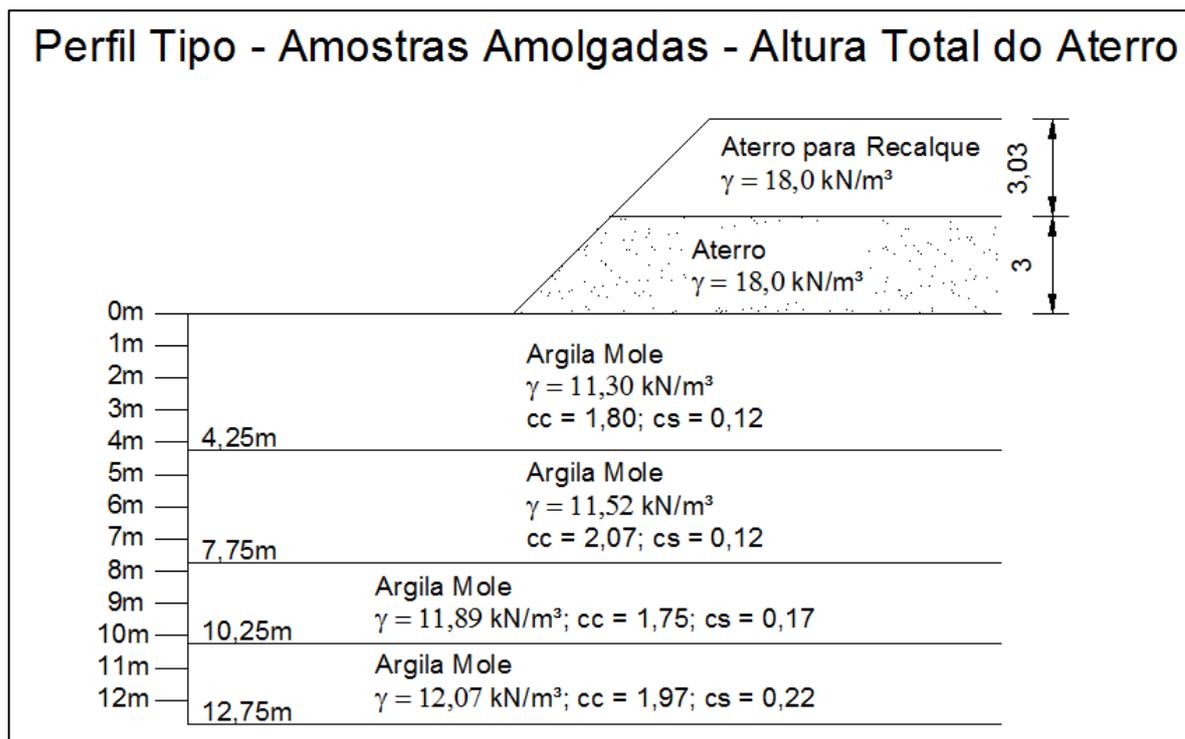
Fonte: Elaboração Própria

Tabela 15 – Calculo do Recalque Total – Amostra Corrigida

Calculo do recalque total (m)	
Recalque Primário + Recalque Secundário	2,253

