



**Vitor Guerra Lopes**

**Avaliação da qualidade de amostras da Argila do Sarapuí II extraídas com amostradores tubulares de pistão estacionário Geonor/NGI 76 mm**

**Dissertação de Mestrado**

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

Orientador: Prof. Vitor Nascimento Aguiar  
Coorientadores: Profa. Graziella Maria Faquim Jannuzzi  
Prof. Ian Schumann Marques Martins

Rio de Janeiro  
Setembro de 2021



**Vitor Guerra Lopes**

**Avaliação da qualidade de amostras da Argila do Sarapuí II extraídas com amostradores tubulares de pistão estacionário Geonor/NGI 76 mm**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo.

**Prof. Vitor Nascimento Aguiar**

Orientador

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

**Profa. Graziella Maria Faquim Jannuzzi**

Coorientadora

Escola Politécnica – UFRJ

**Prof. Ian Schumann Marques Martins**

Coorientador

COPPE – UFRJ

**Prof. Tácio Mauro Pereira de Campos**

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

**Prof. Fernando Artur Brasil Danziger**

COPPE – UFRJ

**Prof. Sandro Salvador Sandroni**

Sandro Sandroni Engenheiros Associados Ltda.

Rio de Janeiro, 30 de setembro de 2021

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

## Vitor Guerra Lopes

Graduou-se em Engenharia Civil pelo CEFET/RJ (Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca), em dezembro de 2017. Ingressou no mestrado na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em agosto de 2018, desenvolvendo dissertação na linha de pesquisa de Geotecnia experimental.

### Ficha Catalográfica

Lopes, Vitor Guerra

Avaliação da qualidade de amostras da Argila do Sarapuí II extraídas com amostradores tubulares de pistão estacionário Geonor/NGI 76 mm. / Vitor Guerra Lopes; orientador: Vitor Nascimento Aguiar – 2021.

197 f.: il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2021.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil e ambiental – Teses. 2. Argila mole. 3. Amostragem. 4. Qualidade de amostra. 5. Amolgamento. 6. Ensaio de adensamento edométrico. I. Aguiar, Vitor Nascimento. II. Jannuzzi, Graziella Maria Faquim. III. Martins, Ian Schumann Marques. IV. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. V. Título.

CDD: 624

## **Agradecimentos**

Ao meu pai, Antônio, por toda a dedicação aos seus filhos e por ser a principal referência como profissional e inspiração para a minha carreira como engenheiro.

À minha mãe, Valéria, por todo amor e apoio conferidos ao longo da minha vida.

Ao meu irmão, Renan, por todos os anos de companheirismo.

À minha irmã, Iris, pelos conselhos e apoio dados em momentos de dificuldade.

Aos amigos que fiz no mestrado, por toda a parceria e amizade, que tornaram essa caminhada mais prazerosa.

À minha namorada, Yasmine, por todo amor, companheirismo e por acreditar nos nossos sonhos.

Ao professor Vitor Aguiar, por toda a sua paciência, ensinamentos, dedicação e por ter acreditado na realização deste trabalho.

Ao professor Ian, pelos valiosos conselhos, essenciais na realização dos ensaios.

À professora Graziella M. F. Jannuzzi por todo o suporte e orientações durante a realização deste trabalho.

Ao professor Fernando A. B. Danziger, que viabilizou a realização desta pesquisa.

Ao Roberto Mazzarone, por toda a ajuda durante a retirada das amostras e por ter detalhado todo o procedimento de utilização do amostrador de pistão Geonor/NGI.

A toda equipe do Laboratório de Ensaio de Campo e Instrumentação Professor Marcio Miranda Soares, pela ajuda durante a coleta das amostras.

À Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro pelo espaço concedido e pela formação de excelência, fundamentais para a realização deste trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

## Resumo

Lopes, Vitor Guerra; Aguiar, Vitor Nascimento; Jannuzzi, Graziella Maria Faquim; Martins, Ian Schumann Marques. **Avaliação da qualidade de amostras da Argila do Sarapuí II extraídas com amostradores tubulares de pistão estacionário Geonor/NGI 76 mm.** Rio de Janeiro, 2021. 197 p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este trabalho teve como objetivo avaliar a qualidade de amostras intactas da Argila do Sarapuí II extraídas com amostradores tubulares de pistão estacionário Geonor/NGI 76 mm. Este amostrador possui comprimento útil de 800 mm e diâmetro interno de 76,2 mm sem folga interna, dispondo de um pistão estacionário com ponta cônica, não sendo necessária a execução de pré-furo para a sua cravação. Duas amostras foram extraídas entre as profundidades de 3,50 e 4,30 m, sendo que um dos tubos de amostragem teve a sua superfície interna revestida com um polímero de baixo coeficiente de atrito, com o intuito de reduzir a tensão cisalhante entre a amostra e o amostrador durante a manobra de cravação do tubo no solo e, assim, avaliar a influência dessa redução na qualidade das amostras. As qualidades das amostras foram avaliadas com base nos resultados de ensaios de adensamento edométrico de carga incremental realizados em corpos de prova moldados com diâmetros de cerca de 50 mm e de 70 mm e altura de 20 mm, o que possibilitou também a avaliação da influência do diâmetro do corpo de prova na qualidade. Todos os corpos de prova foram classificados como de qualidade “*excelente a muito boa*” segundo o critério de Lunne et al. (1997), não tendo sido observada influência do diâmetro do corpo de prova nos resultados. Da mesma forma, a aplicação do polímero na superfície interna do tubo de amostragem parece não ter exercido influência nas qualidades dos corpos de prova.

## Palavras-chave

Argila mole; Amostragem; Qualidade de Amostra; Amolgamento; Ensaio de Adensamento Edométrico.

## Abstract

Lopes, Vitor Guerra; Aguiar, Vitor Nascimento (Advisor); Jannuzzi, Graziella Maria Faquim (Co-Advisor); Martins, Ian Schumann Marques (Co-Advisor). **Quality evaluation of Sarapuí II Clay samples taken with stationary piston tube samplers Geonor/NGI 76 mm.** Rio de Janeiro, 2021. 197 p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The aim of this work is to evaluate the quality of intact Sarapuí II clay samples taken with stationary piston tube samplers Geonor/NGI 76 mm. This sampler has a net tube length of 800 mm and an inner diameter of 76,2 mm with no inside clearance. It has a cone ended stationary piston, and pre-drilled boreholes are not required when driving the sampler. Two samples were taken from a depth  $I$  of 3.50 m to 4.30 m. One of the sampler tubes was coated on the inside with a low friction polymer in order to try to reduce the shearing stress between the sample and the sampler tube when pushing the tube during sampling, as to evaluate the influence of such reduction on the quality of the samples. The sample's quality was evaluated based on the results of incremental-loading one-dimensional consolidation tests carried out on specimens trimmed with diameters of about 50 mm and 70 mm, and a height of 20 mm. This also allowed the evaluation of the influence of the specimen's diameter on quality. All specimens were classified as "excellent to very good" according to Lunne et al's (1997) criterion. Moreover, no influence of the specimen diameter on the results was observed. Furthermore, the use of the polymer on the inner surface of the sampler tube seems to have had no influence on the quality of the specimens.

## Keywords

Soft clay; Sampling; Sample Quality; Disturbance; One-Dimensional Consolidation Test.

# Sumário

1 . Introdução	21
1.1. Considerações iniciais	21
1.2. Motivação	22
1.3. Objetivos	22
1.4. Organização da dissertação	23
2 . Amostragem em Solos Moles	24
2.1. Considerações Iniciais	24
2.2. Classificação das amostras de solo	24
2.3. Tipos de amostradores	26
2.3.1. Amostradores de tubo aberto de parede fina	26
2.3.2. Amostradores tubulares de parede fina com pistão estacionário	28
2.3.3. Amostradores tubulares com pistão retrátil	32
2.3.4. Amostradores tubulares com pistão livre	32
2.3.5. Amostradores Laval	33
2.3.6. Amostrador Sherbrooke	34
2.4. Fatores que influenciam a qualidade da amostra/ corpo de prova	37
2.4.1. Considerações iniciais	37
2.4.2. Método de extração da amostra	38
2.4.3. Geometria do amostrador tubular	40
2.4.4. Relação entre o diâmetro do corpo de prova e o diâmetro da amostra	47
2.4.5. Material do tubo de amostragem	50
2.4.6. Procedimentos de transporte e armazenamento das amostras e de moldagem dos corpos de prova	52
2.5. Efeitos do amolgamento nos parâmetros de compressibilidade e adensamento da argila e avaliação da qualidade dos corpos de prova	56
2.5.1. Considerações iniciais	56
2.5.2. Parâmetros de compressibilidade	57
2.5.3. Avaliação da qualidade de amostras de argila mole	62

3 . Materiais e Métodos	66
3.1. Considerações Iniciais	66
3.2. Descrição do depósito de argila do campo experimental Sarapuí II	66
3.3. Procedimentos de amostragem	69
3.3.1. Campanha de amostragem no Sarapuí II	69
3.3.2. Descrição do amostrador NGI/Geonor de 76 mm	71
3.3.3. Aplicação do etileno-propileno fluorado (FEP) na parede interna do tubo de amostragem	73
3.3.4. Preparação do amostrador NGI 76 mm	74
3.3.5. Etapas da amostragem	78
3.3.6. Manipulação das amostras	81
3.3.7. Moldagem dos corpos de prova	85
3.4. Ensaio de caracterização	100
3.5. Ensaio de adensamento convencionais	101
3.6. Determinação do teor de umidade ao longo do raio da amostra	106
4 . Resultados obtidos	112
4.1. Ensaio de caracterização	112
4.2. Ensaio de adensamento edométrico	116
4.2.1. Considerações iniciais	116
4.2.2. Corpo de prova CPRP-A	119
4.2.3. Corpo de prova CPRP-B	121
4.2.4. Corpo de prova CPRP-C	123
4.2.5. Corpo de prova CPRP-D	125
4.2.6. Corpo de prova CPNR-B	127
4.2.7. Corpo de prova CPNR-C	129
4.2.8. Corpo de prova CPNR-D	131
4.2.9. Corpo de prova CPNR-F	133
4.2.10. Corpo de prova CPNR-E	135
4.2.11. Corpo de prova CPNR-G	137
4.2.12. Corpo de prova CPNR-H	139
4.2.13. Corpo de prova CPNR-RM1	141
4.2.14. Corpo de prova CPNR-RM2	143

4.2.15. Teor de umidade ao longo do raio da amostra	145
5 . Análise dos resultados dos ensaios de adensamento edométrico	147
5.1. Considerações iniciais	147
5.2. Tensão de sobreadensamento e razão de sobreadensamento	147
5.3. Parâmetros de compressibilidade	155
5.4. Coeficiente de adensamento	161
5.5. Qualidade das amostras/ corpos de prova	164
5.5.1. Aplicação de critérios para a avaliação das qualidades dos corpos de prova	164
5.5.2. Comparação entre os resultados dos corpos de prova intactos e dos corpos de prova remoldados	168
5.5.3. Comparação entre os resultados dos corpos de prova da bateria EDO-RP	170
5.5.4. Comparação entre os resultados dos corpos de prova da bateria EDO-NR(SEC)	172
5.5.5. Comparação entre os resultados dos corpos de prova com cerca de 50 mm de diâmetro	174
5.5.6. Comparação entre os resultados dos corpos de prova com cerca de 70 mm de diâmetro	177
5.5.7. Comparação entre os resultados dos corpos de prova das baterias EDO-NR(SEC) e EDO-NR(26D)	179
5.6. Estágios de descarregamento de longa duração dos ensaios da bateria EDO-NR(SEC)	182
6 . Conclusões e sugestões para pesquisas futuras	185
6.1. Conclusões.	185
6.2. Sugestões para futuras pesquisas.	189
7 . Referências bibliográficas	191

## Lista de Figuras

Figura 2.1 – Folga interna, folga externa e índice de área (adaptado de Hvorslev, 1949).	27
Figura 2.2 – Operação do amostrador de tubo aberto de parede fina (adaptado de Hvorslev, 1949).	28
Figura 2.3 – Amostrador tubular de parede fina com pistão estacionário (adaptado de Clayton et al., 1995).	29
Figura 2.4 – Operação do amostrador de pistão estacionário (adaptado de ASTM, 2015a,).	30
Figura 2.5 – Amostradores com pistão fixo: mecânico (JGS 1221-1995), hidráulico (ASTM D 6519-05), operado a óleo (Chung & Kweon, 2013) (adaptado de Chung et al., 2014).	31
Figura 2.6 – Amostrador Laval de diâmetro de 200 mm (La Rochelle et al., 1981).	33
Figura 2.7 – Etapas de operação do amostrador Laval de diâmetro de 200 mm (La Rochelle et al., 1981).	34
Figura 2.8 – Esquema do amostrador Sherbrooke (Lefebvre & Poulin, 1979).	35
Figura 2.9 – Visão frontal do amostrador Sherbrooke (Oliveira, 2002).	36
Figura 2.10 – Deformações das camadas de solo durante as operações de amostragem com um amostrador tubular de pistão estacionário sem pré-furo (adaptado de Andresen, 1981).	39
Figura 2.11 – Deformações do solo durante penetração não drenada do amostrador simples em argilas saturadas ( $B/t = 40$ ) (Baligh et al., 1987).	41
Figura 2.12 – Caminhos de deformações para um elemento de solo situado na linha central de um tubo de amostragem ( $B/t = 40$ ) (Baligh, 1985).	42
Figura 2.13 – Termos adotados para definir a geometria da sapata de corte (Clayton & Siddique, 1999).	44
Figura 2.14 – Geometrias das sapatas de corte analisadas por meio do Método do caminho de deformações (Clayton & Siddique, 1999).	45
Figura 2.15 – Previsão de deformação axial dos elementos de solo ao longo da linha vertical que passa pelo centro do amostrador (Clayton & Siddique, 1999).	45
Figura 2.16 – Desenho esquemático de um amostrador sem folga interna, (DeGroot et al., 2005).	46

Figura 2.17 –Efeitos da folga interna no grau de amolgamento (Andresen, 1981).	47
Figura 2.18 – Aparato montado para medição do atrito entre o solo e à superfície do material testado (Kallstenius, 1963).	51
Figura 2.19 – Atrito dinâmico entre a argila e diferentes materiais, (a) Coeficiente de atrito, (b) Força de atrito (Kallstenius, 1963).	52
Figura 2.20 – Corte de um segmento do tubo amostrador para moldagem de corpos	55
Figura 2.21 – Corte de tubo de amostragem com cortador de tubos manual (Germaine & Germaine, 2009).	55
Figura 2.22 – Caminho de tensões efetivas hipotético durante a amostragem com amostradores tubulares e preparação de uma argila com baixo OCR. (Ladd & DeGroot, 2003).	57
Figura 2.23 – Curvas de compressibilidade ( $\epsilon_v \times \sigma'_v$ ) de ensaios edométricos realizados na Argila do Canal do Porto de Santos (Aguiar, 2008).	58
Figura 2.24 – Curvas de compressão edométrica ( $e \times \sigma'_v$ ) de amostras com diferentes graus de amolgamento (Coutinho, 1976).	59
Figura 2.25 – Curvas de compressão edométrica de amostras intactas (Schmertmann, 1955).	60
Figura 2.26 – Resultados de ensaios edométricos em amostras da Argila de Lierstranda (Lunne, et al. 2006).	62
Figura 3.1 – Fotografia aérea com a localização do campo experimental Sarapuí II na Estação Rádio da Marinha (base –Google) (Jannuzzi, 2009 modificado por Aguiar, 2014).	67
Figura 3.2 – Campo experimental Sarapuí II (Jannuzzi et al., 2015).	67
Figura 3.3 – Perfis de (a) composição granulométrica; (b) teor de matéria orgânica; (c) teores de sais solúveis e de NaCl; (d) composição mineralógica ao longo da profundidade (Jannuzzi et al., 2015).	68
Figura 3.4 – Perfis de (a) limite de liquidez, limite de plasticidade e teor de umidade natural; (b) densidade relativa dos grãos; (c) Peso específico natural do solo; (d) índice de vazios natural; (e) atividade ao longo da profundidade (Jannuzzi et al., 2015).	69
Figura 3.5 – Localização dos furos nos quais foram coletadas as amostras NGI-RP e NGI-NR.	70
Figura 3.6 - Amostrador NGI 76 mm com pistão estacionário.	71
Figura 3.7 – Tubo de amostragem com 76 mm de diâmetro interno e 880 mm de comprimento.	72
Figura 3.8 – Detalhes da geometria do tubo de amostragem.	72
Figura 3.9 – FEP aplicado no interior do tubo de amostragem utilizado nesta pesquisa.	74

Figura 3.10 – Extremidade superior do corpo do amostrador NGI 76 mm antes de sua montagem.	75
Figura 3.11 - Aplicação de vaselina no anel de vedação do corpo do amostrador NGI 76 mm.	76
Figura 3.12 - Aplicação de vaselina na face interna do tubo de amostragem, com o objetivo de facilitar o encaixe do tubo ao corpo do amostrado.	76
Figura 3.13 - Encaixe do pistão estacionário ao corpo do amostrador.	76
Figura 3.14 - Posição correta do pistão estacionário após a montagem completa do amostrador.	77
Figura 3.15 – Amostrador NGI 76 mm montado.	77
Figura 3.16 - Fixação do primeiro par de hastes, interna e externa, ao corpo do amostrador.	77
Figura 3.17 – Posicionamento e nivelamento do equipamento de cravação.	79
Figura 3.18 – Equipamento amostrador instalado no equipamento de cravação antes de iniciar a cravação.	80
Figura 3.19 – Cravação do equipamento amostrador no subsolo com velocidade de 1cm/s.	80
Figura 3.20 – Etapas de manobra de cravação do tubo amostrador NGI 76 mm, após atingida a profundidade de amostragem.	81
Figura 3.21 – Limpeza da superfície externa do tubo amostrador contendo a amostra.	82
Figura 3.22 – Remoção com fio de aço do excesso de amostra presente na extremidade inferior (biselada) do tubo amostrador.	83
Figura 3.23 – Extremidade inferior (biselada) do tubo amostrador sendo revestida com filme de PVC e papel alumínio.	83
Figura 3.24 – Aplicação de tecido sobre a camada de papel alumínio na extremidade inferior (biselada) do tubo amostrador.	83
Figura 3.25 – Execução do lacre da extremidade inferior (biselada) do tubo amostrador.	84
Figura 3.26 – Aplicação de parafina sobre o tecido na extremidade inferior (biselada) do tubo amostrador.	84
Figura 3.27 – Lacre da extremidade inferior (biselada) do tubo amostrador concluído com a colocação da tampa de plástico.	84
Figura 3.28 – Amostra armazenada na posição vertical com a extremidade biselada voltada para baixo em câmara úmida com temperatura e umidade controladas.	85
Figura 3.29 – Localização dos corpos de prova esculpido na amostra NGI-RP.	88
Figura 3.30 – Localização dos corpos de prova na amostra NGI-NR.	89

Figura 3.31 – Tubo de amostragem posicionado no extrator de amostras horizontal motorizado.	92
Figura 3.32 – Operação de retirada do pistão estacionário do amostrador do interior do tubo de amostragem	93
Figura 3.33 – Detalhe da retirada do pistão estacionário do amostrador do interior do tubo de amostragem.	93
Figura 3.34 – Extração de um segmento de amostra do interior do tubo de amostragem.	94
Figura 3.35 – Corte de um segmento de amostra rente à extremidade superior do tubo de amostragem.	94
Figura 3.36 – Aplicação de graxa de silicone na parede interna do anel edométrico.	95
Figura 3.37 – Segmento de amostra posicionado no aparato de moldagem.	95
Figura 3.38 – Cravação do anel edométrico no segmento de amostra.	96
Figura 3.39 – Ferramentas utilizadas para a moldagem do corpo de prova.	96
Figura 3.40 – Corpo de prova com superfícies inferior e superior regularizadas.	97
Figura 3.41 – Corpo de prova embalado e preparado para ser transportado.	97
Figura 3.42 – Corpos de prova embalados entre placas de acrílico no interior da caixa de isopor.	98
Figura 3.43 – Posicionamento do colarinho centralizador na célula de adensamento.	98
Figura 3.44 – Célula montada na prensa de adensamento tipo Bishop.	99
Figura 3.45 – Amassamento da argila dentro de um saco plástico para posterior moldagem de um corpo de prova remoldado.	99
Figura 3.46 – Sala com temperatura controlada e acesso restrito, montada para os ensaios de adensamento edométrico.	101
Figura 3.47 – Esgotamento da água da célula de adensamento.	104
Figura 3.48 – Migração de água da periferia para o centro da amostra devida às tensões cisalhantes ao longo da superfície lateral da amostra provocadas pela cravação do tubo amostrador no subsolo.	108
Figura 3.49 – Cravação de um dos anéis no corpo de prova com o auxílio de um gabarito.	110
Figura 3.50 – Corpo de prova com todos os anéis cravados.	110
Figura 3.51 – Vista superior do corpo de prova com os três anéis cravados.	111
Figura 3.52 – Corte vertical do corpo de prova com os três anéis cravados.	111
Figura 4.1 – Curva granulométrica da Argila do Sarapuú II, amostra NGI-NR.	113

Figura 4.2 – Curvas de compressão edométrica “ $e \times \sigma'_v(\log)$ ” do corpo de prova CPRP-A.	119
Figura 4.3 – Curvas de coeficiente de adensamento “ $c_v(\log) \times \sigma'_{v \text{ médio}}(\log)$ ” do corpo de prova CPRP-A.	119
Figura 4.4 – Curvas de compressão edométrica “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v(\log)$ ” do corpo de prova CPRP-A.	120
Figura 4.5 – Inspeção do corpo de prova CPRP-A após o ensaio.	120
Figura 4.6 – Curvas de compressão edométrica “ $e \times \sigma'_v(\log)$ ” do corpo de prova CPRP-B.	121
Figura 4.7 – Curvas de coeficiente de adensamento “ $c_v(\log) \times \sigma'_{v \text{ médio}}(\log)$ ” do corpo de prova CPRP-B.	121
Figura 4.8 – Curvas de compressão edométrica “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v(\log)$ ” do corpo de prova CPRP-B.	122
Figura 4.9 – Inspeção do corpo de prova CPRP-B após o ensaio.	122
Figura 4.10 – Curvas de compressão edométrica “ $e \times \sigma'_v(\log)$ ” do corpo de prova CPRP-C.	123
Figura 4.11 – Curvas de coeficiente de adensamento “ $c_v(\log) \times \sigma'_{v \text{ médio}}(\log)$ ” do corpo de prova CPRP-C.	123
Figura 4.12 – Curvas de compressão edométrica “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v(\log)$ ” do corpo de prova CPRP-C.	124
Figura 4.13 – Inspeção do corpo de prova CPRP-C após o ensaio.	124
Figura 4.14 – Curvas de compressão edométrica “ $e \times \sigma'_v(\log)$ ” do corpo de prova CPRP-D.	125
Figura 4.15 – Curvas de coeficiente de adensamento “ $c_v(\log) \times \sigma'_{v \text{ médio}}(\log)$ ” do corpo de prova CPRP-D.	125
Figura 4.16 – Curvas de compressão edométrica “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v(\log)$ ” do corpo de prova CPRP-D.	126
Figura 4.17 – Inspeção do corpo de prova CPRP-D após o ensaio.	126
Figura 4.18 – Curvas de compressão edométrica “ $e \times \sigma'_v(\log)$ ” do corpo de prova CPNR-B.	127
Figura 4.19 – Curvas de coeficiente de adensamento “ $c_v(\log) \times \sigma'_{v \text{ médio}}(\log)$ ” do corpo de prova CPNR-B.	127
Figura 4.20 – Curvas de compressão edométrica “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v(\log)$ ” do corpo de prova CPNR-B.	128
Figura 4.21 – Inspeção do corpo de prova CPNR-B após o ensaio.	128
Figura 4.22 – Curvas de compressão edométrica “ $e \times \sigma'_v(\log)$ ” do corpo de prova CPNR-C.	129

Figura 4.23 – Curvas de coeficiente de adensamento “ $c_v(\log) \times \sigma'_{v\text{ médio}}(\log)$ ” do corpo de prova CPNR-C.	129
Figura 4.24 – Curvas de compressão edométrica “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v(\log)$ ” do corpo de prova CPNR-C.	130
Figura 4.25 – Inspeção do corpo de prova CPNR-C após o ensaio.	130
Figura 4.26 – Curvas de compressão edométrica “ $e \times \sigma'_v(\log)$ ” do corpo de prova CPNR-D.	131
Figura 4.27 – Curvas de coeficiente de adensamento “ $c_v(\log) \times \sigma'_{v\text{ médio}}(\log)$ ” do corpo de prova CPNR-D.	131
Figura 4.28 – Curvas de compressão edométrica “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v(\log)$ ” do corpo de prova CPNR-D.	132
Figura 4.29 – Inspeção do corpo de prova CPNR-D após o ensaio.	132
Figura 4.30 – Curvas de compressão edométrica “ $e \times \sigma'_v(\log)$ ” do corpo de prova CPNR-F.	133
Figura 4.31 – Curvas de coeficiente de adensamento “ $c_v(\log) \times \sigma'_{v\text{ médio}}(\log)$ ” do corpo de prova CPNR-F.	133
Figura 4.32 – Curvas de compressão edométrica “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v(\log)$ ” do corpo de prova CPNR-F.	134
Figura 4.33 – Inspeção do corpo de prova CPNR-F após o ensaio.	134
Figura 4.34 – Curvas de compressão edométrica “ $e \times \sigma'_v(\log)$ ” do corpo de prova CPNR-E.	135
Figura 4.35 – Curvas de coeficiente de adensamento “ $c_v(\log) \times \sigma'_{v\text{ médio}}(\log)$ ” do corpo de prova CPNR-E.	135
Figura 4.36 – Curvas de compressão edométrica “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v(\log)$ ” do corpo de prova CPNR-E.	136
Figura 4.37 – Inspeção do corpo de prova CPNR-E após o ensaio.	136
Figura 4.38 – Curvas de compressão edométrica “ $e \times \sigma'_v(\log)$ ” do corpo de prova CPNR-G.	137
Figura 4.39 – Curvas de coeficiente de adensamento “ $c_v(\log) \times \sigma'_{v\text{ médio}}(\log)$ ” do corpo de prova CPNR-G.	137
Figura 4.40 – Curvas de compressão edométrica “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v(\log)$ ” do corpo de prova CPNR-G.	138
Figura 4.41 – Inspeção do corpo de prova CPNR-G após o ensaio.	138
Figura 4.42 – Curvas de compressão edométrica “ $e \times \sigma'_v(\log)$ ” do corpo de prova CPNR-H.	139
Figura 4.43 – Curvas de coeficiente de adensamento “ $c_v(\log) \times \sigma'_{v\text{ médio}}(\log)$ ” do corpo de prova CPNR-H.	139

Figura 4.44 – Curvas de compressão edométrica “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v(\log)$ ” do corpo de prova CPNR-H.	140
Figura 4.45 – Inspeção do corpo de prova CPNR-H após o ensaio.	140
Figura 4.46 – Curvas de compressão edométrica “ $e \times \sigma'_v(\log)$ ” do corpo de prova CPNR-RM1.	141
Figura 4.47 – Curvas de coeficiente de adensamento “ $c_v(\log) \times \sigma'_{v \text{ médio}}(\log)$ ” do corpo de prova CPNR-RM1.	141
Figura 4.48 – Curvas de compressão edométrica “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v(\log)$ ” do corpo de prova CPNR-RM1.	142
Figura 4.49 – Inspeção do corpo de prova CPNR-RM1 após o ensaio.	142
Figura 4.50 – Curvas de compressão edométrica “ $e \times \sigma'_v(\log)$ ” do corpo de prova CPNR-RM2.	143
Figura 4.51 – Curvas de coeficiente de adensamento “ $c_v(\log) \times \sigma'_{v \text{ médio}}(\log)$ ” do corpo de prova CPNR-RM2.	143
Figura 4.52 – Curvas de compressão edométrica “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v(\log)$ ” do corpo de prova CPNR-RM2.	144
Figura 4.53 – Inspeção do corpo de prova CPNR-RM2 após o ensaio.	144
Figura 5.1 – Determinação do índice de recompressão ( $C_r$ ), índice de compressão ( $C_c$ ), e do índice de expansão ( $C_e$ ) (Andrade, 2009).	155
Figura 5.2 – Curvas de coeficiente de adensamento “ $c_v(\log) \times \sigma'_{v \text{ médio}}(\log)$ ” de todos os corpos de prova (método de Taylor).	161
Figura 5.3 – Curvas de coeficiente de adensamento “ $c_v(\log) \times \sigma'_{v \text{ médio}}(\log)$ ” de todos os corpos de prova (método de Casagrande).	162
Figura 5.4 – Curvas de compressão edométrica “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v(\log)$ ” de todos os corpos de prova.	169
Figura 5.5 – Curvas de compressão edométrica “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v(\log)$ ” da bateria de ensaios EDO-RP.	171
Figura 5.6 – Curvas de coeficiente de adensamento “ $c_v(\log) \times \sigma'_{v \text{ médio}}(\log)$ ” da bateria de ensaios EDO-RP.	171
Figura 5.7 – Curvas de compressão edométrica “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v(\log)$ ” da bateria de ensaios EDO-NR(SEC).	173
Figura 5.8 – Curvas de coeficiente de adensamento “ $c_v(\log) \times \sigma'_{v \text{ médio}}(\log)$ ” da bateria de ensaios EDO-NR(SEC).	173
Figura 5.9 – Curvas de compressão edométrica “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v(\log)$ ” de corpos de prova com cerca de 50 mm de diâmetro das baterias EDO-RP e EDO-NR(SEC).	176
Figura 5.10 – Curvas de coeficiente de adensamento “ $c_v(\log) \times \sigma'_{v \text{ médio}}(\log)$ ” de corpos de prova com cerca de 50 mm de diâmetro das baterias EDO-RP e EDO-NR(SEC).	176

Figura 5.11 – Curvas de compressão edométrica “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v(\log)$ ” dos corpos de prova com cerca de 70 mm de diâmetro das baterias EDO-RP e EDO-NR(SEC).	178
Figura 5.12 – Curvas de coeficiente de adensamento “ $c_v(\log) \times \sigma'_{v\text{ médio}}(\log)$ ” dos corpos de prova com cerca de 70 mm de diâmetro das baterias EDO-RP e EDO-NR(SEC).	178
Figura 5.13 – Curvas de compressão edométrica “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v(\log)$ ” das baterias de ensaio EDO-NR(26D) e EDO-NR(SEC).	181
Figura 5.14 – Curvas de coeficiente de adensamento “ $c_v(\log) \times \sigma'_{v\text{ médio}}(\log)$ ” das baterias de ensaio EDO-NR(26D) e EDO-NR(SEC).	181
Figura 5.15 – Curvas “ $\Delta\varepsilon_v \text{ versus } t(\log)$ ” dos estágios de descarregamento de longa duração da bateria de ensaios EDO-NR(SEC)	184
Figura 5.16 – Curvas “ $\Delta\varepsilon_v \text{ versus } t$ ” dos estágios de descarregamento de longa duração da bateria de ensaios EDO-NR(SEC)	184

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Resumo dos indicadores e métodos de avaliação de qualidade de amostras (Amundsen et al., 2015).	63
Tabela 2.2 – Critério de avaliação da qualidade de amostras (adaptado de Lunne et al., 1997).	64
Tabela 2.3 – Classificação da qualidade de amostras (Coutinho, 2007).	64
Tabela 2.4 – Tabela de avaliação da qualidade de corpos de prova de ensaios de adensamento edométrico (Andrade, 2009).	65
Tabela 3.1 – Propriedades do etileno-propileno fluorado (FEP)	73
Tabela 3.2 – Identificação dos corpos de prova.	86
Tabela 3.3 – Informações dos ensaios de adensamento edométrico da bateria EDO-RP.	102
Tabela 3.4 – Informações dos ensaios de adensamento edométrico da bateria EDO-NR(SEC).	104
Tabela 3.5 – Informações dos ensaios de adensamento edométrico da bateria EDO-NR(26D).	105
Tabela 3.6 – Informações dos ensaios de adensamento edométrico da bateria EDO-NR(RM).	106
Tabela 4.1 – Composição granulométrica da Argila do Sarapuú II	113
Tabela 4.2 – Caracterização física da Argila do Sarapuú II	113
Tabela 4.3 – Índices físicos dos corpos de prova da bateria de ensaios edométricos EDO-RP.	114
Tabela 4.4 – Índices físicos dos corpos de prova da bateria de ensaios edométricos EDO-NR(SEC).	114
Tabela 4.5 – Índices físicos dos corpos de prova da bateria de ensaios edométricos EDO-NR(26D).	114
Tabela 4.6 – Índices físicos dos corpos de prova da bateria de ensaios edométricos EDO-NR(RM).	115
Tabela 4.7 – Teor de umidade ao longo do raio das amostras NGI-RP e NGI-NR.	145
Tabela 4.8 – Intervalo de tempo compreendido entre a cravação da amostrador no campo e a determinação do teor de umidade no laboratório.	145

Tabela 5.1 – Bateria de ensaios EDO-RP: Tensões e razões de sobreadensamento obtidas das curvas de compressão edométrica traçadas sob diferentes critérios.	153
Tabela 5.2 – Bateria de ensaios EDO-NR(SEC): Tensões e razões de sobreadensamento obtidas das curvas de compressão edométrica traçadas sob diferentes critérios.	153
Tabela 5.3 – Bateria de ensaios EDO-NR(26D): Tensões e razões de sobreadensamento obtidas das curvas de compressão edométrica traçadas sob diferentes critérios.	154
Tabela 5.4 – Bateria de ensaios EDO-NR(RM): Tensões e razões de sobreadensamento obtidas das curvas de compressão edométrica traçadas sob diferentes critérios.	154
Tabela 5.5 – Bateria de ensaios EDO-RP: Parâmetros de compressibilidade.	159
Tabela 5.6 – Bateria de ensaios EDO-NR(SEC): Parâmetros de compressibilidade.	159
Tabela 5.7 – Bateria de ensaios EDO-NR(26D): Parâmetros de compressibilidade.	160
Tabela 5.8 – Bateria de ensaios EDO-NR(RM): Parâmetros de compressibilidade.	160
Tabela 5.9 – Qualidade dos corpos de prova da bateria de ensaio EDO-RP segundo diferentes critérios de classificação.	166
Tabela 5.10 – Qualidade dos corpos de prova da bateria de ensaio EDO-NR(SEC) segundo diferentes critérios de classificação.	166
Tabela 5.11 – Qualidade dos corpos de prova da bateria de ensaio EDO-NR(26D) segundo diferentes critérios de classificação.	167
Tabela 5.12 – Qualidade dos corpos de prova da bateria de ensaio EDO-NR(RM) segundo diferentes critérios de classificação.	167

*Devemos julgar um homem mais pelas suas  
perguntas que pelas respostas.*

Voltaire

# 1.

## Introdução

### 1.1.

#### Considerações iniciais

Um dos problemas relacionados à engenharia de solos moles é o comprometimento da representatividade dos parâmetros de resistência e de deformabilidade obtidos em ensaios de laboratório devido ao amolgamento decorrente dos processos de amostragem. Por este motivo, muito esforço tem sido despendido no sentido de não apenas avaliar a melhor técnica de amostragem dentre as disponíveis, mas também de aprimorá-las.

Nesse sentido, diversos estudos foram realizados ao longo dos anos com o objetivo de aprimorar as técnicas de amostragem em solos moles e os amostradores utilizados durante a extração de amostras intactas de argila mole, tais como: Hvorslev (1949), Rochelle et al. (1976), Lefebvre e Poulin (1979) Clayton & Siddique (1999), Ladd & DeGroot (2003), Germaine & Germaine (2009).

Concomitantemente, foram realizadas diversas pesquisas no que se refere aos fatores que interferem na qualidade das amostras, aos efeitos do amolgamento e à avaliação da qualidade das amostras, por exemplo: Hvorslev (1949), Schmertmann (1955), Ladd (1973), Jamiolkowski et al. (1985), Lunne et al. (1997).

No Brasil foram realizados diversos estudos no que diz respeito à amostragem de solos moles, a exemplo de: Coutinho (1976), Ferreira (1982), Ferreira & Coutinho (1988), Oliveira (2002) Andrade (2009).

Um aspecto importante com relação a investigações geotécnicas realizadas em argilas moles é que as técnicas de amostragem e os critérios de qualidade empregados devem levar em consideração os parâmetros que serão obtidos, o custo do procedimento de amostragem e as características do depósito de argila estudado.

Ademais, verifica-se que os efeitos de amolgamento são observados desde a coleta das amostras até a moldagem e manuseio dos corpos de prova no laboratório e montagem dos ensaios (Andrade, 2009).

## 1.2.

### **Motivação**

Dentro deste contexto, o autor sentiu-se motivado a avaliar a qualidade de amostras coletadas do depósito de argila mole do campo experimental Sarapuí II com amostradores tubulares de pistão estacionário Geonor/NGI 76 mm, a fim de averiguar o desempenho deste tipo de amostrador na Argila do Sarapuí II.

Como um dos efeitos mais evidentes do amolgamento de uma amostra de argila mole é a alteração das características de compressibilidade e de adensamento, optou-se por avaliar a qualidade das amostras/ corpos de prova mediante a análise de resultados de ensaios de adensamento edométrico.

Ademais, em uma tentativa de melhorar a qualidade de amostras extraídas com o amostrador Geonor/NGI 76 mm, foi realizada a aplicação de etileno-propileno fluorado (FEP) na superfície interna do tubo de amostragem a fim de reduzir a tensão cisalhante entre o amostrador e a amostra durante a manobra de cravação do tubo no solo.

Além disso, o autor tem a pretensão de estimular pesquisas que avaliem a aplicação de outros tipos de revestimentos ou de outros materiais em tubos de amostragem.

## 1.3.

### **Objetivos**

Os principais objetivos deste trabalho são:

- 1) Avaliar a qualidade de amostras coletadas do depósito de argila mole do campo experimental Sarapuí II com amostradores tubulares de pistão estacionário Geonor/NGI 76 mm;
- 2) Avaliar o efeito da aplicação do FEP na superfície interna do tubo de amostragem na qualidade da amostra;
- 3) Avaliar a influência do diâmetro do corpo de prova em relação ao diâmetro da amostra na qualidade dos corpos de prova.

## 1.4.

### **Organização da dissertação**

Este trabalho está organizado em sete capítulos. No capítulo 1 são apresentadas as motivações que levaram o autor a escolher o tema abordado, o objetivo da dissertação e a forma como esta se encontra organizada.

No capítulo 2 é apresentada uma breve revisão dos conceitos mais importantes acerca das técnicas de amostragem em solos moles, aos tipos de amostradores, aos fatores que interferem na qualidade das amostras, aos efeitos do amolgamento e à avaliação da qualidade de amostras intactas.

No capítulo 3 apresentam-se, inicialmente, informações acerca do depósito de argila do campo experimental Sarapuí II, tais como localização e uma descrição do material sob o ponto de vista geológico e geotécnico. Também são descritos os equipamentos e as metodologias utilizadas na amostragem, na moldagem dos corpos de prova e na execução dos ensaios.

No capítulo 4 são apresentados todos os resultados obtidos neste trabalho.

No capítulo 5 é feita uma análise dos resultados dos ensaios de adensamento edométrico.

O capítulo 6 apresenta as conclusões obtidas a partir da análise dos resultados, além de sugestões para pesquisas futuras.

No capítulo 7 são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas na realização deste trabalho.

## 2.

### Amostragem em Solos Moles

#### 2.1.

##### Considerações Iniciais

No presente capítulo, são apresentadas informações acerca das técnicas de amostragem em solos moles, dando ênfase aos tipos de amostradores, aos fatores que interferem na qualidade das amostras, aos efeitos do amolgamento e à avaliação da qualidade das amostras.

#### 2.2.

##### Classificação das amostras de solo

A amostragem em solos é realizada com o objetivo de identificar, caracterizar e classificar os diferentes tipos de solo existentes num local, além de executar ensaios de laboratório tendo em vista a obtenção de parâmetros físicos, mecânicos e hidráulicos. O tipo de amostra de solo a ser coletada deve levar em consideração os parâmetros que serão obtidos e o custo do procedimento de amostragem.

Hvorslev (1949) classificou os diferentes tipos de amostras de solo em: amostras indeformadas, amostras deformadas representativas e amostras deformadas não-representativas. As amostras indeformadas são aquelas nas quais o solo é submetido a perturbações muito pequenas, sendo, portanto, adequadas à realização de ensaios de laboratório que visam a determinação de parâmetros de resistência e deformabilidade. As amostras deformadas representativas, também chamadas de amolgadas, são apropriadas somente para ensaios de caracterização e identificação do tipo de material ao longo das diferentes camadas do subsolo. São amostras que foram submetidas a um alto grau de perturbação, com comprometimento da estrutura do solo e alteração no teor de umidade, mas que contêm todos os constituintes do solo *in situ*. Por sua vez, as amostras deformadas não-representativas são amostras nas quais solos

de diferentes camadas foram misturados, que foram contaminadas por outros materiais ou que perderam algum dos seus componentes.

Portanto, as amostras de solo ditas deformadas representativas destinam-se apenas à realização de ensaios de caracterização, com a finalidade de identificar e classificar o solo. Já as amostras de solo indeformadas são aquelas que mantêm a textura, a estrutura, o teor de umidade e o peso específico *in situ* e, portanto, podem também ser utilizadas para a determinação de parâmetros físicos e mecânicos do solo por meio de ensaios de laboratório (modificado de Caputo, 1988).

Já a norma ABNT NBR 6502:1995 define amostra amolgada como a amostra de solo que teve a sua estrutura natural modificada pelo amolgamento; amostra deformada como a amostra de solo que não mantém todas as características verificadas *in situ*; amostra indeformada como a amostra de solo obtida de modo a preservar as características que se verificam *in situ*; e amostra representativa como a amostra de solo que conserva as características de textura e teor de umidade *in situ*, entendendo como textura o conjunto de características dos elementos mineralógicos constituintes do solo no que se refere à forma, dimensão e arranjo.

Germaine & Germaine (2009) afirmam que, embora o termo “indeformada” seja adotado para descrever amostras, na prática, é impossível coletar um material do campo sem que ocorra algum tipo de perturbação. Além disso, o termo “indeformada” refere-se a uma condição muito específica que representa a condição *in situ* do solo, ou seja, com as condições de temperatura, estado de tensões, deformações e composição química inalteradas. Assim, os referidos autores recomendam adotar o termo “intacta” para se referir a amostras que tenham sido obtidas com as melhores técnicas e práticas disponíveis, de tal forma que sejam preservadas as características do solo no campo necessárias para a determinação de seu comportamento mecânico (incluindo hidráulico na acepção da mecânica dos fluidos). Desta forma, dizer que uma amostra é “intacta” é reconhecer que algum tipo de perturbação, por menor que seja, ocorreu durante o processo de amostragem. Quanto menor o grau de perturbação, melhor a qualidade da amostra intacta.

A norma ASTM (2021) também apresenta distinção entre amostras indeformadas (*undisturbed*) e amostras intactas (*intact*). Segundo a referida norma, o termo “*undisturbed*” (indeformada) deve ser utilizado para o material

amostrado que possui exatamente a mesma composição, propriedades e condições que o material *in situ*. Já o termo “*intact*” (intacta) deve ser utilizado para o material obtido por um processo seguindo o “estado da prática” (ou “estado de cuidado”) destinado a preservar a estrutura *in situ*, o teor de umidade, o peso específico, bem como outras propriedades a um nível consistente com a finalidade pretendida para o ensaio de laboratório.

Ainda segundo Germaine & Germaine (2009), o termo “remoldada” (*remolded*) deve ser adotado para descrever uma amostra de solo que tenha tido a sua estrutura propositalmente modificada por meio de deformações cisalhantes sem que tenham ocorrido mudanças significativas em seu teor de umidade natural e peso específico. Uma amostra remoldada deve ser uniforme e sem preferência no arranjo estrutural das partículas. Já as amostras reconstituídas (*reconstituted*) são aquelas produzidas em laboratório conforme condições prescritas e procedimentos especificados. As características e a homogeneidade de uma amostra reconstituída dependem do método e de particularidades adotados durante o seu preparo.

### 2.3.

#### **Tipos de amostradores**

Na grande maioria das obras geotécnicas, faz-se necessária a obtenção de amostras intactas dos diferentes tipos de solo envolvidos a fim de obter seus parâmetros de resistência e deformabilidade por meio de ensaios de laboratório (modificado de Andresen, 1981). A escolha do tipo de amostrador a ser utilizado dá-se de acordo com o tipo de solo, disponibilidade, custo e finalidade a qual a amostra se destina (Germaine & Germaine, 2009).

Alguns dos principais amostradores utilizados para a coleta de amostras intactas de argila mole são apresentados nos itens a seguir.

#### 2.3.1.

##### **Amostradores de tubo aberto de parede fina**

Amostradores de tubo aberto de parede fina, também denominados “Shelby tube”, foram introduzidos nos EUA na década de 1930 (Hvorslev, 1949). O amostrador consiste em um tubo cilíndrico fabricado, em geral, em aço inoxidável, com uma base cortante (bisel). O amostrador é acoplado a um conjunto de hastes e cravado no fundo de furos de sondagem para a coleta de

amostras. Segundo a DNER (1994), estes tipos de amostradores são adotados na extração de amostras indeformadas de solos plásticos pouco consistentes. Entretanto, estes amostradores não são muito eficazes em solos muito moles.

Conforme exigências detalhadas pela ABNT NBR 9820:1997, o amostrador deve ser confeccionado com material anticorrosivo e resistente, como latão, bronze ou aço. O tubo deve ter superfícies lisas e sem nenhum tipo de protuberância ou defeito. Além disso, o tubo deve ter o comprimento de seis a dez vezes o diâmetro. A extremidade do tubo deve ser biselada, com o ângulo do bisel variando entre 5° e 10°. A cabeça do amostrador deve ter um sistema de válvula constituída por esfera de aço e orifícios que têm a função de permitir a saída de ar e água durante a cravação do amostrador no solo.

Hvorslev (1949) apresentou uma série de requisitos que devem ser atendidos para a fabricação de amostradores tubulares de parede fina, como: relação de folga interna ( $C_i$ ), relação de folga externa ( $C_o$ ) e índice de área ( $C_\alpha$ ), cujas definições são apresentadas na Figura 2.1.