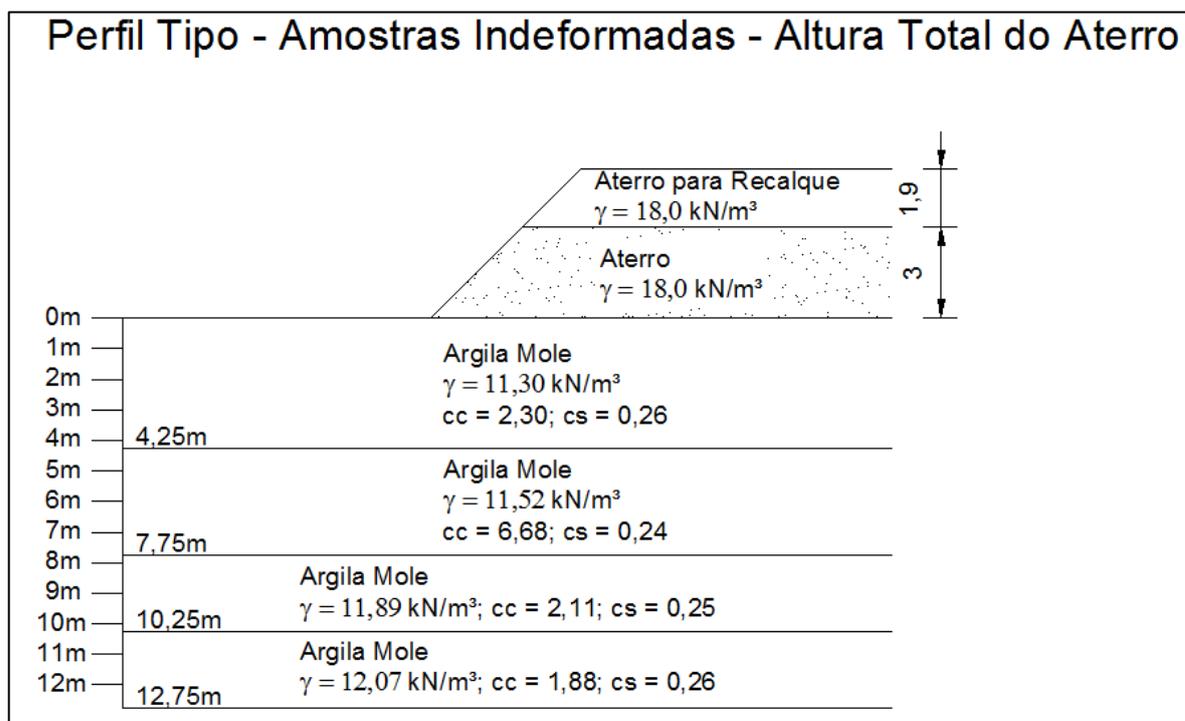
Fonte: Elaboração Própria

Figura 26 – Amostra Amolgada – Altura Final do Aterro



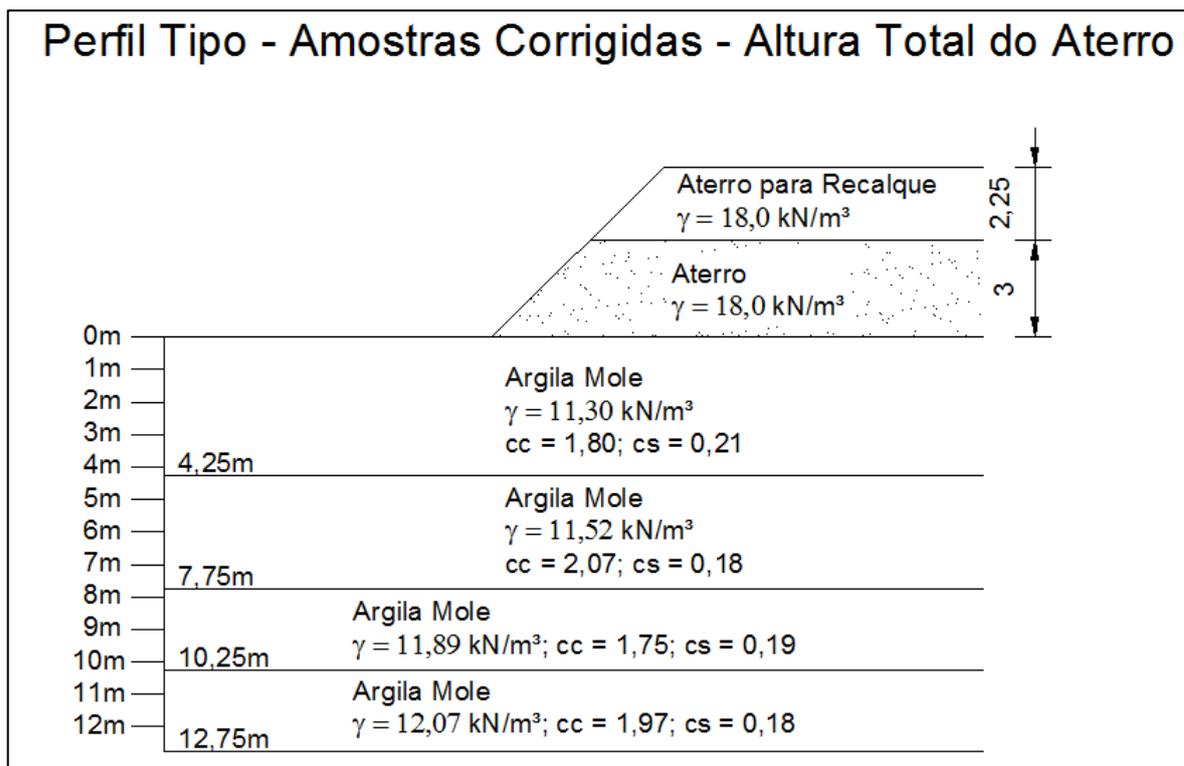
Fonte: Elaboração Própria.

Figura 27 – Amostra Indeformada – Altura Final do Aterro



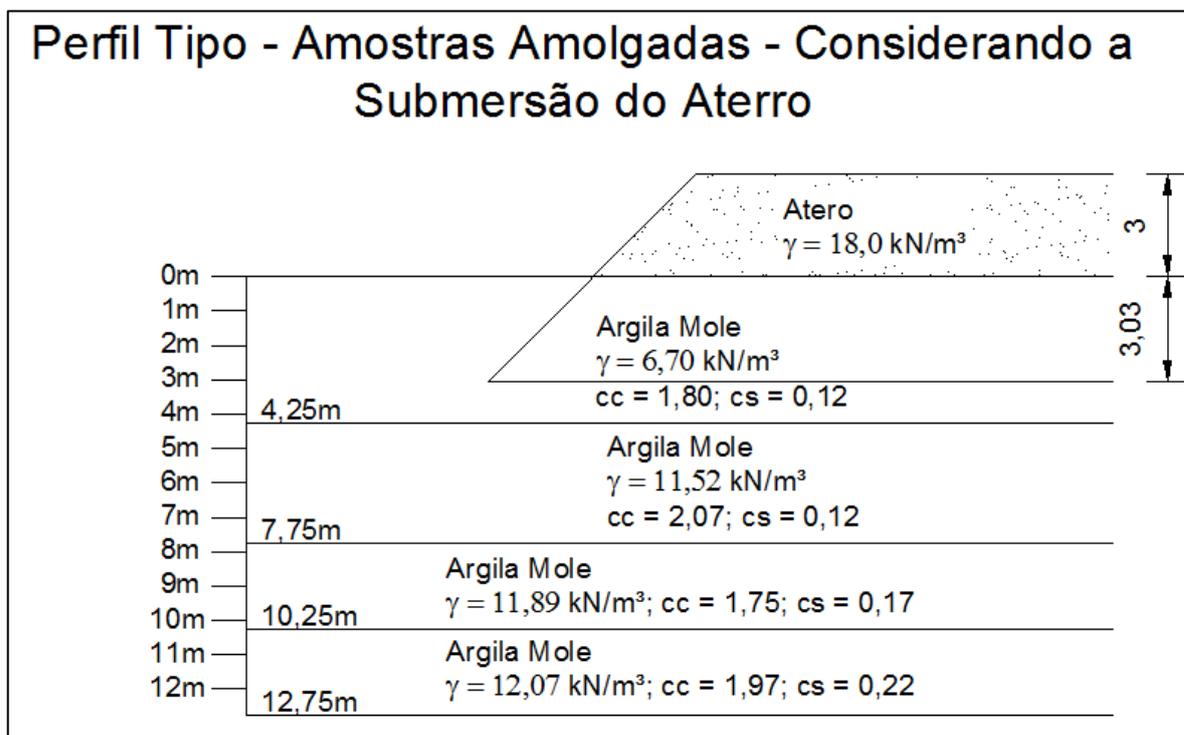
Fonte: Elaboração Própria.