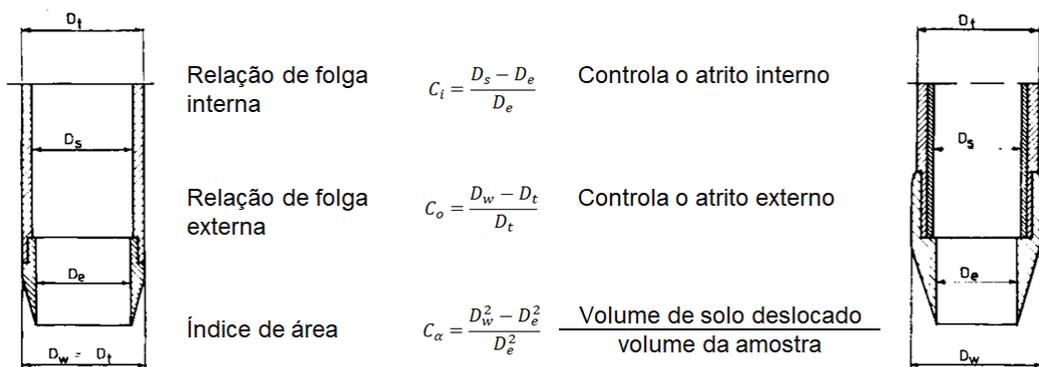


Figura 2.1 – Folga interna, folga externa e índice de área (adaptado de Hvorslev, 1949).

Este tipo de amostrador tem como vantagens o fácil manuseio e a rapidez na coleta da amostra. No entanto, possui maior porcentagem de amostras não recuperadas do que outros amostradores. A Figura 2.2 ilustra a operação do amostrador de tubo aberto de parede fina.

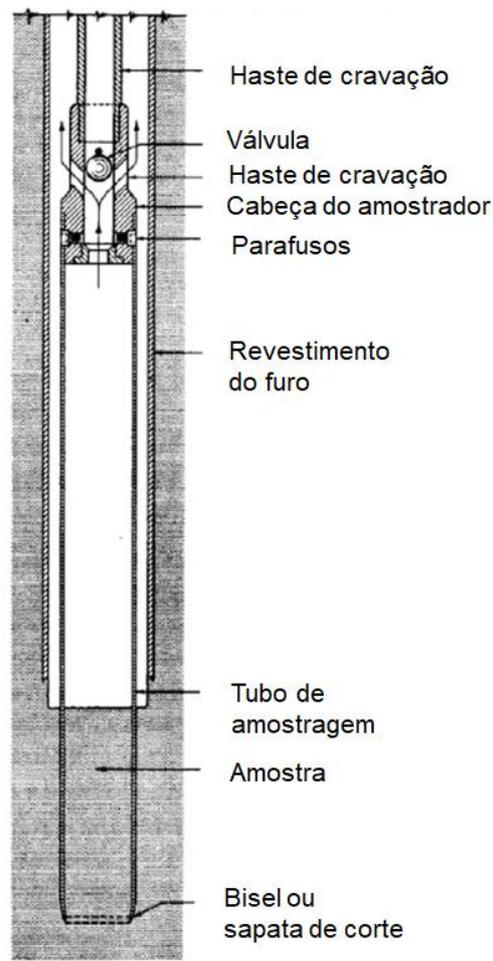


Figura 2.2 – Operação do amostrador de tubo aberto de parede fina (adaptado de Hvorslev, 1949).

### 2.3.2.

#### Amostradores tubulares de parede fina com pistão estacionário

Conforme descrito pelo DNER (1994), o amostrador tubular de parede fina com pistão estacionário é utilizado para a coleta de amostras em solos muito moles ou em casos onde não é possível reter a amostra com o amostrador sem pistão. Segundo a ABNT NBR 9820:1997, o amostrador com pistão estacionário é composto por: cabeça do amostrador, pistão, haste do pistão e tubo amostrador de parede fina, conforme ilustra a Figura 2.3. Este tipo de amostrador pode ser utilizado com ou sem a execução de pré-furo (Clayton et al., 1995)

O processo de amostragem, sem pré-furo, é iniciado com a cravação de todo o conjunto, com o pistão se mantendo alinhado à sapata de corte do tubo amostrador até atingir a cota pretendida, conforme ilustra a Figura 2.4. Em seguida, é feita a cravação do tubo com o pistão mantido a uma profundidade

constante. A cravação é realizada sem interrupções, sem rotação e garantindo que a haste do pistão mantenha-se fixa. Após a manobra do tudo amostrador, o conjunto pode ser puxado cuidadosamente até a superfície.

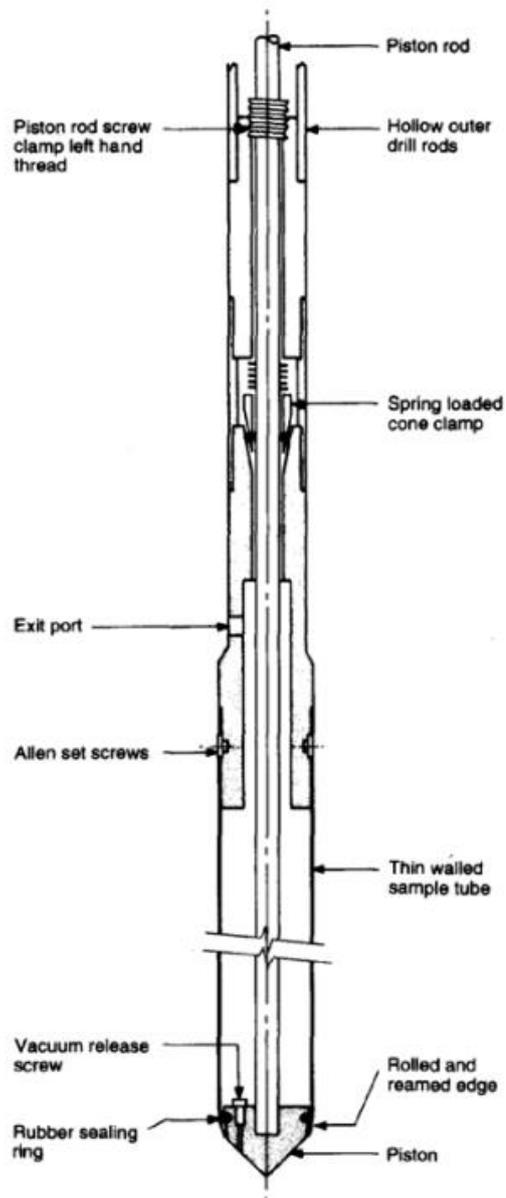


Figura 2.3 – Amostrador tubular de parede fina com pistão estacionário (adaptado de Clayton et al., 1995).

As principais vantagens deste tipo de amostrador são: obtenção de amostras de excelente qualidade; impedimento de entrada de detritos no tubo amostrador durante o processo de cravação do conjunto; redução da entrada de solo excedente durante a manobra do tubo amostrador; alta taxa de recuperação

de amostras; amostra não submetida à pressão atmosférica ou hidrostática durante a operação (Hvorslev, 1949).

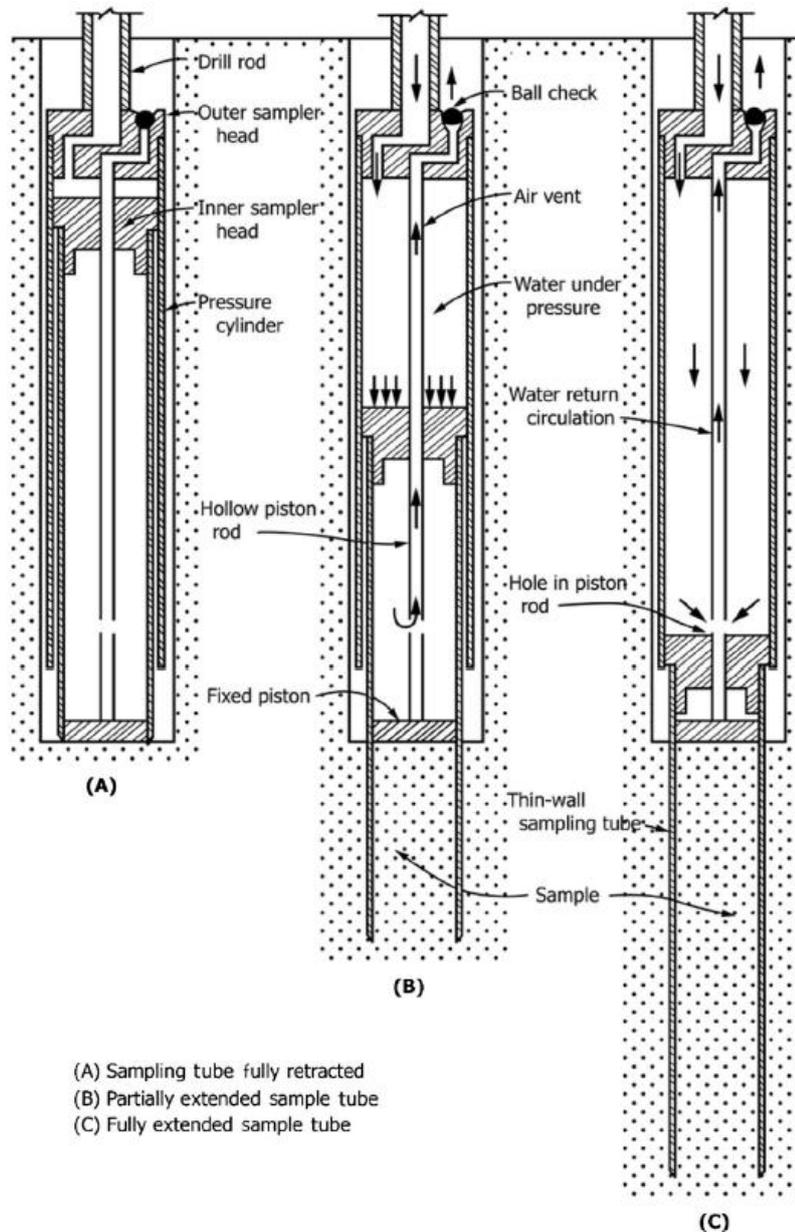


Figura 2.4 – Operação do amostrador de pistão estacionário (adaptado de ASTM, 2015a.).

Existem diversos modelos de amostradores tubulares de parede fina com pistão estacionário (ou fixo) disponíveis no mercado, sendo alguns com diferentes mecanismos de cravação. Chung et al. (2014) realizaram ensaios de adensamento com velocidade de deformação constante (CRS) e ensaios de adensamento edométrico incremental em amostras da argila do delta do Rio Nakdong, em Busan, Coreia do Sul, extraídas com três tipos de amostradores de pistão estacionário de mesmo diâmetro, porém operados por diferentes

mecanismos de cravação. O primeiro com operação mecânica, o segundo operado por um mecanismo hidráulico e o terceiro operado a óleo (Figura 2.5). Os resultados dos ensaios mostraram que o amostrador operado a óleo foi o que coletou amostras de melhor qualidade, seguido pelo amostrador mecânico. O amostrador com mecanismo hidráulico de cravação foi aquele que obteve amostras de pior qualidade. A pesquisa sugeriu, portanto, que as diferenças nas qualidades das amostras obtidas pelos amostradores se deveu a perturbações mecânicas atribuídas aos respectivos mecanismos de cravação dos tubos amostradores.

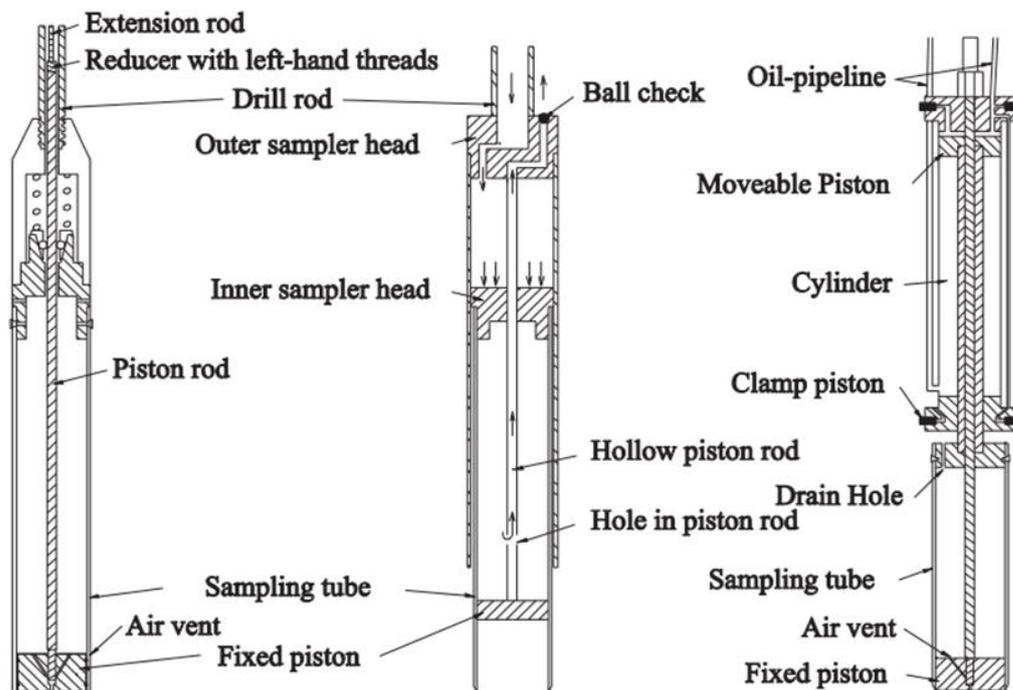


Figura 2.5 – Amostradores com pistão fixo: mecânico (JGS 1221-1995), hidráulico (ASTM D 6519-05), operado a óleo (Chung & Kweon, 2013) (adaptado de Chung et al., 2014).

O primeiro modelo de amostrador tubular de parede fina com pistão estacionário foi desenvolvido por Olsson (1925). Posteriormente, foram desenvolvidos outros modelos, dentre os quais se destacam o amostrador Osterberg (1973), o amostrador com pistão estacionário NGI (Andresen, 1981) e o amostrador japonês (Tanaka & Tanaka, 1999).

Segundo Clayton et al. (1995), amostradores tubulares de parede fina com pistão estacionário revestidos internamente com *liners*, geralmente feitos em plástico, também são amplamente utilizados. Raymond et al. (1971) sugerem que o uso de *liners* em tubos amostradores é essencial durante a extração de amostras de pequeno diâmetro, uma vez que o procedimento de extrusão de

amostras no laboratório e as vibrações impostas durante o corte de tubos em aço inoxidável podem causar um alto grau de perturbação nas amostras. Além disso, Andresen (1981) sugere que amostradores com pistão e *liners* devem ser utilizados a fim de se obter amostras intactas de depósitos de argila mole situados abaixo de camadas de argila rija ou material arenoso.

### **2.3.3.**

#### **Amostradores tubulares com pistão retrátil**

Amostradores tubulares com pistão retrátil foram introduzidos com o objetivo de evitar a entrada de materiais não desejados durante a cravação do conjunto até a cota de amostragem. Assim que a cota é atingida, o pistão é recolhido até o topo do tubo amostrador. Em seguida é dado início à manobra de cravação do tubo amostrador. Este tipo de amostrador é pouco utilizado, pois possui uma série de desvantagens. Durante o recolhimento do pistão, há a possibilidade de que o solo suba para dentro do tubo de amostragem. Além disso, possui um elevado índice de área, o que pode acarretar a entrada de solo amolgado para dentro do tubo amostrador durante a sua cravação (Clayton et al., 1995).

### **2.3.4.**

#### **Amostradores tubulares com pistão livre**

O amostrador tubular com pistão livre possui um pistão em seu interior que pode ser fixado junto à sapata de corte do amostrador durante a cravação do conjunto até a cota de amostragem, ou também fixado junto ao topo do tubo amostrador durante a retirada da amostra. No entanto, durante a manobra de cravação do tubo amostrador, o pistão é livre para se movimentar tanto em relação ao tubo amostrador quanto em relação à cota do terreno. Este modelo de amostrador possui várias vantagens em relação ao amostrador de tubo aberto (sem pistão), no entanto é pouco utilizado, pois o atrito entre o pistão e a parede interna do tubo amostrador pode ocasionar uma compressão na amostra, bem como uma redução na quantidade de amostras recuperadas (Clayton et al., 1995).

### 2.3.5.

#### Amostradores Laval

O amostrador Laval, desenvolvido na Universidade de Laval, no Canadá, foi concebido para a coleta de amostras intactas de argilas moles e sensíveis (La Rochelle et al., 1981). Possui uma operação complicada e de custo elevado quando comparado com outros amostradores tubulares. No entanto, as amostras retiradas com este tipo de amostrador possuem excelente qualidade, mostrando-se apenas um pouco inferior às amostras do tipo bloco (Clayton et al., 1992).

O equipamento consiste basicamente em um tubo de amostragem sem folga interna com 208 mm de diâmetro interno e parede de 5 mm de espessura, cabeça do amostrador e o tubo externo, conforme ilustrado na Figura 2.6. O bisel de corte do tubo amostrador tem um ângulo de  $5^\circ$  e o índice de área é de 10 %.

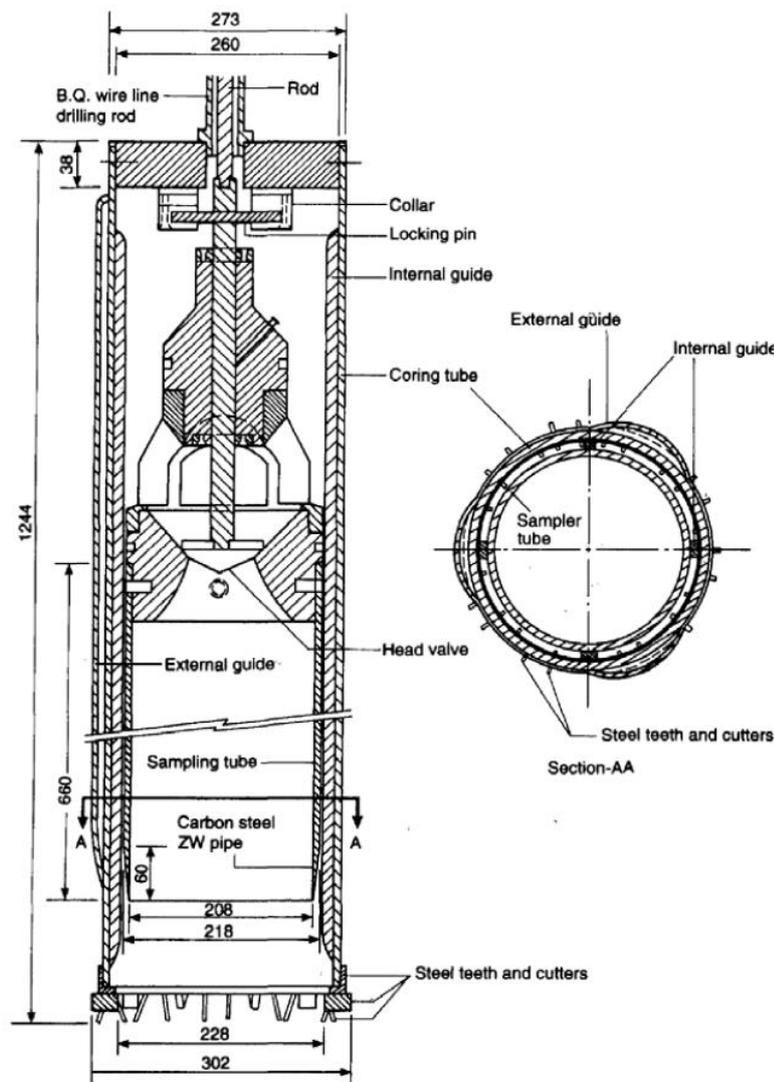


Figura 2.6 – Amostrador Laval de diâmetro de 200 mm (La Rochelle et al., 1981).

O procedimento de amostragem é iniciado com a realização de um pré-furo e com o posicionamento da base do amostrador junto à base do furo, conforme ilustrado na etapa (a) da Figura 2.7. Em seguida, o tubo interno é cravado no solo (etapa b). Após a manobra de cravação do tubo interno, o tubo externo é descido com o objetivo de realizar a limpeza externa do furo, até uma posição de aproximadamente 20 cm abaixo da sapata de corte do tubo interno (etapa c). Por fim, todo o conjunto é retirado do furo (etapa d) (La Rochelle et al., 1981). A Figura 2.7 ilustra as etapas seguidas durante a amostragem.

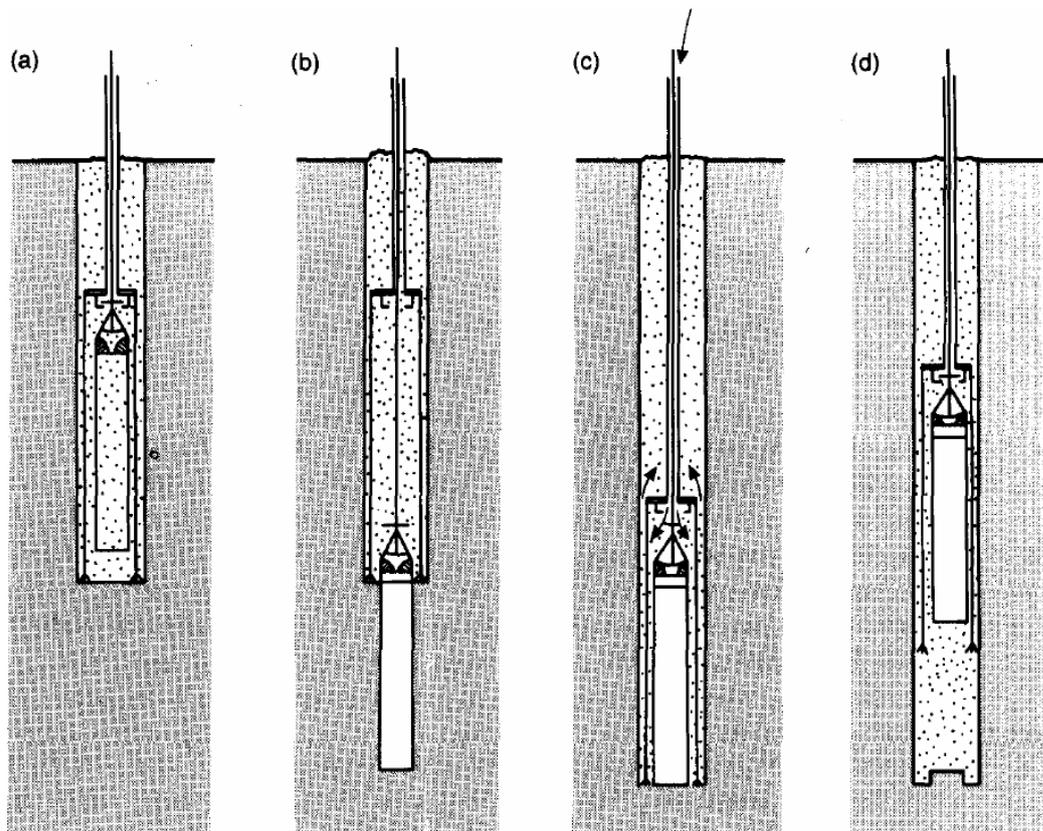


Figura 2.7 – Etapas de operação do amostrador Laval de diâmetro de 200 mm (La Rochelle et al., 1981).

### 2.3.6.

#### Amostrador Sherbrooke

O amostrador Sherbrooke foi desenvolvido por Lefebvre e Poulin (1979) na Universidade de Sherbrooke, no Canadá, com o objetivo de retirar amostras indeformadas, do tipo bloco, de camadas profundas de argilas moles e sensíveis. Este tipo de amostrador permite coletar amostras com diâmetros de 25 cm e altura de aproximadamente 35 cm.

O procedimento de amostragem é iniciado com a inserção do amostrador dentro de um furo de aproximadamente 45 cm de diâmetro, preenchido com lama tixotrópica. O amostrador possui três lâminas de cortes em sua extremidade inferior, conectadas a uma haste de perfuração, conforme ilustrado nas Figura 2.8 e 2.9. Quando o amostrador atinge a profundidade desejada, as lâminas são movidas para a posição horizontal e, em seguida, é realizado o corte da base da amostra. Por fim, a amostra é removida lentamente de dentro do furo (Lefebvre & Poulin, 1979).

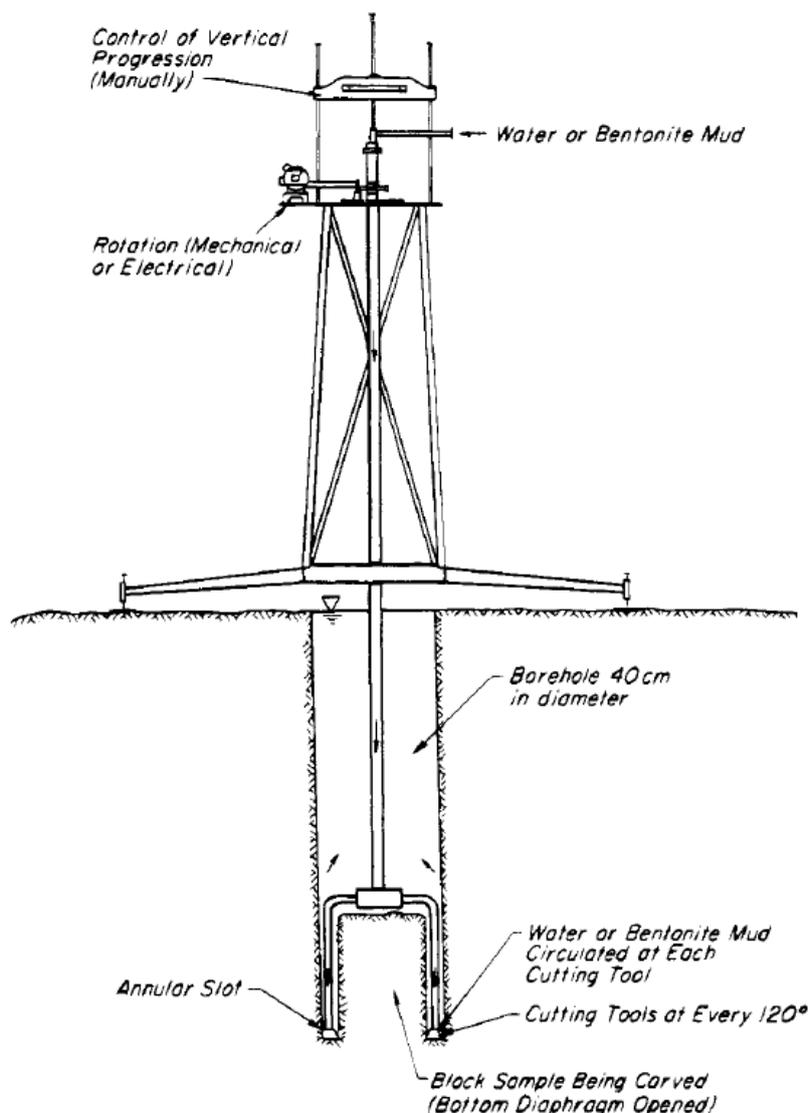


Figura 2.8 – Esquema do amostrador Sherbrooke (Lefebvre & Poulin, 1979).

Este amostrador já foi utilizado em argilas do Canadá, Escócia, Noruega e Brasil, fornecendo amostras de excelente qualidade (Lefebvre & Poulin, 1979;

Clayton et al., 1992; Lunne et al., 1997; Oliveira, 2002). Com base em ensaios triaxiais adensados anisotropicamente, não drenados, de compressão (CAU-C) e ensaios (CRS), realizados em amostras intactas da argila de Lierstranda, Noruega, extraídas com diferentes amostradores, Lunne et al. (1997) constataram a superioridade da qualidade de amostras coletadas com o amostrador Sherbrooke em relação a amostras coletadas com amostradores tubulares de pistão estacionário de diâmetros de 54 mm e de 75 mm. A diferença nos resultados dos ensaios foi mais significativa em amostras de argilas sensíveis de baixa plasticidade.

Oliveira (2002) comparou a qualidade de amostras intactas de argilas moles do Clube Internacional (Recife) e da Barra da Tijuca no Rio de Janeiro, coletadas com o amostrador Sherbrooke e com amostradores tubulares de parede fina com pistão estacionário de diâmetro de 100 mm. A avaliação da qualidade foi feita com base nos resultados de ensaios de adensamento edométrico incremental e ensaios triaxiais. As amostras Sherbrooke apresentaram, em geral, qualidade levemente superior em relação a amostras coletadas com os amostradores tubulares para a argila do Recife. Entretanto, para a argila da Barra da Tijuca, a qualidade das amostras Sherbrooke foi equivalente ou levemente inferior a das amostras coletadas com os amostradores tubulares. Além disso, Oliveira (2002) não conseguiu amostrar com o sherbrooke na altura original, pois a amostra rompia com o peso próprio



Figura 2.9 – Visão frontal do amostrador Sherbrooke (Oliveira, 2002).

Segundo Oliveira (2002) esses resultados podem ser explicados pela baixa consistência e alta plasticidade da argila da Barra da Tijuca (Rio de Janeiro). Por outro lado, a argila do Recife é mais consistente e menos plástica, portanto, mais suscetível ao amolgamento durante o procedimento de amostragem.

Ademais, Oliveira (2002) conclui que o alto custo e as dificuldades operacionais devido à necessidade de execução de pré-furo de 45 cm de diâmetro não justificam a utilização do amostrador Sherbrooke em projetos envolvendo essas argilas.

## **2.4.**

### **Fatores que influenciam a qualidade da amostra/ corpo de prova**

#### **2.4.1.**

##### **Considerações iniciais**

Uma amostra de solo está sujeita a efeitos de amolgamento durante a sua extração, manipulação, acondicionamento, armazenamento no campo, transporte para o laboratório e armazenamento no laboratório.

Andrade (2009) e Rémy & Aguiar (2016) chamam a atenção para o uso da expressão “qualidade de corpos de prova” no lugar de “qualidade de amostras”, ainda que esta última seja comumente adotada pelos engenheiros geotécnicos, visto que os efeitos de amolgamento são observados desde a coleta das amostras até a moldagem e manuseio dos corpos de prova no laboratório e montagem dos ensaios. Por conseguinte, é de suma importância que os corpos de prova sejam moldados com extremo cuidado, utilizando técnicas e ferramentas adequadas, para que os ensaios realizados em laboratório forneçam resultados confiáveis.

Segundo Hvorslev (1949), os diferentes tipos de perturbações a que uma amostra está sujeita durante o procedimento de amostragem são:

- 1) Variação do estado de tensões;
- 2) Variação do teor de umidade e do índice de vazios;
- 3) Alteração da estrutura do solo;
- 4) Variação química;
- 5) Mistura e segregação dos constituintes do solo.

Por sua vez, Jamiolkowski et al. (1985) apontam que os principais fatores que podem causar o amolgamento em amostras de argila são:

- 1) Variação no estado de tensões devido à abertura do furo;
- 2) Eventual remoção das tensões cisalhantes de campo;
- 3) Eventual remoção da tensão confinante;
- 4) Geometria do amostrador;
- 5) Método de cravação do tubo;
- 6) Método de extração do tubo;
- 7) Transporte;
- 8) Armazenamento;
- 9) Procedimentos de moldagem dos corpos de prova.

Alguns destes fatores podem ser controlados ou minimizados por meio de técnicas de amostragem avançadas, bem como pela seleção de técnicas adequadas para cada tipo de solo e condição (Jamiolkowski et al., 1985).

Alguns dos fatores que influenciam a qualidade das amostras são discutidos nos itens abaixo.

#### **2.4.2.**

#### **Método de extração da amostra**

Skempton & Sowa (1963) pontuam que até mesmo as melhores técnicas de amostragem causam algum tipo de perturbação na amostra. Vários autores consideram que os amostradores do tipo bloco são os que fornecem amostras de melhor qualidade. Amostradores tubulares com pistão estacionário fornecem amostras de melhor qualidade do que os amostradores de tubo aberto (sem pistão), pois o pistão impede a entrada de solo amolgado durante a penetração e a manobra de cravação do tubo amostrador (Andresen, 1981). Além disso, amostradores com pistão estacionário podem ser cravados em furos revestidos ou não revestidos, bem como por meio de cravação por deslocamento, isto é, sem execução de pré-furo. Ademais, a perda de amostras durante a operação de retirada do amostrador de dentro do furo é menor em amostradores com pistão estacionário.

Em relação ao método de cravação, amostradores tubulares de pistão estacionário podem ser operados por meio do método do pré-furo ou pelo método do deslocamento, isto é, sem a execução de pré-furo. No método do deslocamento, o pistão se mantém fixado junto à sapata de corte (bisel) do tubo

amostrador, enquanto todo o conjunto é cravado diretamente no subsolo até cota de amostragem. Em seguida, o pistão é travado por meio de um conjunto de hastes internas e o tubo amostrador é cravado no solo. Os amostradores do NGI possuem um pistão com ponta cônica para facilitar a cravação no subsolo (Andresen, 1981; Lunne et al., 1997).

A Figura 2.10 ilustra as deformações impostas às camadas de solo durante o procedimento de amostragem, sem pré-furo, utilizando um amostrador tubular de pistão estacionário.

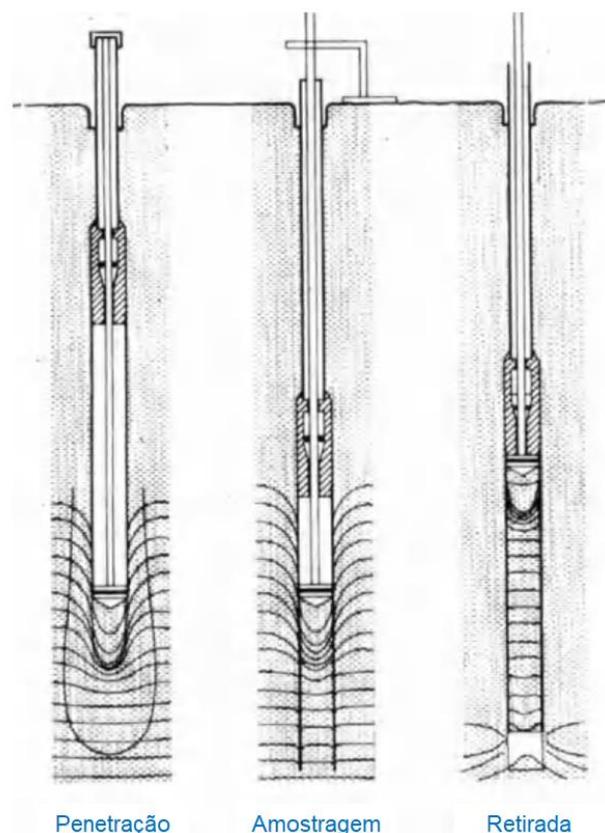


Figura 2.10 – Deformações das camadas de solo durante as operações de amostragem com um amostrador tubular de pistão estacionário sem pré-furo (adaptado de Andresen, 1981).

Por outro lado, no método do pré-furo, o amostrador desce até a cota de amostragem por um furo pré-executado preenchido com lama bentonítica. Posteriormente, o pistão é fixado e é iniciada cravação do tubo amostrador. Este método de cravação é o utilizado no amostrador japonês de diâmetro de 75 mm (Tanaka & Tanaka, 1999). Ressalta-se que é necessária uma limpeza cuidadosa do furo antes de realizar a cravação do amostrador. Oliveira (2002) chama a atenção para a ruptura de fundo por extensão devida ao alívio da tensão vertical total durante a operação com este tipo de amostrador.

O efeito da execução ou não de pré-furo na qualidade de amostras foi estudado por Tanaka & Tanaka (1999). Estes autores constataram que a resistência à compressão simples ( $q_u$ ) da amostra é aproximadamente 20 % inferior quando utilizado o método do deslocamento com o amostrador japonês de diâmetro de 75 mm. Na opinião dos referidos autores, a penetração do amostrador no solo causa um amolgamento maior na amostra do que a abertura do pré-furo. Não foram observados efeitos da execução ou não do pré-furo nos valores de  $q_u$  das amostras extraídas com o amostrador NGI de diâmetro de 54 mm.

### 2.4.3.

#### **Geometria do amostrador tubular**

A influência da geometria dos amostradores tubulares no amolgamento das amostras é discutida por vários autores (Hvorslev, 1949; Andresen, 1981; Baligh, 1985; Clayton et al., 1998; Clayton & Siddique, 1999).

Durante a manobra de cravação do tubo de amostragem no subsolo, o solo no interior do tubo sofre deformações cisalhantes devido à ocorrência de tensões cisalhantes entre a parede interna do tubo e a amostra, ao passo que o solo ao redor do tubo sofre deformações cisalhantes em razão do deslocamento de solo (Clayton & Siddique, 1999).

Hvorslev (1949) definiu os seguintes parâmetros relacionados à geometria do tubo de amostragem, já descritos na Figura 2.1: índice de área, relação de folga interna e relação de folga externa. O índice de área representa a razão entre o volume de solo deslocado pela cravação do tubo e o volume da amostra, a relação de folga interna está relacionada ao atrito interno, e a relação de folga externa está relacionada ao atrito externo.

Baligh (1985) e Baligh et al. (1997), por meio do Método do Caminho de Deformações, apresentaram uma previsão das deformações no solo causadas pela cravação de um amostrador tubular idealizado, mostrado na Figura 2.11. A solução apresentada é resultante de um modelo que considera a sobreposição de um anel em um material assumido saturado, homogêneo, isotrópico, sem resistência ao cisalhamento e com drenagem muito lenta em relação à velocidade de cravação. O amostrador idealizado possui pontas curvas, apresenta uma leve redução no diâmetro interno, tendo relação de folga interna

de 0,98 %, e possui relação  $B/t$  de 40, onde “ $B$ ” representa o diâmetro externo do tubo de amostragem e “ $t$ ” a espessura da parede do tubo.

Segundo Baligh et al. (1997), uma análise visual da malha distorcida, apresentada na Figura 2.11, indica que, durante a cravação do amostrador, as deformações do solo iniciam-se a partir da ponta da parede do tubo e estabilizam-se rapidamente dentro do amostrador. Além disso, observa-se que, a partir de uma certa distância da ponta do tubo, são observadas distorções apenas próximo à periferia do tubo, não sendo observadas distorções no núcleo da amostra.

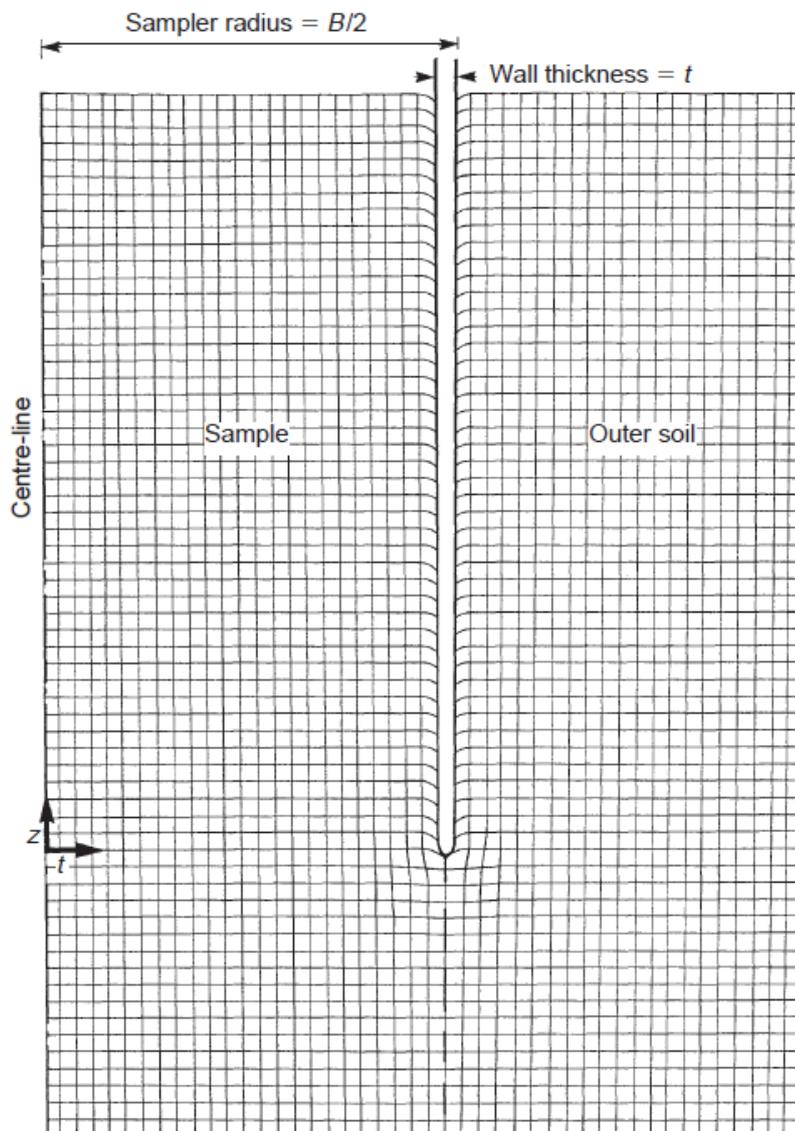


Figura 2.11 – Deformações do solo durante penetração não drenada do amostrador simples em argilas saturadas ( $B/t = 40$ ) (Baligh et al., 1987).

Além disso, Baligh (1985) observou que o elemento de solo localizado no eixo central da amostra é submetido a três fases de cisalhamento triaxial durante a cravação do amostrador, conforme mostrado na Figura 2.12. Primeiro ocorre uma compressão axial à frente do amostrador, resultando em uma deformação axial de zero até um valor máximo. Em seguida, ocorre uma extensão do material próximo à sapada de corte, ocasionando uma mudança de estado de compressão para uma extensão máxima. Por fim, ocorre uma segunda fase de compressão dentro do tubo de amostragem. Nesta fase, a deformação axial diminui até atingir um valor constante.

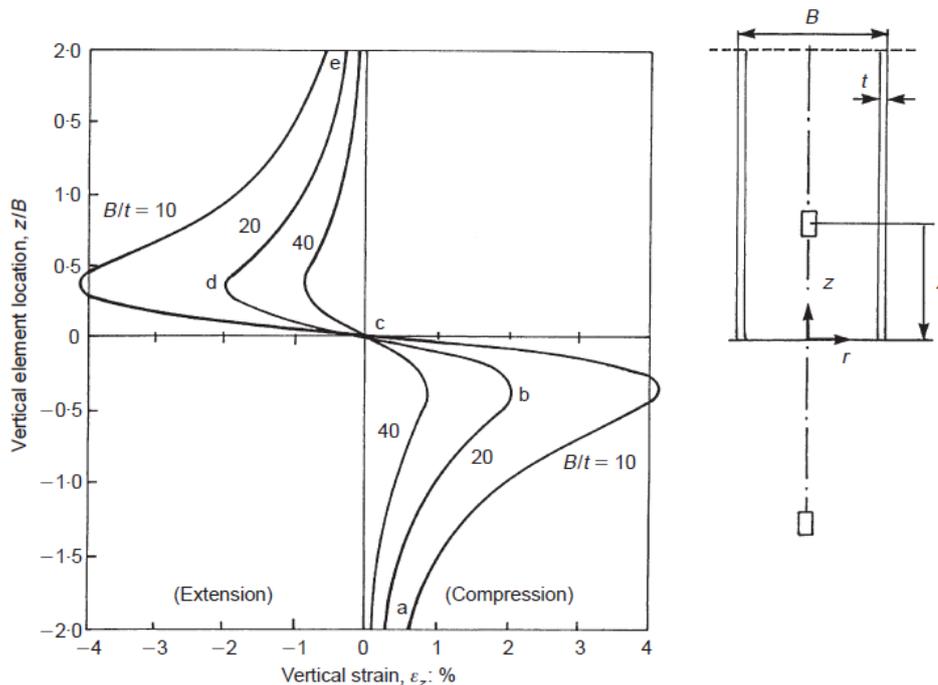


Figura 2.12 – Caminhos de deformações para um elemento de solo situado na linha central de um tubo de amostragem ( $B/t = 40$ ) (Baligh, 1985).

Baligh (1985) também apresentou a previsão de deformação para um amostrador com parede reta e ponta chata com relação  $B/t$  de 20, e de um amostrador simples com o mesmo valor de  $B/t$ . Observou-se que a geometria do amostrador não tem influência sobre o histórico de deformações em elementos de solo na linha vertical que passa pelo centro da amostra. No entanto, a geometria do amostrador, ou seja, a relação  $B/t$ , exerce grande influência na distorção do solo próximo à periferia do tubo.

Em relação às dimensões dos amostradores tubulares, Andresen (1981) afirma que o amolgamento da amostra diminui com o aumento do diâmetro do amostrador. No entanto, a relação entre o diâmetro do amostrador e a qualidade

da amostra depende de alguns fatores como: história de tensões, resistência ao cisalhamento e sensibilidade da argila. Para muitas argilas, as melhores amostras são obtidas com amostradores com diâmetro igual ou superior a 100 mm. Segundo Andresen (1981), amostradores com diâmetros inferiores a 50 mm não devem ser utilizados para a coleta de amostras intactas.

Sandroni (1997) afirma que amostradores com diâmetros inferiores a 50 mm não são desejáveis, pois a região anular amolgada, formada na periferia da amostra durante a cravação do tubo de amostragem, é proporcionalmente maior quanto menor for o diâmetro. Por outro lado, amostradores com diâmetros superiores a 150 mm aumentam o risco de instabilidade no fundo da amostra durante a extração do amostrador do furo.

Andresen (1981) pontua que a possibilidade de perda da amostra durante a sua extração aumenta consideravelmente com o aumento do diâmetro interno (D) do amostrador. Isto decorre do fato da força peso que atua na amostra ser diretamente proporcional ao quadrado do diâmetro da amostra e, portanto, do diâmetro interno do amostrador ( $\sim D^2$ ), ao passo que a força de resistência lateral exercida pela parede interna do tubo, que é quem segura a amostra junto ao amostrador, ser diretamente proporcional ao diâmetro ( $\sim D$ ).

Após avaliarem a qualidade de amostras coletadas com diferentes tipos de tubos amostradores dotados de pistão estacionário, Chung et al. (2014) constataram que o diâmetro do amostrador e a razão entre o comprimento e o diâmetro do amostrador tinha influência insignificante na qualidade das amostras. No entanto, a qualidade da amostra foi fortemente influenciada pelo ângulo da sapata de corte.

De acordo com Clayton & Siddique (1999), experiências sugerem que o índice de área e o ângulo interno da sapata de corte do tubo de amostragem são os fatores de maior influência na qualidade das amostras. A Figura 2.13 mostra a nomenclatura adotada por Clayton & Siddique (1999).