Figura 28 – Amostra Corrigida – Altura Final do Aterro



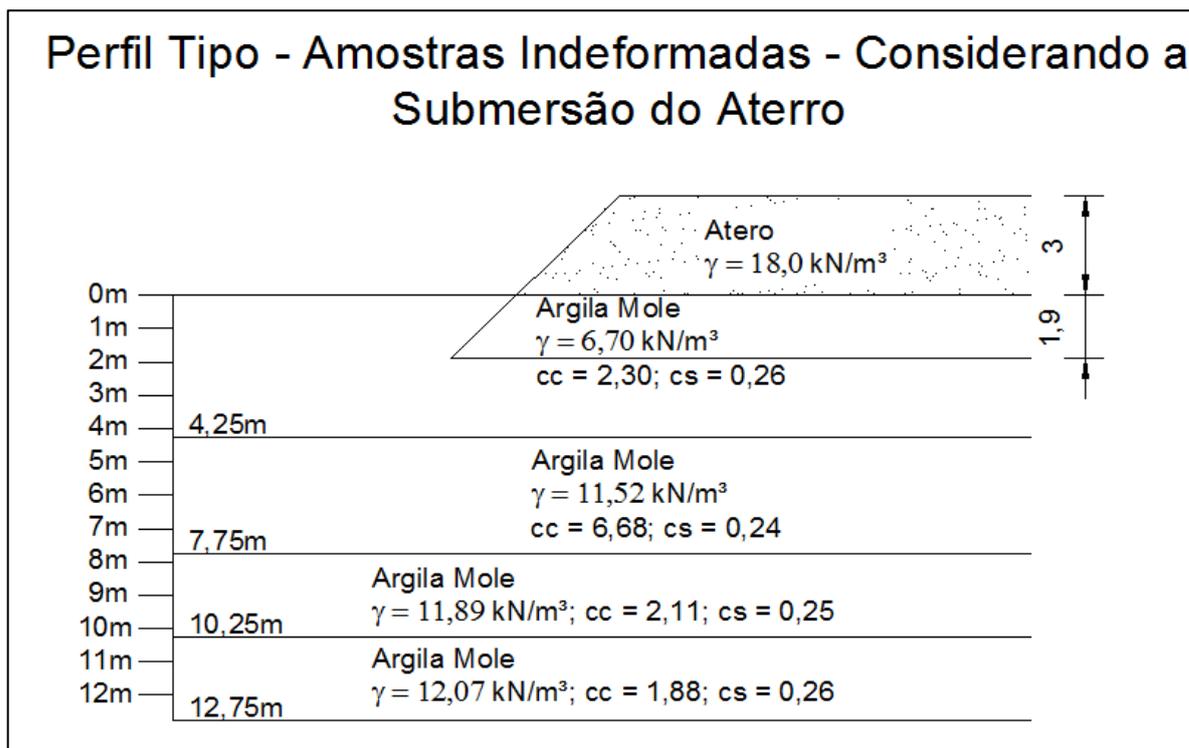
Fonte: Elaboração Própria.

Figura 29 – Amostra Amolgada – Submersão do Aterro



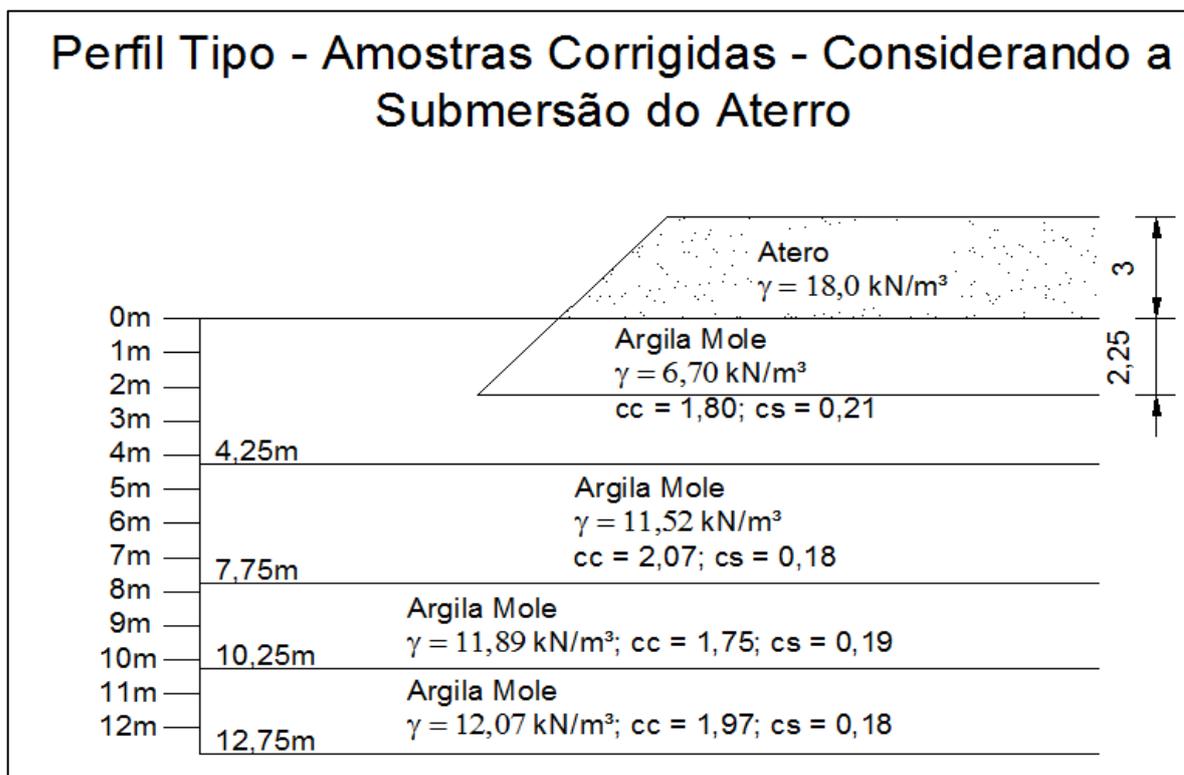
Fonte: Elaboração Própria.

Figura 30 – Amostra Indeformada – Submersão do Aterro



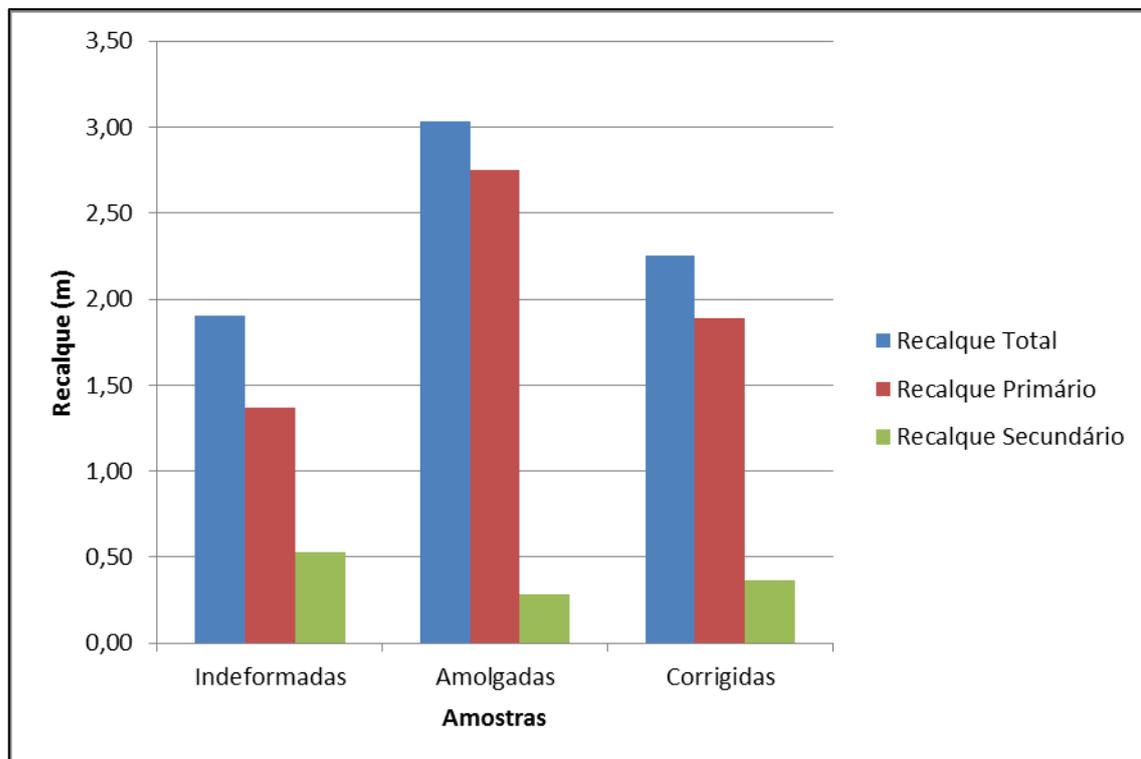
Fonte: Elaboração Própria.

Figura 31 – Amostra Corrigida – Submersão do Aterro



Fonte: Elaboração Própria.