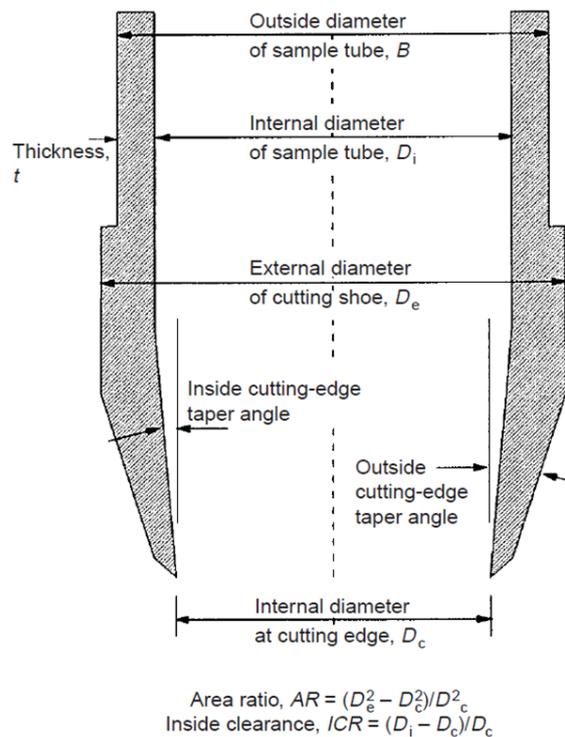


Figura 2.13 – Termos adotados para definir a geometria da sapata de corte (Clayton & Siddique, 1999).

Segundo Clayton & Siddique (1999), a *International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering* (ISSMFE, 1965) indica a importância de amostradores terem uma redução de diâmetro interno próximo à sua extremidade inferior, de forma gradual.

Em análises efetuadas com base no Método do Caminho de Deformações (Baligh, 1985), Clayton & Siddique (1999) avaliaram cinco amostradores com diferentes geometrias e ângulos da sapata de corte, conforme ilustrado na Figura 2.14. Os referidos autores constataram que o amostrador 5 era aquele que apresentava menor pico de deformação axial de compressão ao longo da linha vertical que passa pelo centro da amostra e, conseqüentemente, o capaz de coletar amostras com maior qualidade. A Figura 2.15 mostra a previsão de deformação axial, ora de compressão (+) ora de extensão (-), dos elementos de solo situados ao longo da linha vertical que passa pelo centro da amostra durante a cravação do amostrador, para os cinco amostradores estudados.

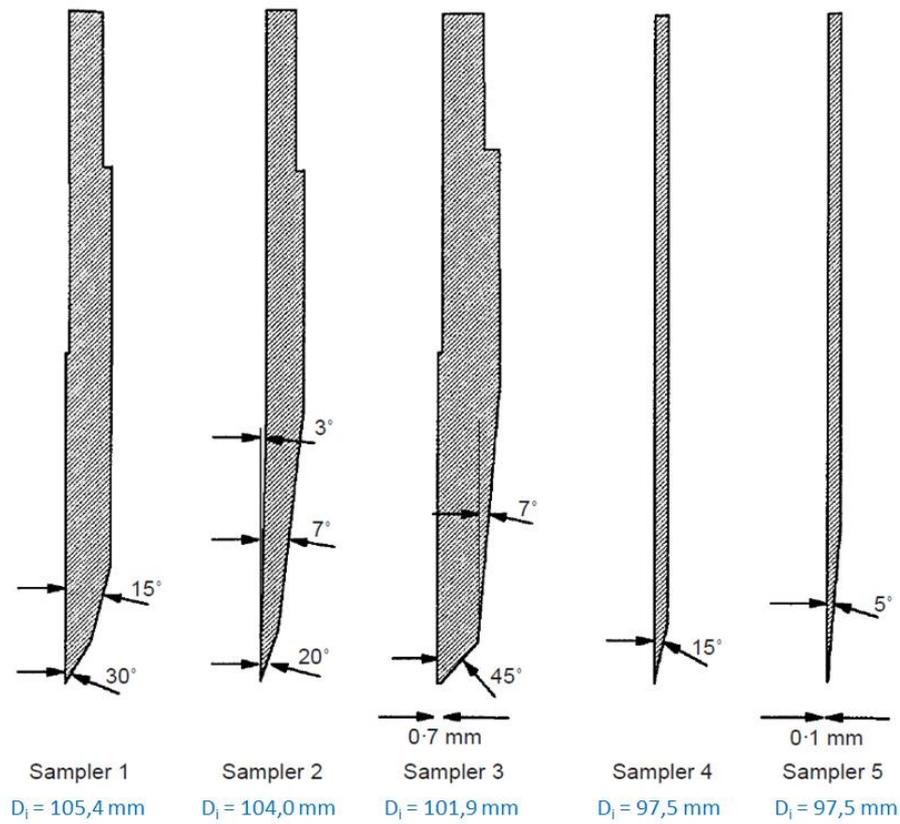


Figura 2.14 – Geometrias das sapatas de corte analisadas por meio do Método do caminho de deformações (adaptado de Clayton & Siddique, 1999).

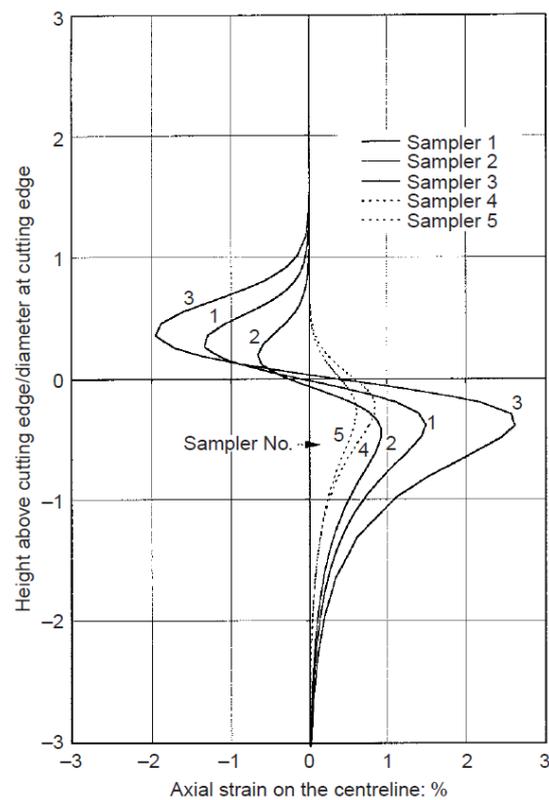


Figura 2.15 – Previsão de deformação axial dos elementos de solo ao longo da linha vertical que passa pelo centro do amostrador (Clayton & Siddique, 1999).

Clayton et al. (1998) indicam que amostradores sem folga interna e com sapata de corte afiada devem fornecer amostras de melhor qualidade no caso de argilas moles, tendo em vista a baixa resistência entre o tubo e a argila amolgada na periferia durante a manobra de cravação do tubo.

Para argilas moles, Ladd & DeGroot (2003) recomendam a utilização de amostradores com diâmetro externo do tubo ( $D_0$ ) de, no mínimo, 76 mm, com ICR (Figura 2.13) entre 0 % e 0,5 %, e com espessura de parede ( $t$ ) de tal forma que a relação  $D_0/t$  seja maior que 45. A Figura 2.16 mostra a geometria de um tubo de amostragem recomendado para argilas moles (DeGroot et al., 2005)

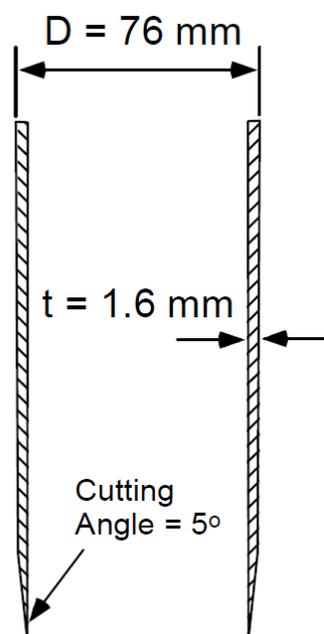


Figura 2.16 – Desenho esquemático de um amostrador sem folga interna, (DeGroot et al., 2005).

Andresen (1981) afirma que a relação de folga interna depende de fatores como o tipo de solo, a profundidade de amostragem e a qualidade da amostra. Uma relação de folga interna grande, entre 1,0 e 3,0 %, permite o inchamento da amostra dentro do tubo e o aparecimento de fissuras, que acarretam na redução da resistência ao cisalhamento, no caso de solos que contenham gases, conforme mostrado na Figura 2.17.

Por outro lado, Clayton et al. (1995) afirmam que a folga interna seja talvez um mal necessário, pois embora permita a expansão lateral da amostra, esta reduz o atrito entre a amostra e a parede interna do tubo amostrador.

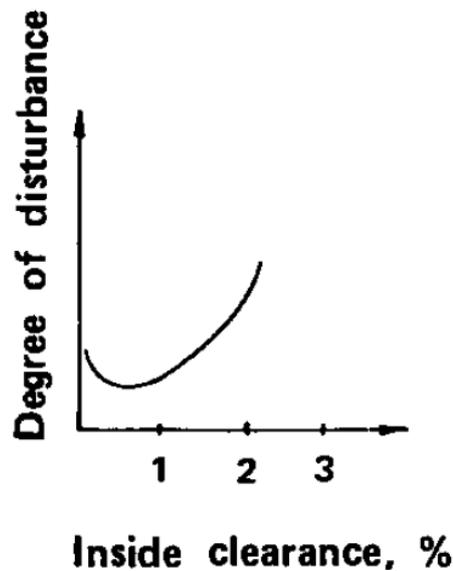


Figura 2.17 –Efeitos da folga interna no grau de amolgamento (Andresen, 1981).

Hight (2001) pontua que, para argilas moles, é evidente o benefício de se utilizar amostradores com grande diâmetro, sapata de corte afiada, parede fina e sem folga interna. Além disso, o referido autor recomenda a adoção de amostradores longos, de modo a reduzir o impacto causado na amostra pelo amolgamento na base do furo e pela sucção durante a retirada da amostra.

#### 2.4.4.

#### Relação entre o diâmetro do corpo de prova e o diâmetro da amostra

Casagrande (1936) observou que, imediatamente após a amostragem, a periferia da amostra apresentava poropressão maior do que a parte central da amostra, em razão das distorções geradas na periferia da amostra durante a cravação do tubo de amostragem, decorrentes do atrito da superfície externa da amostra com a parede interna do tubo.

À este respeito, segundo Hvorslev (1949), é fundamental que os corpos de prova sejam moldados próximos ao núcleo da amostra, tendo em vista que o amolgamento causado pela cravação do tubo de amostragem é mais acentuado na periferia da amostra, junto à parede interna do tubo.

Bjerrum (1973) apresenta um resumo dos principais fatores responsáveis pelo amolgamento de amostras de argila extraídas com amostradores tubulares de parede fina com pistão estacionário. Segundo o referido autor, a causa mais óbvia da destruição da estrutura original da argila é a simples perturbação mecânica da argila provocada: pela cravação do tubo amostrador no subsolo;

pelo cisalhamento do fundo da amostra para a retirada do tubo amostrador do subsolo; e pela própria retirada e manuseio do tubo amostrador. Isto posto, ressalta-se que a periferia da amostra está mais sujeita ao amolgamento do que o seu núcleo, assim como a região na vizinhança da base da amostra deve ter sua estrutura mais comprometida do que a sua meia-altura.

Segundo Bjerrum (1973), toda a amostra de argila fica submetida a uma poropressão negativa (sucção) como resultado do alívio de tensões totais imposto à amostra pela sua extração do subsolo. Na bancada do laboratório, o estado de tensões totais passa a ser hidrostático e nulo. Em uma amostragem perfeita, a poropressão negativa ( $u$ ) na amostra pode ser calculada a partir da Equação 2.1, abaixo. Esta equação é facilmente demonstrável a partir da mudança do estado de tensões totais sofrida pela amostra, tendo como base as definições dos parâmetros de poropressão  $A$  e  $B$  de Skempton (1954), e adotando  $B = 1$  para argila saturada. A equação é válida para  $K_0 < 1$ .

$$u = -\sigma'_{v0}[K_0 + A_u(1 - K_0)] \quad (2.1)$$

onde:

$\sigma'_{v0}$  : tensão vertical efetiva que atuava no elemento de solo *in situ*

$K_0$  : coeficiente de empuxo no repouso do elemento de solo *in situ*

$A_u$ : parâmetro de poropressão  $A$  de Skempton (1954) associado à remoção da tensão desviadora *in situ*.

Se a argila se comportasse como um material perfeitamente elástico,  $A_u$  deveria ser igual a  $1/3$  e a equação 2.2 passaria a ser escrita como:

$$u = -\sigma'_{v0} \frac{(1 + 2K_0)}{3} \quad (2.2)$$

Se este fosse o caso, a sucção na amostra seria numericamente igual à tensão octaédrica efetiva ( $\sigma'_{oct}$ ) que atuava *in situ*. Entretanto, Bjerrum (1973) destaca que o valor de  $A_u$  é geralmente inferior a  $1/3$  (Ladd & Lambe, 1964; Skempton & Sowa, 1963; Noorany & Seed, 1965), o que faz com que, mesmo em uma amostragem perfeita, o valor da sucção na amostra seja levemente inferior à tensão octaédrica efetiva *in situ*.

Além da distorção sofrida pela amostra devido à remoção da tensão desviadora *in situ*, mencionada acima, deve-se ter em mente que qualquer outro tipo de distorção sofrido pela amostra durante o processo de amostragem acarreta em alteração de sua estrutura original, isto é, amolgamento, em maior ou menor grau. É por esta razão que o processo de amostragem nunca é “perfeito”. E mesmo após o processo de amostragem, incluindo o transporte e o armazenamento das amostras no laboratório, a moldagem dos corpos de prova no laboratório e a montagem do ensaio também podem provocar distorções nos corpos de prova, comprometendo a estrutura da argila e, conseqüentemente, alterando suas propriedades originais de compressibilidade e resistência ao cisalhamento.

As distorções não drenadas sofridas por uma argila normalmente adensada ou levemente sobreadensada geram excessos de poropressão positivos, fazendo com que a sucção medida na amostra/corpo de prova seja ainda menor. É por esta razão que muitos autores vêm propondo a medição da sucção como uma avaliação da qualidade da amostra/corpo de prova (Ladd & Lambe, 1963; Hight et al., 1992; Tanaka et al. 2001; Donohue & Long, 2009). Quanto menor a sucção medida, pior a qualidade da amostra/corpo de prova, no caso de argilas normalmente adensadas ou levemente sobreadensadas.

Por exemplo, segundo Bjerrum (1973), as deformações cisalhantes decorrentes do atrito estabelecido entre a superfície externa da amostra e a parede interna do tubo amostrador, durante a cravação do tubo, acarretam no desenvolvimento de excesso de poropressão positivo em solos com baixos valores de razão de sobreadensamento (OCR). Isto provoca uma diminuição do valor da sucção gerada pelo alívio de tensões totais. Como tais deformações cisalhantes são tanto maiores quanto mais próximo o elemento de solo encontra-se da periferia da amostra, assim também são os excessos de poropressão positivos decorrentes. Por esta razão, ocorre migração de água da periferia para o núcleo da amostra. Por conseguinte, o núcleo da amostra sofre expansão à medida que a periferia da amostra sofre adensamento (compressão), porém sem variação de volume da amostra como um todo. A redistribuição de água ao longo do raio da amostra foi medida por Bjerrum (1973) na Argila de Drammen, Noruega, que constatou que o núcleo da amostra possuía teor de umidade superior ao da periferia.

Ortigão (1980) realizou ensaios triaxiais não adensados e não drenados (UU) em corpos de prova com diferentes diâmetros, moldados a partir de amostradores tubulares de parede fina com diferentes diâmetros. O referido autor constatou que o valor da resistência não drenada ( $S_u$ ) da Argila do Sarapuí aumentava com o aumento da relação diâmetro do amostrador/diâmetro do corpo de prova.

Por outro lado, Pinto (2006) afirma que, para a moldagem de corpos de prova para ensaios de adensamento edométrico, é melhor usar anéis edométricos com diâmetros maiores, pois o amolgamento causado no corpo de prova durante a cravação do anel na amostra é menos pronunciado.

#### 2.4.5.

##### **Material do tubo de amostragem**

Segundo Germaine & Germaine (2009), a escolha do tipo de material empregado na fabricação do tubo de amostragem depende da consistência do material a ser coletado e do tempo que a amostra permanecerá armazenada. Os tubos podem ser fabricados em latão, aço macio, aço galvanizado, aço inoxidável, podendo ser revestidos com resina epoxy ou acomodarem *liners* de plástico na parede interna.

O latão e o aço inoxidável são indicados para amostras que permanecerão armazenadas por um longo período, pois podem resistir vários anos sem apresentar corrosão. No entanto, a menor resistência do latão faz com o que o seu uso na coleta de amostras de argilas mais rijas seja limitado.

A ASTM (2015b) recomenda que as amostras não devam permanecer dentro dos tubos de amostragem por um período superior a sete dias, a não ser nos casos em que o tubo seja feito em aço inoxidável ou que possua algum revestimento anticorrosivo. O contato entre a amostra e o tubo de aço provoca uma corrosão galvânica que, além de danificar o tubo, provoca um endurecimento do solo na região anular da amostra. Além disso, podem ocorrer alterações no solo devido à atividade de micro-organismos em razão da exposição da amostra ao ar. Conforme descrito por Germaine & Germaine (2009), o contato da amostra com o ar também acarreta em uma aceleração no processo de corrosão do tubo, mesmo em tubos fabricados em aço inoxidável. Em amostragens de solo em áreas contaminadas, recomenda-se o emprego de tubos revestidos em epoxy ou o uso de *liners* de plástico, com o objetivo de

eliminar as interações químicas. Andresen (1981) afirma que em locais onde amostradores com *liners* foram utilizados, verificou-se uma frequência elevada de perda de amostras durante a extração do amostrador, em razão da baixa aderência entre a amostra e o *liner* de plástico.

Revestimentos em epoxy ou laca também são utilizados para reduzir o atrito lateral entre a amostra e a parede interna do amostrador. O revestimento empregado deve ter dureza e espessura suficientes para resistir a eventuais arranhões causados por partículas de areia ou quartzo (ASTM, 2015b).

Kallstenius (1963) realizou ensaios para medir o atrito entre a argila mole e alguns materiais usados na produção de tubos de amostragem. Os ensaios foram realizados em um aparato que permitia a aplicação de diferentes valores de carregamento vertical, conforme ilustrado na Figura 2.18. A aplicação de carregamentos para gerar a força tangencial entre o solo e a superfície do material testado era realizada em várias etapas, até que o cilindro com solo começasse a mover-se em relação à superfície, e até que fosse atingida uma velocidade de 0,8 m/min. Os resultados, ilustrados na Figura 2.19, indicaram que o coeficiente de atrito dinâmico ( $\mu$ ) sofreu uma redução com o aumento da força normal.

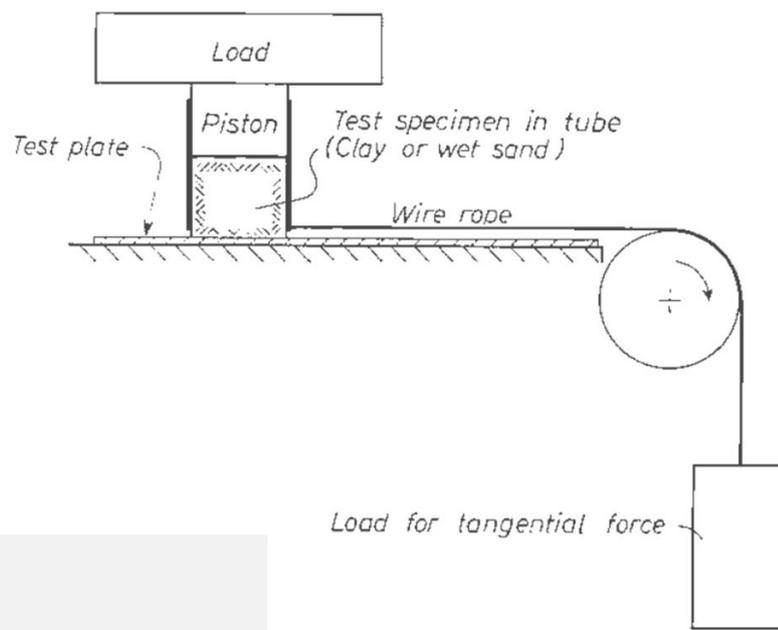


Figura 2.18 – Aparato montado para medição do atrito entre o solo e à superfície do material testado (Kallstenius, 1963).

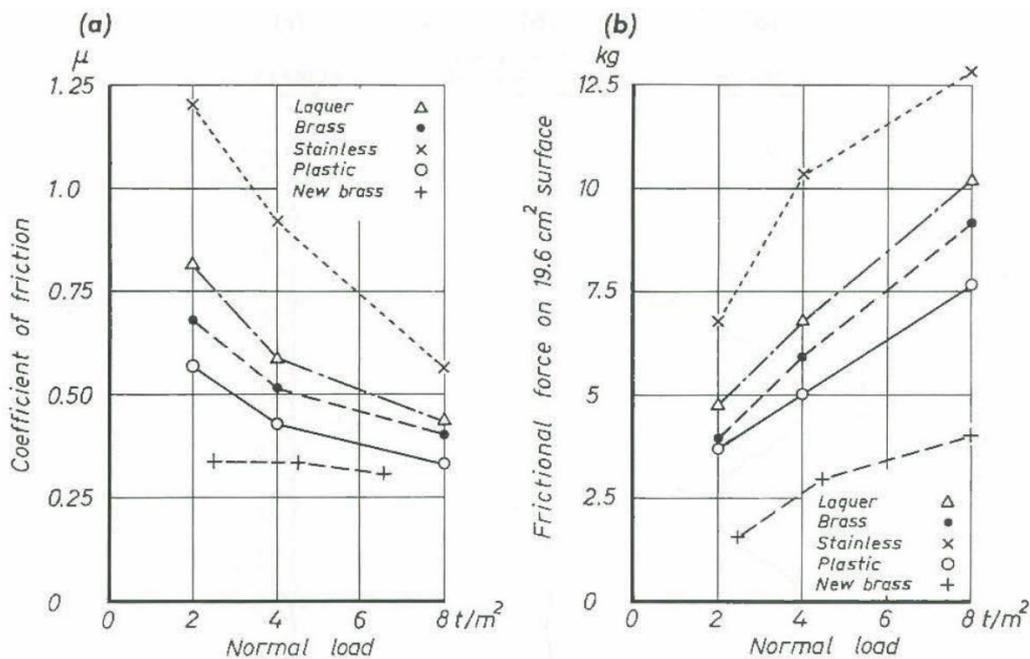


Figura 2.19 – Atrito dinâmico entre a argila e diferentes materiais, (a) Coeficiente de atrito, (b) Força de atrito (Kallstenius, 1963).

#### 2.4.6.

### Procedimentos de transporte e armazenamento das amostras e de moldagem dos corpos de prova

Conforme já mencionado, além do amolgamento causado durante as operações de amostragem, a amostra de solo pode sofrer perturbações em sua estrutura durante o seu transporte até o laboratório e armazenamento no campo e no laboratório, bem como durante a moldagem dos corpos de prova e montagem dos ensaios.

Ladd & DeGroot (2003) sugeriram uma série de procedimentos a serem adotados a fim de minimizar o amolgamento na amostra. Segundo os referidos autores, após a sua extração, a amostra deve ser mantida dentro do tubo de amostragem, as suas extremidades devem ser seladas e a amostra deve ser colocada dentro de uma caixa na posição vertical, com a sua base voltada para baixo. A caixa deve ser preenchida com material capaz de proteger a amostra de possíveis impactos durante o transporte até o laboratório. Todos esses cuidados são também descritos em detalhes na norma ASTM (2014). No Brasil, os procedimentos de manipulação das amostras são descritos na norma ABNT NBR 9820:1997.

La Rochelle et al. (1976) realizaram um estudo da influência do tempo de armazenamento nos parâmetros de resistência e compressibilidade de uma argila sensível cimentada do leste do Canadá, Champlain Clay. Observou-se uma redução na resistência ao cisalhamento não drenado ( $S_u$ ) de amostras armazenadas por vários anos em uma câmara úmida. No entanto, a tensão de sobreadensamento ( $\sigma'_{vm}$ ) aparentou não ter sido afetada.

Andrade (2009) realizou ensaios de adensamento edométrico de carga incremental em amostras da Argila do Canal do Porto de Santos, SP, extraídas com amostradores tubulares de parede fina com pistão estacionário feitos de latão, de diâmetro interno de 100 mm. Os resultados de teor de umidade e dos parâmetros de compressibilidade e de adensamento das amostras ensaiadas após permanecerem cerca de um ano e meio armazenadas em câmara úmida não sofreram alteração em relação aos resultados das amostras ensaiadas logo após a extração.

Segundo Ladd & DeGroot (2003), alguns autores preferem extrudar a amostra no campo de modo a reaproveitar o tubo amostrador no próprio campo, além de evitar o aumento da resistência ao cisalhamento entre a amostra e a parede interna do tubo, bem como a expansão do núcleo da amostra devido à migração de água da periferia da amostra para o seu núcleo, fenômenos estes que ocorrem ao longo do tempo. Cabe ressaltar que, para evitar a expansão do núcleo da amostra, o corpo de prova também deve ser moldado no próprio campo. No entanto, Ladd & DeGroot (2003) afirmam que é preferível lidar com esses problemas a arriscar causar distorções no solo durante a extrusão e manipulação da amostra no campo, onde não se têm os devidos cuidados que normalmente se tem no laboratório.

Com o objetivo de avaliar os efeitos da expansão do núcleo da amostra devido à migração de água da periferia da amostra para o seu núcleo na resistência não drenada ( $S_u$ ), Bjerrum (1973) realizou ensaios triaxiais do tipo adensado anisotropicamente, reestabelecendo as tensões efetivas *in situ*, e cisalhado de forma não drenada (CAU), de compressão, em dois corpos de prova idênticos de uma *quick clay*. Um corpo de prova foi extraído do amostrador imediatamente após a amostragem, moldado, montado na célula triaxial e adensado no campo, próximo ao furo de amostragem. O outro corpo de prova foi extraído do amostrador, moldado no laboratório e ensaiado três dias após a amostragem. O corpo de prova moldado no laboratório apresentou uma

resistência não drenada ( $S_u$ ) 15 % inferior ao  $S_u$  do corpo de prova moldado no campo. Segundo Bjerrum (1973), a redução no valor de  $S_u$  foi devido à expansão que o corpo de prova experimentou durante os três dias entre a sua coleta e o ensaio.

Ladd & DeGroot (2003) e Germaine & Germaine (2009) pontuam que a extrusão da amostra do tubo amostrador pode resultar em um amolgamento elevado e prejudicar os resultados dos ensaios, uma vez que a resistência ao cisalhamento entre a amostra e a parede interna do tubo torna-se significativa com o tempo. A força axial necessária para superar a resistência ao cisalhamento entre a parede interna do tubo e a amostra causa distorções que podem ser observadas conforme o solo é retirado do tubo. Por esta razão, os referidos autores recomendam que os amostradores sejam cortados em segmentos menores (com comprimentos um pouco maiores do que comprimento do corpo de prova a ser moldado) e as amostras posteriormente extrudadas. Com isso, há uma redução da força axial necessária para remover a amostra de dentro do tubo e, conseqüentemente, uma redução no amolgamento causado durante o procedimento. Além disso, essa prática permite que o restante da amostra seja armazenada dentro do tubo para ensaios posteriores (Germaine & Germaine, 2009).

Laad & DeGroot (2003) recomendam que o tubo seja cortado em segmentos com tamanho apropriado para cada tipo de ensaio. O corte deve ser realizado com um arco de serra ou com uma serra de fita, conforme ilustrado na Figura 2.20. Cortadores de tubo podem deformar o tubo. Por outro lado, Germaine & Germaine (2009) afirmam que a vibração causada pela serra de fita pode causar amolgamento em amostras de argila de baixa plasticidade e em materiais sensíveis a vibrações, embora não cause danos em argilas muito plásticas. Neste caso, recomenda-se que o corte do tubo seja feito com um cortador de tubo manual, desde que os segmentos, anterior e posterior ao local do corte, sejam reforçados com luvas bipartida de metal, conforme ilustrado na Figura 2.21.

Após o corte da parede do segmento de tubo, o segmento de amostra deve ser separado do restante da amostra com o uso de corda de violão. Em seguida, deve-se passar a corda de violão, por 3 ou 4 resoluções, ao longo da geratriz do segmento, de modo a promover o desprendimento da amostra à

parede do tubo. Maiores detalhes são descritos e ilustrados por Ladd & DeGroot (2003), Aguiar (2008), Andrade (2009) e Germaine & Germaine (2009).



Figura 2.20 – Corte de um segmento do tubo amostrador para moldagem de corpos de prova para ensaio de adensamento (Aguiar, 2008).

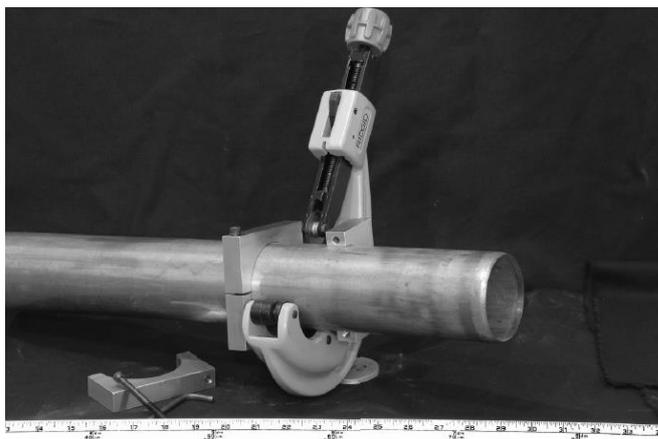


Figura 2.21 – Corte de tubo de amostragem com cortador de tubos manual (Germaine & Germaine, 2009).

A moldagem dos corpos de prova deve ser realizada rapidamente e em ambiente úmido, de modo a evitar a perda de umidade do material. Além disso, o corpo de prova não deve ser tocado diretamente com os dedos, uma vez que a pressão realizada pelos dedos pode resultar em um amolgamento localizado com consequente redistribuição de água pelo corpo de prova. Recomenda-se o uso de ferramentas afiadas e corda de violão para desbastar o material durante a moldagem do corpo de prova (Ladd & DeGroot, 2003; Germaine & Germaine, 2009).

## **2.5.**

### **Efeitos do amolgamento nos parâmetros de compressibilidade e adensamento da argila e avaliação da qualidade dos corpos de prova**

#### **2.5.1.**

##### **Considerações iniciais**

Segundo Terzaghi (1941), em amostras de argila normalmente adensadas, o amolgamento devido ao processo de amostragem praticamente não altera o índice de vazios da amostra como um todo, no entanto a tensão vertical efetiva é reduzida consideravelmente.

Cada estágio do processo de amostragem, transporte, armazenamento e moldagem promove algum grau de amolgamento na amostra/corpo de prova. Ladd & DeGroot (2003) apresentam um caminho de tensões efetivas hipotético com as potenciais fontes de amolgamento desde a coleta de uma amostra de argila normalmente adensada ou levemente sobreadensada (baixo valor de OCR) com amostradores tubulares, com execução de pré-furo, até a moldagem do corpo de prova para ensaio de laboratório, ilustrado na Figura 2.22. O estado de tensões efetivas da amostra no campo é indicado pelo ponto 1. O ponto 9 indica o estado de tensões efetivas do corpo de prova imediatamente antes da realização de um ensaio de laboratório. Os demais pontos indicam o caminho de tensões efetivas seguido pela amostra desde a sua extração até a preparação do corpo de prova. Observa-se que todo o procedimento desde a amostragem até a moldagem do corpo de prova reduz a tensão efetiva média do solo e promove grandes variações da tensão desviadora, o que acarreta em distorções e, conseqüentemente, alteração da estrutura do solo.

Nos itens abaixo, são discutidos os efeitos do amolgamento de amostras de argila mole nos resultados de ensaios de adensamento edométrico. Ademais, são apresentados alguns critérios propostos para a avaliação da qualidade de amostras/corpos de prova de argilas moles baseados nos resultados de ensaios de adensamento edométrico.

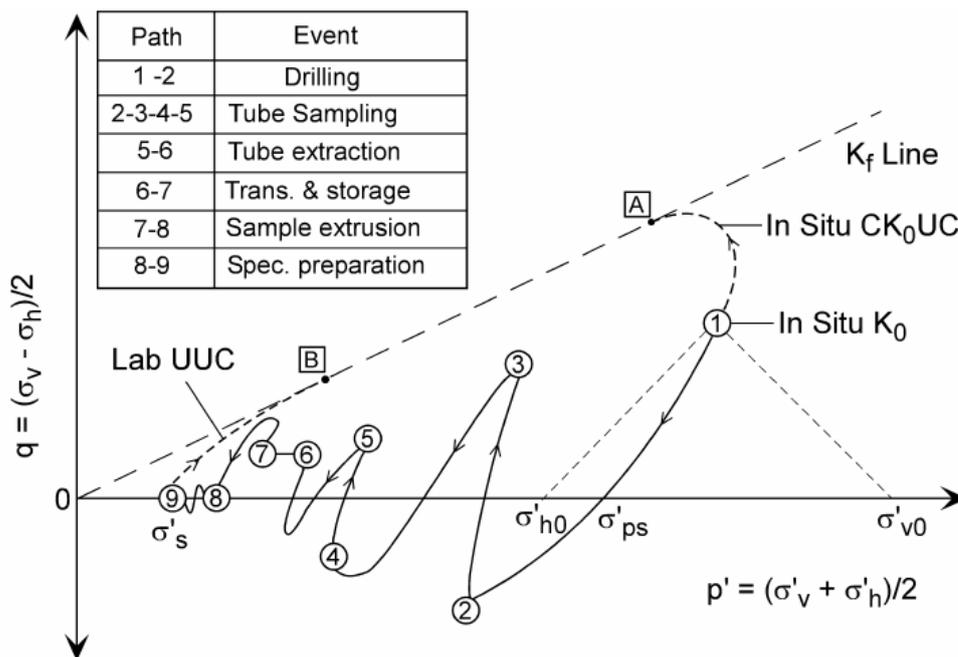


Figura 2.22 – Caminho de tensões efetivas hipotético durante a amostragem com amostradores tubulares e preparação de uma argila com baixo OCR. (Ladd & DeGroot, 2003).

## 2.5.2.

### Parâmetros de compressibilidade

O amolgamento de uma amostra de argila mole afeta seus parâmetros de compressibilidade significativamente. Segundo Ladd (1973), os efeitos do amolgamento na curva de compressão edométrica ( $e \times \sigma'_v$ ) ou ( $\varepsilon_v \times \sigma'_v$ ) são:

- 1) Reduz o índice de vazios (ou aumenta a deformação volumétrica específica) para qualquer valor de tensão vertical efetiva ( $\sigma'_v$ );
- 2) Torna-se difícil definir o ponto de menor raio de curvatura, obscurecendo a tensão de sobreadensamento ( $\sigma'_{vm}$ );
- 3) Reduz do valor estimado de ( $\sigma'_{vm}$ );
- 4) Aumenta a compressibilidade na região de recompressão;
- 5) Diminui a compressibilidade na região de compressão virgem.

A Figura 2.23 apresenta curvas de compressibilidade ( $\varepsilon_v \times \sigma'_v$ ) de corpos de prova de boa qualidade e de um corpo de prova remoldado, o qual foi completamente amolgado em laboratório, da Argila do Canal do Porto de Santos,

próximo à Ilha de Barnabé (Aguiar, 2008), onde se pode constatar todos os efeitos apontados por Ladd (1973).

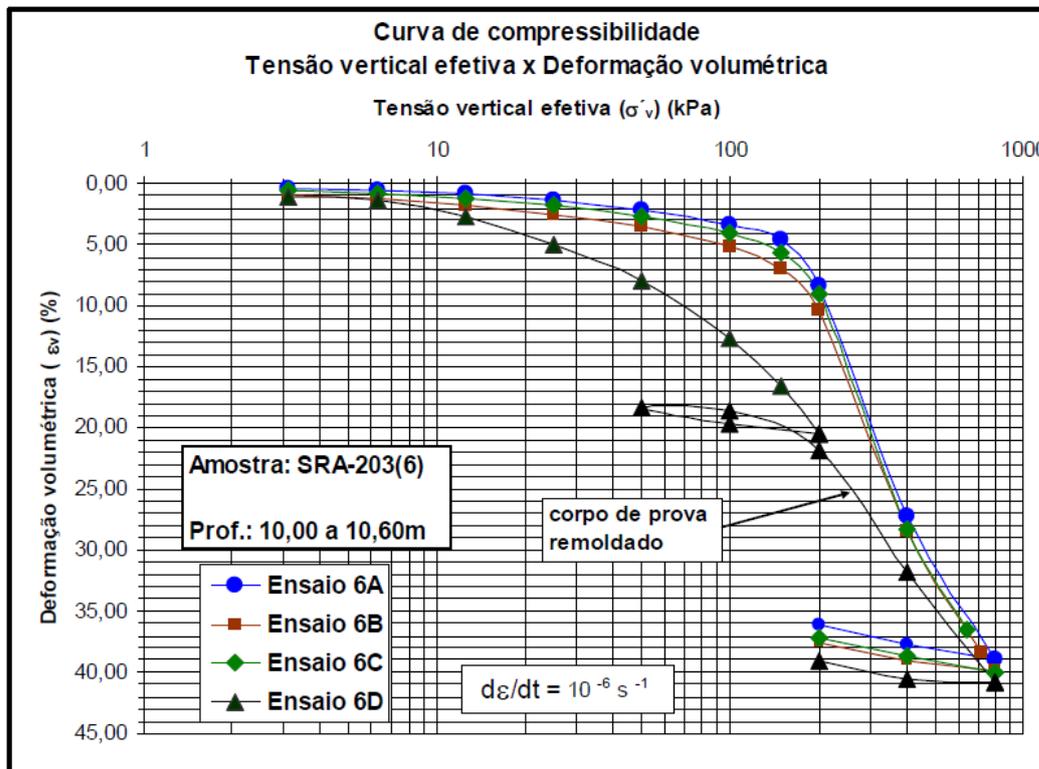


Figura 2.23 – Curvas de compressibilidade ( $\epsilon_v$  x  $\sigma'_v$ ) de ensaios edométricos realizados na Argila do Canal do Porto de Santos (Aguiar, 2008).

A Figura 2.24 apresenta curvas de compressão ( $e$  x  $\sigma'_v$ ) de ensaios de adensamento edométrico de carga incremental realizados por Coutinho (1976) na Argila do Sarapuí, em amostras com diferentes graus de amolgamento. Observa-se a diminuição do índice de vazios, para mesmos valores de tensão vertical efetiva, com a piora na qualidade da amostra. Ademais, observa-se o aumento da dificuldade em determinar a tensão de sobreadensamento, a diminuição do valor estimado para a tensão de sobreadensamento, o aumento da compressibilidade na região de recompressão e a diminuição da compressibilidade na região de compressão virgem, com a piora da qualidade da amostra. Por outro lado, a inclinação do trecho de expansão (ou descompressão) da curva não parece ter sido alterada pelo amolgamento da amostra. Isto pode ser explicado pelo fato de, após terem sido adensadas sob elevada tensão vertical efetiva, as estruturas da argila na amostra de boa qualidade e na amostra de má qualidade assemelharem-se, apagando, portanto, o efeito do amolgamento.

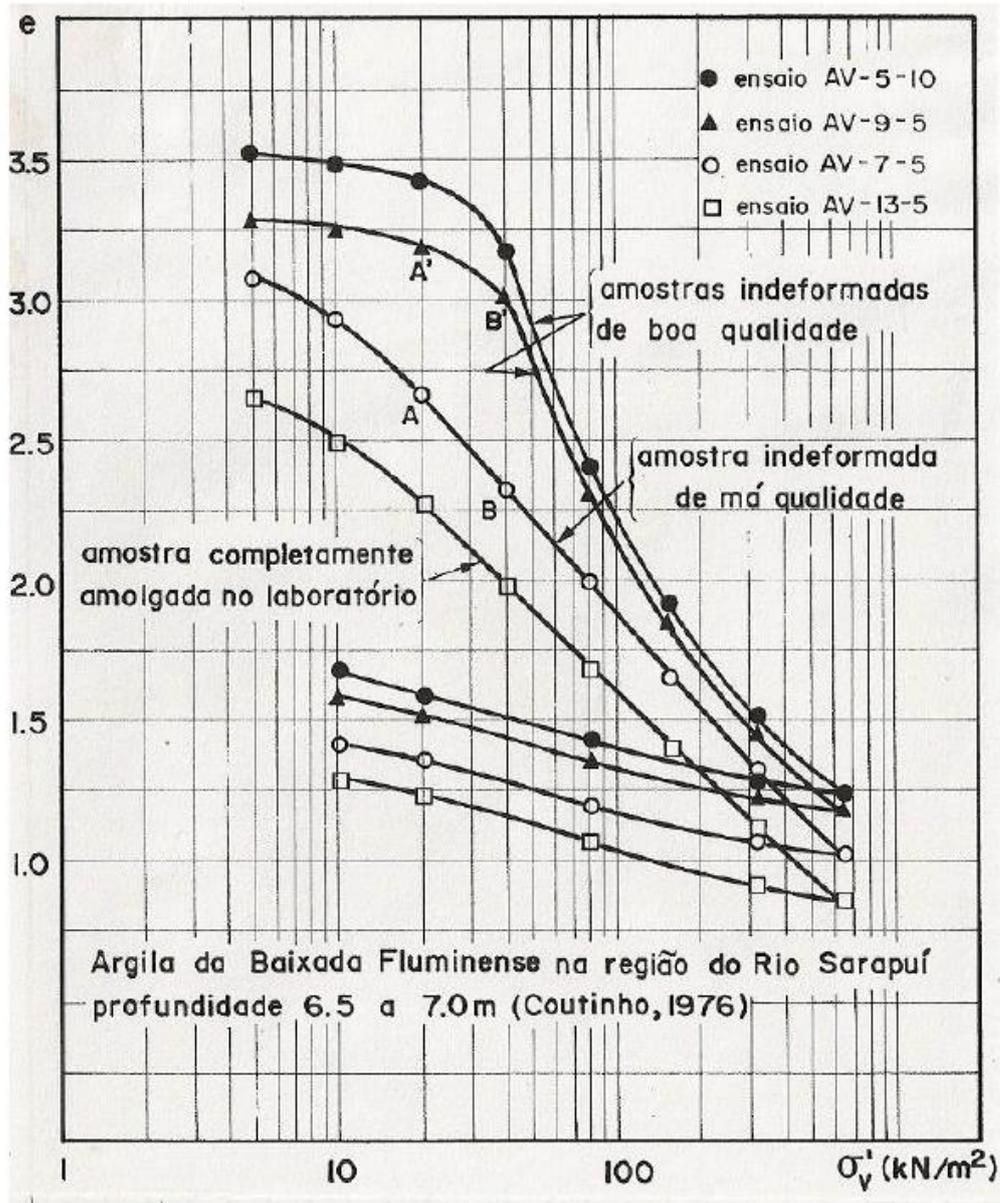


Figura 2.24 – Curvas de compressão edométrica ( $e \times \sigma'_v$ ) de amostras com diferentes graus de amolgamento (Coutinho, 1976).

A este respeito, vale ressaltar que Schmertmann (1955) observou que existe um paralelismo entre o trecho recompressão e o trecho de expansão da curva de compressão edométrica de amostras intactas de boa qualidade. A Figura 2.25 apresenta algumas curvas de compressão edométrica obtidas de ensaios de adensamento edométrico realizados em amostras intactas de argila mole por Schmertmann (1955), ilustrando essa observação.

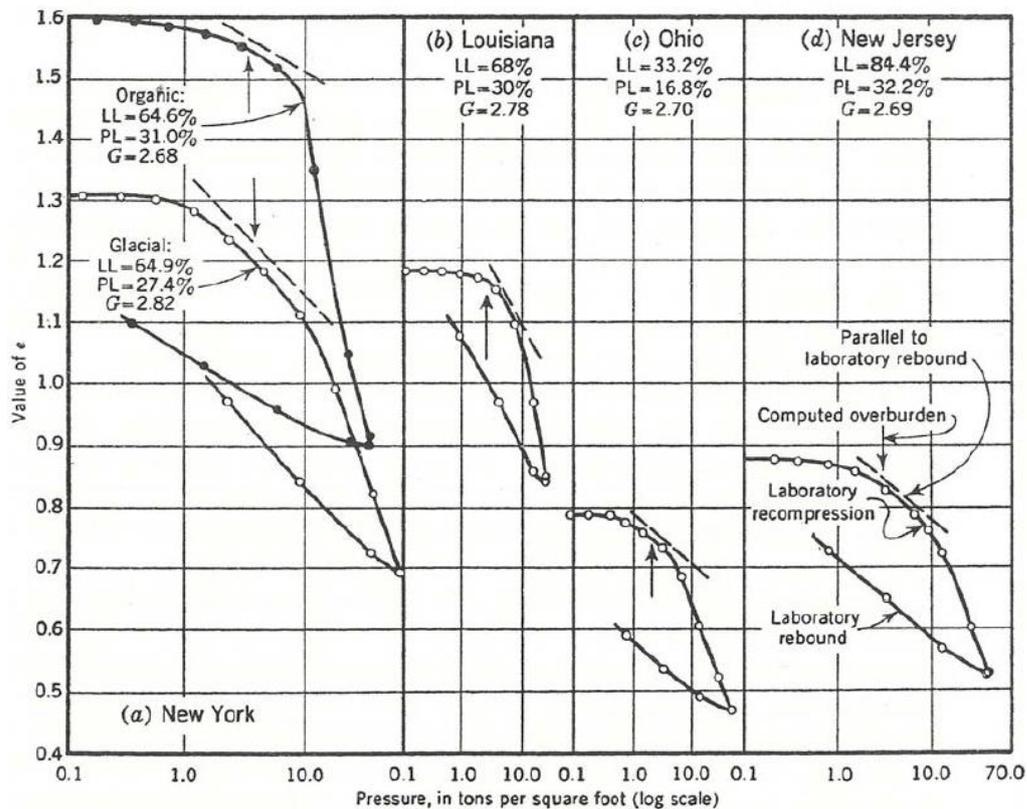


Figura 2.25 – Curvas de compressão edométrica de amostras intactas (Schmertmann, 1955).