Figura 32 – Comparação dos Recalques para as Amostras Indeformadas, Amolgadas e Corrigidas



Fonte: Elaboração Própria

Nos Gráficos expostos das Figuras 14 a 23, é possível realizar a comparação entre as amostras indeformadas e amolgadas, onde é possível notar uma grande perturbação na amostra amolgada, o que causa a mudança na inclinação da reta virgem e de índice de vazios inicial da amostra.

Com a mudança na inclinação da reta virgem, os valores de  $C_c$ ,  $C_s$  e Tensão de Pré-adensamento são alterados. Na sua maioria a inclinação da reta diminui conforme o aumento da partubação da amostra, o que leva a um valor menor de Tensão de Pré-adensamento.

A partir do Gráfico mostrado na Figura 26, é possível notar que para o presente estudo quanto maior for o grau de amolgamento da amostra maior será o seu recalque primário e menor o seu recalque secundário, quando comparado com as amostras indeformadas. Já no caso do recalque secundário, será maior em amostras indeformadas.

Pode-se notar também que os valores de recalque total para as amostras indeformadas e corrigidas foram próximos, variando em apenas 18%. Já para a amostra amolgada há uma variação de 35% para a amostra corrigida. Quando

comparados os valores de recalque total da amostra indeformada e da amostra amolgada chega-se a uma variação de 60%. Isto prova a necessidade real, de amostras de boa qualidade para obtenção de projetos que condizem com a realidade.

Quanto à necessidade de material para a confecção do aterro, cabe salientar que um aterro projetado a partir de resultados de amostras amolgadas, acarretaria no cálculo errado da quantidade de material. O recalque calculado para a amostra amolgada corresponde a 101% da altura final do aterro, sendo assim induziria à necessidade do dobro de material para a construção do aterro. Porém quando analisamos o recalque para a amostra indeformada fica evidente o erro causado na utilização de amostras amolgadas no cálculo do recalque, pois para a amostra indeformada se confirma a necessidade de apenas 63% a mais em altura de solo.

O presente trabalho avalia apenas a altura do recalque levando em consideração a resistência do solo. Para complementar o trabalho deve-se realizar o estudo de estabilização do solo. Podendo ser utilizado para o melhoramento da estabilidade geotêxtil, bermas de equilíbrio ou aterro estaqueado sobre plataforma de geogrelhas, entre outros métodos encontrados na literatura.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

### 5.1 Considerações Finais

Através do ensaio de Adensamento Oedométrico, realizado em solo amolgado, no laboratório de Geotecnia e Pavimentação da UNIPAMPA, foi possível realizar o traçado das curvas de adensamento para os solos amolgados. As curvas geradas a partir de solos Indeformados foram geradas no laboratório de Geotecnia da COPPE - UFRJ, de onde foram retirados os parâmetros da Tensão de Pré-Adensamento e Coeficiente de Recompressão, utilizados para realizar a correção dos parâmetros gerados a partir de amostras amolgadas. Optou-se por utilizar o Método de Correção de Parâmetros da Curva de Adensamento, proposto por Coutinho (2007).

Através dos parâmetros geotécnicos do solo, foram obtidos os valores de índice de vazios inicial e índice de vazios para a Tensão Efetiva do Solo utilizada para a classificação das amostras amolgadas e indeformadas.

A partir dos parâmetros geotécnicos dos solos amolgados, indeformados e corrigidos, foi efetuado o cálculo de recalque para os três tipos de amostras. O cálculo de recalque total foi obtido a partir do somatório dos recalques primários e secundários. O recalque primário foi obtido a partir da consideração do efeito de submersão do aterro. O recalque secundário foi calculado a partir do proposto por Martins (2005).

Para as amostras Indeformadas os valores de recalque primário, recalque secundário e recalque total encontrados foram, respectivamente, 1,37m, 0,53m e 1,90m. Isto resulta em uma altura total de aterro igual a 4,90m.

Em amostras amolgadas os valores de recalque primário, recalque secundário e recalque total encontrados foram respectivamente, 2,75m, 0,28m, 3,03m. Resultando em um aterro de altura total igual a 6,03m. Quando comparado com o valor encontrado de aterro para amostras indeformadas, fica evidente a disparidade entre ambos. Com isso fica clara, a necessidade de conhecer a qualidade da amostra trabalhada para evitar erros de projeto que causam superdimensionamento dos aterros.

As amostras corrigidas demonstram uma melhora significativa quanto à altura final do aterro quando comparada com as amostras amolgadas, ficando a altura final

do aterro para amostras corrigidas 15% menor do que para amostras amolgadas. Quando comparada com as amostras indeformadas a altura final do aterro fica 5% maior, o que comprava a eficiência do método proposto por Coutinho (2007). Sendo assim os valores de recalque primário, recalque secundário, recalque total e altura total do aterro são respectivamente 1,89m, 0,36m, 2,25m e 5,25m.

Analisando os valores obtidos de recalques totais para as amostras indeformadas, amolgadas e corrigidas é possível afirmar que o método de correção dos parâmetros da curva de adensamento proposto por Coutinho (2007) é válido para a argila mole estudada no presente estudo. Essa afirmativa é possível já que o valor de recalque encontrado após a correção se torna intermediário aos valores das amostras indeformadas e amolgadas, tendendo a ficar mais próximo da amostra indeformada.

Através dos resultados obtidos é possível reafirmar a importância de amostras de boa qualidade para a execução de projetos confiáveis. Quando não for possível a obtenção dessas amostras devido à dificuldade encontrada, principalmente se tratando de solos moles compressíveis, a adoção de um método de correção da qualidade de amostras é eficaz na minimização dos erros de projeto. A adoção de mais de um método de correção pode elevar o nível de confiabilidade do projeto, pois é possível confrontar os valores encontrados.

## 5.2 Sugestões Para Futuros Trabalhos

- Utilização de todos os métodos de correção de qualidade das amostras de má qualidade, encontrados na literatura.
- Utilização das Correlações Geotécnicas, para a obtenção de um novo método de correção de qualidade das amostras.
- Utilização de amostras de má qualidade corrigidas por diversos métodos de correção, para a posterior previsão de recalque e validação dos métodos para a argila estudada.

## REFERÊNCIAS

AGUIAR, V.N. **Características de Adensamento da Argila do Canal do Porto de Santos na Região da Ilha Barnabé**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2008.

ALMEIDA, M. S. S. **Site Characterization of a Lacustrine Very Soft Rio de Janeiro Organic Clay**. 1st International Symposium on Site Characterization, Atlanta, USA, Vol 2, p. 961-966, 1998.

ALMEIDA, M.S.S., SANTA MARIA, P.E.L., MARTINS, I.S.M., SPOTTI, A .P., COELHO, L.B.M. **Consolidation of a very Soft Clay with Vertical Drains – Géotechnique 50**, No.6: p.633-643, 2000.

ALMEIDA, M.S.S.; MARQUES, M.E.S. **The behaviour of Sarapuí soft organic clay. International Workshop on Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils**, Singapore. Editors: T.S.Tan, K.K. Phoon, D.W. Hight, & S. Leroueil, vol. 1, p. 477–504, 2003.

ALMEIDA, M. S. S.; MARQUES, M. E. S.; MIRANDA, T. C.; NASCIMENTO, C. M. C. **Lowland reclamation in urban areas**. Proc. TC 41 International Workshop on Urban Infrastructure, Búzios, RJ, 2008.

ALMEIDA, M.S.S., MARQUES, M.E.S., BARONI, M. **Geotechnical parameters of very soft clays obtained with CPTu compared with other site investigation tools**. 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, CPT'10, Huntington Beach, California, USA, 2010.

ALMEIDA, M. S. S.; MARQUES, M. E. S. **Aterros Sobre Solos Moles: Projeto e Desempenho**. Coleção Huesker: Engenharia com Geossintéticos, Oficina de textos, São Paulo, SP, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Amostras de Solo – Preparação para Ensaios de Compactação e Caracterização. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 1986.

\_\_\_\_\_. **NBR 6459**: Solo – Determinação do Limite de Liquidez. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 1984.

\_\_\_\_\_. **NBR 6508**: Grãos de Solo que Passam na Peneira 4,2mm – Determinação da Massa Específica. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 1984.

\_\_\_\_\_. **NBR 7180:** Solo – Determinação do Limite de Plasticidade. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 1984.

\_\_\_\_\_. **NBR 7181:** Solo – Análise Granulométrica. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 1984.

\_\_\_\_\_. **NBR 9820:** Solo – Coleta de Amostras Indeformadas de Solos de Baixa Consistência em Furos de Sondagem. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 1997.