Lunne et al. (2006) investigaram os efeitos do amolgamento nos parâmetros de compressibilidade e de adensamento de argilas moles, obtidos de ensaios de adensamento edométrico de velocidade de deformação constante (CRS) e de carga incremental. Foram realizados ensaios em amostras de excelente qualidade do tipo bloco e em amostras extraídas com amostradores de pistão estacionário de diâmetros de 75 mm e 54 mm, de quatro diferentes depósitos de argila marinha da Noruega. A

Figura 2.26 mostra os resultados de ensaios edométricos do tipo CRS realizados em amostras da Argila de Lierstranda.

Segundo Lunne et al. (2006), os valores de tensão de sobreadensamento ( $p'_c$ ) determinados nas amostras extraídas com os amostradores de 54 mm foram entre 20 a 30 % inferiores aos valores determinados nas amostras do tipo bloco, conforme ilustrado na Figura 2.26. Além disso, no trecho compreendido entre a tensão vertical efetiva *in situ* ( $\sigma'_{vo}$ ) e a tensão de sobreadensamento ( $p'_c$ ), os valores do módulo de deformação edométrico ( $E_{eod}$ ) para as amostras extraídas com os amostradores de 54 mm foram aproximadamente 40 % menores do que para as amostras do tipo bloco. Da mesma forma, os valores de

coeficiente de adensamento ( $c_v$ ) calculados no trecho de recompressão foram, em geral, 50 % menores para as amostras extraídas com os amostradores de 54 mm quando comparadas com as amostras do tipo bloco. Portanto, o amolgamento, maior nas amostras extraídas com o amostrador de 54 mm, aumentou a compressibilidade (ou diminuiu a rigidez), além de ter diminuído o coeficiente de adensamento ( $c_v$ ) no trecho de recompressão. Na realidade, a diminuição do coeficiente de adensamento ( $c_v$ ) no trecho de recompressão pode ser vista como uma consequência do aumento da compressibilidade provocado pelo amolgamento, uma vez que, por definição:

$$c_v = \frac{k}{m_v \gamma_w} \quad (2.3)$$

, onde:

$k$ : coeficiente de permeabilidade;

$\gamma_w$ : peso específico da água;

$m_v$ : coeficiente de compressibilidade volumétrica, sendo que:

$$m_v = \frac{d\varepsilon_v}{d\sigma'_v} = \frac{1}{M} \quad (2.4)$$

, onde:

$\varepsilon_v$ : deformação vertical (ou axial) específica, sob condições edométricas.

Vários autores (Coutinho, 1976; Ferreira, 1982; Martins, 1983; Ferreira & Coutinho, 1988; Martins & Lacerda, 1994) chamam a atenção ainda para o fato de que, em amostras de boa qualidade, o trecho de compressão virgem da curva de compressão edométrica apresenta-se côncavo, com a concavidade tanto maior quanto melhor a qualidade da amostra. Um dos efeitos do amolgamento na curva de compressão edométrica é, portanto, diminuir a concavidade do trecho de compressão virgem, podendo torná-lo retilínea se o amolgamento for significativo, tal como ilustrado nas Figuras 2.23 (Aguiar, 2008) e 2.24 (Coutinho, 1976).

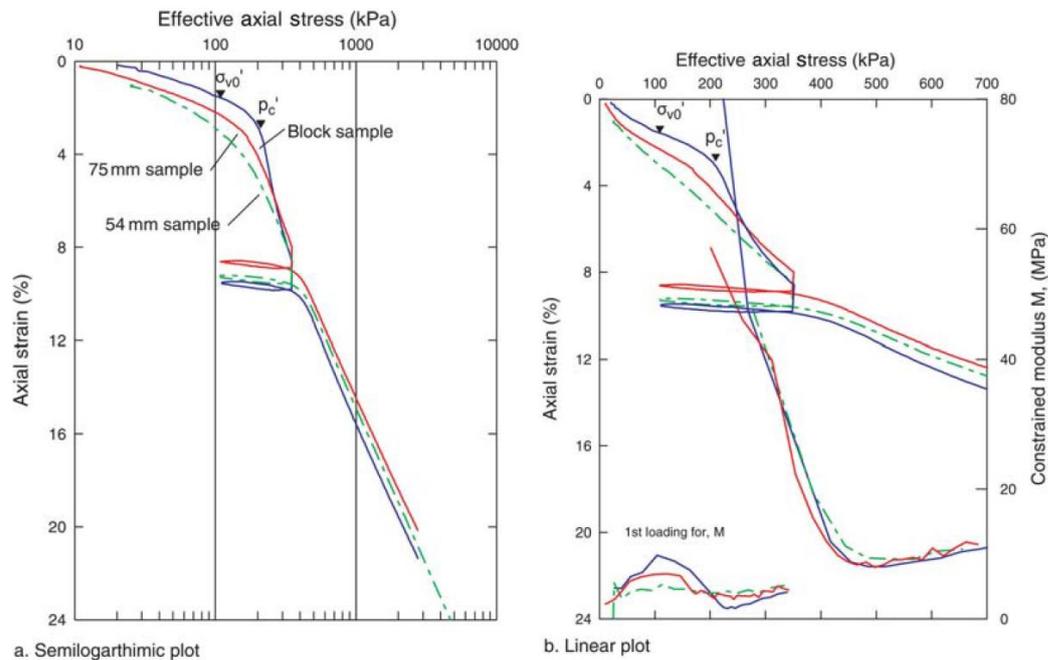


Figura 2.26 – Resultados de ensaios edométricos em amostras da Argila de Lierstranda (Lunne, et al. 2006).

### 2.5.3.

#### Avaliação da qualidade de amostras de argila mole

Todos os métodos de amostragem causam, em maior ou menor grau, algum tipo de perturbação na amostra de argila mole. Neste sentido, vários métodos de avaliação de qualidade de amostras de argila mole têm sido desenvolvidos ao longo dos anos, os quais incluem: medição da variação volumétrica (ou do índice de vazios) durante o adensamento edométrico até a tensão vertical efetiva *in situ*, radiografia da amostra, medição da velocidade de onda sísmica e medição da sucção.

Amundsen et al. (2015) resumem alguns dos indicadores e métodos de avaliação de qualidade de amostras de argila mole até então publicados na literatura, conforme reproduzido na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Resumo dos indicadores e métodos de avaliação de qualidade de amostras (Amundsen et al., 2015).

Year	Method	Parameter	“Very good to excellent” quality	“Very poor” quality
<b>Triaxial and oedometer tests:</b>				
1979-1988	Volumetric strain ( $\varepsilon_{v0}$ ) at <i>in situ</i> effective stress ( $\sigma_{v0}$ ) (Andresen and Kolstad, 1979), (Lacasse and Berre, 1988)	$\varepsilon_{v0}$	<1%	>10%
1996	Specimen Quality Designation (SQD) (Terzaghi et al., 1996)	$\varepsilon_{v0}$	<1%	>8%
1997	Change in void ratio ( $\Delta e/e_0$ ) (Lunne et al., 1997), which depends on the overconsolidation ratio (OCR)	$\Delta e/e_0$	<0.04(OCR 1-2) <0.03(OCR 2-4)	>0.14 OCR 1-2) >0.10(OCR 2-4)
2013	Oedometer stiffness ratio (Karlsrud and Hernandez-Martinez, 2013)	$M_0/M_L$	>2.0	<1.0
<b>Uniaxial compression tests:</b>				
1979	Strain at failure ( $\varepsilon_{vf}$ ) in an unconsolidated and undrained (UU) test on soft clay (Andresen and Kolstad, 1979)	$\varepsilon_{vf}$ (UU)	3-5%	10%
1980	Unconsolidated and undrained shear strength, $s_u$ (UU), measured in the laboratory (Ladd et al., 1980), (Ladd and DeGroot, 2003)	$s_u$ (UU)	Relative assessment based on information about stress history and predicted strength using SHANSEP	
<b>Suction and shear wave velocity measurements:</b>				
1963-2002	Residual effective stress ( $\sigma_s$ ) and the effective stress for a “perfect sample” ( $\sigma_{ps}$ ) (Ladd and Lambe, 1963), (Hight et al., 1992), (Ladd and DeGroot, 2003)	$\sigma_s/\sigma_{ps}$	$\approx 0.25-0.50$ (OCR>1.5) $\approx 0.05-0.25$ (OCR<1.5)	
1996-2000	Soil suction ( $u_r$ ) (Tanaka et al., 1996), (Tanaka, 2000)	$u_r/\sigma_{v0}$	$\approx 1/5$ to $1/6$	
2007	Shear wave velocity ( $V$ ) (Landon et al., 2007), $V_{vh}$ is measured in the field and $V_{SCPTU}$ is from SCPTU.	$V_{vh}/V_{SCPTU}$	$\geq 0.60$	<0.35
2010	Combination of normalized shear wave velocity ( $L_{vs}$ ) and normalized soil suction ( $L_u$ ) (Donohue and Long, 2010)	$L_{vs}$ $L_u$	$L_{vs} < 0.65$ $L_u < 0.4$	$L_{vs} > 0.8$ $L_u > 0.6$
1985-2014	Radiography (Ladd and DeGroot, 2003)	Visual identification of sample disturbance.		

Segundo Germaine & Germaine (2009), a utilização da radiografia permite identificar camadas com materiais diferentes, rachaduras e zonas amolgadas na amostra. Desta forma, a radiografia possibilita a identificação e seleção das melhores regiões do tubo de amostragem para a extração de corpos de prova para a realização de ensaios.

Segundo Hight (2000), o amolgamento causa uma redução na velocidade de onda sísmica em argilas. Assim, a qualidade de amostras de argila mole pode ser avaliada comparando-se a velocidade da onda sísmica medida no campo com a velocidade da onda sísmica medida no corpo de prova no laboratório. No laboratório, a velocidade de onda sísmica pode ser medida pela técnica de “*Bender elements*”, enquanto que, no campo, a medição pode ser realizada com o uso do cone sísmico (Landon et al., 2007).

Lunne et al. (1997) apresentaram um critério para avaliar a qualidade de corpos de prova com base na relação  $\Delta e/e_0$  no trecho de recompressão da curva compressão edométrica ( $e \times \sigma'_v$ ), onde  $\Delta e$  é a diferença entre o índice de vazios

inicial do corpo de prova ( $e_0$ ) e o índice de vazios associado à tensão vertical efetiva no campo ( $e_{v0}$ ). A Tabela 2.2 apresenta a classificação proposta por Lunne et al. (1997).

Tabela 2.2 – Critério de avaliação da qualidade de amostras (adaptado de Lunne et al., 1997).

OCR	$\Delta e/e_0$			
	Excelente a Muito Boa	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

Coutinho et al. (1998) sugeriram uma adaptação do critério de Lunne et al. (1997) para as argilas moles de Recife-PE, pois consideraram, com base em experiências locais, que a proposta de Lunne et al. (1997) era muito rigorosa para as argilas brasileiras, de plasticidade muito maior do que as argilas do hemisfério norte. Essa proposta foi posteriormente aprimorada por Coutinho (2007), que apresentou os critérios de avaliação de qualidade conforme mostrado na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Classificação da qualidade de amostras (Coutinho, 2007).

OCR	$\Delta e/e_0$			
	Excelente a Muito Boa	Boa a Regular	Pobre	Muito Pobre
1 – 2,5	< 0,05	0,05 – 0,08	0,08 – 0,14	> 0,14

Andrade (2009) sugeriu uma modificação da classificação apresentada por Coutinho (2007), pois, em algumas situações, o corpo de prova pode apresentar um valor de  $\Delta e/e_0$  exatamente igual ao limite inferior de uma classe, que, por sua vez, coincide com o limite superior da classe subsequente, gerando, assim, uma dúvida na escolha da classe a ser atribuída à qualidade do corpo de prova. A Tabela 2.4 apresenta a classificação de Coutinho (2007) modificada por Andrade (2009). De acordo com a classificação da Tabela 2.4, se o valor de  $\Delta e/e_0$  for exatamente igual ao valor fronteiro entre duas classes vizinhas, a classificação a ser atribuída à qualidade do corpo de prova é o adjetivo comum nas duas classes. Por exemplo, se  $\Delta e/e_0 = 0,065$ , que é o valor fronteiro das classes

“Muito Boa a Boa” e “Boa a Regular”, a classificação atribuída à qualidade do corpo de prova é simplesmente “Boa”.

Tabela 2.4 – Tabela de avaliação da qualidade de corpos de prova de ensaios de adensamento edométrico (Andrade, 2009).

OCR	$\Delta e/e_0$					
	Excelente a Muito Boa	Muito Boa a Boa	Boa a Regular	Regular a Pobre	Pobre a Muito Pobre	Muito Pobre
1 – 2,5	< 0,05	0,05-0,065	0,065-0,08	0,08-0,11	0,11-0,14	> 0,14

### **3.**

## **Materiais e Métodos**

### **3.1.**

#### **Considerações Iniciais**

O objetivo do presente capítulo é apresentar e descrever as metodologias adotadas nos ensaios realizados neste trabalho.

### **3.2.**

#### **Descrição do depósito de argila do campo experimental Sarapuí II**

O campo experimental Sarapuí II, utilizado pelo Laboratório de Ensaio de Campo e Instrumentação Professor Marcio Miranda Soares, da COPPE/UFRJ, pertence à área da Estação de Rádio da Marinha, no município de Duque de Caxias, no estado do Rio de Janeiro. A região encontra-se na margem esquerda do rio Sarapuí, próximo à Rodovia Washington Luiz (BR-040) (coordenadas aproximadas 22°44'27"S e 43°16'49"W). A Figura 3.1 e a Figura 3.2 mostram a localização do campo experimental Sarapuí II.

O nome Sarapuí II foi concebido com o objetivo de diferenciar o atual campo experimental do campo experimental Sarapuí I, mais antigo, localizado a apenas 1,5 km de distância, conforme mostra a Figura 3.1.

Diversos trabalhos, os quais estão citados em Jannuzzi (2015), foram realizados pelos grupos de geotecnia da COPPE/UFRJ e da PUC-Rio no campo experimental Sarapuí I entre a década de 1970 e o início da década 2000, quando o campo experimental foi desativado por questões de segurança. Desde então, as pesquisas passaram a ser realizadas no campo experimental Sarapuí II (Alves, 2004; Francisco, 2004; Alves et al., 2004).

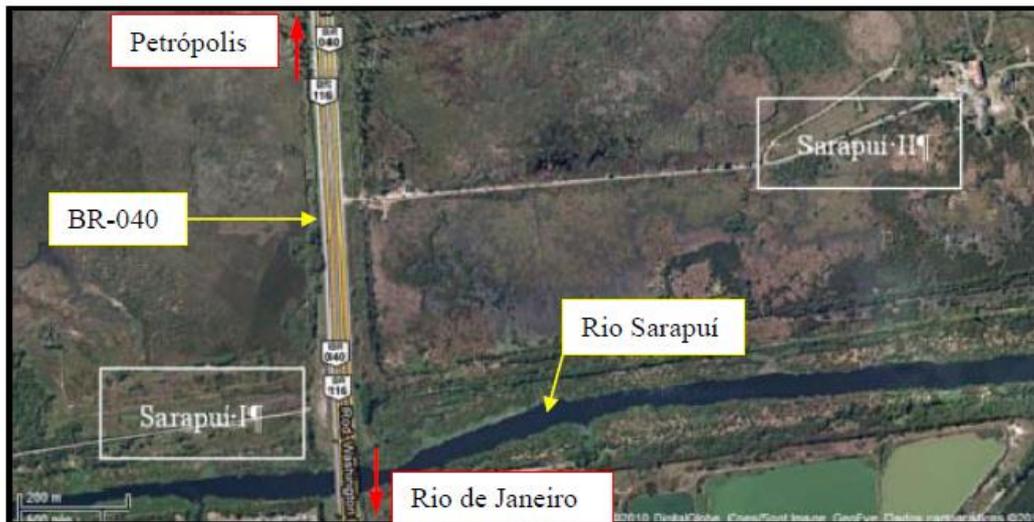


Figura 3.1 – Fotografia aérea com a localização do campo experimental Sarapuí II na Estação Rádio da Marinha (base –Google) (Jannuzzi, 2009 modificado por Aguiar, 2014).

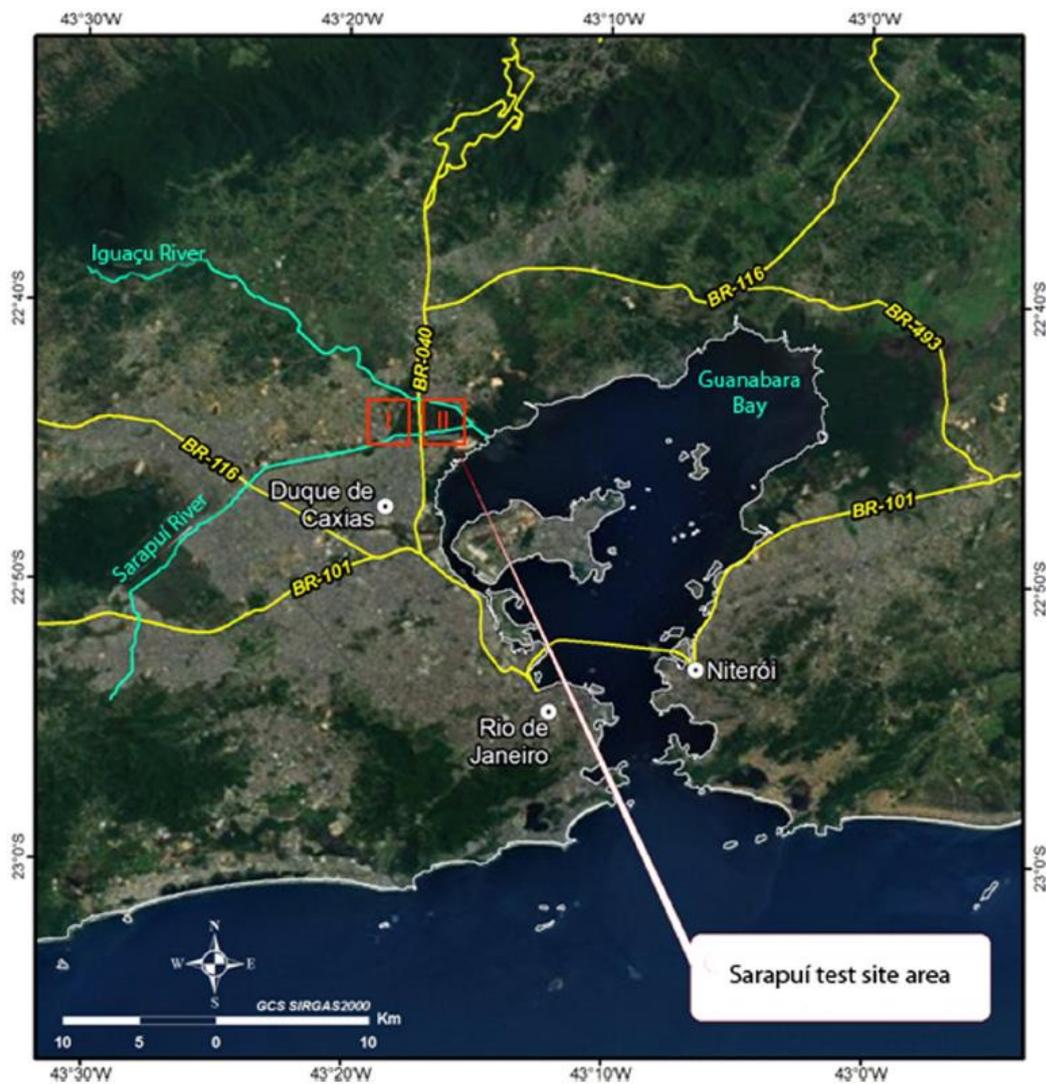


Figura 3.2 – Campo experimental Sarapuí II (Jannuzzi et al., 2015).

Danziger et al. (2019) investigaram a idade da argila orgânica muito mole do Sarapuí II por meio de datação por radiocarbono, realizada em 15 amostras retiradas ao longo do perfil do depósito de argila. Os resultados apresentados pelos referidos autores indicam que a formação desse depósito ocorreu entre 8590 e 2300 anos atrás. A taxa de deposição média da argila é igual a 0,9 mm/ano.

Jannuzzi et al. (2015) realizaram um extenso trabalho de caracterização do depósito de argila mole do Sarapuí II. Análises mineralógicas efetuadas com difratômetro de raio-X apontaram que, na maior parte do perfil, o depósito é constituído predominantemente por caulina, com uma proporção de esmectita um pouco inferior e uma presença menor de illita.

A Figura 3.3 mostra os perfis de composição granulométrica, teor de matéria orgânica, teores de sais solúveis (total) e de NaCl e composição mineralógica ao longo da profundidade do depósito de argila mole do Sarapuí II auferidos por Jannuzzi et al. (2015).

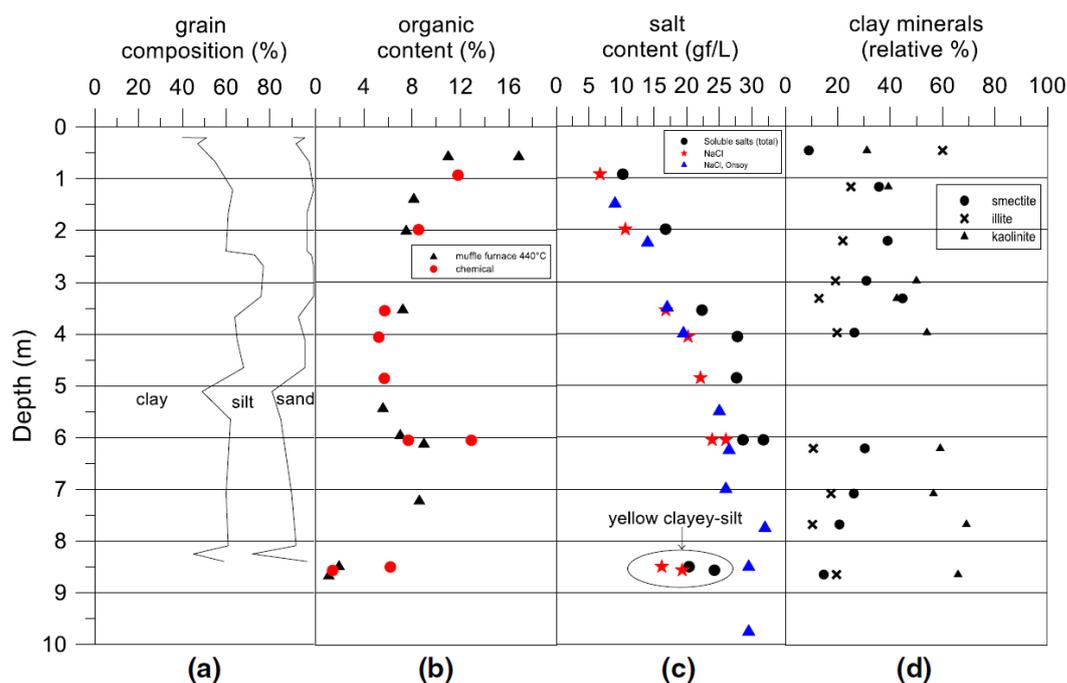


Figura 3.3 – Perfis de (a) composição granulométrica; (b) teor de matéria orgânica; (c) teores de sais solúveis e de NaCl; (d) composição mineralógica ao longo da profundidade (Jannuzzi et al., 2015).

A Figura 3.4 mostra os perfis de limites de liquidez, limite de plasticidade e teor de umidade natural, densidade relativa dos grãos, peso específico natural, índice de vazios natural e atividade da argila ao longo da profundidade do depósito de argila mole do Sarapuí II também obtidos por Jannuzzi et al. (2015).

Maiores detalhes acerca da composição granulométrica, mineralogia, índices físicos e parâmetros de resistência e compressibilidade da argila do Sarapuí II são apresentados por Jannuzzi (2009), Jannuzzi (2013), Aguiar (2014) e Jannuzzi et al. (2015).

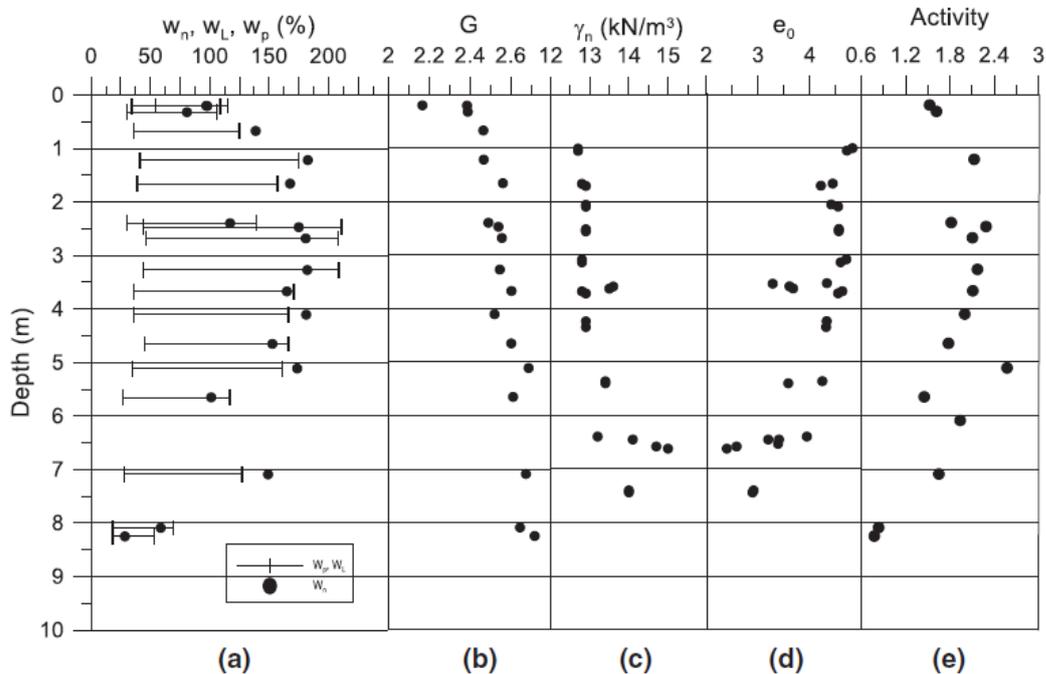


Figura 3.4 – Perfis de (a) limite de liquidez, limite de plasticidade e teor de umidade natural; (b) densidade relativa dos grãos; (c) Peso específico natural do solo; (d) índice de vazios natural; (e) atividade ao longo da profundidade (Jannuzzi et al., 2015).

### 3.3.

#### Procedimentos de amostragem

A seguir, são descritos os procedimentos adotados para a retirada das amostras intactas de argila do depósito do Sarapuí II utilizadas nesta pesquisa.

##### 3.3.1.

#### Campanha de amostragem no Sarapuí II

Para esta pesquisa, foram coletadas duas amostras da Argila do Sarapuí II com amostradores tubulares Geonor/NGI 76 mm entre as profundidades de 3,50 m e 4,30 m, em furos próximos entre si. O amostrador possui comprimento útil de 800 mm e diâmetro interno de 76,2 mm sem folga interna, dispondo de um pistão estacionário com ponta cônica para a sua cravação, não sendo necessária, portanto, a execução de pré-furo. No item 3.2.2, adiante, o

amostrador é descrito em maiores detalhes. Um dos tubos amostradores teve a sua superfície interna revestida com etileno-propileno fluorado (FEP), a fim de reduzir a tensão cisalhante entre o amostrador e a amostra durante a manobra de cravação do tubo no solo. Maiores detalhes sobre o revestimento do amostrador são apresentados no item 3.3.3, adiante.

A amostra coletada com o tubo de amostragem revestido com o FEP é identificada neste trabalho como NGI-RP (RP: revestido com polímero), enquanto a amostra coletada com o tubo não revestido é designada como NGI-NR (NR: não revestido).

A amostra NGI-RP foi coletada no dia 14 de janeiro de 2020, ao passo que extração da amostra NGI-NR ocorreu no dia 5 de maio de 2021. O longo período compreendido entre as retiradas das duas amostras foi devido à interrupção dos trabalhos de campo em decorrência da pandemia de Covid-19.

As duas amostras foram retiradas de dois furos próximos, com cerca de 6,0 m de distância, seguindo os procedimentos descritos nos itens 3.3.5 e 3.3.6, adiante. A Figura 3.5 mostra as localizações dos dois furos de onde as duas amostras foram extraídas.

As amostras coletadas foram utilizadas para a realização de ensaios de caracterização e de adensamento edométrico de carga incremental, bem como para a investigação da eventual variação do teor de umidade ao longo do raio da amostra, conforme será detalhado em itens adiante.

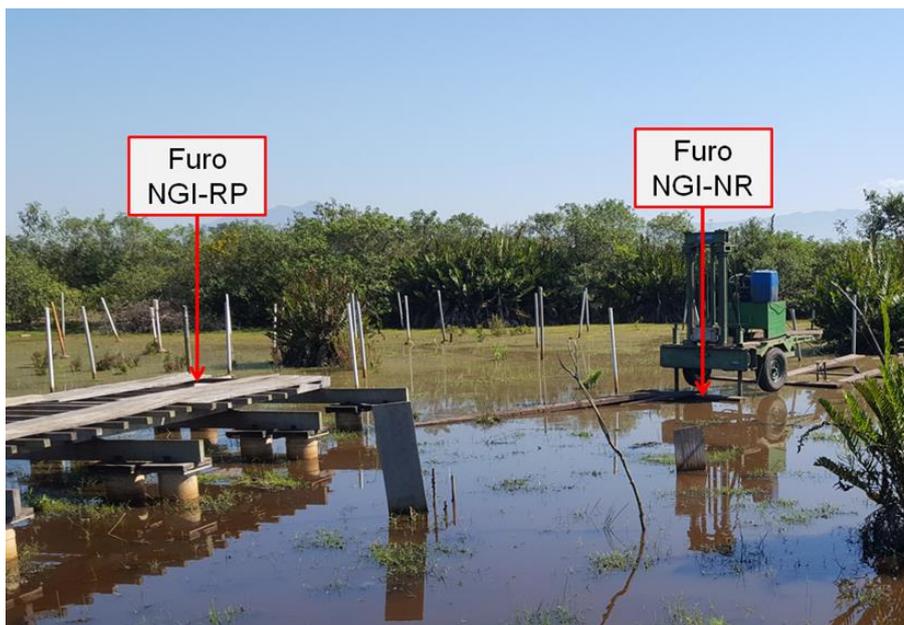


Figura 3.5 – Localização dos furos nos quais foram coletadas as amostras NGI-RP e NGI-NR.

### 3.3.2.

#### Descrição do amostrador NGI/Geonor de 76 mm

Conforme especificado no manual de instruções para a utilização do amostrador a pistão k-200 (Geonor, n.d.), o amostrador de parede fina NGI/Geonor de 76 mm com pistão estacionário foi desenvolvido para retirar amostras indeformadas de argilas, principalmente de argilas moles. O procedimento de cravação dispensa a execução de pré-furo, podendo ser realizado com velocidade controlada por meio de um equipamento que consiste de uma estrutura de reação, sobre a qual é montado um sistema de cravação. A cravação se dá por meio de uma bomba hidráulica acoplada a um motor elétrico.

A Figura 3.6 apresenta o amostrador a pistão NGI de 76 mm desmontado. Conforme ilustrado na figura, o amostrador é composto por um corpo metálico, no qual são conectados o tubo de amostragem, um conjunto de hastes internas e externas coaxiais, e o pistão estacionário com ponta cônica.



Figura 3.6 - Amostrador NGI 76 mm com pistão estacionário.

A Figura 3.7 mostra o tubo de amostragem, ao passo que os detalhes da geometria do tubo são apresentados na Figura 3.8. O tubo de amostragem consiste em um tubo de aço inoxidável, de parede fina com 2,00 mm de espessura, com 76 mm de diâmetro interno, sem folga interna, e com um bisel de ângulo de 9° em sua extremidade inferior. O tubo possui 880 mm de comprimento total, dos quais 800 mm destinam-se a comportar a amostra, enquanto os 80 mm restantes têm a função de guardar o pistão e conectar o tubo de amostragem ao corpo metálico do amostrador.

As hastes internas e externas são formadas por segmentos rosqueáveis de 1,0 m de comprimento, sendo que o deslocamento relativo entre elas ao longo do eixo vertical pode ser permitido ou não, de modo a possibilitar, primeiramente, a cravação de todo o conjunto no subsolo e, posteriormente, atingida a profundidade de amostragem, a cravação somente do cilindro amostrador.



Figura 3.7 – Tubo de amostragem com 76 mm de diâmetro interno e 880 mm de comprimento.

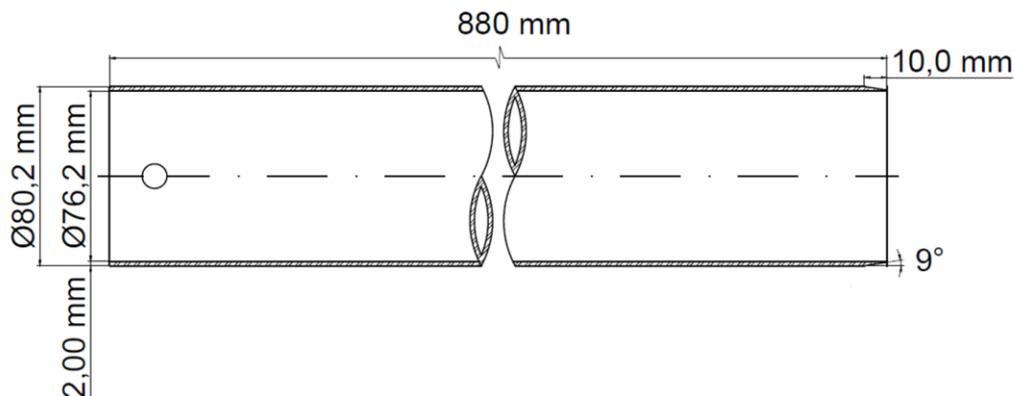


Figura 3.8 – Detalhes da geometria do tubo de amostragem.

### 3.3.3.

#### Aplicação do etileno-propileno fluorado (FEP) na parede interna do tubo de amostragem

Com o objetivo de reduzir a aderência e o atrito entre a parede interna do tubo de amostragem e a amostra durante a coleta da amostra no campo e durante a sua extração no laboratório, um dos tubos de amostragem teve a sua superfície interna revestida com FEP.

O revestimento aplicado consiste de uma dupla camada, *primer* e *top coat*, ambos a base de FEP, com espessura final de 35 a 45  $\mu\text{m}$ , sendo compatível com as normas da *Food and Drug Administration* (FDA). A aplicação foi realizada por meio de pintura *spray* e cura em estufa.

O FEP é um polímero com elevada resistência química, baixa aderência, baixo coeficiente de atrito, além de ser um material não-higroscópico. Possui a maioria das excelentes propriedades físicas, químicas e elétricas do politetrafluoretileno (PTFE), com a vantagem de ser processado em temperaturas mais baixas, ser menos permeável e ser mais barato que o PTFE. No entanto, o FEP possui coeficiente de atrito levemente superior ao do PTFE. Algumas das propriedades do revestimento aplicado na superfície interna do tubo de amostragem são apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Propriedades do etileno-propileno fluorado (FEP) (Sandvik, 2019).

Propriedade	Valor	Unidade
Densidade (massa específica)	2150	$\text{kg/m}^3$
Resistencia à tração	23	MPa
Temperatura de fusão	260	$^{\circ}\text{C}$
Temperatura máxima de operação	204	$^{\circ}\text{C}$
Coeficiente de atrito (ASTM D1894)	0,20	Estático
Absorção de água (ASTM D570)	< 0,01	%

O efeito da aplicação de diferentes revestimentos na redução da aderência e do atrito entre o solo e diferentes superfícies foi investigado por vários autores (Cooper & McCreery, 1961; Salokhe & Gee-Clough, 1988; Kushwaha et al., 1990; Salokhe et al., 1992; Tong et al., 2015; Mirza et al., 2016; Marani et al.,

2019). Dentre os revestimentos estudados pelos referidos autores, destacam-se: esmalte sintético; *Fusion-bonded epoxy* (FBE); PTFE; aço galvanizado; resina reforçada com fibra de vidro; nano nitreto de titânio (TiN); nano carbeto de tântalo (TaC); polietileno em tripla camada (3LPE); polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE).

O efeito da aplicação de revestimentos em tubos de amostragem foi estudado por Kallstenius (1963) e por Mathews (1959) *apud* USACE (2001). Alguns dos revestimentos empregados em amostradores são: laca; resina epóxi; PTFE e galvanização.

A escolha pelo FEP para a realização deste trabalho foi em razão das propriedades do material e da inexistência de literatura que avalie os efeitos da aplicação do FEP em tubos de amostragem. A Figura 3.9 mostra o revestimento aplicado no interior do tubo de amostragem utilizado nesta pesquisa.



Figura 3.9 – FEP aplicado no interior do tubo de amostragem utilizado nesta pesquisa.

#### **3.3.4.**

##### **Preparação do amostrador NGI 76 mm**

O amostrador deve ser montado antes da amostragem, conforme descrito no manual de instruções para a utilização do amostrador a pistão k-200 GEONOR (s.d) e por Mazzarone (2021). As operações de montagem do amostrador encontram-se ilustradas nas Figura 3.10 a Figura 3.16.

Após a sua montagem, o corpo do amostrador é encaixado na parte interna do tubo de amostragem. A operação é realizada passando a haste do pistão estacionário pelo interior do tubo de amostragem e pressionando suavemente a parte inferior do corpo do amostrador contra o topo do tubo de amostragem, até que este esteja completamente vedado. Em seguida, o corpo do amostrador é fixado ao tubo por meio de três parafusos. É recomendada a aplicação de vaselina na parede interna do tubo para facilitar o procedimento, conforme mostra a Figura 3.12.

Posteriormente, é realizado o encaixe do pistão estacionário à haste do pistão. Esta deve ser ajustada de modo que a beirada do pistão fique a aproximadamente 2 mm de distância da base do tubo de amostragem, conforme mostra a Figura 3.14.

A preparação do amostrador é concluída com a fixação do primeiro par de hastes, interna e externa, ao corpo do amostrador, conforme mostra a Figura 3.16..



Figura 3.10 – Extremidade superior do corpo do amostrador NGI 76 mm antes de sua montagem.



Figura 3.11 - Aplicação de vaselina no anel de vedação do corpo do amostrador NGI 76 mm.



Figura 3.12 - Aplicação de vaselina na face interna do tubo de amostragem, com o objetivo de facilitar o encaixe do tubo ao corpo do amostrado.



Figura 3.13 - Encaixe do pistão estacionário ao corpo do amostrador.



Figura 3.14 - Posição correta do pistão estacionário após a montagem completa do amostrador.



Figura 3.15 – Amostrador NGI 76 mm montado.



Figura 3.16 - Fixação do primeiro par de hastas, interna e externa, ao corpo do amostrador.

### 3.3.5.

#### Etapas da amostragem

A amostragem foi realizada conforme as etapas descritas abaixo e ilustradas nas Figura 3.17 a Figura 3.20.

(i) Posicionamento e nivelamento do equipamento de cravação no local de amostragem (Figura 3.17). O equipamento utilizado para a cravação do amostrador foi desenvolvido originalmente para a realização de ensaios de piezocone, e sua descrição é apresentada por Danziger (1990) e Bezerra (1996).

(ii) Instalação do equipamento amostrador no equipamento de cravação (Figura 3.18).

(iii) Marcação de uma cota de referência no equipamento de cravação, de acordo com um *benchmark* conhecido no terreno, de modo a garantir que a amostra fosse retirada na profundidade planejada.

(iv) Cálculo da quantidade de hastes necessárias para alcançar a profundidade de amostragem.

(v) Cravação do equipamento amostrador no subsolo com velocidade constante de 1 cm/s, realizando pausas para rosquear hastes externas e internas (Figura 3.19).

(vi) Atingida a profundidade de amostragem, desconexão do conjunto de hastes internas, conectado ao pistão estacionário, do resto do equipamento amostrador. Este procedimento era realizado girando as hastes internas, no sentido horário, num total de nove vezes.

(vii) Fixação da extremidade superior do conjunto de hastes internas, conectado ao pistão estacionário, a um suporte fixado ao equipamento de cravação, posicionado acima da extremidade superior do conjunto de hastes externas.

(viii) Realização da manobra de cravação de 80 cm do tubo amostrador, empurrando o conjunto de hastes externas no subsolo com uma velocidade de 1 cm/s. As etapas de manobra de cravação do tubo amostrador é ilustrada na Figura 3.20.

(ix) Rotação do tubo amostrador em torno de seu eixo, no sentido horário, dez vezes, com o objetivo de promover o cisalhamento entre a base da amostra

e o subsolo. As dez revoluções foram executadas com a aplicação de torque ao conjunto de hastes externas por meio de um par de chaves de grifo.

(x) Reconexão do conjunto de hastes internas, conectado ao pistão estacionário, ao equipamento amostrador.

(xi) Espera por 20 minutos para que a amostra ficasse aderida às paredes internas do tubo amostrador e, em seguida, retirada do equipamento amostrador contendo a amostra, puxando o conjunto de haste externas à superfície com uma velocidade constante de 1 cm/s.



Figura 3.17 – Posicionamento e nivelamento do equipamento de cravação.



Figura 3.18 – Equipamento amostrador instalado no equipamento de cravação antes de iniciar a cravação.



Figura 3.19 – Cravação do equipamento amostrador no subsolo com velocidade de 1cm/s.

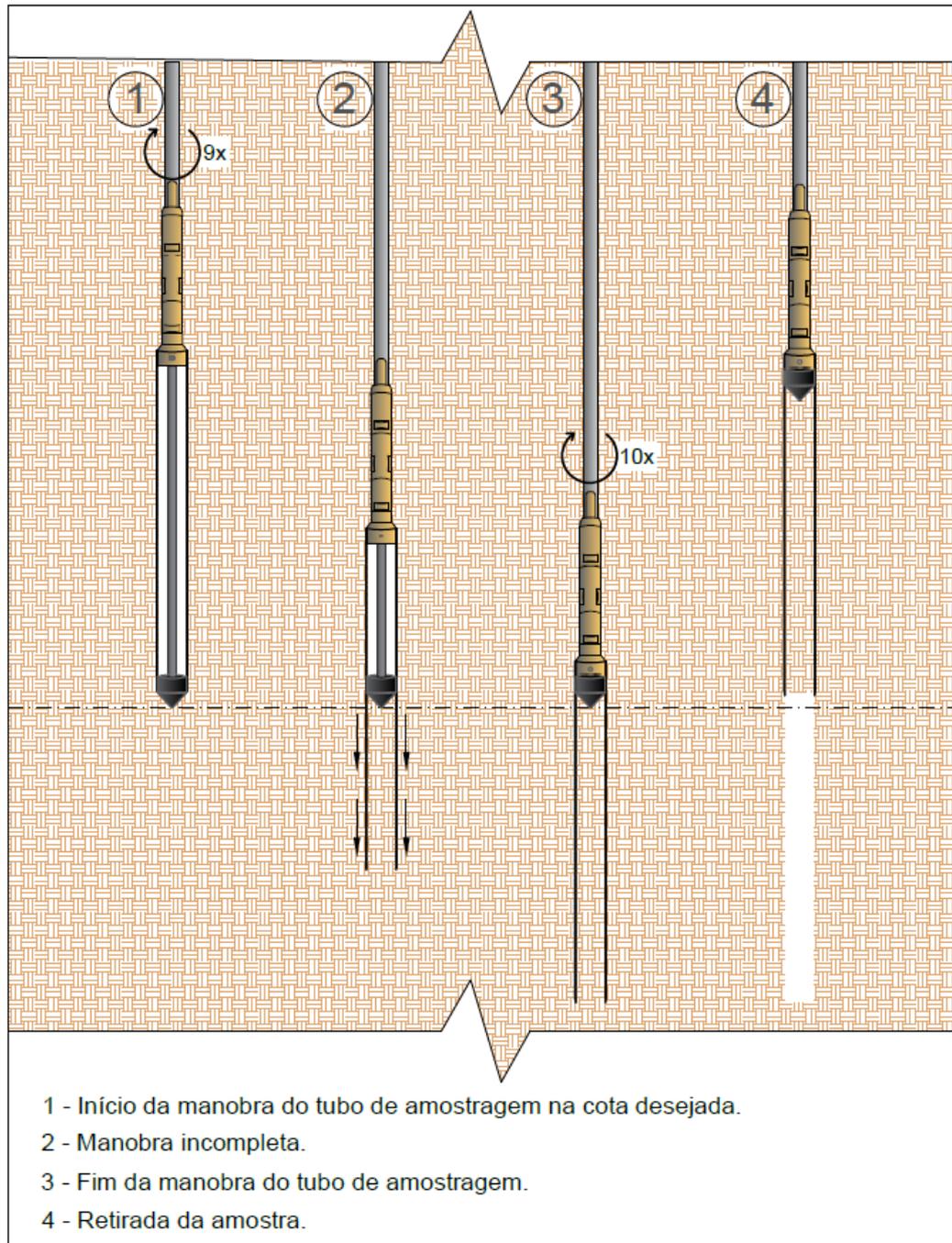


Figura 3.20 – Etapas de manobra de cravação do tubo amostrador NGI 76 mm, após atingida a profundidade de amostragem.

### 3.3.6.

#### Manipulação das amostras

A manipulação das amostras seguiu as recomendações contidas na norma ABNT NBR 9820:1997, bem como as sugestões apresentadas por Aguiar (2008).

Após a retirada do depósito do equipamento amostrador contendo a amostra, o tubo amostrador era limpo e lacrado, de modo a garantir que o teor de umidade natural da amostra fosse preservado. A limpeza da superfície externa do tubo amostrador era realizada com um bloco de espuma levemente umedecido ou com panos limpos (Figura 3.21). Em seguida, cortava-se o excesso de amostra presente na extremidade inferior (biselada) do tubo amostrador com um fio de aço (Figura 3.22). A extremidade biselada era então envelopada com uma camada de filme de PVC, prosseguida por uma folha de papel alumínio e, finalmente, por um tecido embebido em parafina (Figuras 3.23 a 3.26). O lacre da extremidade inferior (biselada) do tubo amostrador era concluído com a colocação de uma tampa de plástico (Figura 3.27).

Em seguida, o corpo do amostrador era desconectado cuidadosamente da extremidade superior do tubo amostrador para evitar perturbações na amostra. Finalmente, a extremidade superior do tubo amostrador, contendo o pistão estacionário, era lacrada conforme as etapas adotadas na extremidade inferior (biselada), com exceção da colocação da tampa de plástico.

A identificação, o transporte e o armazenamento das amostras foram realizados conforme as recomendações da norma ABNT (1997). As amostras foram transportadas do campo ao laboratório na posição vertical com a extremidade biselada voltada para baixo e envoltas por material macio e úmido, como plástico bolha com panos umedecidos. Ao chegar ao laboratório, as amostras foram armazenadas numa câmara úmida, com temperatura e umidade controladas, e protegidas de possíveis choques mecânicos (Figura 3.28).



Figura 3.21 – Limpeza da superfície externa do tubo amostrador contendo a amostra.



Figura 3.22 – Remoção com fio de aço do excesso de amostra presente na extremidade inferior (biselada) do tubo amostrador.



Figura 3.23 – Extremidade inferior (biselada) do tubo amostrador sendo revestida com filme de PVC e papel alumínio.



Figura 3.24 – Aplicação de tecido sobre a camada de papel alumínio na extremidade inferior (biselada) do tubo amostrador.



Figura 3.25 – Execução do lacre da extremidade inferior (biselada) do tubo amostrador.



Figura 3.26 – Aplicação de parafina sobre o tecido na extremidade inferior (biselada) do tubo amostrador.



Figura 3.27 – Lacre da extremidade inferior (biselada) do tubo amostrador concluído com a colocação da tampa de plástico.



Figura 3.28 – Amostra armazenada na posição vertical com a extremidade biselada voltada para baixo em câmara úmida com temperatura e umidade controladas.

### 3.3.7.

#### **Moldagem dos corpos de prova**

Nas duas amostras intactas extraídas, foram moldados treze corpos de prova com cerca de 50 mm e 70 mm de diâmetro, os quais foram submetidos a ensaios de adensamento edométrico de carga incremental. Mais dois corpos de prova com cerca de 70 mm de diâmetro foram moldados também para ensaios de adensamento edométrico, porém não foram utilizados. Além destes, foram moldados outros três corpos de prova, utilizados para a determinação do teor de umidade ao longo do raio da amostra. O solo restante das moldagens dos corpos de prova, assim como parte do topo e alguns segmentos intermediários das amostras foram utilizados para a realização de ensaios de caracterização.

As amostras foram mantidas dentro de uma câmara úmida, com temperatura e umidade controladas, até o momento da moldagem dos corpos de prova.

Os corpos de prova foram identificados conforme a amostra na qual foram moldados e, alguns, também conforme o tipo de ensaio ao qual foram submetidos. A Tabela 3.2 mostra a identificação dos corpos de prova e os respectivos ensaios realizados. Os corpos de prova (CP) nomeados como CPRP

foram moldados da amostra extraída com o amostrador NGI 76 mm cujo tubo teve a superfície interna revestida com o FEP, nomeada de amostra NGI-RP. Os corpos de prova (CP) nomeados como CPNR foram moldados da amostra extraída com o amostrador NGI 76 mm cujo tubo não foi revestido, nomeada de NGI-NR. Os corpos de prova nomeados como CPRP-X ou CPNR-X, onde X é uma única letra, foram submetidos a ensaios de adensamento edométrico convencionais com o corpo de prova na condição intacta. Já os corpos de prova nomeados como CPNR-RM-Y, onde Y é um número, foram submetidos a ensaios de adensamento edométrico convencionais com o corpo de prova na condição remoldada (RM). Finalmente, os corpos de prova nomeados como CPRP-WN-Y ou CPNR-WN-Y, onde Y é um número, foram submetidos a determinação do teor de umidade ao longo do raio.

Os corpos de prova CPNR-B, CPNR-C, CPNR-D e CPNR-E foram submetidos a um estágio de longa duração no ensaio de adensamento edométrico, conforme detalhado adiante.

Os corpos de prova CPRP-E e CPNR-A foram descartados devido à presença excessiva de conchas e acidentes durante a montagem dos ensaios.

Tabela 3.2 – Identificação dos corpos de prova.

Corpo de Prova (CP)	Amostra	Diâmetro do CP (mm)	Profundidade do CP (m)	Ensaio
CPRP-A	NGI-RP	71,09	3,65 - 3,70	Adensamento edométrico
CPRP-B	NGI-RP	50,36	3,70 - 3,75	Adensamento edométrico
CPRP-C	NGI-RP	71,16	3,75 - 3,80	Adensamento edométrico
CPRP-D	NGI-RP	50,32	3,85 - 3,90	Adensamento edométrico
CPRP-WN1	NGI-RP	Variável	3,90 - 3,95	Umidade ao longo do raio da amostra
CPRP-E	NGI-RP	71,03	3,95 - 4,00	Descartado
CPNR-A	NGI-NR	71,09	3,70 - 3,75	Descartado
CPNR-B	NGI-NR	50,36	3,70 - 3,75	Adensamento edométrico
CPNR-WN1	NGI-NR	Variável	3,75 - 3,80	Umidade ao longo do raio da amostra

CPNR-C	NGI-NR	71,16	3,83 - 3,88	Adensamento edométrico
CPNR-WN2	NGI-NR	Variável	3,88 - 3,93	Umidade ao longo do raio da amostra
CPNR-D	NGI-NR	50,32	3,93 - 3,98	Adensamento edométrico
CPNR-E	NGI-NR	50,34	3,98 - 4,04	Adensamento edométrico
CPNR-F	NGI-NR	71,03	4,04 - 4,09	Adensamento edométrico
CPNR-G	NGI-NR	70,97	4,09 - 4,14	Adensamento edométrico
CPNR-H	NGI-NR	50,35	4,14 - 4,19	Adensamento edométrico
CPNR-RM1	NGI-NR	50,32	3,50 - 3,63	Adensamento edométrico
CPNR-RM2	NGI-NR	71,20	3,50 - 3,63	Adensamento edométrico

A Figura 3.29 e a Figura 3.30 mostram a localização dos corpos de prova esculpidos nas duas amostras intactas extraídas.

Os corpos de prova foram moldados no Laboratório de Ensaaios de Campo e Instrumentação (LECI) Professor Marcio Miranda Soares, da COPPE/UFRJ, e transportados, no mesmo dia, para o Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente (LGMA), da PUC-Rio, onde os ensaios de caracterização e de adensamento edométrico foram realizados. Tal procedimento foi adotado porque a extração de segmentos de amostra do interior do tubo amostrador para a moldagem dos corpos de prova se deu por meio de um extrator de amostras horizontal motorizado de propriedade do LECI (Figura 3.31). A distância entre os laboratórios é de 17 km e a duração do trajeto de carro é de aproximadamente 30 minutos.

A amostra NGI-RP foi coletada no dia 14 de janeiro de 2020 e a moldagem dos corpos de prova foi realizada no dia 09 de março de 2020, isto é, 55 dias após a coleta da amostra, período no qual a amostra permaneceu na câmara úmida do LECI, com temperatura e umidade controladas.

A amostra NGI-NR foi coletada no dia 5 de maio de 2021, ao passo que a moldagem dos corpos de prova foi realizada no dia 6 de maio de 2021, isto é, um dia após a coleta da amostra, período no qual a amostra permaneceu

armazenada na câmara úmida do LECI, com temperatura e umidade controladas.

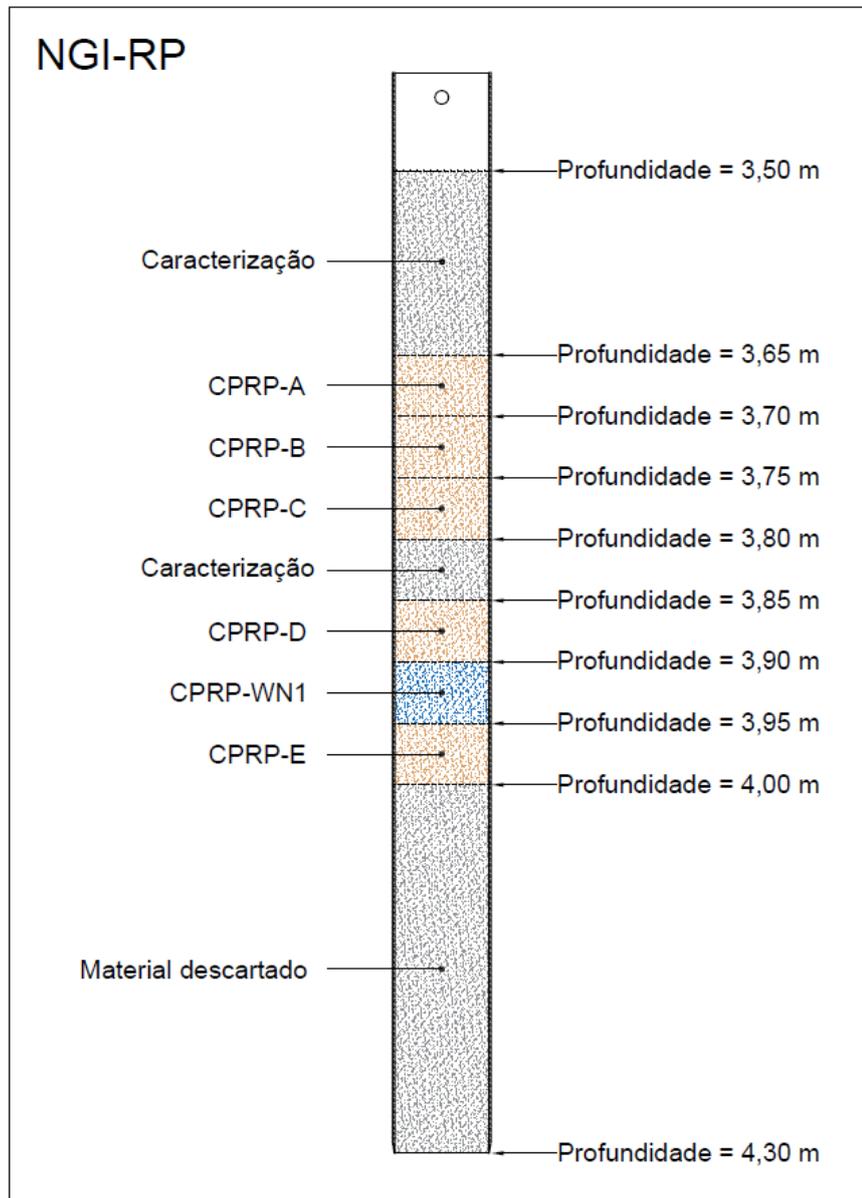


Figura 3.29 – Localização dos corpos de prova esculpido na amostra NGI-RP.

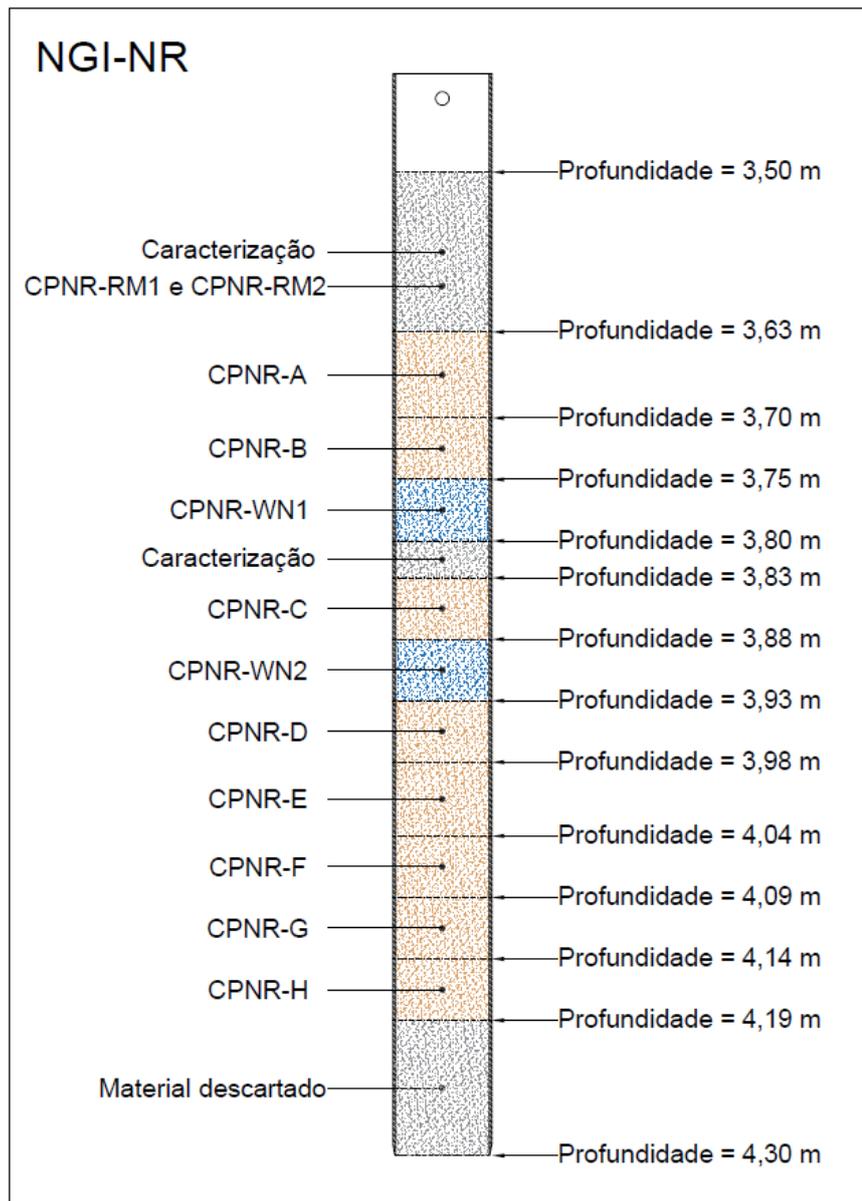


Figura 3.30 – Localização dos corpos de prova na amostra NGI-NR.

As operações de moldagem dos corpos de prova e montagem dos ensaios de adensamento edométrico de carga incremental são ilustradas nas Figura 3.31 a Figura 3.44. As etapas adotadas nessas operações são descritas a seguir:

(i) Posicionamento do tubo de amostragem no extrator de amostras horizontal motorizado conforme indicado na Figura 3.31 e descrito por Mazzarone (2021). O tubo de amostragem era posicionado de modo que o sentido das tensões cisalhantes, geradas entre a superfície lateral da amostra e a parede interna do tubo, durante a extração dos segmentos de amostra, fosse o mesmo que o sentido das tensões cisalhantes provocadas durante a cravação do tubo de amostragem no campo. Para tanto, no início da extração, o pistão do

extrator de amostras era posicionado próximo à extremidade inferior (biselada) do tubo de amostragem, enquanto os segmentos eram retirados na extremidade superior do tubo.

(ii) A operação de extração dos segmentos de amostra para moldagem dos corpos de prova era iniciada com a retirada do pistão estacionário do amostrador do interior do tubo de amostragem, o qual se encontrava próximo à extremidade superior do tubo (Figuras 3.32 e 3.33). Era fundamental que o pistão do amostrador fosse retirado sem que a amostra fosse submetida a esforços de compressão. Para tanto, a base do pistão estacionário do amostrador era fixado a um suporte metálico, o qual se movimenta no mesmo sentido e simultaneamente ao pistão do extrator de amostras. Desta forma, conforme o pistão do extrator de amostras empurrava a base da amostra da extremidade inferior para a extremidade superior do tubo, o pistão estacionário era puxado pelo suporte metálico para fora do tubo com a mesma velocidade de deslocamento. Quando o pistão estacionário do amostrador estava totalmente fora do tubo de amostragem, o suporte metálico do extrator de amostras que puxara o pistão estacionário era desconectado e, em seguida, era dado início à retirada dos segmentos de amostras para a moldagem dos corpos de prova.

(iii) Os segmentos de amostra eram retirados um a um do interior do tubo de amostragem, com aproximadamente 5 cm de comprimento. Conforme a amostra era extraída, inspecionava-se a integridade do segmento. Quando era observada a presença de conchas, galhos ou de materiais com características muito diferentes da amostra como um todo, o segmento era destinado aos ensaios de caracterização ou descartado. Por outro lado, quando observado que o segmento de amostra possuía boas condições para moldagem e realização dos ensaios de adensamento edométrico, este era cortado rente à extremidade superior do tubo de amostragem com um fio de aço (Figuras 3.34 e 3.35).

(iv) O segmento de amostra era então transportado cuidadosamente, em um papel celofane, para o aparato de moldagem dos corpos de prova. Este aparato consistia de um suporte com dois discos de aço (inferior e superior), que eram posicionados junto à base e o topo do segmento de amostra. Tais discos permitiam que o segmento de amostra pudesse ser girado em torno do seu eixo longitudinal durante a moldagem do corpo de prova. Além disso, o disco superior possuía regulagem de altura e era utilizado também para auxiliar a cravação do anel edométrico no segmento de amostra. O segmento de amostra era

posicionado sobre um papel celofane sobre o disco inferior do aparato conforme a posição da amostra no campo.

(v) O anel edométrico tinha a sua parede interna untada com graxa de silicone (Figura 3.36) e, em seguida, era posicionado sobre o segmento de amostra. Um colarinho era então posicionado sobre o anel edométrico (Figura 3.37).

(vi) Por intermédio do disco superior do aparato, o anel edométrico era cravado no segmento de amostra de cima para baixo (Figura 3.38), mantendo, desta forma, as tensões cisalhantes geradas na superfície lateral do corpo de prova com o mesmo sentido das tensões cisalhantes geradas na superfície lateral da amostra quando da cravação do tubo amostrador no campo e quando da extração do segmento de amostra do tubo amostrador. Simultaneamente, removia-se cuidadosamente a amostra que excedia o perímetro do anel edométrico com fio de violão e uma espátula dupla com lâminas afiadas (Figura 3.39).

(vii) Atingida a profundidade de cravação desejada, o segmento de amostra com o anel edométrico cravado era retirado do aparato de moldagem. Em seguida, debastava-se o excesso de amostra junto às extremidades superior e inferior do anel edométrico com corda de violão. O material removido mais próximo das superfícies inferior e superior do corpo de prova era utilizado para determinação do teor de umidade natural do mesmo.

(viii) As superfícies inferior e superior do corpo de prova eram então regularizadas com uma espátula de aço (Figura 3.40) e a superfície externa do anel edométrico era limpa com um papel toalha levemente umedecido e depois secada com um papel toalha seco.

(ix) O peso do corpo de prova mais anel edométrico era determinado em uma balança digital com resolução de 0,01 gf.

(x) Um disco de papel filtro previamente inundado em água destilada era colocado junto a cada uma das extremidades do corpo de prova, inferior e superior. Em seguida, o corpo de prova era embrulhado com filme de PVC.

(xi) Cada corpo de prova embrulhado era colocado entre duas pequenas placas quadradas de acrílico com 4 mm de espessura cada (Figura 3.41) e, imediatamente, guardado entre duas grandes placas retangulares de acrílico com 2 cm de espessura cada, apoiadas no fundo de uma caixa de isopor (Figura

3.42). A caixa de isopor foi preparada exclusivamente para o transporte dos corpos de prova do LECI (COPPE/UFRJ) até o LGMA (PUC-Rio). Um pano umedecido era colocado ao longo do perímetro interno da base da caixa de isopor e pesos leves eram colocados sobre a placa retangular de acrílico superior posicionada sobre os corpos de prova. O transporte dos corpos de prova do LECI ao LGMA era feito de carro com extremo cuidado.

(xii) Na chegada ao LGMA, na parte da noite, os corpos de prova eram mantidos dentro da caixa de isopor colocada dentro da câmara úmida do laboratório, com temperatura e umidade controladas, até serem montados nas células de adensamento e posicionados nas presas tipo Bishop, na manhã seguinte (Figuras 3.43 a 3.45). Conforme detalhado adiante, três corpos de prova permaneceram nesta condição dentro da câmara úmida por 26 dias até serem montados nas células de adensamento e ensaiados.

Os papéis filtro inundados em água destilada e colocados junto às extremidades dos corpos de prova tinham o objetivo de evitar a perda de material durante a retirada do filme de PVC no momento da montagem dos ensaios. Os corpos de prova foram colocados nas células de adensamento com esses papéis filtro.

As placas de acrílico foram empregadas para impedir a expansão dos corpos e prova no período compreendido entre a moldagem e a montagem dos ensaios.



Figura 3.31 – Tubo de amostragem posicionado no extrator de amostras horizontal motorizado.



Figura 3.32 – Operação de retirada do pistão estacionário do amostrador do interior do tubo de amostragem



Figura 3.33 – Detalhe da retirada do pistão estacionário do amostrador do interior do tubo de amostragem.



Figura 3.34 – Extração de um segmento de amostra do interior do tubo de amostragem.



Figura 3.35 – Corte de um segmento de amostra rente à extremidade superior do tubo de amostragem.



Figura 3.36 – Aplicação de graxa de silicone na parede interna do anel edométrico.

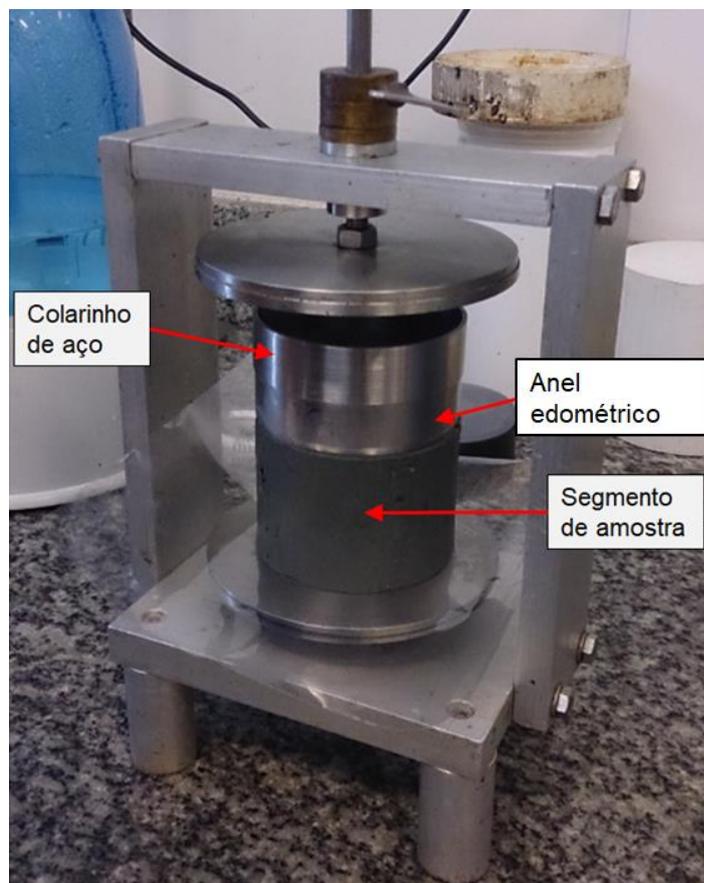


Figura 3.37 – Segmento de amostra posicionado no aparato de moldagem.



Figura 3.38 – Cravação do anel edométrico no segmento de amostra.



Figura 3.39 – Ferramentas utilizadas para a moldagem do corpo de prova.



Figura 3.40 – Corpo de prova com superfícies inferior e superior regularizadas.

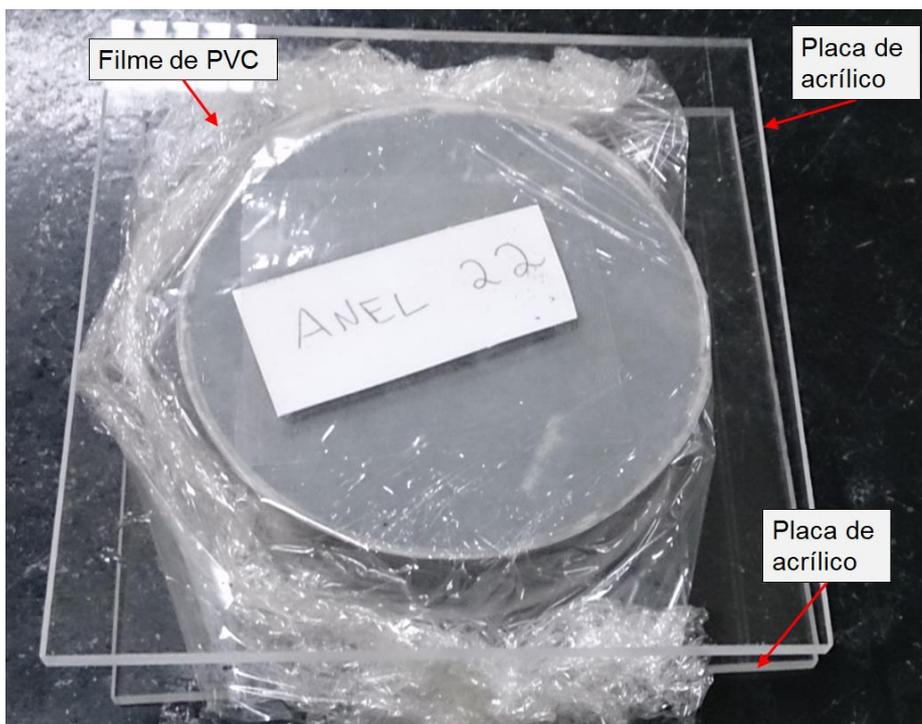


Figura 3.41 – Corpo de prova embalado e preparado para ser transportado.



Figura 3.42 – Corpos de prova embalados entre placas de acrílico no interior da caixa de isopor.

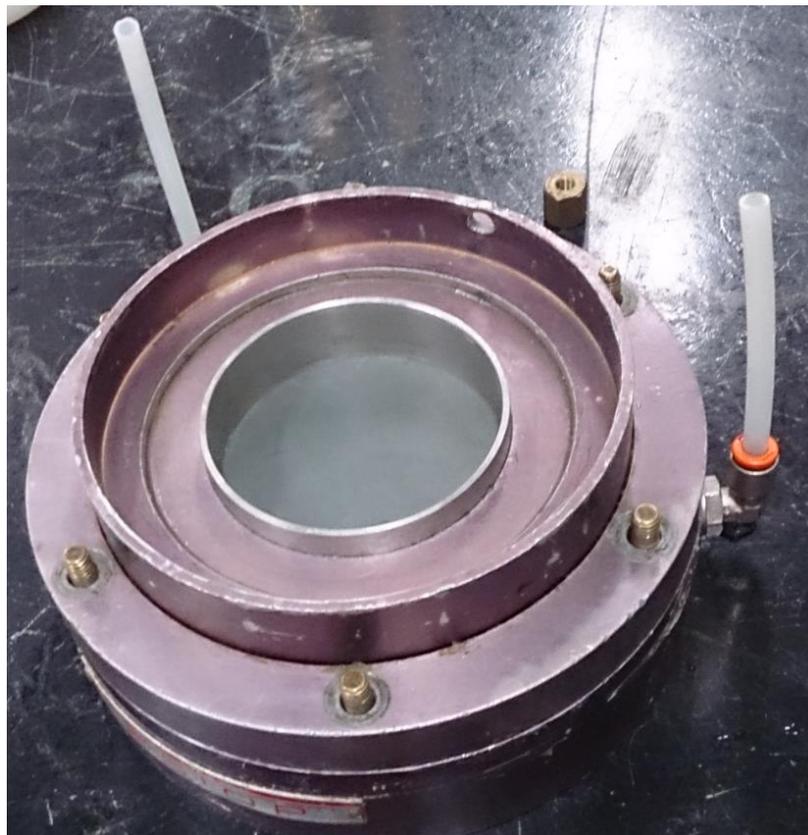


Figura 3.43 – Posicionamento do colarinho centralizador na célula de adensamento.



Figura 3.44 – Célula montada na prensa de adensamento tipo Bishop.

Os corpos de prova CPNR-RM1 e CPNR-RM2 foram moldados com solo completamente amolgado em laboratório. O procedimento de amolgamento consistiu em amassar a argila, contida dentro de um saco plástico, com as mãos por aproximadamente 5 minutos, conforme ilustrado na Figura 3.45. Feito isto, a moldagem desses corpos de prova foi realizada exatamente da mesma forma que os corpos de prova intactos, cujas etapas foram descritas acima.



Figura 3.45 – Amassamento da argila dentro de um saco plástico para posterior moldagem de um corpo de prova remoldado.

### 3.4.

#### Ensaio de caracterização

Foram realizados ensaios de caracterização na amostra NGI-RP e NGI-NR com o solo proveniente do topo e de segmentos intermediários das amostras, bem como com o solo restante das moldagens dos corpos de prova dos ensaios de adensamento edométrico. Os seguintes ensaios de caracterização foram realizados

- Análise granulométrica por peneiramento e sedimentação conforme a norma ABNT NBR 7181:2016 - “Solo - Análise granulométrica”;
- Teor de umidade natural ( $w_n$ ) conforme a norma ABNT NBR 6457:2016 “Amostras de Solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização”;
- Densidade relativa dos grãos ( $G_s$ ) conforme a norma ABNT NBR 6458:2016 – “Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água”;
- Limite de liquidez ( $w_L$ ) conforme a norma ABNT NBR 6459:2016 - “Solo – Determinação do Limite de Liquidez”;
- Limite de plasticidade ( $w_P$ ) conforme a norma ABNT NBR 7180:2016 - “Solo – Determinação do Limite de Plasticidade”.
- Teor de matéria orgânica conforme a norma ABNT NBR 13600:1996 - “Solo – Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°C”.

Os ensaios de análise granulométrica e de determinação do teor de matéria orgânica foram realizados apenas na amostra NGI-NR.

O peso específico natural ( $\gamma_n$ ), o grau de saturação ( $S_r$ ) e o índice de vazios inicial ( $e_0$ ) de cada corpo de prova foram calculados a partir do volume total ( $V_{tot}$ ), do peso total ( $P_{tot}$ ) e do teor de umidade natural ( $w_n$ ) do corpo de prova, bem como da densidade relativa dos grãos ( $G_s$ ).

### 3.5.

#### Ensaio de adensamento convencionais

Os ensaios de adensamento edométrico de carga incremental foram realizados no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente (LGMA) da PUC-Rio. Dentro do LGMA, foi implementada uma sala com controle de temperatura e acesso restrito exclusivamente para realização de parte dos ensaios de adensamento edométrico desta pesquisa. A sala foi equipada com quatro prensas do tipo Bishop com relação de braços de 1:10 e com dois aparelhos de ar-condicionado, os quais funcionavam em esquema de rodízio. A Figura 3.46 mostra a sala montada para a realização dos ensaios de adensamento edométrico desta pesquisa.



Figura 3.46 – Sala com temperatura controlada e acesso restrito, montada para os ensaios de adensamento edométrico.

Conforme será detalhado adiante, dos treze ensaios de adensamento edométrico realizados nesta pesquisa, oito ensaios foram realizados nesta sala implementada, sob temperatura de  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ . Os demais cinco ensaios foram realizados também no LGMA, em prensas do tipo Bishop exatamente iguais às instaladas na sala implementada, porém fora desta sala, sob temperatura de  $22 \pm 1^\circ\text{C}$ .

Após a montagem dos corpos de prova nas células de adensamento, aplicava-se a carga de assentamento de 2,5 kPa e, em seguida, as células de adensamento eram enchidas com água destilada. Em nenhum dos ensaios realizados constatou-se expansão do corpo de prova após o enchimento da célula de adensamento.

As deformações verticais dos corpos de prova eram medidas por meio de extensômetros analógicos com resolução de 0,01 mm, enquanto os tempos de leitura eram acompanhados com cronômetros digitais.

Os ensaios de adensamento edométrico foram executados em quatro diferentes baterias. Os ensaios são identificados pelos próprios nomes dos corpos de prova utilizados.

A primeira bateria de ensaios de adensamento edométrico, chamada de EDO-RP, envolveu quatro corpos de prova esculpidos na amostra NGI-RP, a saber: CPRP-A, CPRP-B, CPRP-C e CPRP-D. Destes ensaios, dois foram realizados em corpos de prova com cerca de 50 mm de diâmetro (CPRP-B e CPRP-D) e dois em corpos de prova com cerca de 70 mm de diâmetro (CPRP-A e CPRP-C). Os corpos de prova foram moldados no dia 09 de março de 2020 e os ensaios foram montados e iniciados no dia 10 de março de 2020. Estes ensaios foram executados na sala implementada, com a temperatura mantida em  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ .

Os quatro ensaios de adensamento edométrico foram executados simultaneamente, com estágios de carregamento com duração de 24 horas. Nos quatro ensaios foi aplicada a mesma sequência de carregamento, a saber: 2,5; 5,0; 10; 20; 40; 80; 160; 320 e 640 kPa. Os estágios de descarregamento final, de 640 kPa para 320 kPa e de 320 kPa para 160 kPa, duraram cerca de 12 horas cada. A Tabela 3.3 resume as informações dos ensaios de adensamento edométrico da bateria EDO-RP.

Tabela 3.3 – Informações dos ensaios de adensamento edométrico da bateria EDO-RP.

Ensaio/ Corpo de prova	Diâmetro (mm)	Profundidade (m)	Estágios de carregamento do ensaio edométrico, $\sigma_v$ (kPa)
CPRP-A	71,09	3,65 - 3,70	2,5; 5,0; 10; 20; 40; 80; 160; 320; 640; 320; 160.
CPRP-B	50,36	3,70 - 3,75	2,5; 5,0; 10; 20; 40; 80; 160; 320; 640; 320; 160.
CPRP-C	71,16	3,75 - 3,80	2,5; 5,0; 10; 20; 40; 80; 160; 320; 640; 320; 160.
CPRP-D	50,32	3,85 - 3,90	2,5; 5,0; 10; 20; 40; 80; 160; 320; 640; 320; 160.

A segunda bateria de ensaios de adensamento edométrico, chamada de EDO-NR(SEC), envolveu quatro corpos de prova esculpados na amostra NGI-NR, a saber: CPNR-B, CPNR-C, CPNR-D e CPNR-F. Destes ensaios, dois foram realizados em corpos de prova com aproximadamente 50 mm de diâmetro (CPNR-B e CPNR-D) e dois em corpos de prova com cerca de 70 mm de diâmetro (CPNR-C e CPNR-F). Os corpos de prova foram moldados no dia 06 de maio de 2021 e os ensaios foram montados e iniciados no dia 07 de maio de 2021. Estes ensaios foram executados na sala implementada, com a temperatura mantida em  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ .

Os quatro ensaios de adensamento edométrico foram executados simultaneamente e submetidos a mesma sequência de carregamento até 160 kPa, a saber: 2,5; 5,0; 10; 20; 40; 80 e 160 kPa, com duração de 24 horas cada. A partir de 160 kPa, os ensaios foram carregados para tensões verticais ( $\sigma_v$ ) diferentes, a saber: Ensaio CPNR-B: 240 kPa; Ensaio CPNR-C: 280 kPa; Ensaio CPNR-D: 320 kPa; Ensaio CPNR-F: 360 kPa, todos também com duração de 24 horas. Em seguida, todos os quatro ensaios foram descarregados para 160 kPa gerando as seguintes razões de sobreadensamento:

- a) Ensaio CPNR-B: OCR = 1,50, de 240 kPa para 160 kPa;
- b) Ensaio CPNR-C: OCR = 1,75, de 280 kPa para 160 kPa;
- c) Ensaio CPNR-D: OCR = 2,00, de 320 kPa para 160 kPa;
- d) Ensaio CPNR-F: OCR = 2,25, de 360 kPa para 160 kPa.

Os quatro ensaios permaneceram descarregados, sob  $\sigma_v = 160$  kPa, por 99.960 minutos (cerca de 70 dias) para monitoramento do eventual adensamento secundário que poderia vir a ocorrer após a expansão primária, daí o nome da bateria (SEC). Entretanto, depois de 60.885 minutos (cerca de 42 dias) do descarregamento, as células de adensamento foram esgotadas com uma seringa (Figura 3.47) até que o nível de água atingisse a face superior do *top cap*, tomando-se cuidado para que não ficasse abaixo do topo da pedra porosa do *top cap*. Em seguida, as células tiveram os seus níveis completados com uma solução de NaCl e água destilada com concentração de 30 g/l, com o objetivo de avaliar o efeito da concentração de sal na compressão secundária vinha ocorrendo.

Decorridos os 99.960 minutos (cerca de 70 dias) de monitoramento do estágio de longa duração, os quatro corpos de prova foram recarregados para as mesmas tensões verticais a partir das quais eles tinham sido descarregados,

com duração de 24 horas. Em seguida, todos os corpos de prova foram carregados para 640 kPa, também com duração de 24 horas. Finalmente, os quatro corpos de prova foram descarregados para 320 kPa e, em seguida, para 160 kPa, com cada estágio de descarregamento final durando cerca de 12 horas.



Figura 3.47 – Esgotamento da água da célula de adensamento.

A Tabela 3.1 resume as informações dos ensaios de adensamento edométrico da bateria EDO-NR(SEC).

Tabela 3.4 – Informações dos ensaios de adensamento edométrico da bateria EDO-NR(SEC).

Ensaio/ Corpo de prova	Diâmetro (m)	Profundidade (m)	Estágios de carregamento do ensaio edométrico, $\sigma_v$ (kPa)
CPNR-B	50,36	3,70 - 3,75	2,5; 5,0; 10; 20; 40; 80; 160; <b>240; 160</b> <b>(sec - OCR = 1,50); 240; 640; 320; 160.</b>
CPNR-C	71,16	3,83 - 3,88	2,5; 5,0; 10; 20; 40; 80; 160; <b>280; 160</b> <b>(sec - OCR = 1,75); 280; 640; 320; 160.</b>
CPNR-D	50,32	3,93 - 3,98	2,5; 5,0; 10; 20; 40; 80; 160; <b>320; 160</b> <b>(sec - OCR = 2,00); 320; 640; 320; 160.</b>
CPNR-F	71,03	4,04 - 4,09	2,5; 5,0; 10; 20; 40; 80; 160; <b>360; 160</b> <b>(sec - OCR = 2,25); 360; 640; 320; 160.</b>

(sec): estágio de longa duração (99.960 minutos) para monitoramento do adensamento secundário pós-expansão primária.

A terceira bateria de ensaios de adensamento edométrico, chamada de EDO-NR (26D), envolveu três corpos de prova esculpados na amostra NGI-NR, a saber: CPNR-E, CPNR-G e CPNR-H. Destes ensaios, dois foram realizados em corpos de prova com aproximadamente 50 mm de diâmetro (CPNR-E e CPNR-H) e um em corpo de prova com cerca de 70 mm de diâmetro (CPNR-G). Os corpos de prova foram moldados no dia 06 de maio de 2021 e os ensaios foram montados e iniciados no dia 1 de junho de 2021, isto é, 26 dias após a moldagem dos ensaios, daí o nome da bateria (26D). Entre a moldagem dos corpos de prova e a montagem dos ensaios, os três corpos de prova permaneceram entre as placas de acrílico, dentro da caixa de isopor, que, por sua vez, foi mantida dentro da câmara úmida do LGMA sob temperatura e umidade controladas. Estes ensaios foram executados fora da sala implementada, com a temperatura mantida em  $22 \pm 1^\circ\text{C}$ .

Os três ensaios de adensamento edométrico foram executados simultaneamente com estágios de carregamento de 24 horas. Nos três ensaios foi aplicada a mesma sequência de carregamento, a saber: 2,5; 5,0; 10; 20; 30; 40; 80; 160; 320 e 640 kPa. Os estágios de descarregamento final, de 640 kPa para 320 kPa e de 320 kPa para 160 kPa, duraram cerca de 12 horas cada.

Nestes ensaios, optou-se por adicionar o estágio de carregamento de 30 kPa, entre os estágios de 20 kPa e 40 kPa. Tal medida teve o objetivo de refinar as curvas de compressão edométrica na vizinhança da tensão de sobreadensamento ( $\sigma'_{vm}$ ), cujos valores no intervalo de profundidade amostrada estão situados entre 20 kPa e 40 kPa (Jannuzzi et al., 2015), o que foi confirmado pelos resultados dos ensaios da primeira bateria, os quais já haviam sido realizados e calculados.

A Tabela 3.5 resume as informações dos ensaios de adensamento edométrico da bateria EDO-NR(26D).

Tabela 3.5 – Informações dos ensaios de adensamento edométrico da bateria EDO-NR(26D).

Ensaio/ Corpo de prova	Diâmetro (m)	Profundidade (m)	Estágios de carregamento do ensaio edométrico, $\sigma_v$ (kPa)
CPNR-E	50,34	3,98 - 4,04	2,5; 5,0; 10; 20; <b>30</b> ; 40; 80; 160; 320; 640; 320; 160.
CPNR-G	70,97	4,09 - 4,14	2,5; 5,0; 10; 20; <b>30</b> ; 40; 80; 160; 320; 640; 320; 160.
CPNR-H	50,35	4,14 - 4,19	2,5; 5,0; 10; 20; <b>30</b> ; 40; 80; 160; 320; 640; 320; 160.

A quarta bateria de ensaios de adensamento edométrico, chamada de EDO-NR(RM), envolveu dois corpos de prova esculpido na amostra NGI-NR, a saber: CPNR-RM1, com cerca de 50 mm de diâmetro, e CPNR-RM2, com cerca de 70 mm de diâmetro. Os corpos de prova foram moldados, montados e começaram a ser ensaiados no dia 18 de maio de 2021. Ambos os corpos de prova foram moldados a partir de um trecho da amostra NGI-NR que foi completamente amolgado em laboratório, gerando, desta forma, corpos de prova remoldados, daí o nome da bateria (RM). O procedimento de amolgamento foi descrito no item 3.3.7 “*Moldagem dos corpos de prova*”, Figura 3.46. Estes ensaios foram executados fora da sala implementada, com a temperatura mantida em  $22 \pm 1^\circ\text{C}$ .

Os dois ensaios de adensamento edométrico foram executados simultaneamente com estágios de carregamento de 24 horas. Nos dois ensaios foi aplicada a mesma sequência de carregamento, a saber: 2,5; 5,0; 10; 20; 40; 80; 160; 320 e 640 kPa. Os estágios de descarregamento final, de 640 kPa para 320 kPa e de 320 kPa para 160 kPa, duraram cerca de 12 horas cada.

A Tabela 3.6 resume as informações dos ensaios de adensamento edométrico da bateria EDO-NR(RM).

Tabela 3.6 – Informações dos ensaios de adensamento edométrico da bateria EDO-NR(RM).

Ensaio/ Corpo de prova	Diâmetro (mm)	Profundidade (m)	Estágios de carregamento do ensaio edométrico, $\sigma_v$ (kPa)
CPNR-RM1	50,32	3,50 - 3,63	2,5 ; 5,0; 10; 20; 40; 80; 160; 320; 640; 320; 160.
CPNR-RM2	71,20	3,50 - 3,63	2,5; 5,0; 10; 20; 40; 80; 160; 320; 640; 320; 160.

### 3.6.

#### **Determinação do teor de umidade ao longo do raio da amostra**

Conforme discutido no item 2.4.4 com base em Bjerrum (1973), as tensões cisalhantes atuantes ao longo da superfície lateral da amostra devidas ao atrito entre a amostra e a parede interna do tubo de amostragem, durante a manobra de cravação do tubo no subsolo, acarretam em deformações cisalhantes na amostra, as quais são tanto maiores quanto mais próximo o elemento do solo

encontra-se da periferia da amostra. Deformações cisalhantes sob condições não drenadas geram excessos de poropressão positivos em argilas levemente sobreadensadas, como é o caso da argila do Sarapuí II. Conseqüentemente, o excesso de poropressão positivo gerado é tanto maior quanto mais próximo o elemento encontra-se da periferia da amostra. Para equalizar os excessos de poropressão gerados ao longo do raio em uma dada seção transversal da amostra, ocorre, ao longo do tempo, migração de água da periferia da amostra, que sofre adensamento (diminuição do teor de umidade), para o centro da amostra, que sofre expansão (aumento do teor de umidade). A Figura 3.48 ilustra esse fenômeno. Assim, ao longo do tempo, o teor de umidade deve ser maior no centro da amostra e diminuir com o aumento do raio, sendo menor na periferia da amostra. Tal fenômeno deve ser tanto mais perceptível quanto maior o intervalo de tempo entre a cravação do tubo de amostragem no subsolo e a determinação dos teores de umidade no laboratório.

Vale ressaltar ainda, que o mesmo fenômeno também ocorre, talvez em menor grau, quando a amostra é extraída do amostrador, no laboratório, para a moldagem dos corpos de prova. Todavia, o tempo compreendido entre a extração da amostra do tubo amostrador e a determinação dos teores de umidade é bastante curto para que tal procedimento seja relevante na redistribuição dos teores de umidade ao longo do raio.

Para averiguar a ocorrência do fenômeno acima descrito, foram realizados ensaios de determinação de teor de umidade ao longo do raio da amostra em três corpos de prova, a saber: CPRP-WN1, CPNR-WN1 e CPNR-WN2. Para o corpo de prova CPRP-WN1, o tempo compreendido entre a cravação do tubo amostrador no campo (amostragem) e a determinação do teor de umidade no laboratório foi de 1320 horas (cerca de 55 dias). Para os corpos de prova CPNR-WN1 e CPNR-WN2, o tempo compreendido entre a amostragem e a determinação do teor de umidade no laboratório foi de 21 horas e 24 horas, respectivamente (cerca de 1 dia).