\_\_\_\_\_. **NBR 12007:** Solo – Ensaio de Adensamento Unidimensional, Rio de Janeiro, RJ, 1990.

BARONI, Magnos. **Investigação Geotécnica em Argilas Orgânicas Muito Compressíveis em Depósito da Barra da Tijuca.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2010.

BELLO, Maria Isabela Marques da Cunha Vieira. **Estudos de Parâmetros Geotécnicos de Argilas Moles – Estruturação de Banco de Dados a Partir de Caracterização Geotécnica – Suape/PE.** Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 2011.

COUTINHO, R. Q. **Características de Adensamento com Drenagem Vertical e Radial em Argila Mole na Baixada Fluminense.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 1976.

COUTINHO, R. Q.; FERREIRA, S. R. M. **Argilas orgânicas do Recife – Estudos de Caracterização e de Compressibilidade em Seis Depósitos,** Simp. Depósitos Quaternários das Baixadas Litorâneas Brasileiras - SIDEQUA, vol. 1, p. 3.35–3.54, 1988.

COUTINHO, R. Q.; OLIVEIRA, J. T. R.; OLIVEIRA, A. T. J. **Estudo Quantitativo da Qualidade de Amostras de Argilas Moles Brasileiras,** Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica - COBRAMSEG, Brasília, vol. 2, p. 927–936, 1998.

COUTINHO, R. Q. **Characterization and Engineering Properties of Recife Soft Clays,** The Second International Workshop on Characterization e Engineering Properties of Natural Soils, Singapore, p. 2049–2100, 2007.

COUTINHO, R. Q. **Investigação Geotécnica de Campo e Avanços para a Prática,** XIV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica - COBRAMSEG, Búzios, RJ, vol. 1, p. 201–230, 2008.

FERNANDES, W. D. Verificação da Resistência ao Cisalhamento e Estabilidade de Taludes de um Solo Natural e Melhorado com Cimento, Cal e Cinza da Casca do Arroz. **Trabalho de Conclusão de Curso**. Universidade Federal do Pampa, Alegrete, RS, 2014.

FERREIRA, S. R. W. **Característica de Compressibilidade de uma Argila Orgânica mole do Recife**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 1982.

FUTAI, M. M. **Theoretical and Practical Concepts on Behavior Analysis os Some Rio de Janeiro Clays**. DSc. Seminar, COOPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, p.133, 1982.

GUSMÃO, J. A. F. Solos – **Da Formação Geológica ao Uso na Engenharia**. 2. ed. Ed. Universitária da UFPE, 2008.

LEROUEIL, S. **Compressibility of clays: fundamental and practical aspects**. Asce Specialty Conference, Settlement, p.57-76, 1994.

LUNNE, T.; ROBERTSON, P. K.; POWELL, J. J. M. **Cone Penetration Testing in Geotechnical Praticce**. Blackie Academic & Professional, p.312, 1997.

MARTINS, I. S. M. **Algumas Considerações sobre Adensamento Secundário**. Palestra Proferida ao Clube de Engenharia, 2005.

MARTINS, I. S. M. **Sobre uma nova relação índice de vazios tensões em solos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 1983.

MASSAD, Façal. **Obras de Terra: Curso Básico de Geotecnia**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

OLIVEIRA, F. S. Avaliação de Propostas Para Estimativa de Parâmetros de Compressibilidade de Argilas Moles. **Trabalho de Conclusão de Curso**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2011.

ORTIGÃO, J. A. R. **Introdução à Mecânica dos Solos dos Estados Críticos**. 3. ed. : Terratek, 2007.

PINTO, Carlos de Souza. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas/2ª Edição**. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

SHMERTMANN, J. H. **The Undisturbed Consolidation Behavior of Clay**. Transactions, ASCE, Vol. 120, p.1201-1233, 1955.

SCHNAID, F.; ODEBRECHT, E. **Ensaio de Campo e Suas Aplicações a Engenharia de Fundações/2ª Edição**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

SCHNAID, F. **In Situ Testing in Geomechanics**. Oxon: Taylor and Francis. 2009.

SKEMPTON, A. W.; COOLING, L. F.; LITTLE, A. L. A Century of soil mechanics. Institution of Civil Engineers, London, 1969.