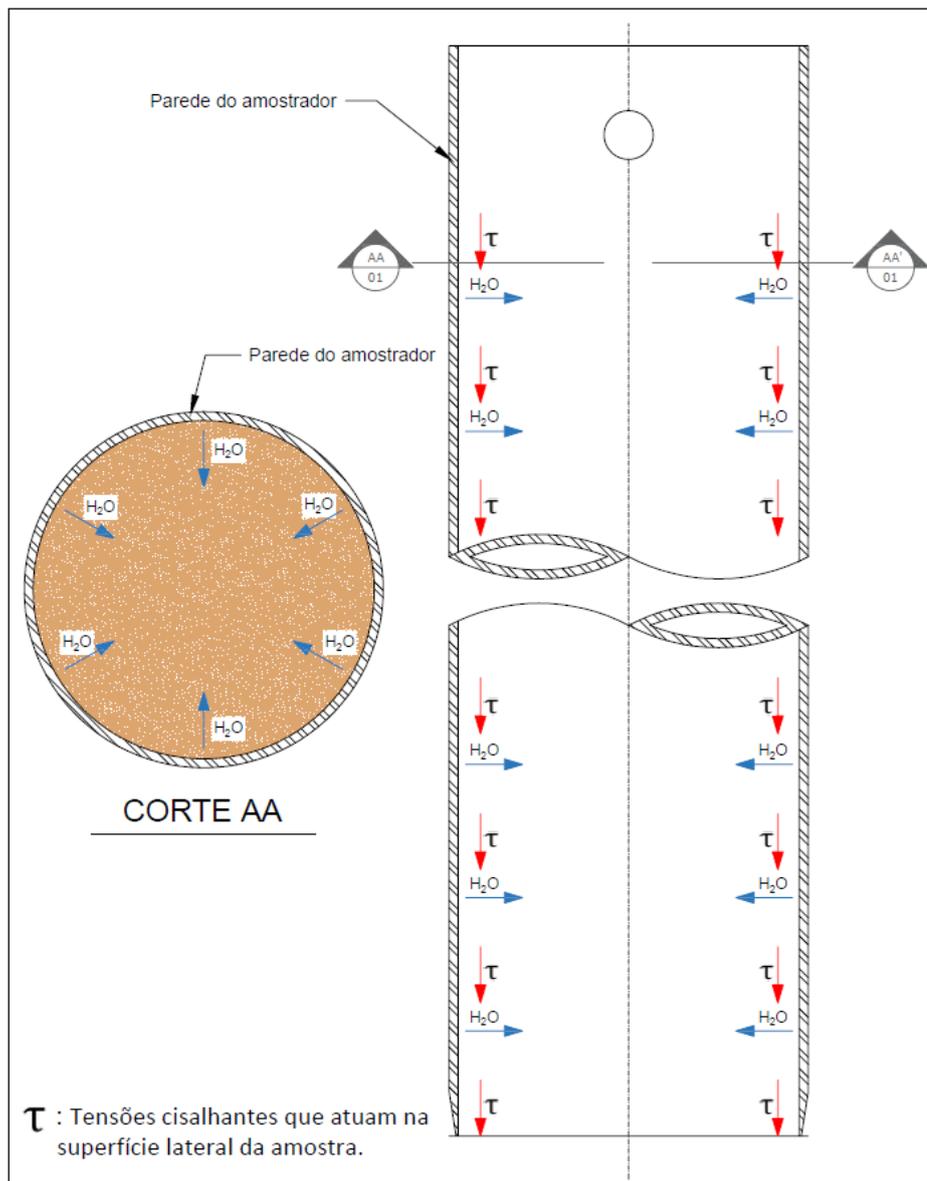


Figura 3.48 – Migração de água da periferia para o centro da amostra devida às tensões cisalhantes ao longo da superfície lateral da amostra provocadas pela cravação do tubo amostrador no subsolo.

A Tabela 3.7 resume as informações dos ensaios para determinação do teor de umidade ao longo do raio da amostra.

Tabela 3.7 – Resumo das informações dos ensaios para determinação dos teores de umidade ao longo do raio da amostra.

Ensaio/ Corpo de prova	Amostra de origem	Profundidade (m)	$\Delta t$ (horas/dias)
CPRP-WN1	NGI-RP	3,90 - 3,95	1320 / 55
CPNR-WN1	NGI-NR	3,75 - 3,80	21 / 1
CPNR-WN2	NGI-NR	3,88 - 3,93	24 / 1

( $\Delta t$ ): Tempo compreendido entre a cravação do amostrador no campo e a determinação do teor de umidade no laboratório.

A preparação dos corpos de prova para a determinação do teor de umidade ao longo do raio da amostra seguiu as seguintes etapas:

- (i) Moldava-se um corpo de prova com cerca de 70 mm de diâmetro e 20 mm de altura, seguindo exatamente as mesmas etapas adotadas para a moldagem do corpo de prova do ensaio de adensamento edométrico.
- (ii) O corpo de prova era então posicionado sobre uma placa de vidro coberta com papel celofane.
- (iii) Em seguida, com o auxílio de gabaritos especialmente confeccionados para a execução deste ensaio (Figura 3.49), cravava-se mais um anel no corpo de prova, com cerca de 50 mm de diâmetro e 20 mm de altura, e, logo em seguida, cravava-se um outro anel com cerca de 30 mm diâmetro e 20 mm de altura, ambos concêntricos ao anel de 70 mm inicialmente cravado. Assim, o corpo de prova ficava dividido em três regiões (região 1, região 2 e região 3), conforme mostrado na Figura 3.50, Figura 3.51 e Figura 3.52.
- (iv) Com todos os anéis cravados, o material de cada uma das regiões era retirado separadamente e colocado em cápsulas metálicas para determinação do teor de umidade. Para cada região, eram preenchidas 2 cápsulas metálicas para a determinação do teor de umidade e o valor atribuído correspondia à média aritmética dos valores determinados nas cápsulas.



Figura 3.49 – Cravação de um dos anéis no corpo de prova com o auxílio de um gabarito.



Figura 3.50 – Corpo de prova com todos os anéis cravados.

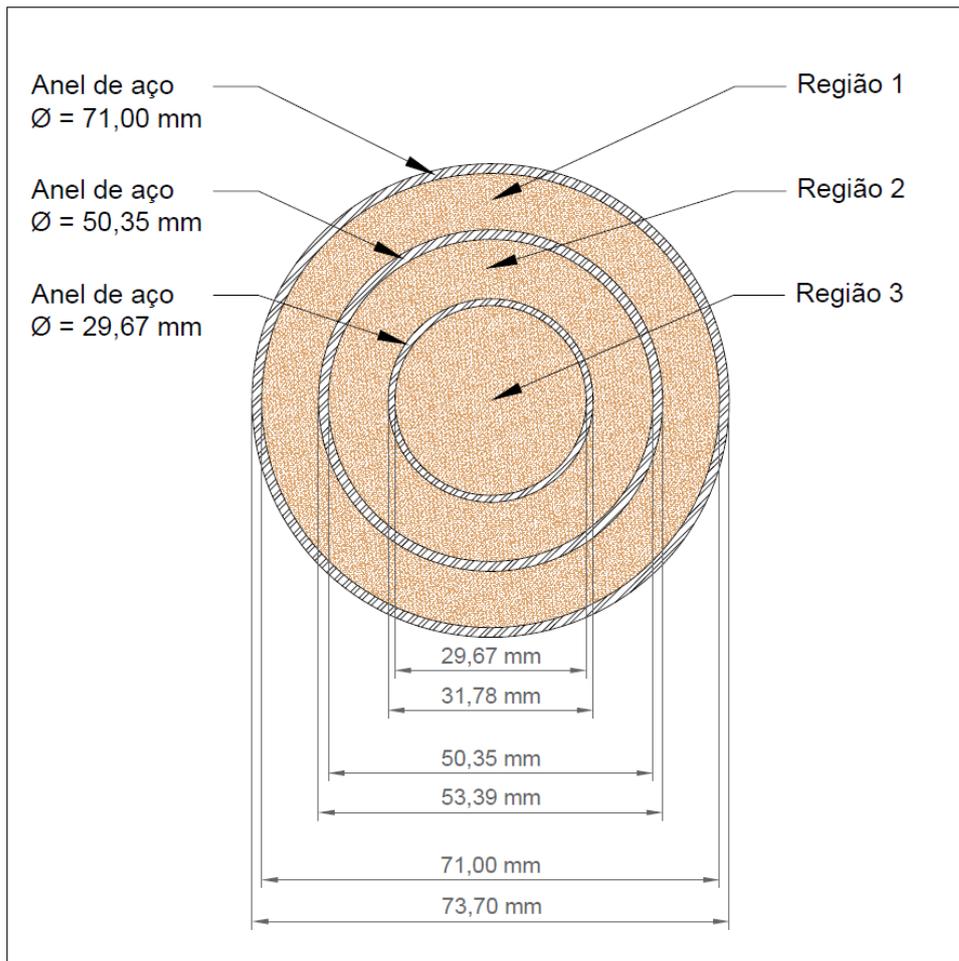


Figura 3.51 – Vista superior do corpo de prova com os três anéis cravados.

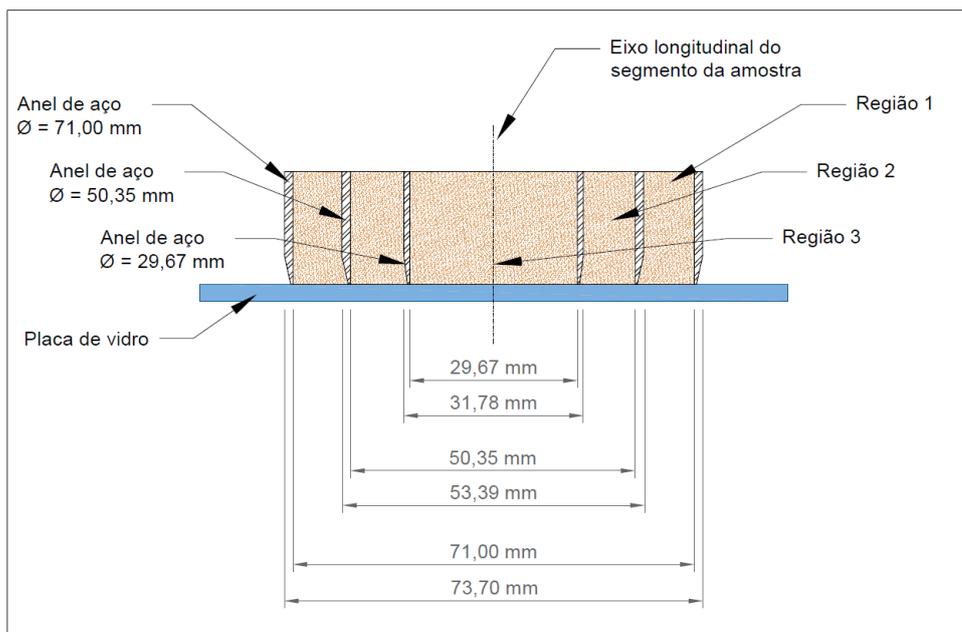


Figura 3.52 – Corte vertical do corpo de prova com os três anéis cravados.

## 4.

### Resultados obtidos

#### 4.1.

##### Ensaio de caracterização

Conforme mencionado no item 3.4 “*Materiais e métodos*”, foram realizados os seguintes ensaios de caracterização nas duas amostras extraídas do depósito de argila mole do Sarapuí II, NGI-RP e NGI-NR: limites de consistência ou de Atterberg (limite de liquidez e limite de plasticidade) e densidade relativa dos grãos. Os ensaios de granulometria por peneiramento e sedimentação e de teor de matéria orgânica foram realizados apenas na amostra NGI-NR.

A curva granulométrica obtida da amostra NGI-RP é apresentada na Figura 4.1. A composição granulométrica obtida dessa curva tomando como referência a norma ABNT NBR 6502 – Rochas e Solos, de setembro de 1995, é apresentada na Tabela 4.1.

A Tabela 4.2 apresenta os valores de densidade relativa dos grãos ( $G_s$ ), teor de matéria orgânica (T.M.O.), limite de liquidez ( $w_L$ ), limite de plasticidade ( $w_P$ ) e índice de plasticidade ( $I_P$ ) obtidos nas amostras.

Os valores de composição granulométrica, limites de consistência e teor de matéria orgânica determinados nesta pesquisa, apresentados nas Tabelas 4.1 e 4.2, são bastante similares aos valores obtidos por Jannuzzi et al. (2015) na Argila do Sarapuí II no intervalo de profundidade de 3,50 a 4,30 m. Ademais, os valores de densidade relativa dos grãos são próximos aos obtidos por Jannuzzi et al. (2015) neste intervalo de profundidade.

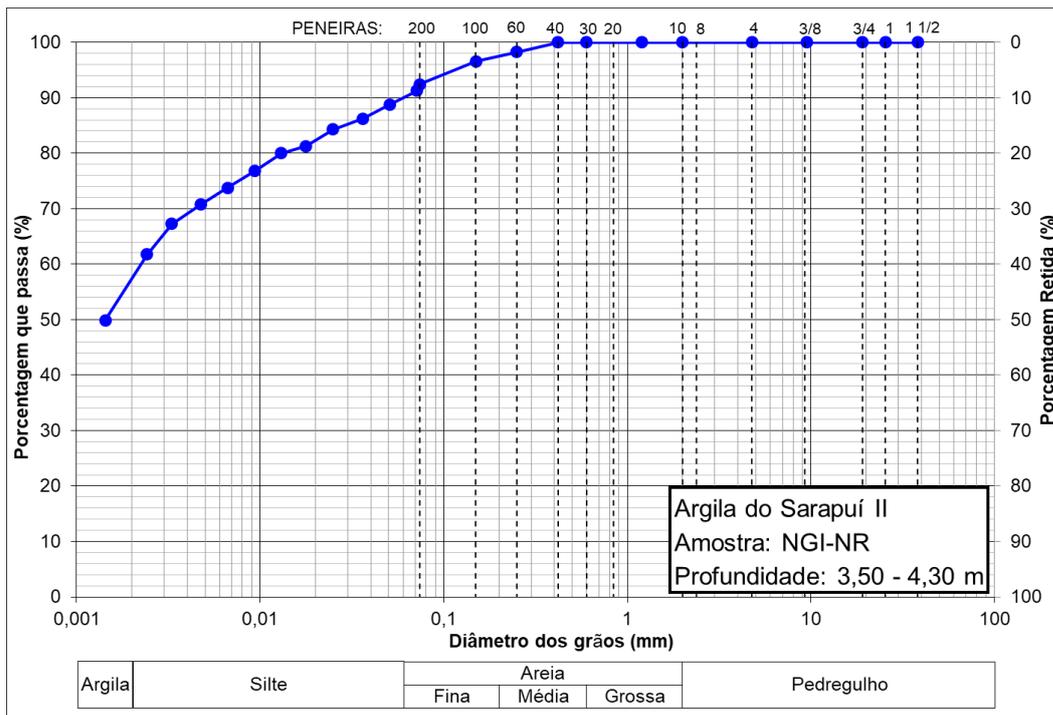


Figura 4.1 – Curva granulométrica da Argila do Sarapuí II, amostra NGI-NR.

Tabela 4.1 – Composição granulométrica da Argila do Sarapuí II

Amostra	Prof. (m)	Composição granulométrica (%) (ABNT NBR 6502)			
		Argila	Silte	Areia fina	Areia média
NGI-NR	3,50 - 4,30	57	33	7	3

Tabela 4.2 – Caracterização física da Argila do Sarapuí II

Amostra	Prof. (m)	$G_s$	T.M.O (%)	$W_L$ (%)	$W_P$ (%)	$I_P$ (%)
NGI-RP	3,50 - 4,30	2,57	(*)	182	53	129
NGI-NR	3,50 - 4,30	2,57	8,6	158	44	114

(\*) Não determinado.

Os índices físicos, a saber, teor de umidade natural ( $w_n$ ), grau de saturação ( $S_r$ ), índice de vazios ( $e_0$ ) e peso específico natural ( $\gamma_n$ ), de cada um dos corpos de prova moldados para os ensaios de adensamento edométrico, são apresentados na Tabela 4.3 à Tabela 4.6.

A Tabela 4.3, a seguir, apresenta os índices físicos dos corpos de prova da bateria de ensaios de adensamento edométrico EDO-RP.

Tabela 4.3 – Índices físicos dos corpos de prova da bateria de ensaios edométricos EDO-RP.

Ensaio/ Corpo de prova	Profundidade (m)	Diâmetro (mm)	w <sub>n</sub> (%)	S <sub>r</sub> (%)	e <sub>0</sub>	γ <sub>n</sub> (kN/m <sup>3</sup> )
CPRP-A	3,65 - 3,70	71,09	152	100,0	3,90	13,0
CPRP-B	3,70 - 3,75	50,36	152	100,0	3,91	13,0
CPRP-C	3,75 - 3,80	71,16	151	100,0	3,88	13,0
CPRP-D	3,85 - 3,90	50,32	143	100,0	3,67	13,1

A Tabela 4.4, a seguir, apresenta os índices físicos dos corpos de prova da bateria de ensaios de adensamento edométrico EDO-NR(SEC).

Tabela 4.4 – Índices físicos dos corpos de prova da bateria de ensaios edométricos EDO-NR(SEC).

Ensaio/ Corpo de prova	Profundidade (m)	Diâmetro (mm)	w <sub>n</sub> (%)	S <sub>r</sub> (%)	e <sub>0</sub>	γ <sub>n</sub> (kN/m <sup>3</sup> )
CPNR-B	3,70 - 3,75	50,36	150	99,0	3,91	12,9
CPNR-C	3,83 - 3,88	71,16	147	100,0	3,71	13,2
CPNR-D	3,93 - 3,98	50,32	151	100,0	3,83	13,1
CPNR-F	4,04 - 4,09	71,03	146	100,0	3,67	13,3

A Tabela 4.5, a seguir, apresenta os índices físicos dos corpos de prova da bateria de ensaios de adensamento edométrico EDO-NR(26D).

Tabela 4.5 – Índices físicos dos corpos de prova da bateria de ensaios edométricos EDO-NR(26D).

Ensaio/ Corpo de prova	Profundidade (m)	Diâmetro (mm)	w <sub>n</sub> (%)	S <sub>r</sub> (%)	e <sub>0</sub>	γ <sub>n</sub> (kN/m <sup>3</sup> )
CPNR-E	3,98 - 4,04	50,34	144	99,8	3,72	13,1
CPNR-G	4,09 - 4,14	70,97	143	100,0	3,63	13,3
CPNR-H	4,14 - 4,19	50,35	142	100,0	3,63	13,2

A Tabela 4.6, a seguir, apresenta os índices físicos dos corpos de prova da bateria de ensaios de adensamento edométrico EDO-NR(RM).

Tabela 4.6 – Índices físicos dos corpos de prova da bateria de ensaios edométricos EDO-NR(RM).

Ensaio/ Corpo de prova	Profundidade (m)	Diâmetro (mm)	$w_n$ (%)	$S_r$ (%)	$e_0$	$\gamma_n$ (kN/m <sup>3</sup> )
CPNR-RM1	3,50 - 3,63	50,32	160	100,0	4,11	12,8
CPNR-RM2	3,50 - 3,63	71,20	146	97,8	3,85	12,8

Dos corpos de prova intactos, pertencentes às baterias EDO-RP, EDO-NR(SEC) e EDO-NR(26D) (Tabelas 4.3, 4.4 e 4.5), observa-se que os valores de teor de umidade natural ( $w_n$ ) ficaram situados entre 142 % e 152 %, os valores de índice de vazios ( $e_0$ ) ficaram situados entre 3,63 e 3,91, e os valores de peso específico natural ( $\gamma_n$ ) ficaram situados entre 12,8 kN/m<sup>3</sup> e 13,3 kN/m<sup>3</sup>. Estes valores de índice de vazios e de peso específico natural são bastante similares aos valores obtidos por Jannuzzi et al. (2015) na Argila do Sarapuí II no intervalo de profundidade de 3,50 a 4,30 m. Os valores de teor de umidade natural são ligeiramente inferiores aos obtidos por Jannuzzi et al. (2015) neste intervalo de profundidade.

Das Tabelas 4.3 a 4.5, observa-se também que, de uma forma geral, dentro das duas amostras (NGI-RP e NGI-NR), há uma tendência de aumento do peso específico natural ( $\gamma_n$ ), e de diminuição do índice de vazios ( $e_0$ ) com o aumento da profundidade do corpo de prova.

O corpo de prova remoldado CPNR-RM1 apresentou valores de teor de umidade natural e de índice de vazios mais elevados do que todos os valores dos demais corpos de prova intactos. Isto deve ser explicado pelo fato deste corpo de prova ter sido moldado em um segmento da amostra de profundidade menor do que todos os demais corpos de prova intactos. Por outro lado, o corpo de prova remoldado CPNR-RM2, moldado no mesmo segmento de amostra, apresentou um valor de teor de umidade natural um pouco inferior ao do corpo de prova CPNR-RM1. Tal fato pode ser atribuído à dificuldade, e consequente demora, na moldagem do corpo de prova no anel de cerca de 70 mm de diâmetro, uma vez que, o procedimento de amolgamento do solo no laboratório ocasionou numa redução significativa da resistência não drenada da argila e,

consequentemente, numa perda de resistência entre a superfície lateral do corpo de prova e a parede interna do anel edométrico. Observou-se grande quantidade de fragmentos de conchas em ambos corpos de prova remoldados.

Ademais, verificou-se que corpos de prova, de ambas as amostras, localizados na mesma profundidade, apresentaram valores de índices físicos muito próximos. Este fato indica uma semelhança entre os materiais das duas amostras.

## 4.2.

### Ensaio de adensamento edométrico

#### 4.2.1.

##### Considerações iniciais

Os procedimentos seguidos nos treze ensaios de adensamento edométrico realizados nesta pesquisa foram detalhadamente descritos no item 3.5 “*Materiais e métodos*”.

Para cada um dos treze ensaios, foram plotadas curvas de compressão edométrica tanto em termos de índice de vazios ( $e$ ) quanto em termos de deformação volumétrica específica ( $\varepsilon_v$ ) versus tensão vertical efetiva ( $\sigma'_v$ ) em escala logarítmica. Nestas curvas, para cada estágio de carregamento do ensaio, os valores de índice de vazios ( $e$ ) e de deformação volumétrica específica ( $\varepsilon_v$ ) foram plotados segundo três critérios, a saber:

- a) “Fim do primário” determinado pelo método de Taylor;
- b) Velocidade de deformação volumétrica específica ( $\dot{\varepsilon}_v$ ) igual a  $10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ;
- c) Duração de 24 horas do estágio.

A velocidade de deformação volumétrica específica ( $\dot{\varepsilon}_v$ ) foi calculada segundo a seguinte equação:

$$\dot{\varepsilon}_v = \frac{1}{\Delta t} \left( \frac{\Delta H}{H_i} \right) \quad (4.1)$$

, onde:

$H_i$  : altura do corpo de prova correspondente à leitura do extensômetro de ordem  $i$ ;

$\Delta H$  : recalque do corpo de prova ( $H_i - H_{i+1}$ );

$\Delta t$  : intervalo de tempo entre as leituras do extensômetro de ordens  $i$  e  $i + 1$ .

O valor de velocidade de deformação volumétrica ( $\dot{\epsilon}_v$ ) igual a  $10^{-6} \text{ s}^{-1}$  justifica-se pelo fato de resultados de ensaios de adensamento edométrico de carga incremental realizados em argilas moles terem mostrado que este valor corresponde à maior potência inteira de 10 após o “fim do primário” para corpos de prova com distância de drenagem máxima da ordem de 1 cm, isto é, corpos de prova de 2 cm de espessura com drenagem vertical dupla (ver Leroueil *et al.*, 1985; Aguiar, 2008; Andrade, 2009; Conte, 2019).

Em cada estágio de carregamento, com exceção para o primeiro estágio, foi determinado o coeficiente de adensamento por drenagem vertical ( $c_v$ ) ajustando-se a curva de adensamento teórica, definida pela teoria de Terzaghi & Fröhlich (1936) *apud* Taylor (1948), à curva experimental. As determinações foram feitas tanto pelo método de Taylor (em termos da raiz quadrada do tempo) quanto pelo método de Casagrande (em termos de tempo em escala logarítmica). Assim, para cada ensaio de adensamento edométrico, foram plotadas duas curvas “ $c_v(\log)$  versus  $\sigma'_v(\log)$ ”, em escala bi-logarítmica, sendo uma com os valores de  $c_v$  determinados pelo método de Taylor e a outra com os valores de  $c_v$  calculados pelo método de Casagrande. Nestas curvas, os valores de  $\sigma'_v$  correspondem aos valores médios dos estágios de carregamento.

A seguir, nos itens 4.2.2 a 4.2.14, da Figura 4.3 à Figura 4.53, para cada ensaio de adensamento edométrico (corpo de prova), é apresentada a seguinte sequência de quatro figuras:

- Curvas de compressão edométrica “ $e$  versus  $\sigma'_v(\log)$ ” segundo os três critérios acima mencionados, a saber: “fim do primário”,  $\dot{\epsilon}_v = 10^{-6} \text{ s}^{-1}$  e 24 horas;
- Curvas “ $c_v(\log)$  versus  $\sigma'_v(\log)$ ”, uma com os valores de  $c_v$  determinados pelo método de Taylor e outra com os valores de  $c_v$  determinados pelo método de Casagrande;

- Curvas de compressão edométrica “ $\varepsilon_v$  versus  $\sigma'_v(\log)$ ” segundo os três critérios acima mencionados;
- Fotografia do corpo de prova partido após a realização do ensaio para inspeção visual.

Os resultados dos ensaios de adensamento edométrico serão analisados no item 5 “*Análises dos resultados dos ensaios de adensamento edométrico*”.

## 4.2.2.

## Corpo de prova CPRP-A

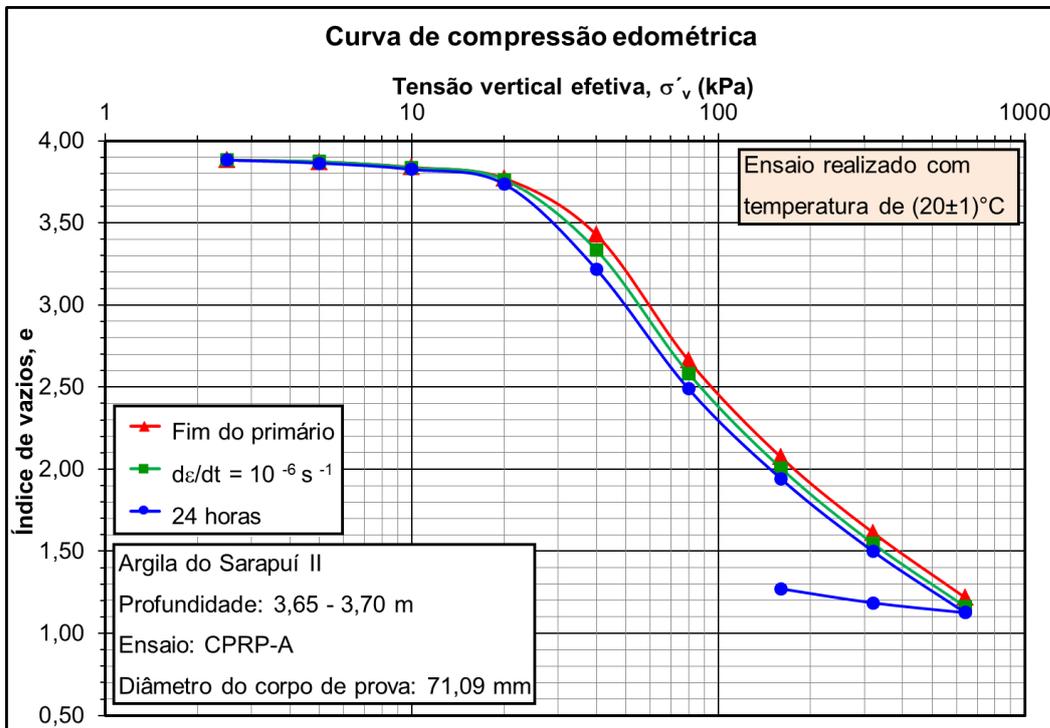


Figura 4.2 – Curvas de compressão edométrica “ $e \times \sigma'_v$  (log)” do corpo de prova CPRP-A.

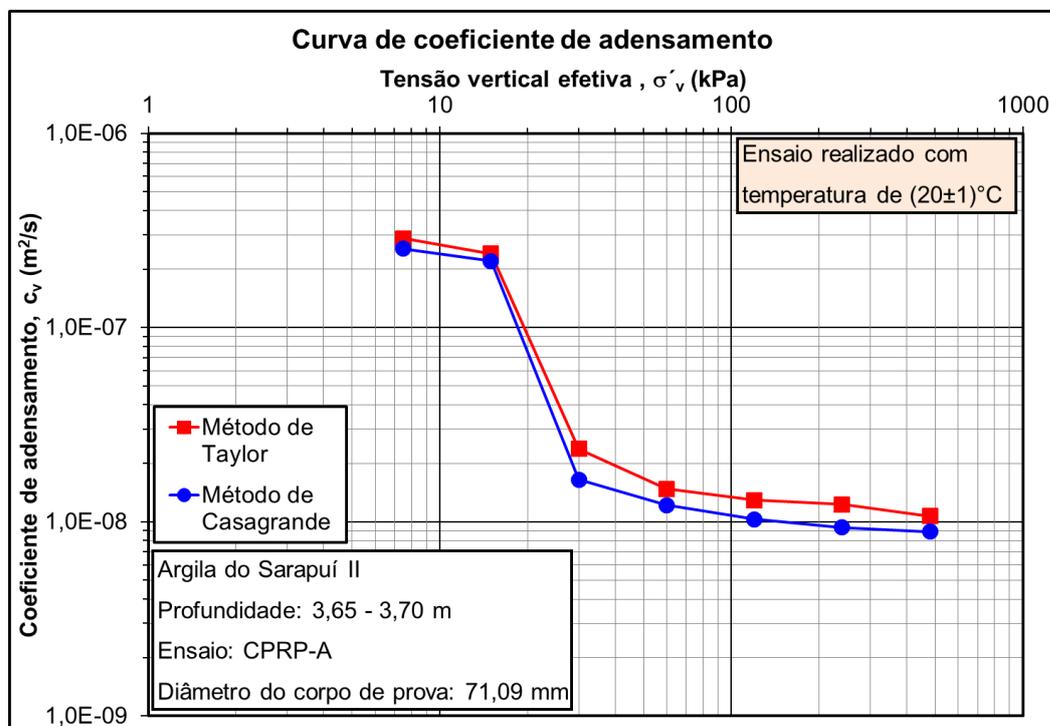


Figura 4.3 – Curvas de coeficiente de adensamento “ $c_v$  (log)  $\times \sigma'_{v \text{ médio}}$  (log)” do corpo de prova CPRP-A.

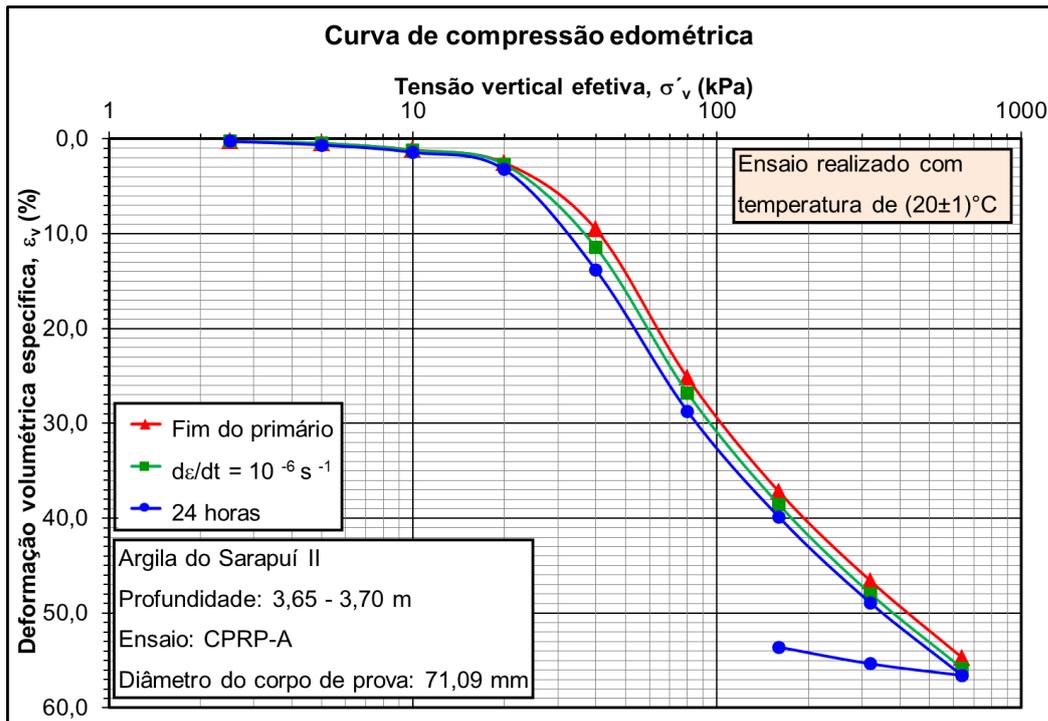


Figura 4.4 – Curvas de compressão edométrica “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v(\log)$ ” do corpo de prova CPRP-A.

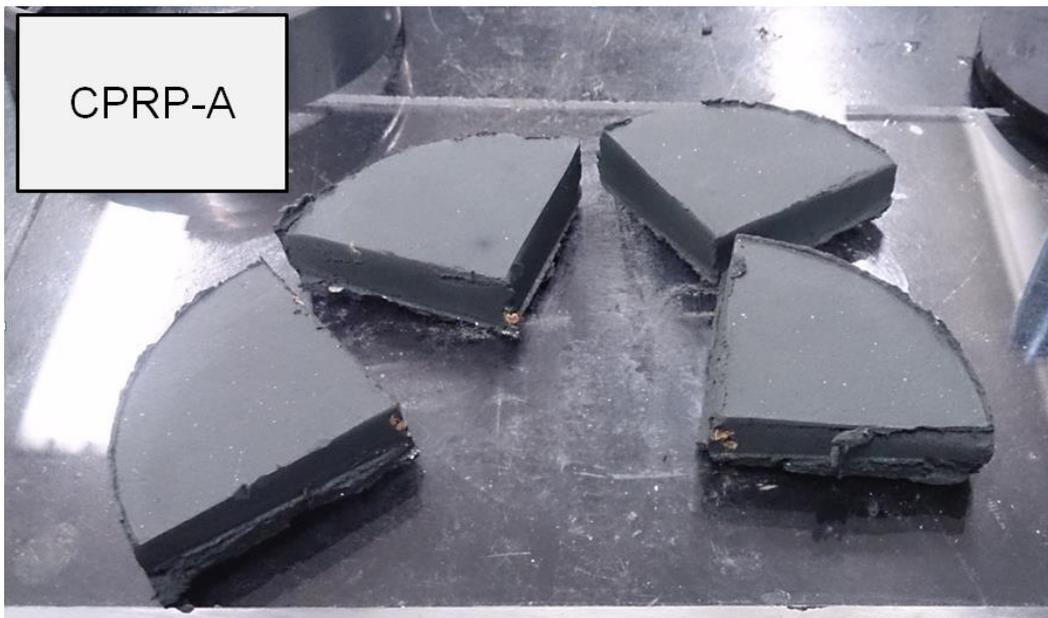
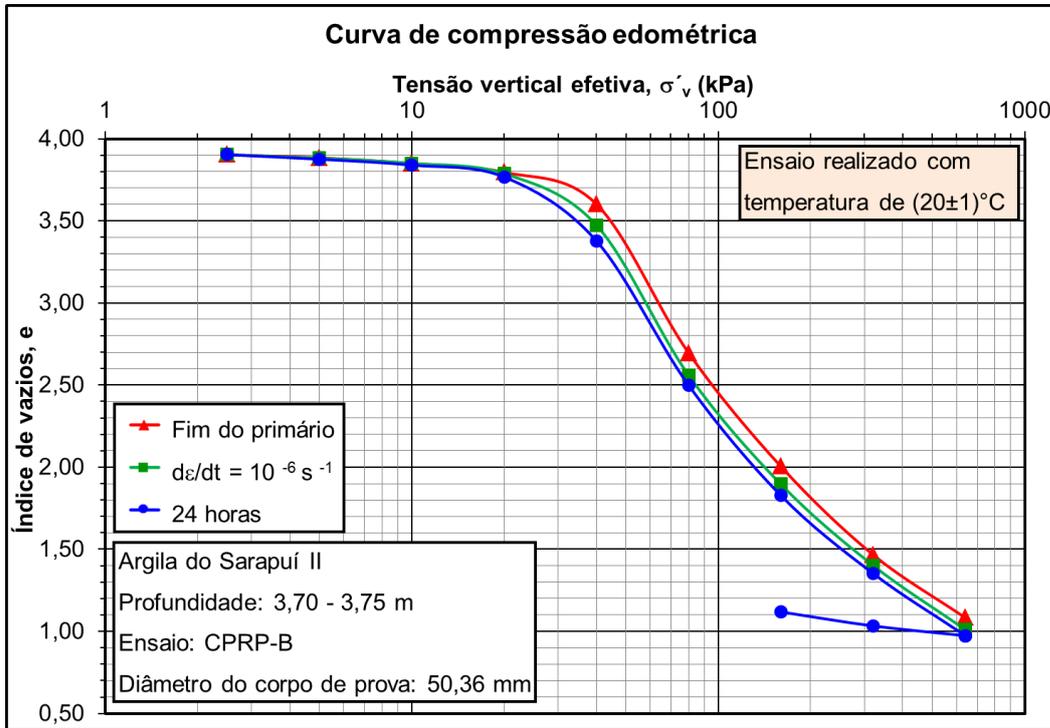
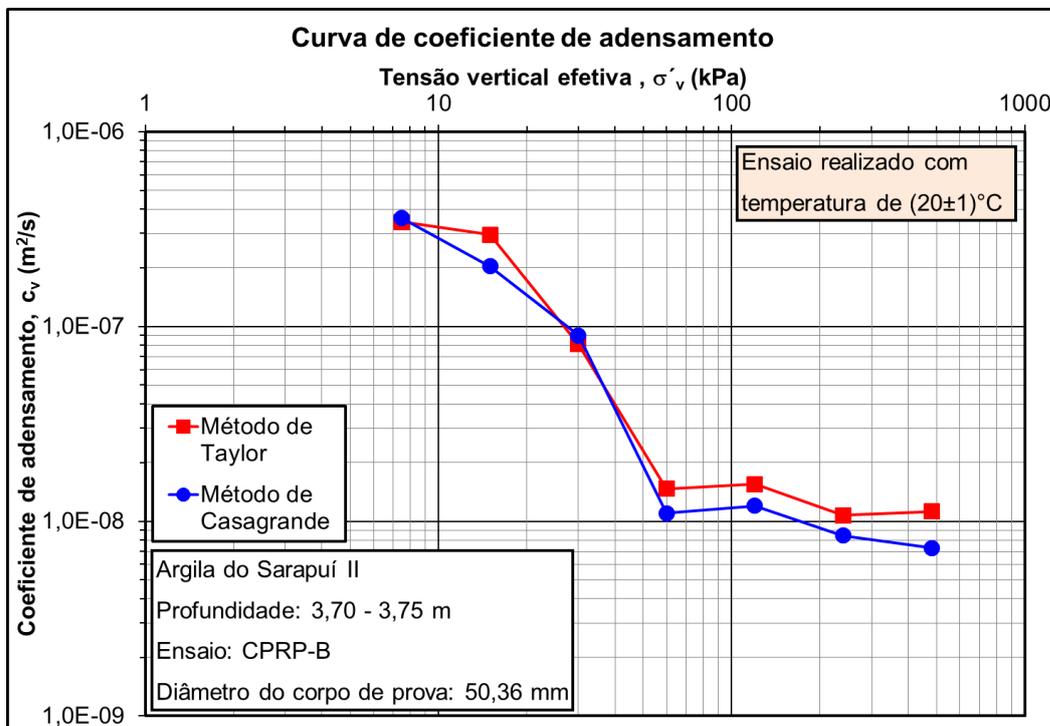


Figura 4.5 – Inspeção do corpo de prova CPRP-A após o ensaio.

Relatório de inspeção: Fragmentos de conchas no centro do corpo de prova.

## 4.2.3.

## Corpo de prova CPRP-B

Figura 4.6 – Curvas de compressão edométrica “ $e$  x  $\sigma'_v$  (log)” do corpo de prova CPRP-B.Figura 4.7 – Curvas de coeficiente de adensamento “ $c_v$  (log) x  $\sigma'_v$  médio (log)” do corpo de prova CPRP-B.

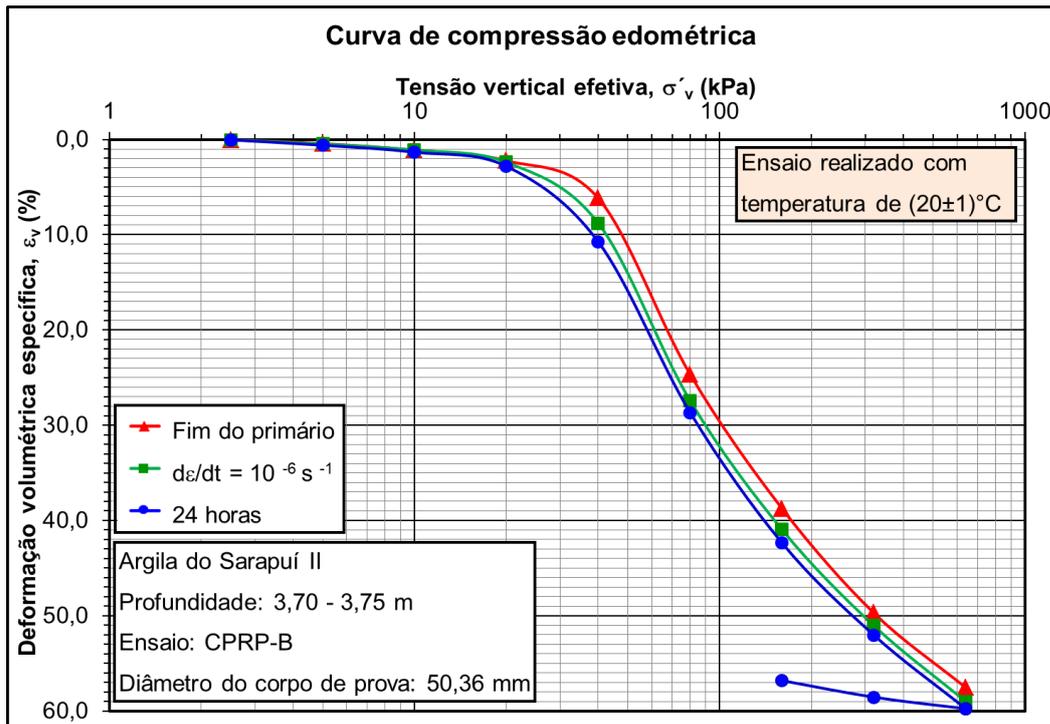


Figura 4.8 – Curvas de compressão edométrica “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v(\log)$ ” do corpo de prova CPRP-B.

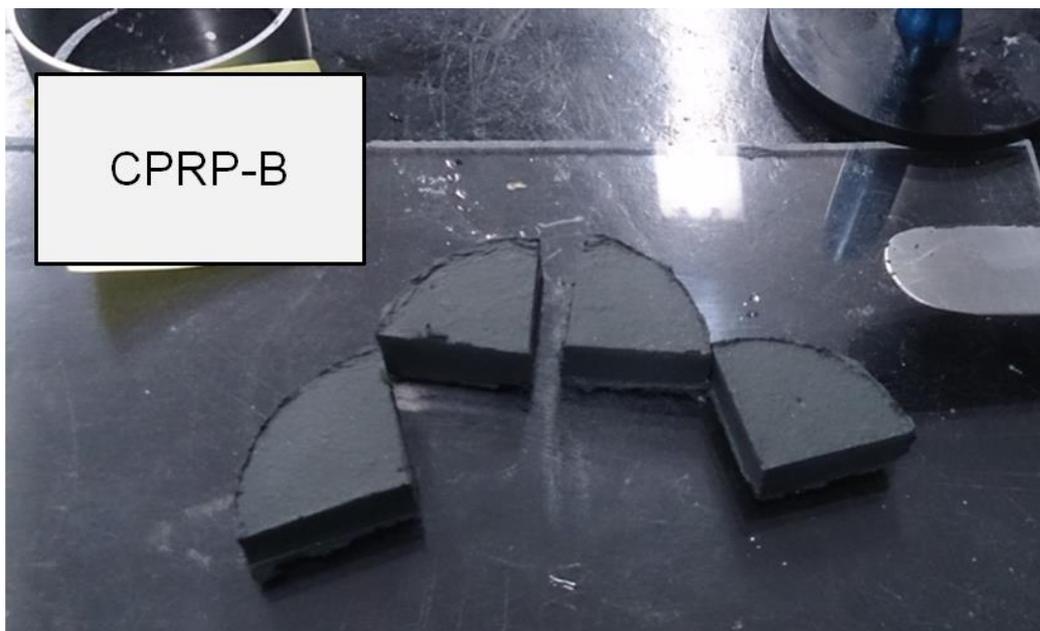


Figura 4.9 – Inspeção do corpo de prova CPRP-B após o ensaio.

Relatório de inspeção: Sem indícios de fragmentos de conchas ou outros materiais anômalos.

## 4.2.4.

## Corpo de prova CPRP-C

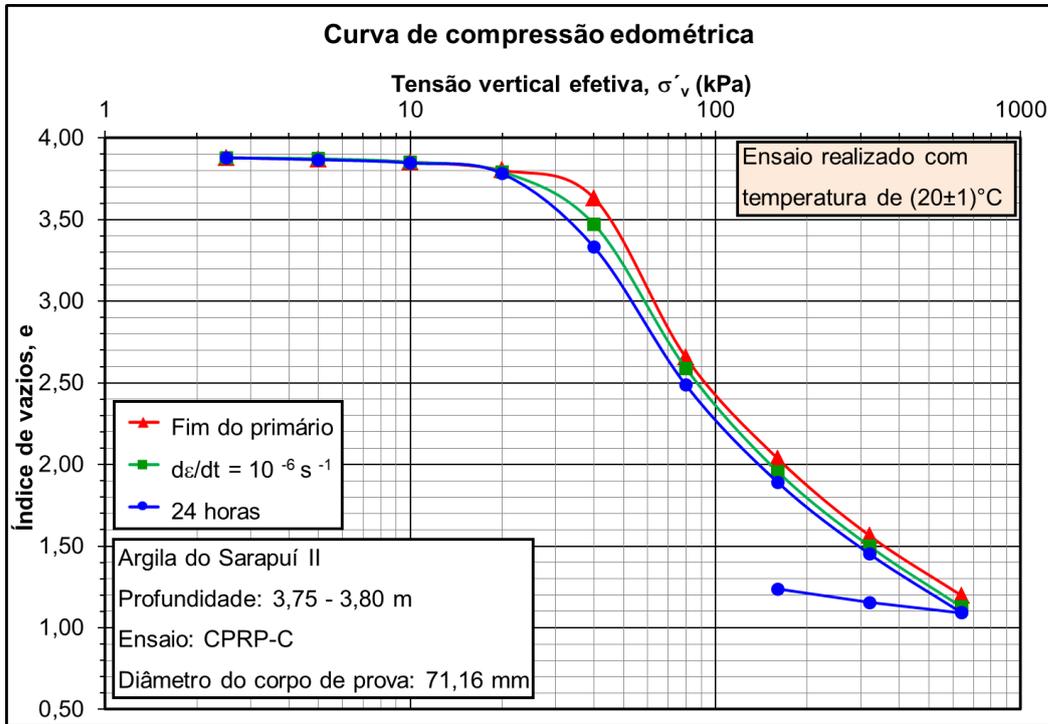


Figura 4.10 – Curvas de compressão edométrica “ $e \times \sigma'_v$  (log)” do corpo de prova CPRP-C.

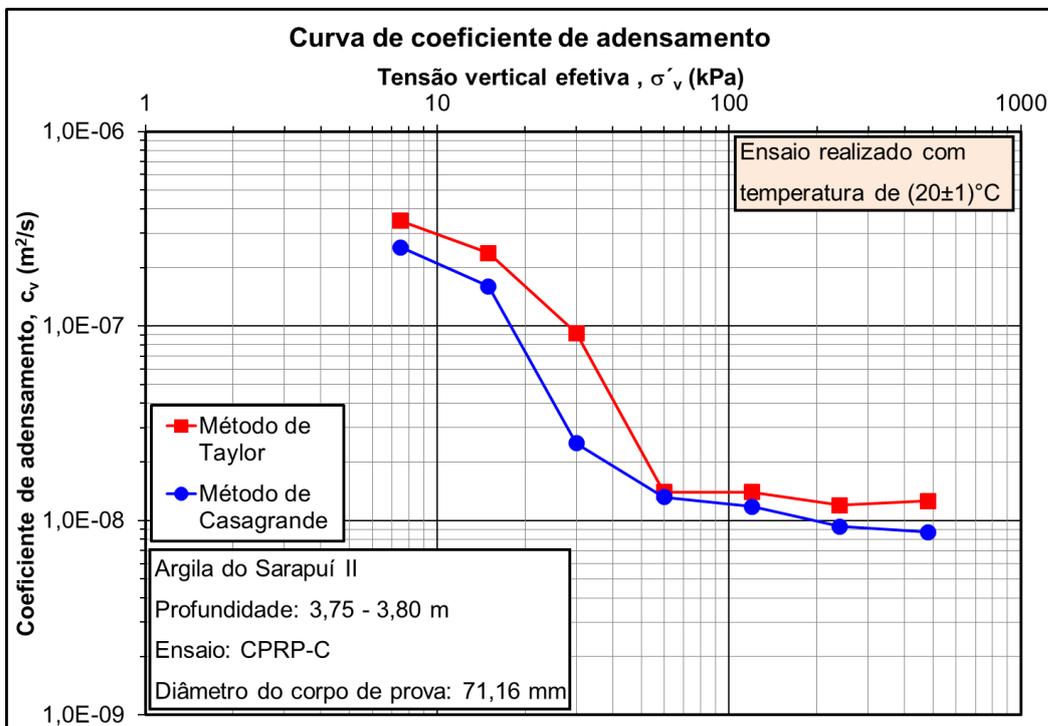


Figura 4.11 – Curvas de coeficiente de adensamento “ $c_v$  (log)  $\times \sigma'_{v \text{ médio}}$  (log)” do corpo de prova CPRP-C.

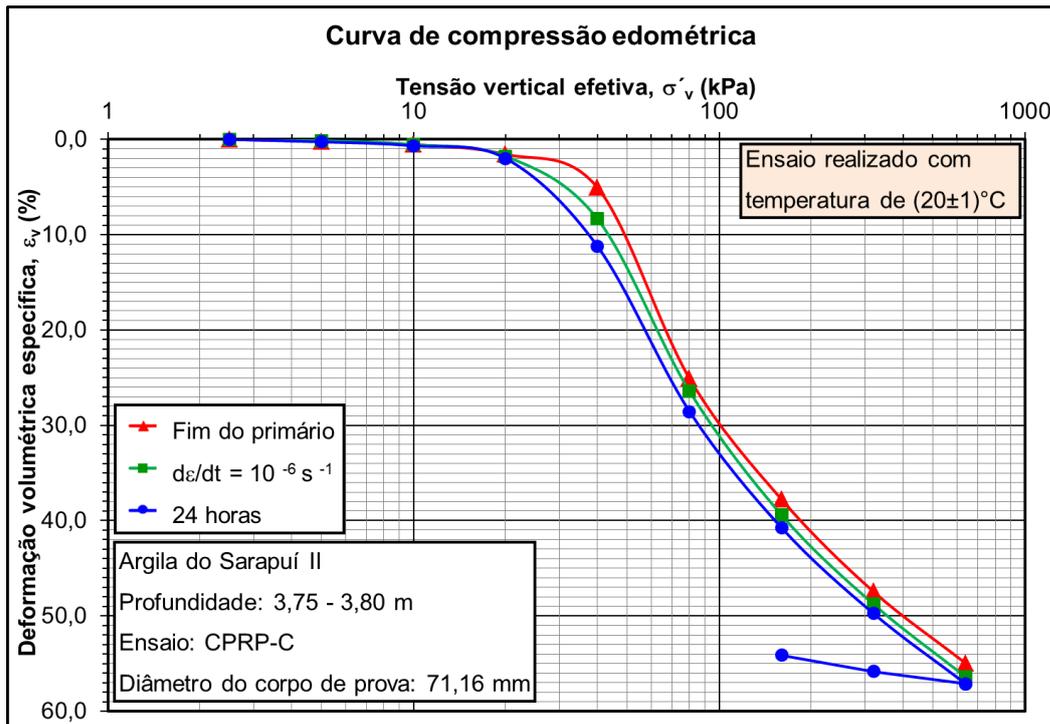


Figura 4.12 – Curvas de compressão edométrica “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v(\log)$ ” do corpo de prova CPRP-C.



Figura 4.13 – Inspeção do corpo de prova CPRP-C após o ensaio.

Relatório de inspeção: Sem indícios de fragmentos de conchas ou outros materiais anômalos.

## 4.2.5.

## Corpo de prova CPRP-D

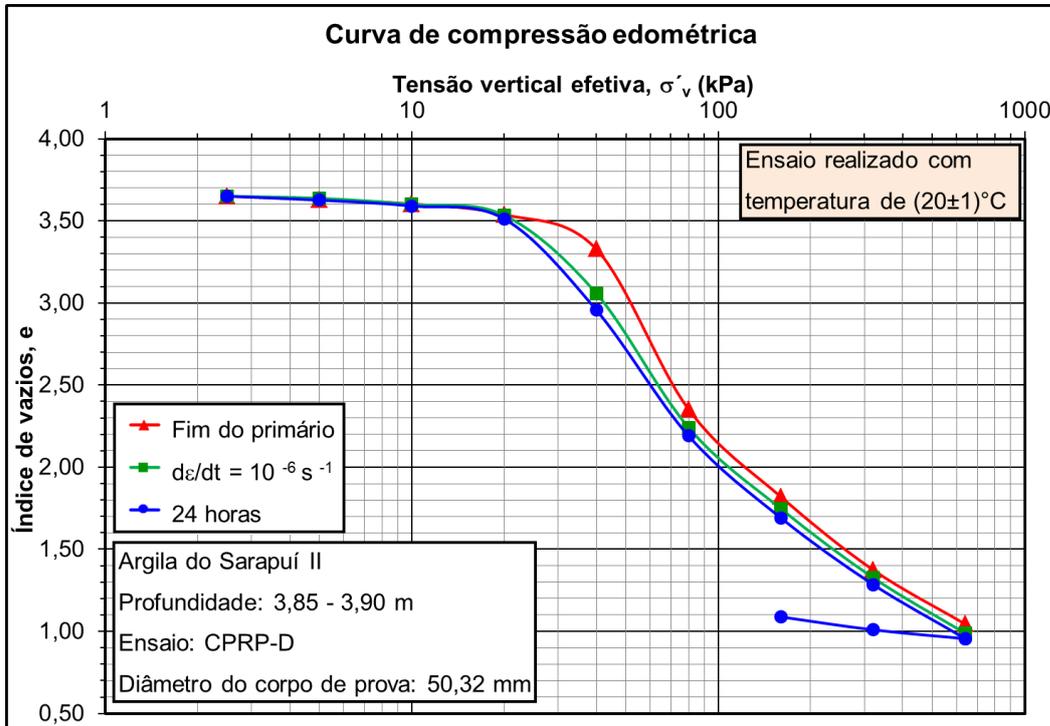


Figura 4.14 – Curvas de compressão edométrica “ $e \times \sigma'_v$  (log)” do corpo de prova CPRP-D.

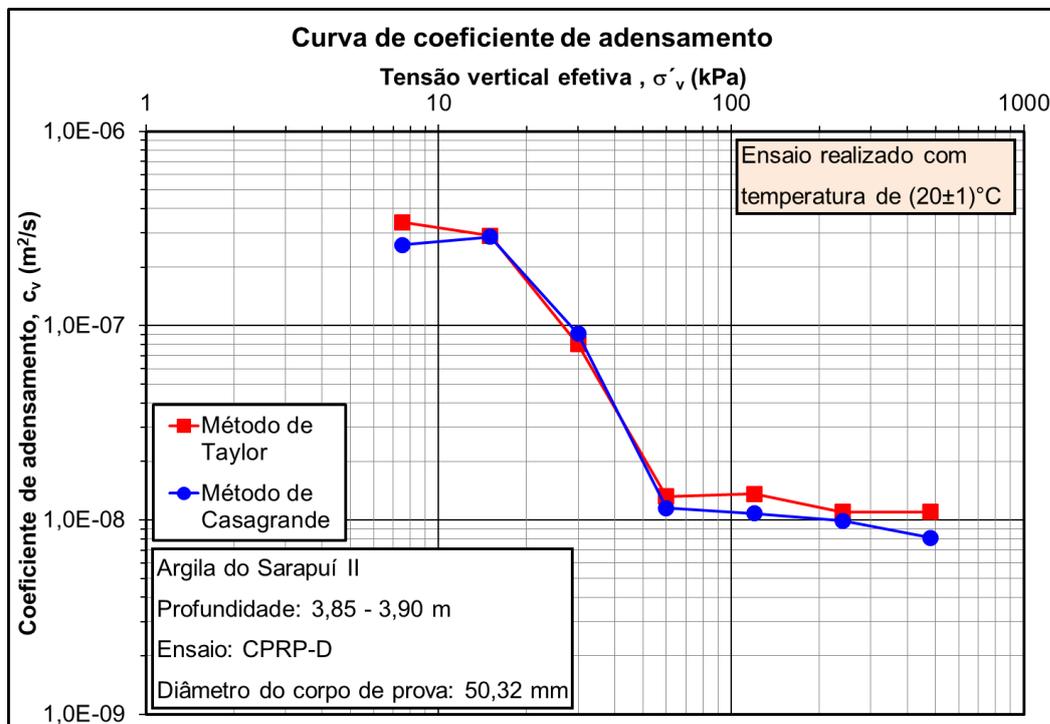


Figura 4.15 – Curvas de coeficiente de adensamento “ $c_v$  (log)  $\times \sigma'_{v \text{ médio}}$  (log)” do corpo de prova CPRP-D.

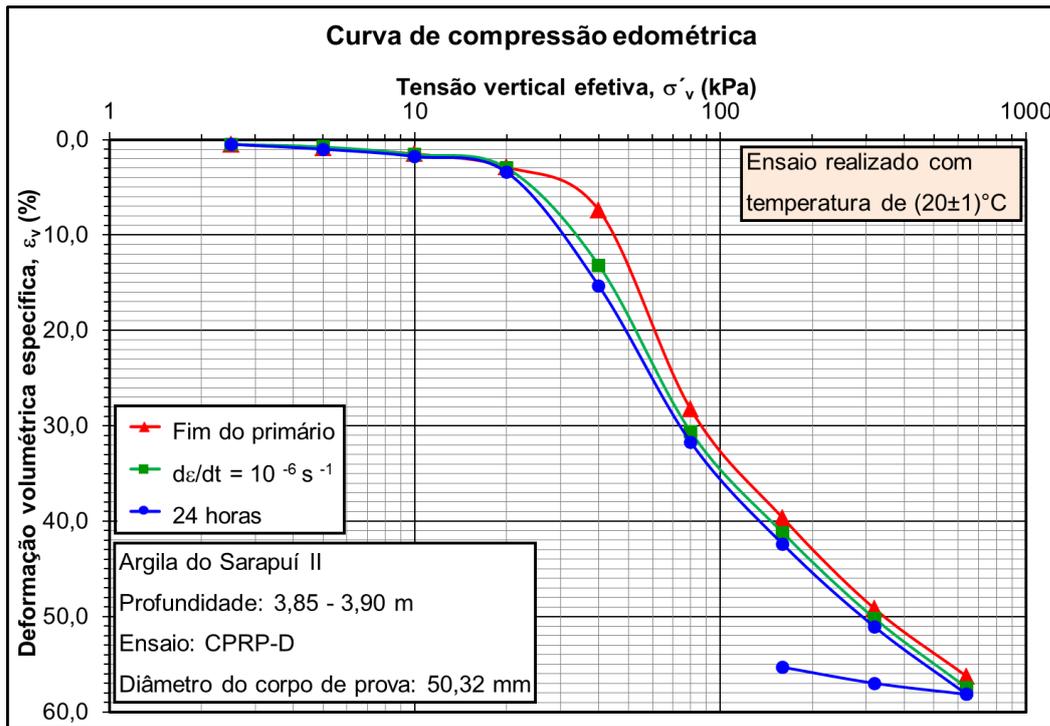


Figura 4.16 – Curvas de compressão edométrica “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v(\log)$ ” do corpo de prova CPRP-D.

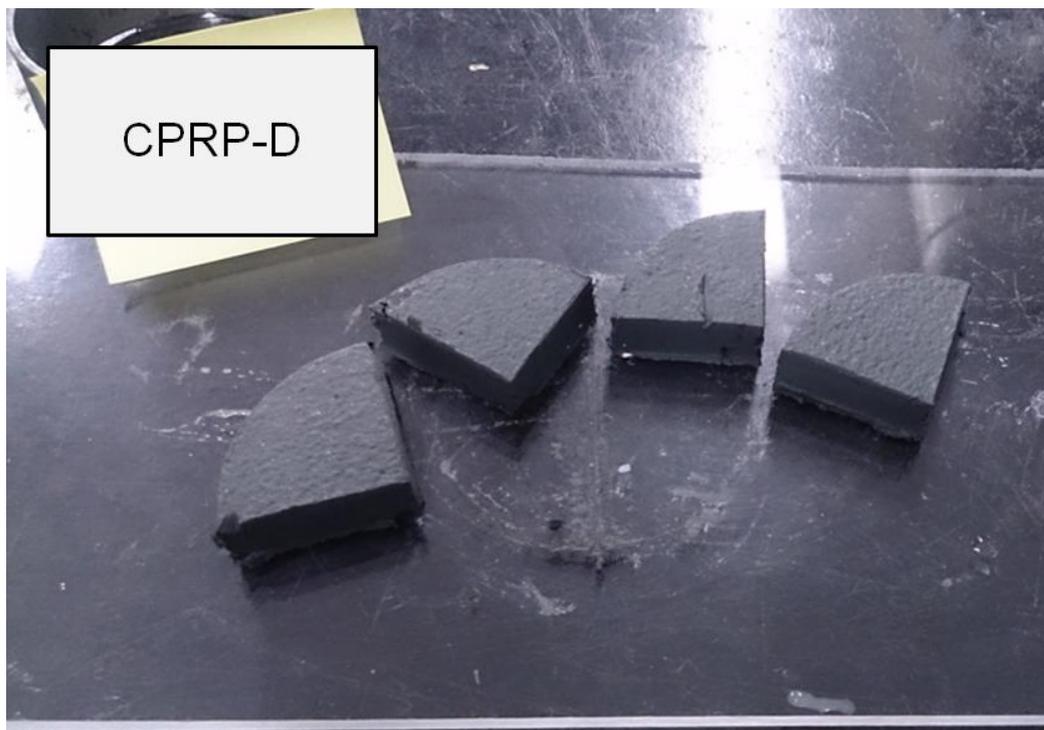


Figura 4.17 – Inspeção do corpo de prova CPRP-D após o ensaio.

Relatório de inspeção: Pequena quantidade de fragmentos de conchas no centro do corpo de prova.

## 4.2.6.

## Corpo de prova CPNR-B

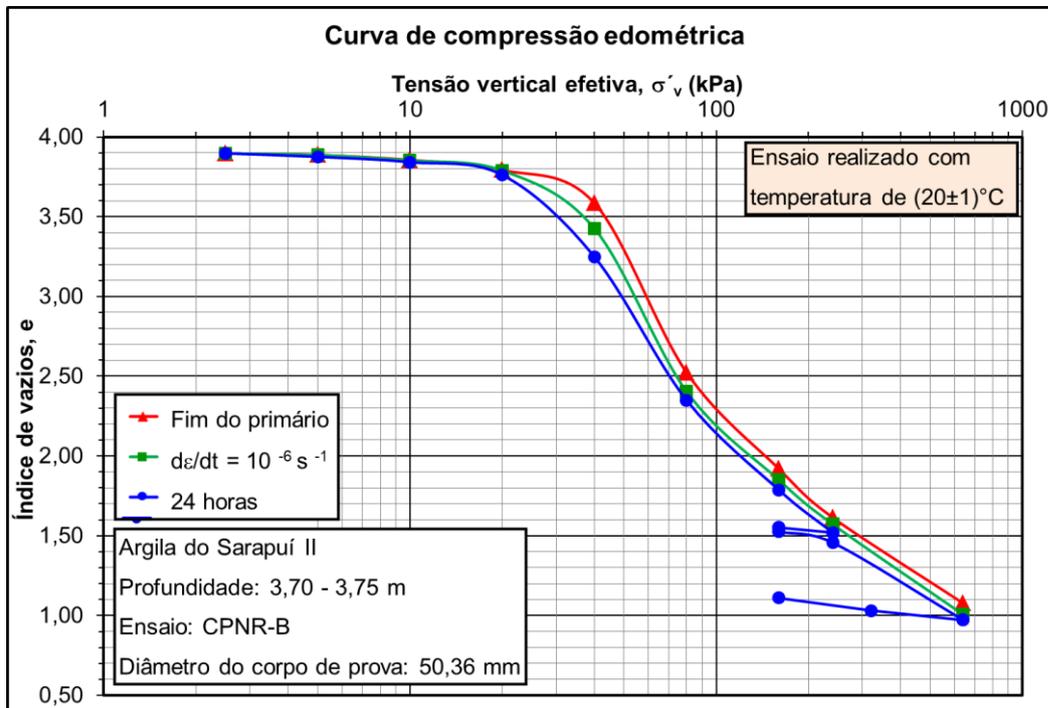


Figura 4.18 – Curvas de compressão edométrica “ $e \times \sigma'_v$  (log)” do corpo de prova CPNR-B.

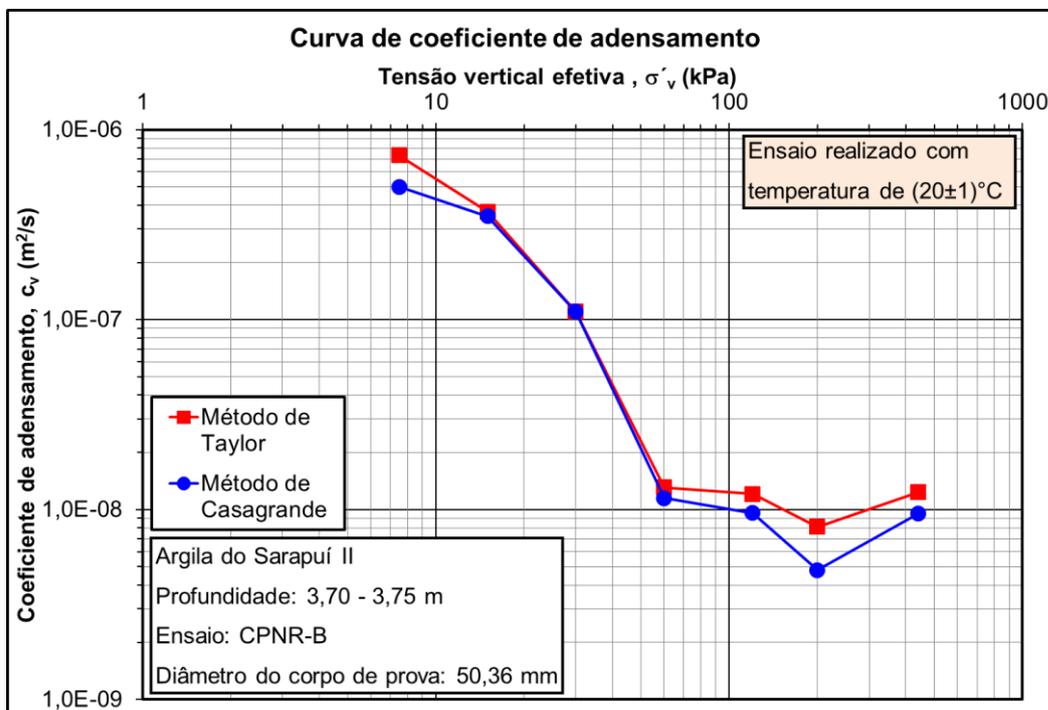


Figura 4.19 – Curvas de coeficiente de adensamento “ $c_v$  (log)  $\times \sigma'_{v \text{ médio}}$  (log)” do corpo de prova CPNR-B.

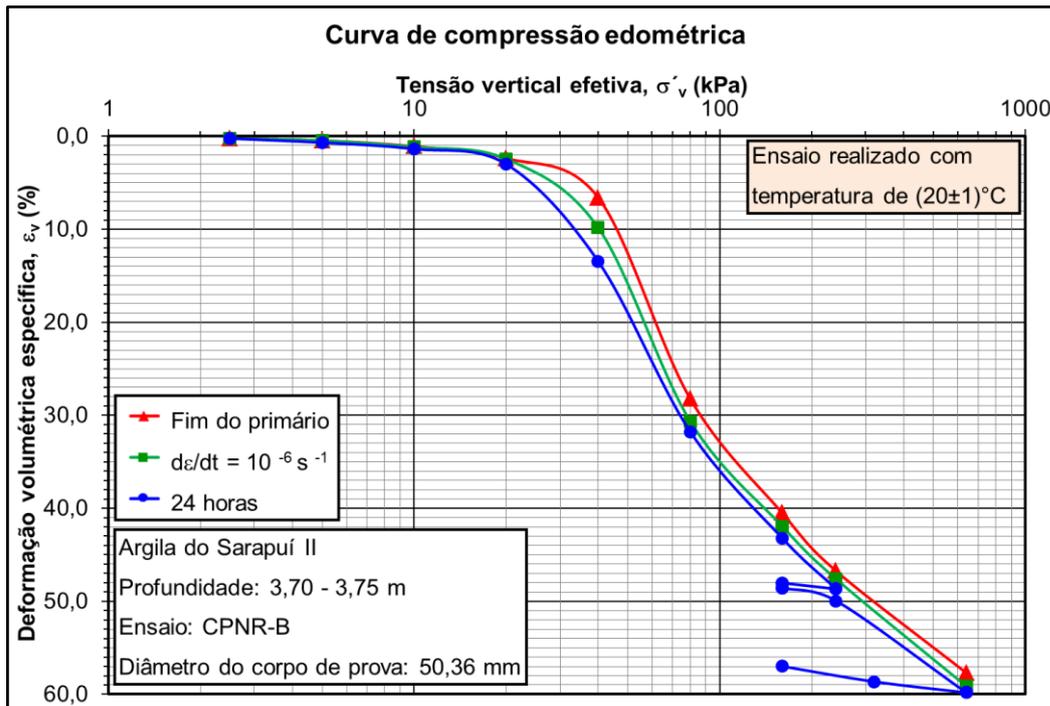


Figura 4.20 – Curvas de compressão edométrica “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v(\log)$ ” do corpo de prova CPNR-B.

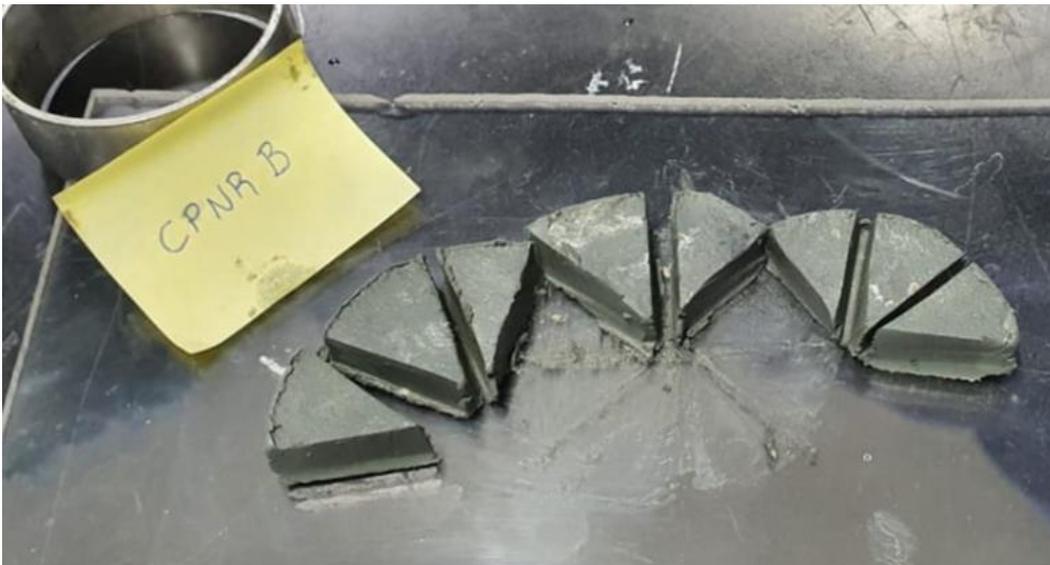


Figura 4.21 – Inspeção do corpo de prova CPNR-B após o ensaio.

Relatório de inspeção: Observou-se a presença de uma concha próxima ao topo do corpo de prova durante a sua moldagem.

## 4.2.7.

## Corpo de prova CPNR-C

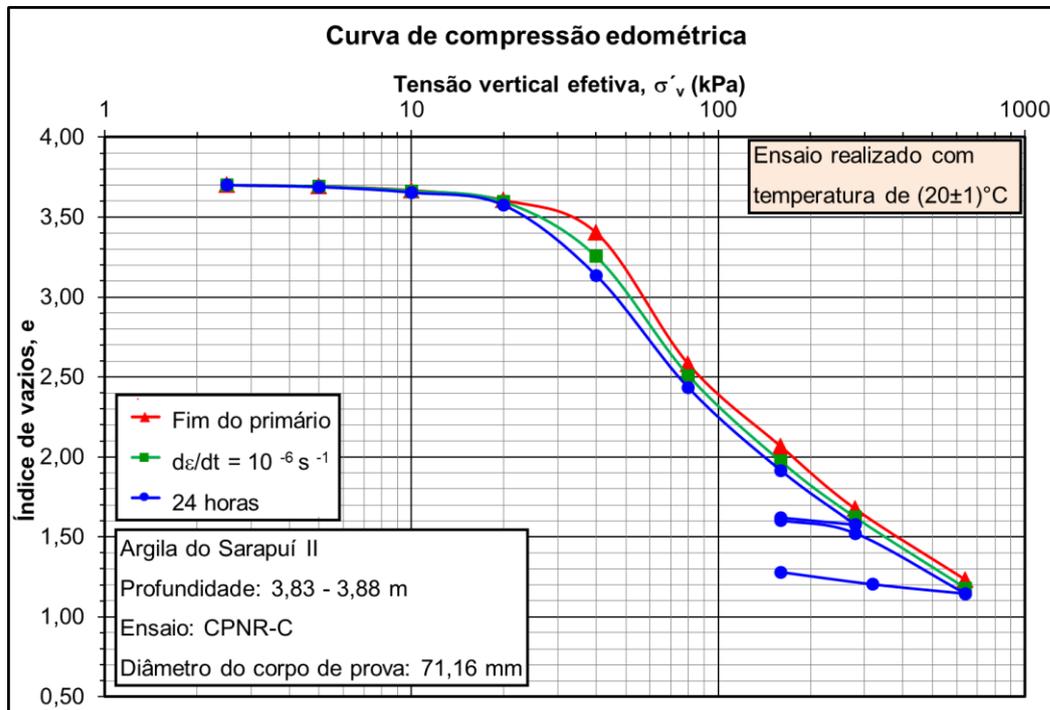


Figura 4.22 – Curvas de compressão edométrica “ $e \times \sigma'_v$  (log)” do corpo de prova CPNR-C.

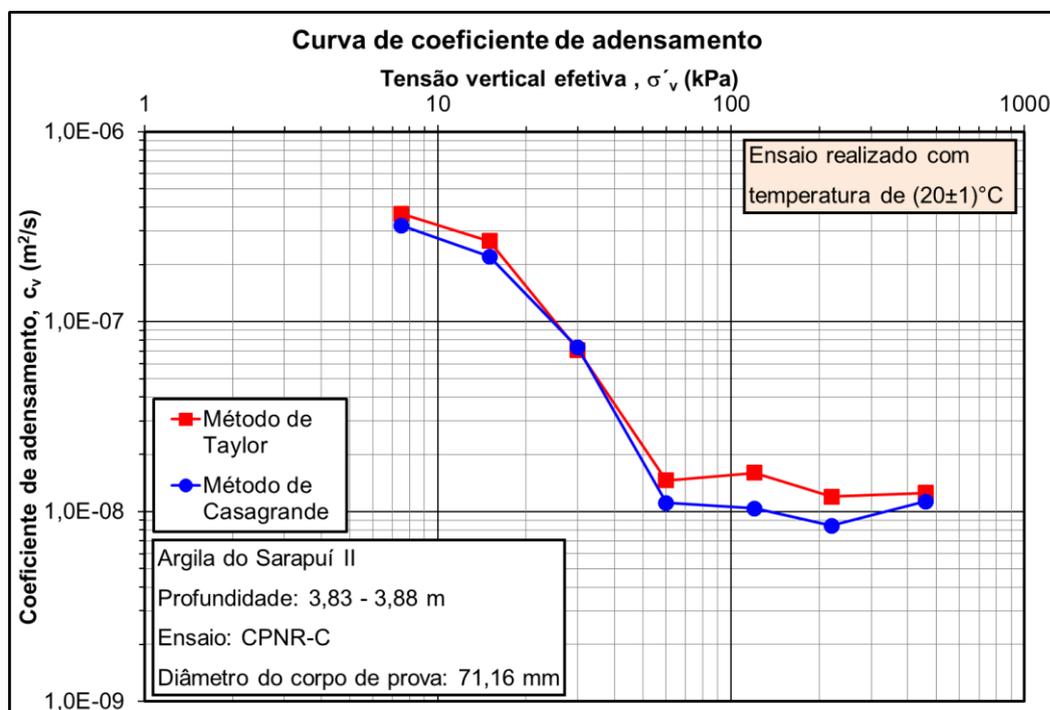


Figura 4.23 – Curvas de coeficiente de adensamento “ $c_v$  (log)  $\times \sigma'_v$  médio (log)” do corpo de prova CPNR-C.

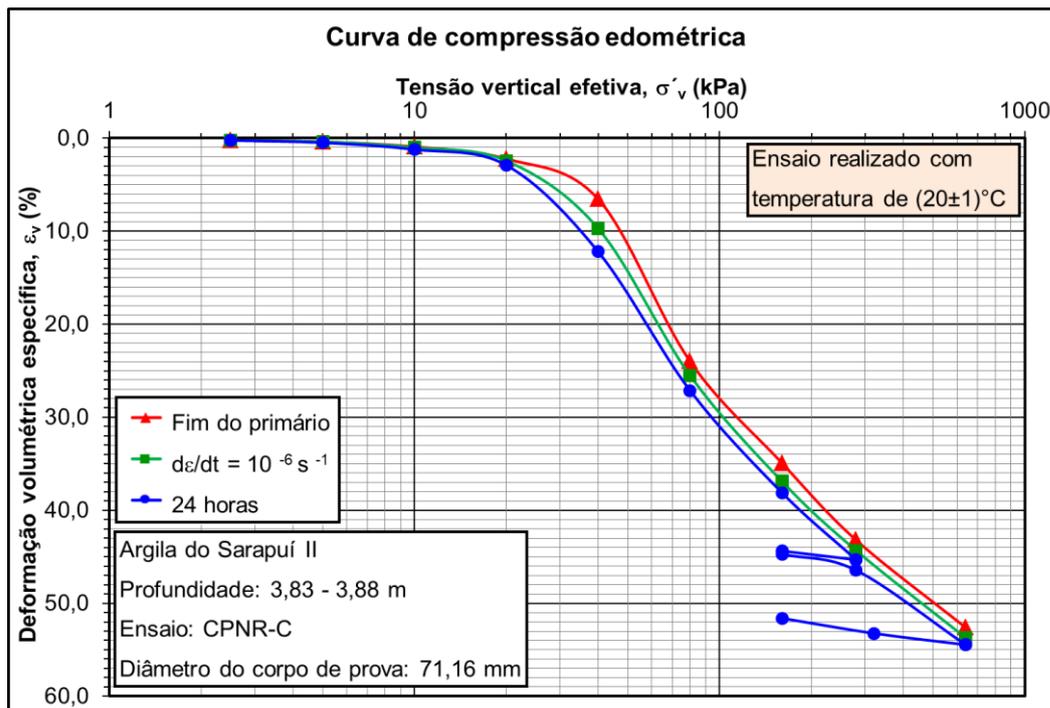


Figura 4.24 – Curvas de compressão edométrica “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v(\log)$ ” do corpo de prova CPNR-C.



Figura 4.25 – Inspeção do corpo de prova CPNR-C após o ensaio.

Relatório de inspeção: Presença de uma concha e de pequenos fragmentos de conchas.

## 4.2.8.

## Corpo de prova CPNR-D

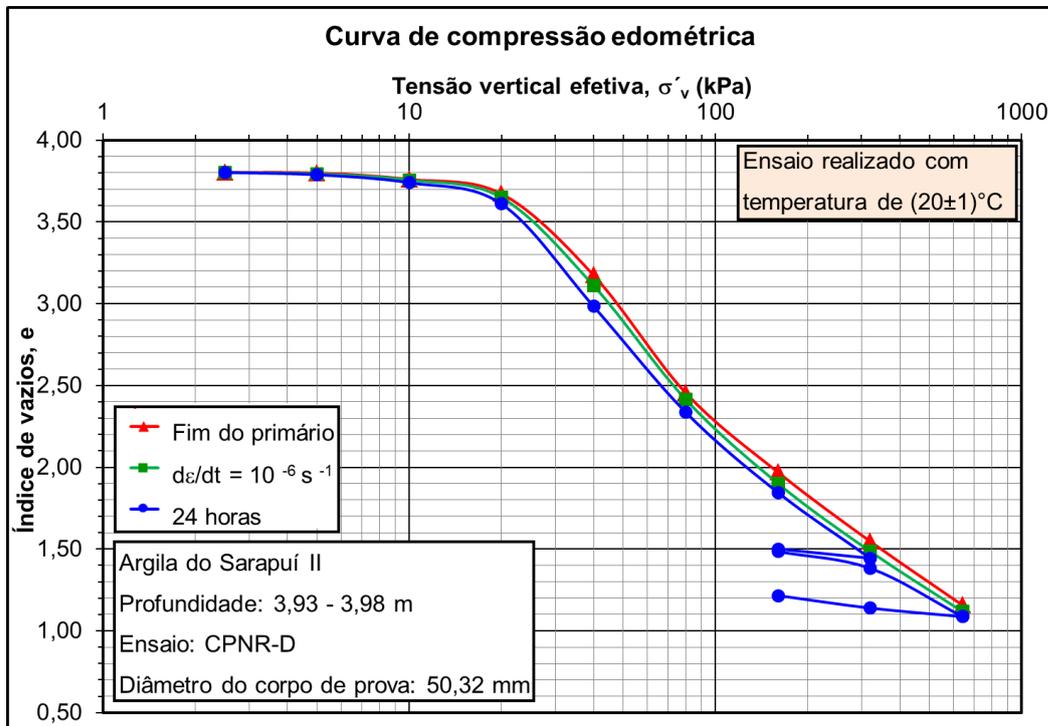


Figura 4.26 – Curvas de compressão edométrica “ $e \times \sigma'_v$  (log)” do corpo de prova CPNR-D.

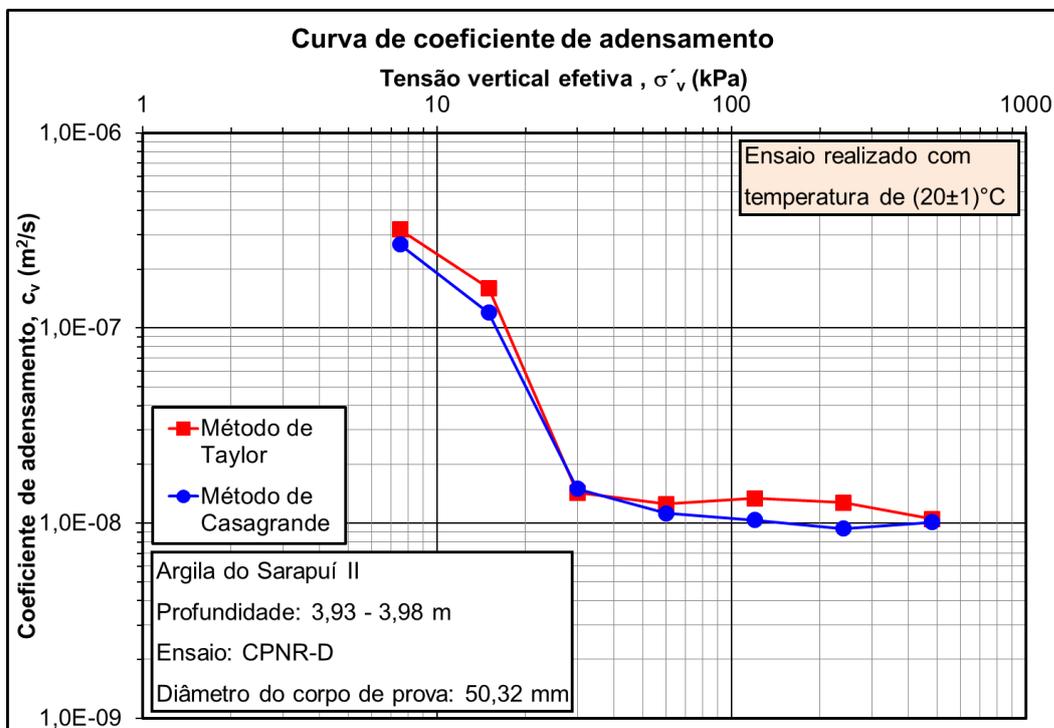


Figura 4.27 – Curvas de coeficiente de adensamento “ $c_v$  (log)  $\times \sigma'_{v \text{ médio}}$  (log)” do corpo de prova CPNR-D.

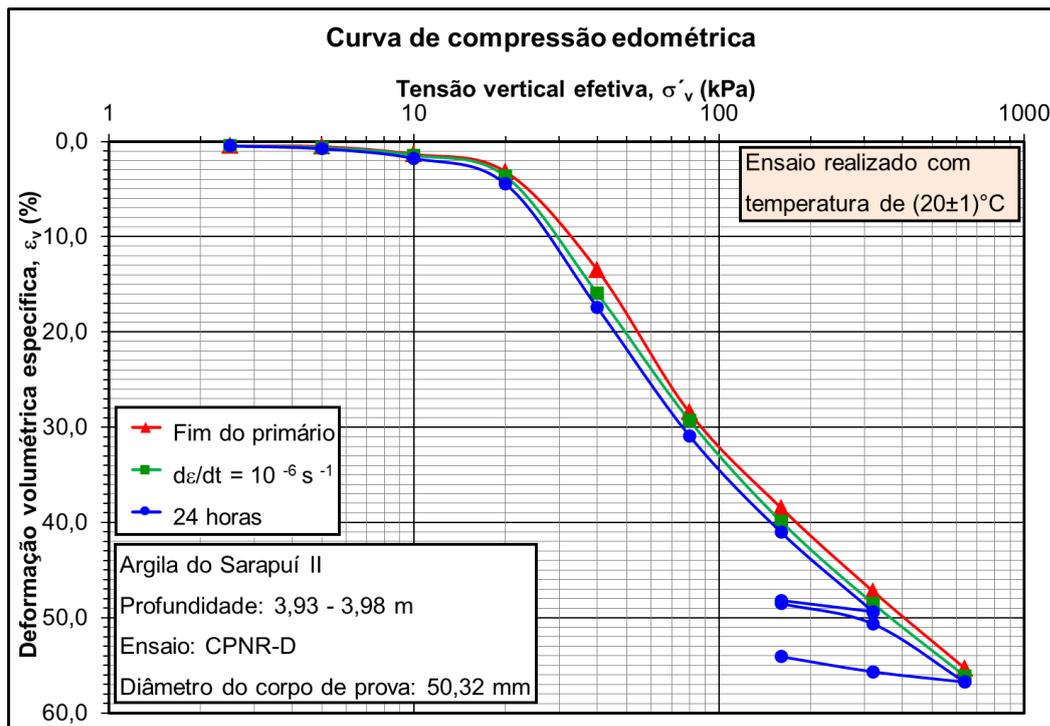


Figura 4.28 – Curvas de compressão edométrica “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v(\log)$ ” do corpo de prova CPNR-D.

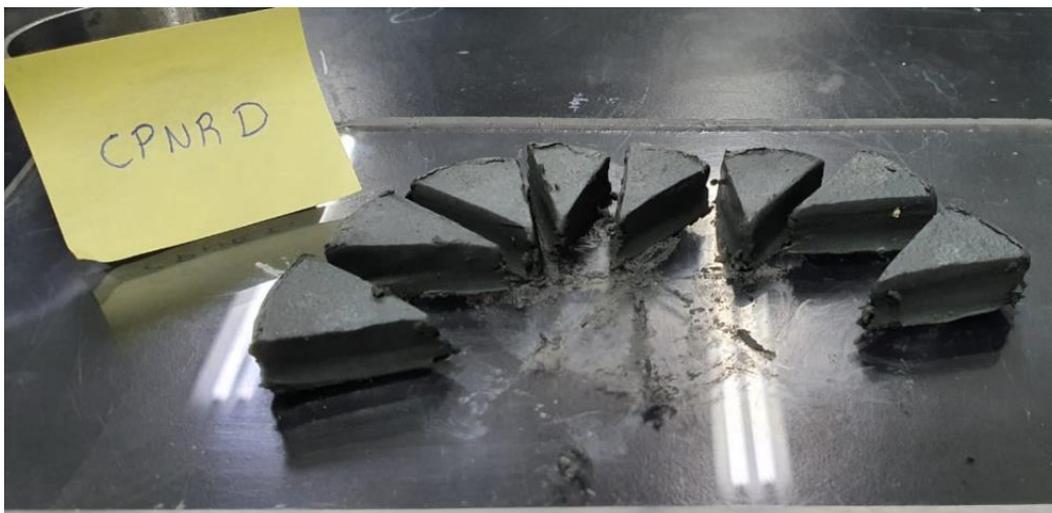


Figura 4.29 – Inspeção do corpo de prova CPNR-D após o ensaio.

Relatório de inspeção: Presença de um fragmento de concha dentro do corpo de prova.

## 4.2.9.

## Corpo de prova CPNR-F

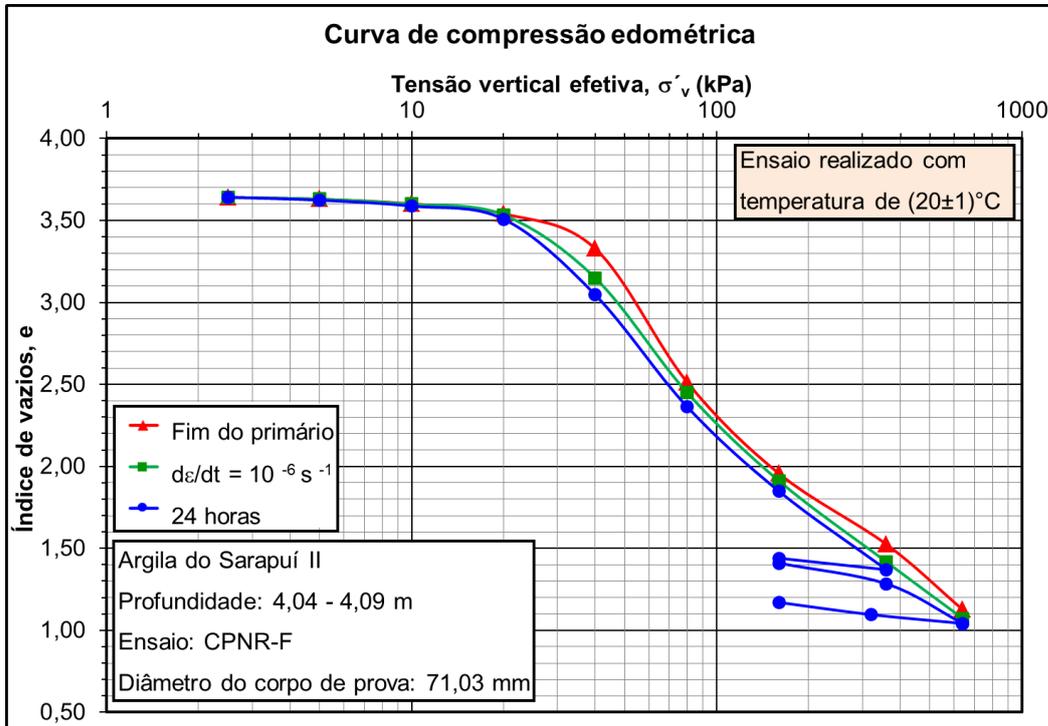


Figura 4.30 – Curvas de compressão edométrica “ $e \times \sigma'_v(\log)$ ” do corpo de prova CPNR-F.

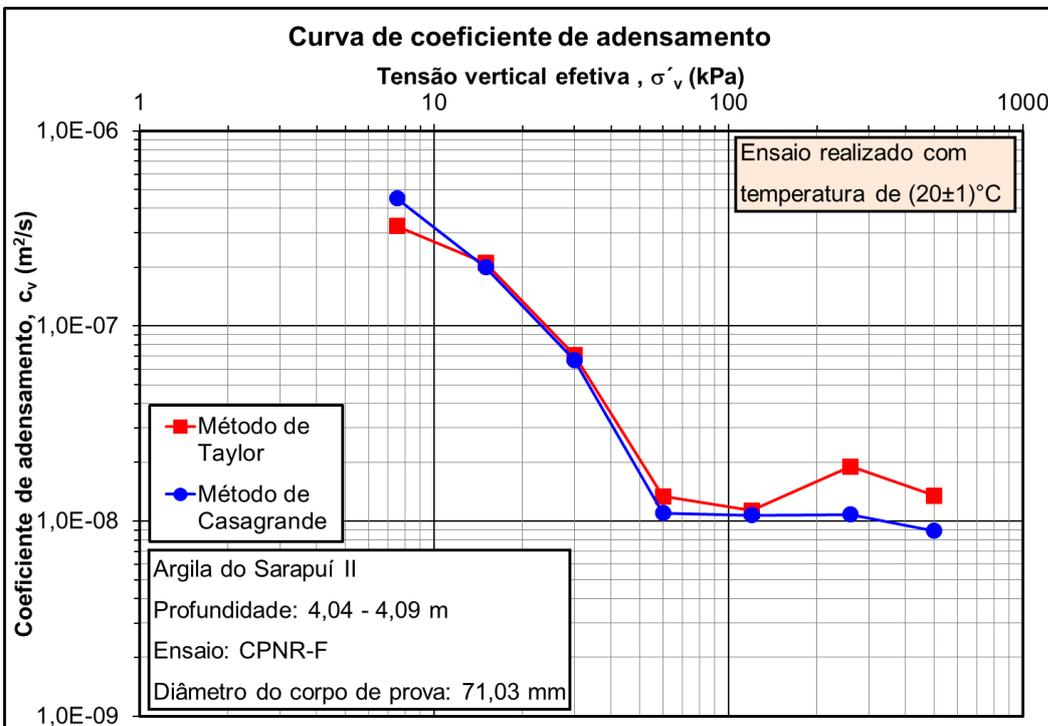


Figura 4.31 – Curvas de coeficiente de adensamento “ $c_v(\log) \times \sigma'_{v \text{ médio}}(\log)$ ” do corpo de prova CPNR-F.

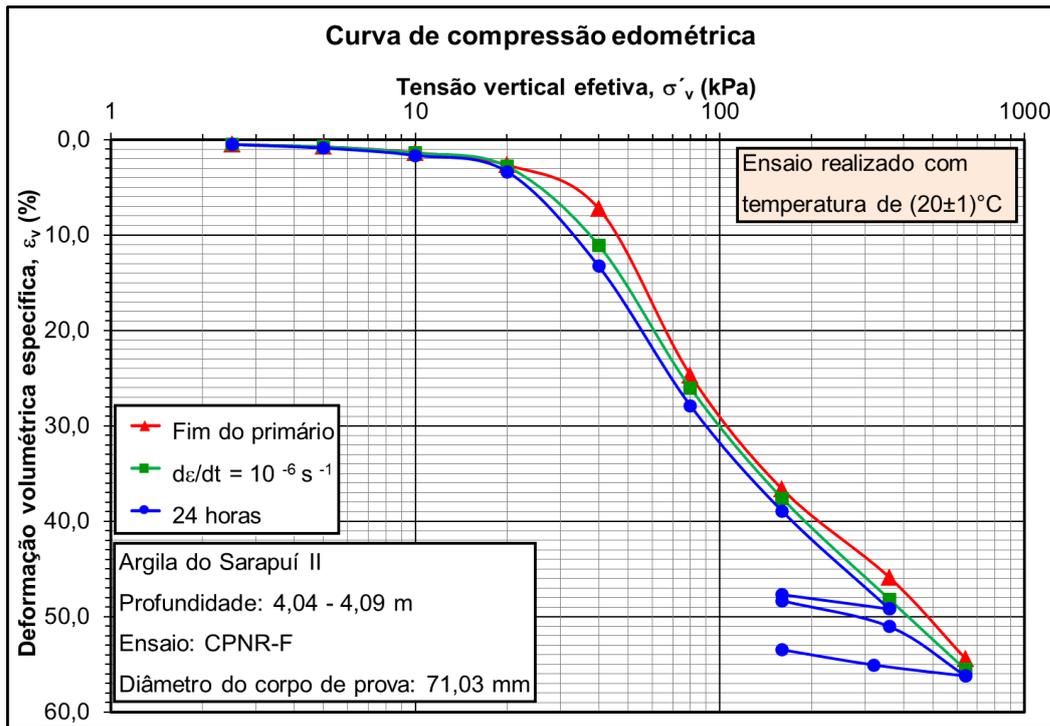


Figura 4.32 – Curvas de compressão edométrica “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v(\log)$ ” do corpo de prova CPNR-F.

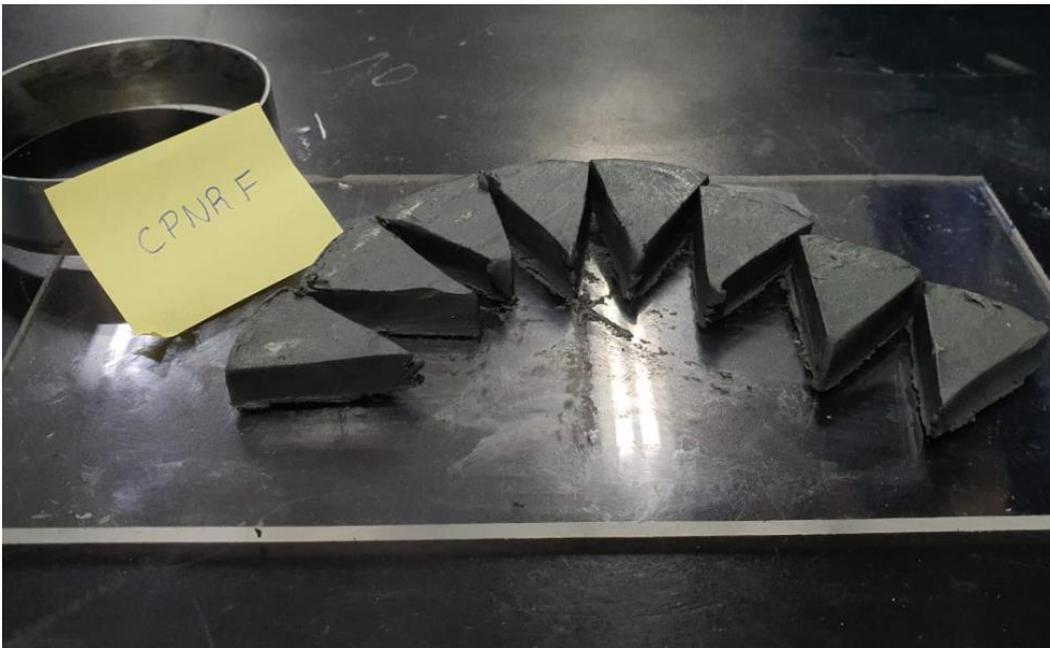


Figura 4.33 – Inspeção do corpo de prova CPNR-F após o ensaio.

Relatório de inspeção: Sem indícios de fragmentos de conchas ou de outros materiais anômalos.

## 4.2.10.

## Corpo de prova CPNR-E

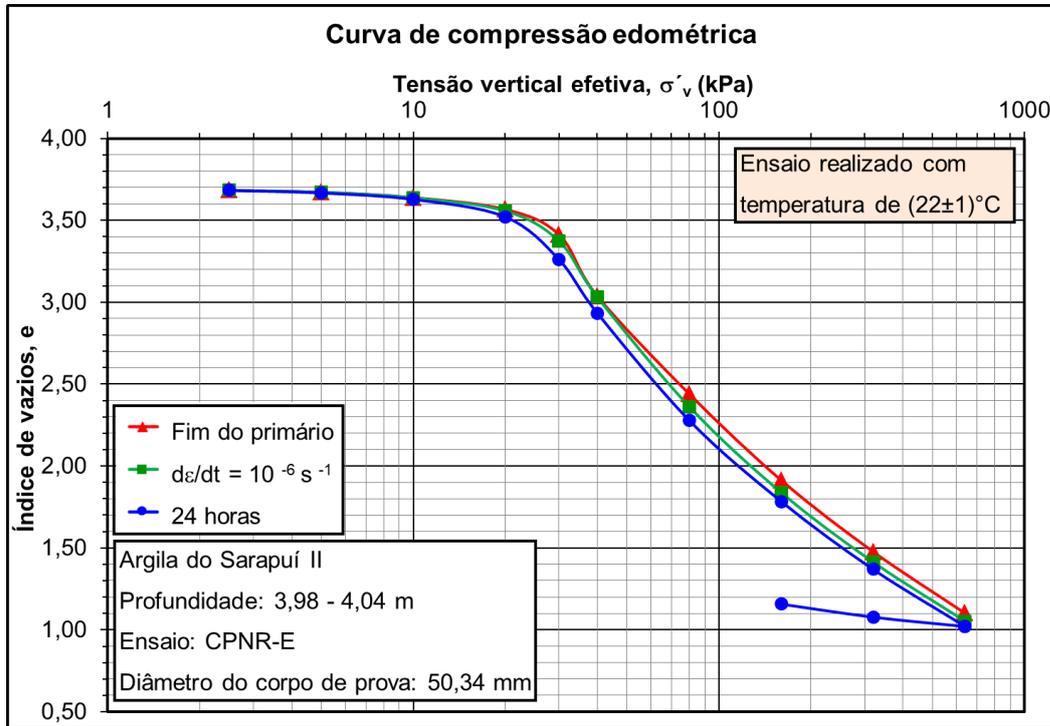


Figura 4.34 – Curvas de compressão edométrica “ $e \times \sigma'_v$  (log)” do corpo de prova CPNR-E.

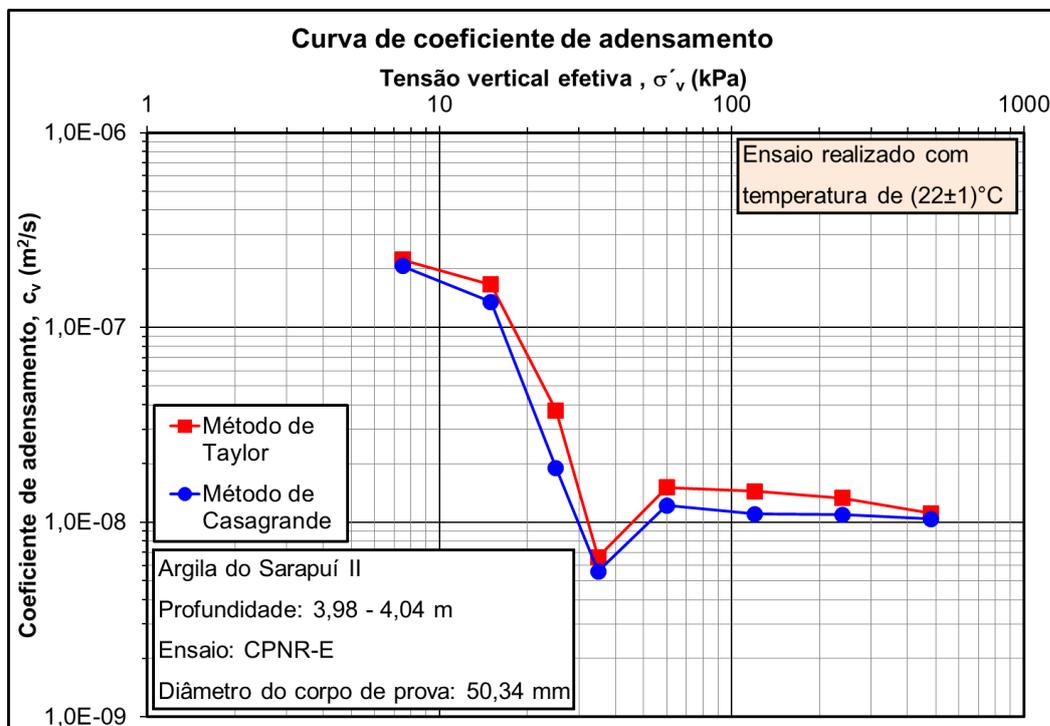


Figura 4.35 – Curvas de coeficiente de adensamento “ $c_v$  (log)  $\times \sigma'_{v \text{ médio}}$  (log)” do corpo de prova CPNR-E.

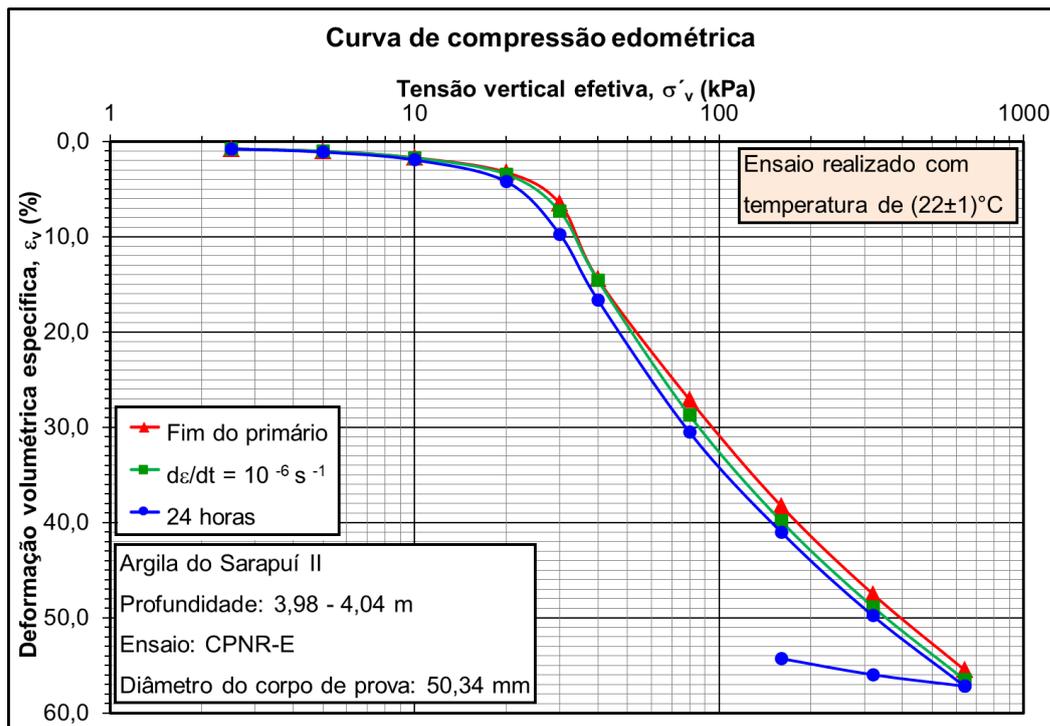


Figura 4.36 – Curvas de compressão edométrica “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v(\log)$ ” do corpo de prova CPNR-E.

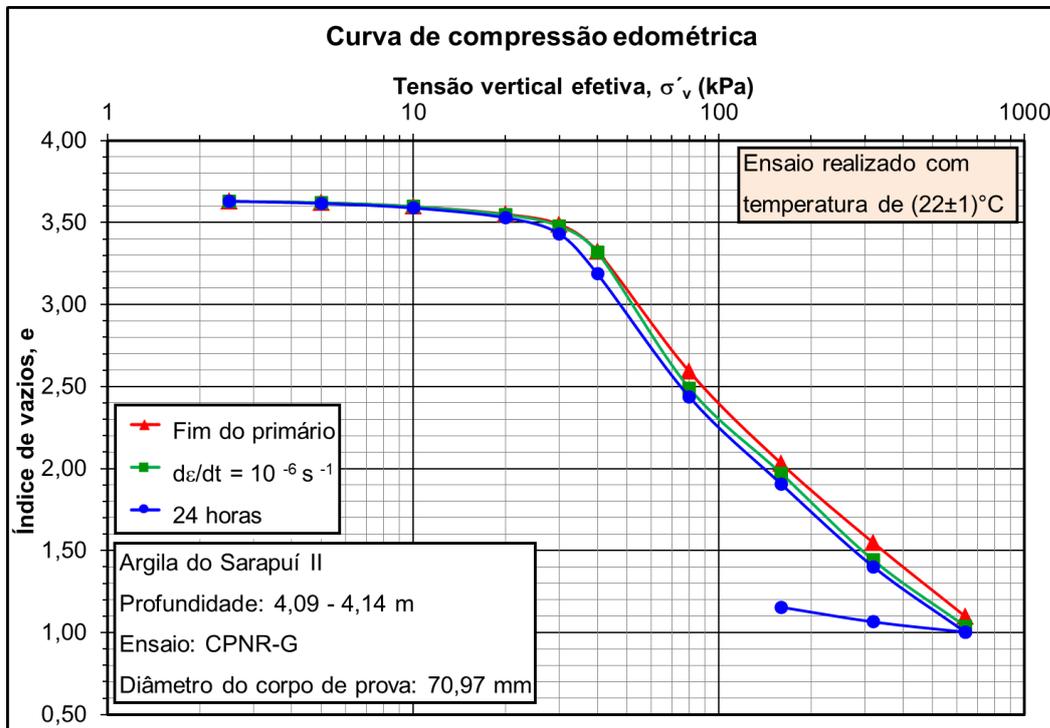
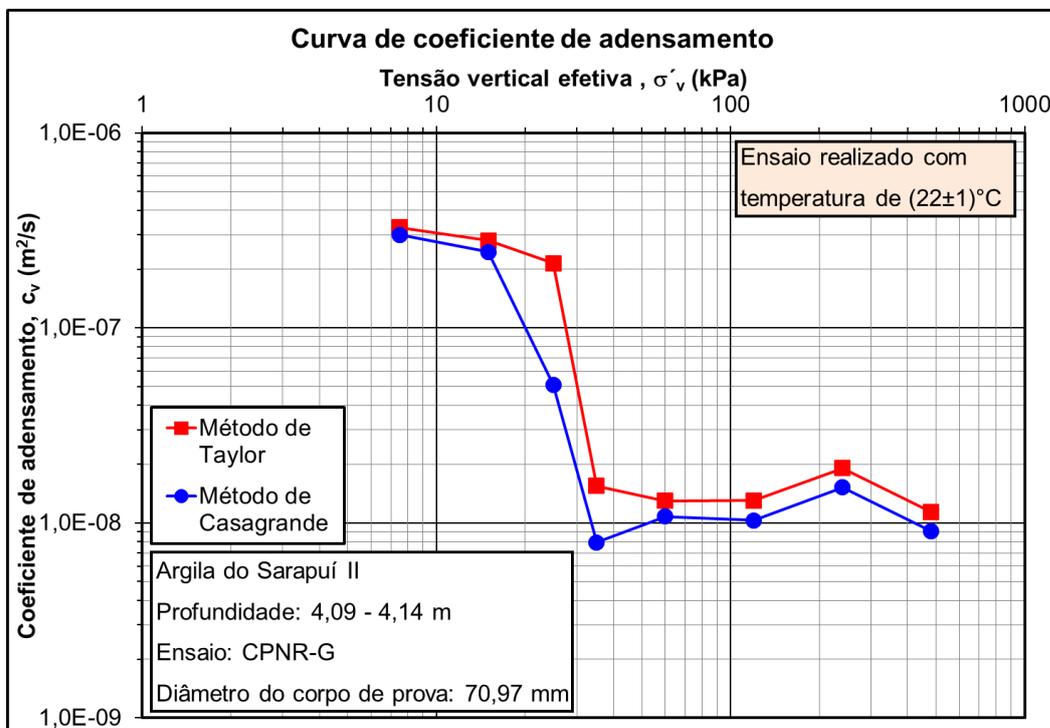


Figura 4.37 – Inspeção do corpo de prova CPNR-E após o ensaio.

Relatório de inspeção: Sem indícios de fragmentos de conchas ou de outros materiais anômalos.

## 4.2.11.

## Corpo de prova CPNR-G

Figura 4.38 – Curvas de compressão edométrica “ $e \times \sigma'_v$  (log)” do corpo de prova CPNR-G.Figura 4.39 – Curvas de coeficiente de adensamento “ $c_v$  (log) x  $\sigma'_v$  médio (log)” do corpo de prova CPNR-G.

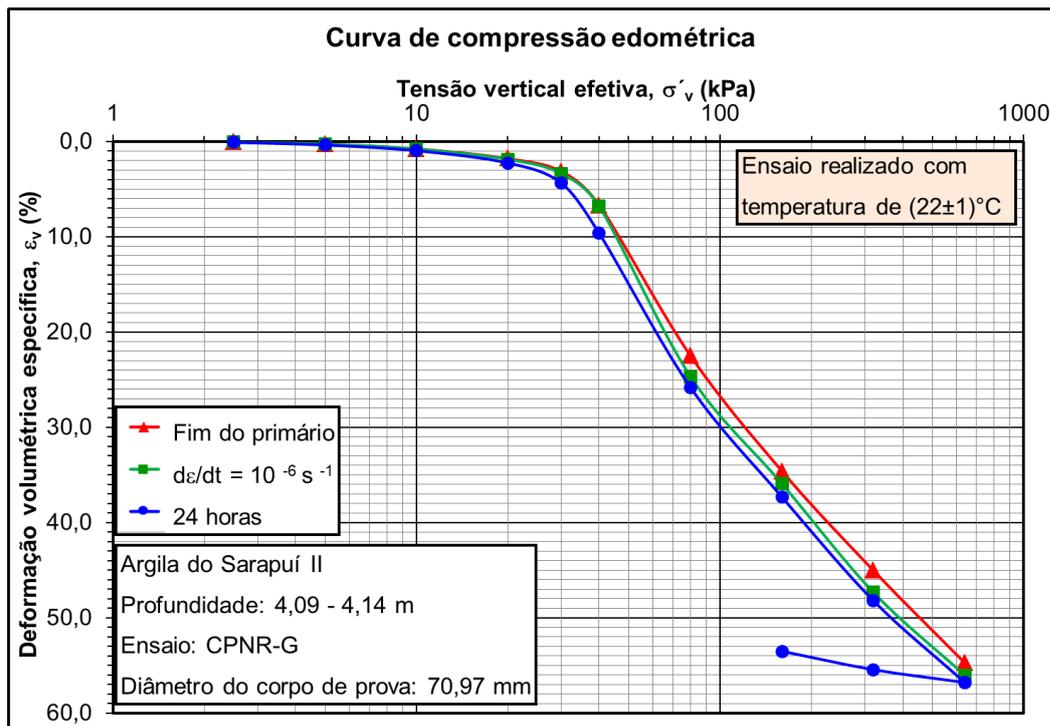


Figura 4.40 – Curvas de compressão edométrica “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v(\log)$ ” do corpo de prova CPNR-G.



Figura 4.41 – Inspeção do corpo de prova CPNR-G após o ensaio.

Relatório de inspeção: Pequena quantidade de fragmentos de conchas no centro do corpo de prova.

## 4.2.12.

## Corpo de prova CPNR-H

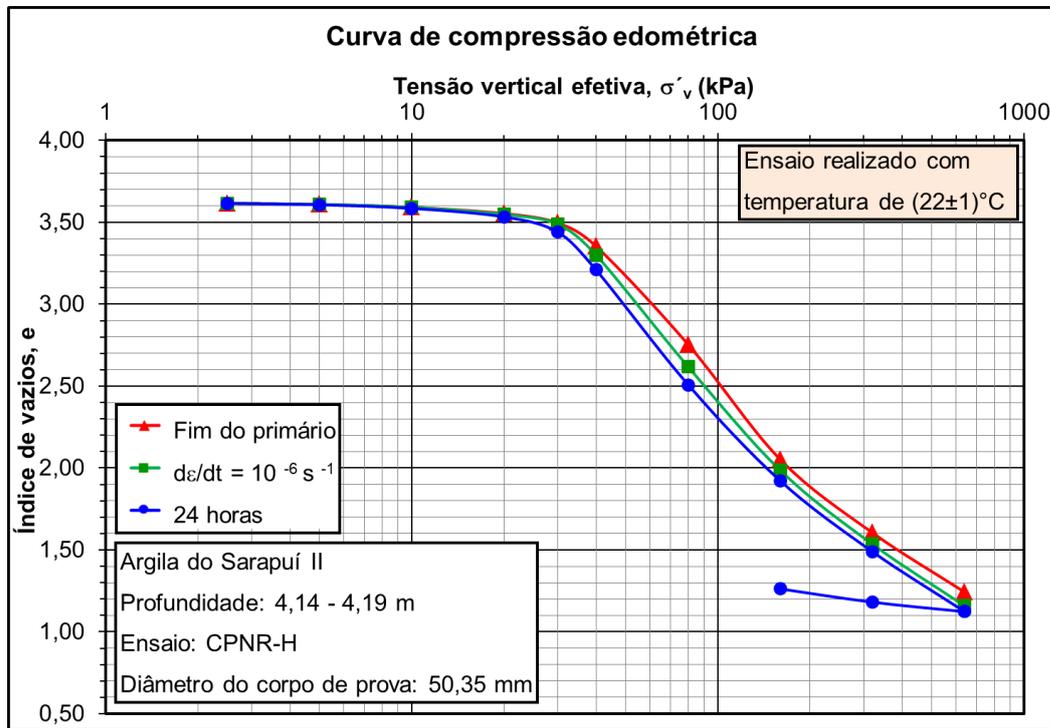


Figura 4.42 – Curvas de compressão edométrica “ $e \times \sigma'_v$  (log)” do corpo de prova CPNR-H.

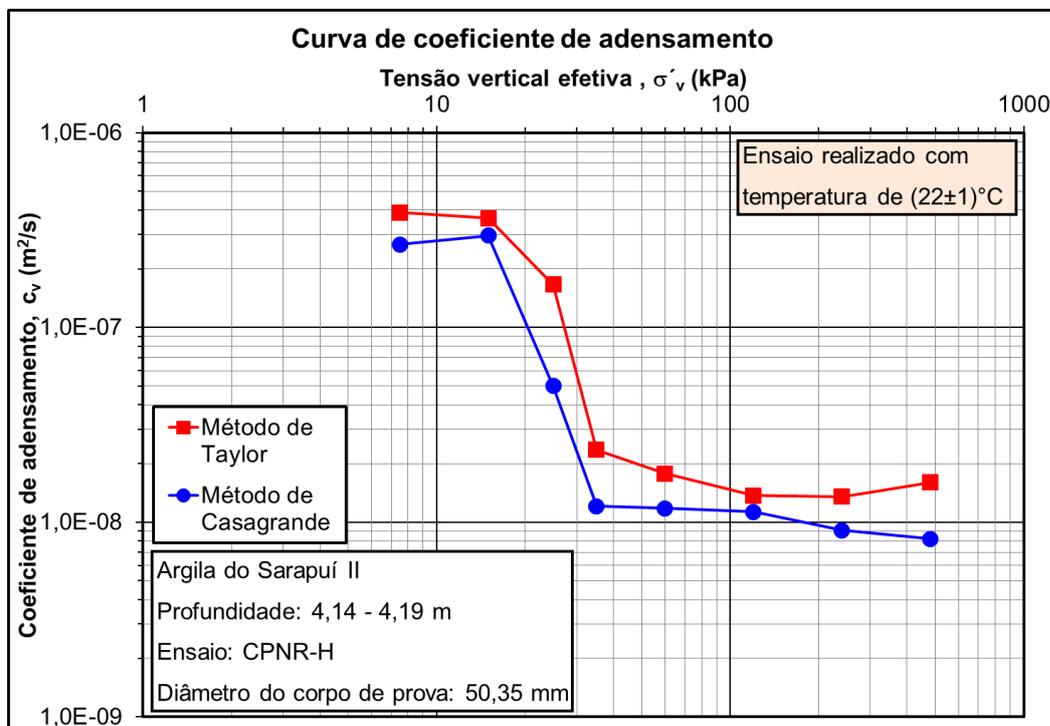


Figura 4.43 – Curvas de coeficiente de adensamento “ $c_v$  (log)  $\times \sigma'_{v \text{ médio}}$  (log)” do corpo de prova CPNR-H.

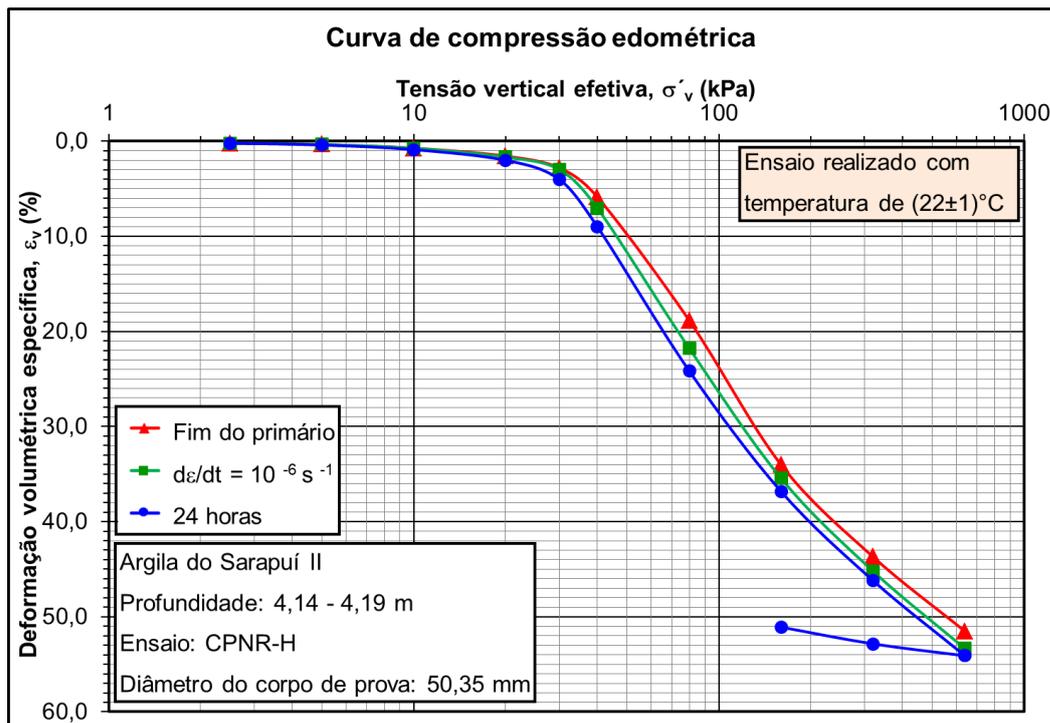


Figura 4.44 – Curvas de compressão edométrica “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v(\log)$ ” do corpo de prova CPNR-H.

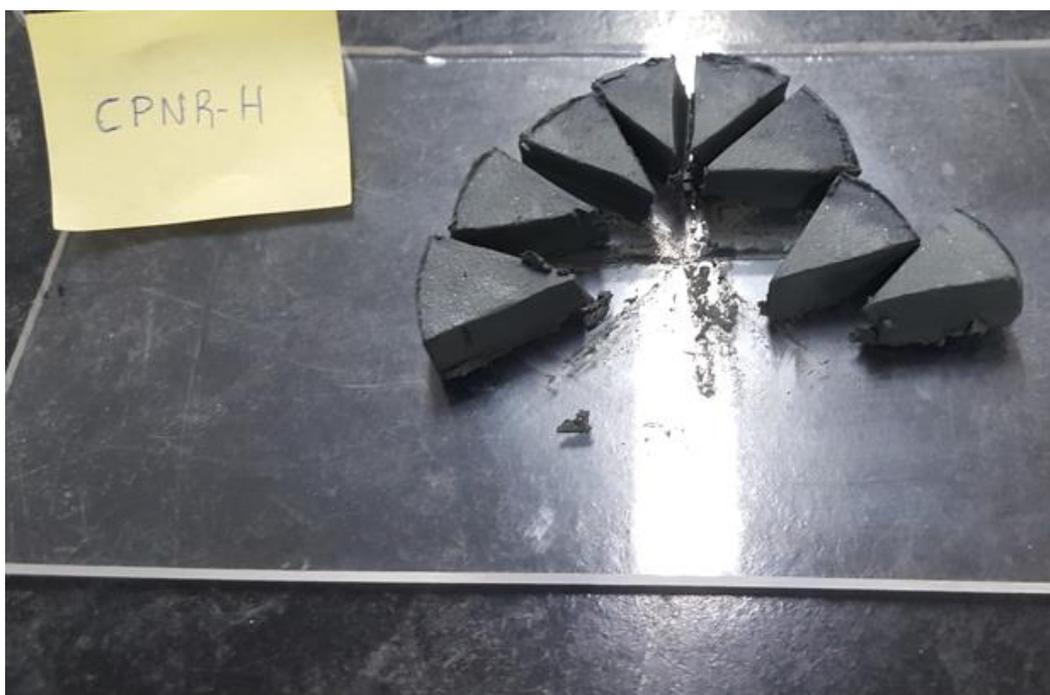


Figura 4.45 – Inspeção do corpo de prova CPNR-H após o ensaio.

Relatório de inspeção: Sem indícios de fragmentos de conchas ou outros materiais anômalos.

## 4.2.13.

## Corpo de prova CPNR-RM1

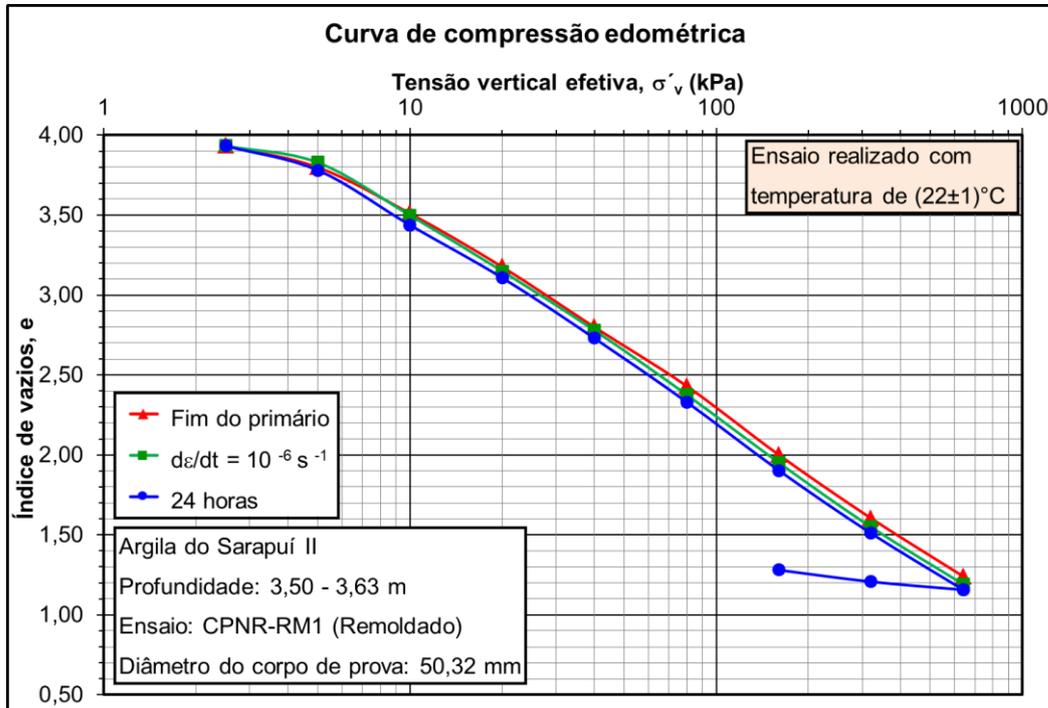


Figura 4.46 – Curvas de compressão edométrica “ $e$  x  $\sigma'_v$  (log)” do corpo de prova CPNR-RM1.

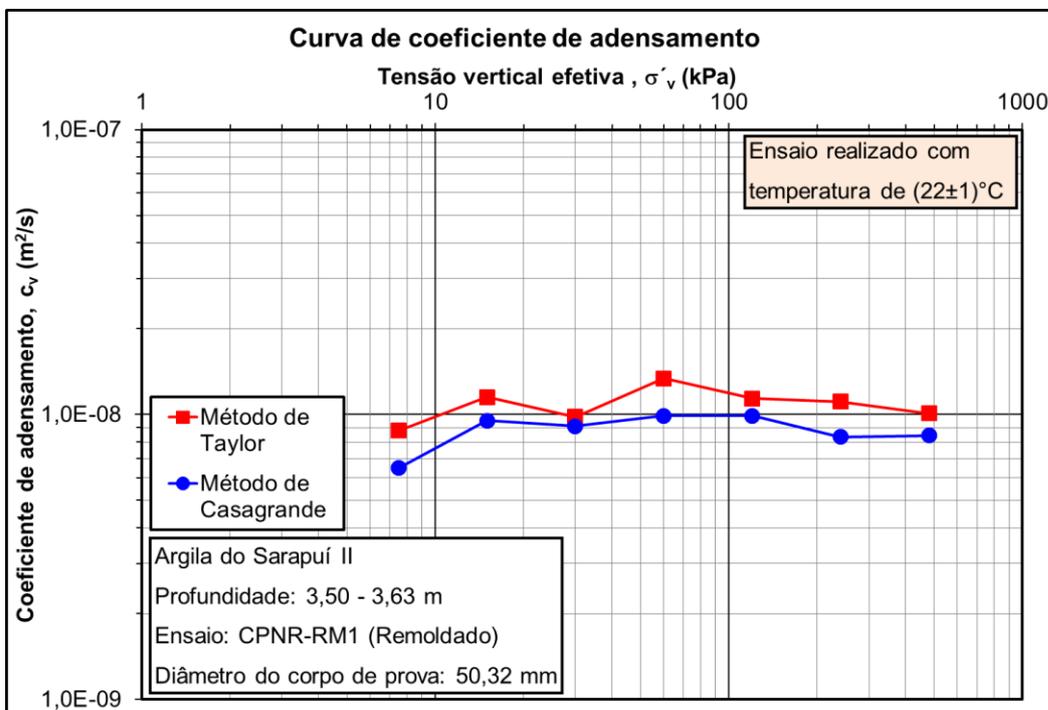


Figura 4.47 – Curvas de coeficiente de adensamento “ $c_v$  (log) x  $\sigma'_v$  médio (log)” do corpo de prova CPNR-RM1.

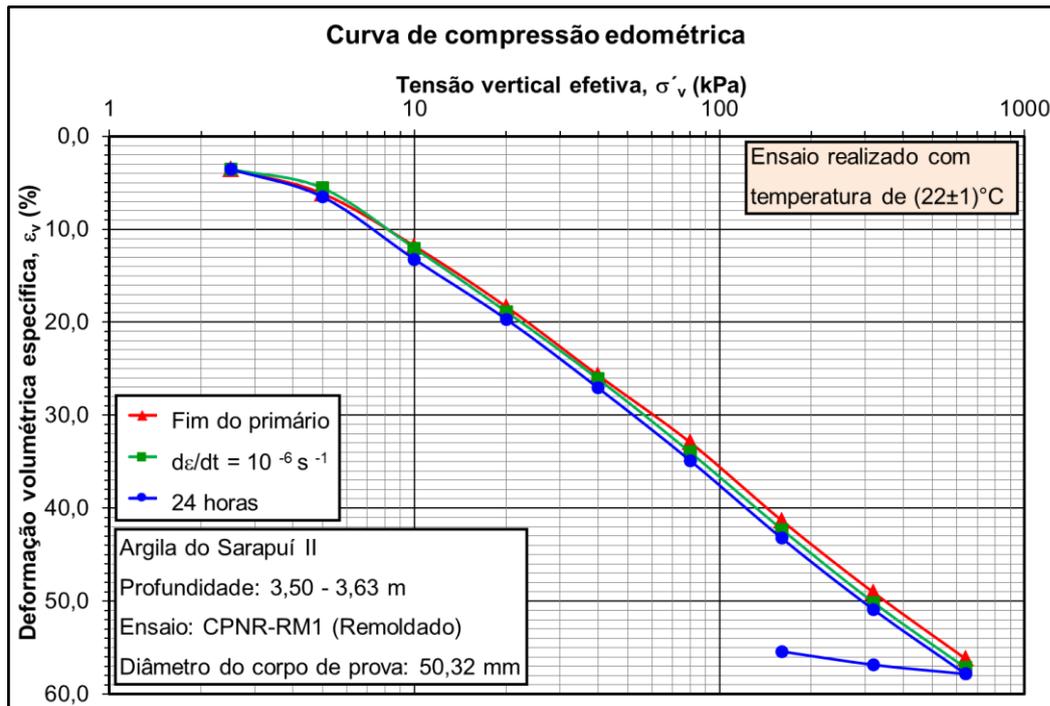


Figura 4.48 – Curvas de compressão edométrica “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v(\log)$ ” do corpo de prova CPNR-RM1.

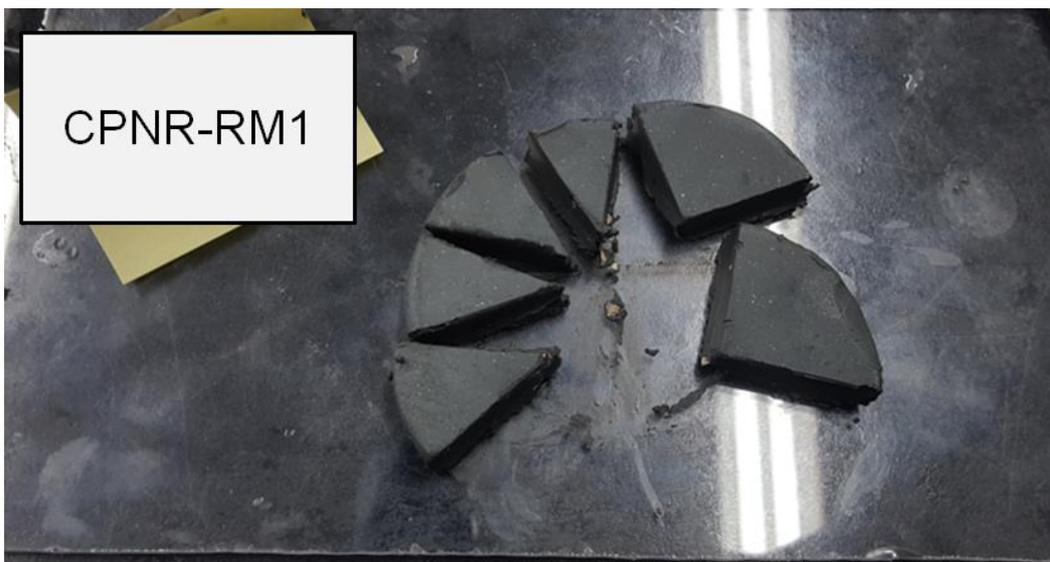


Figura 4.49 – Inspeção do corpo de prova CPNR-RM1 após o ensaio.

Relatório de inspeção: Grande quantidade de fragmentos de conchas.

## 4.2.14.

## Corpo de prova CPNR-RM2

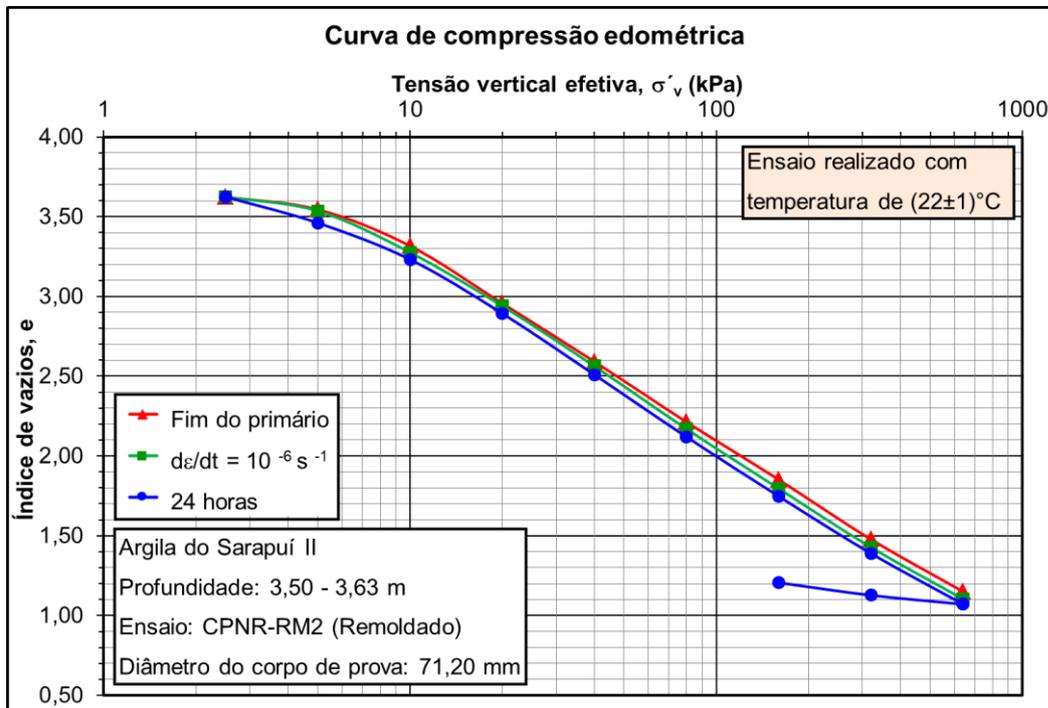


Figura 4.50 – Curvas de compressão edométrica “ $e \times \sigma'_v$  (log)” do corpo de prova CPNR-RM2.

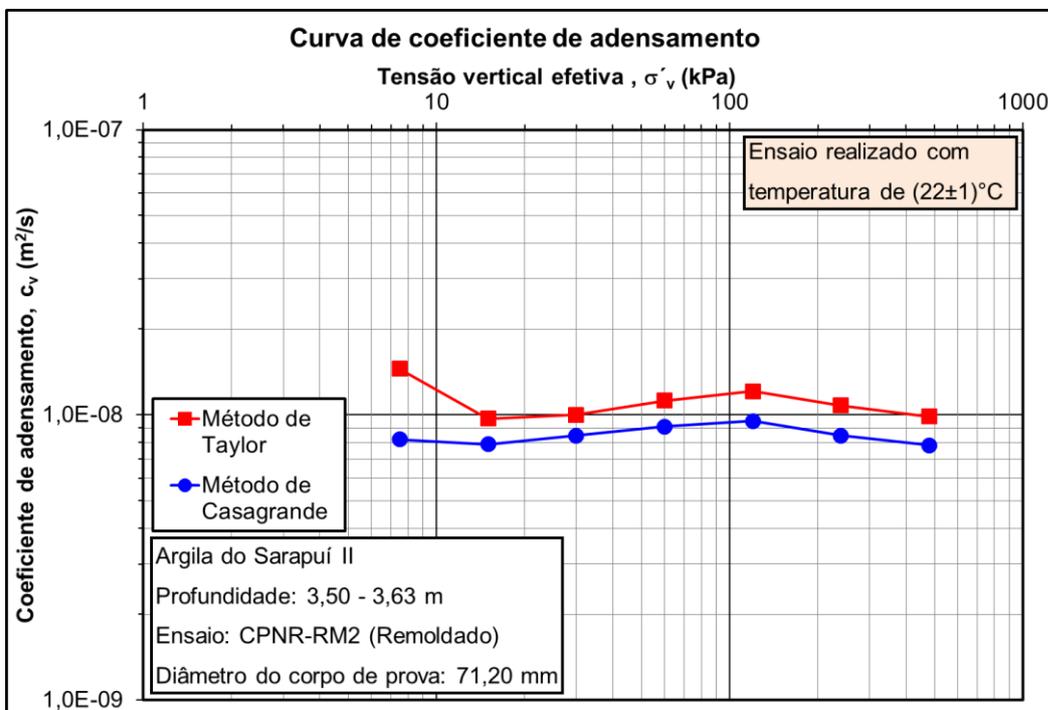


Figura 4.51 – Curvas de coeficiente de adensamento “ $c_v$  (log)  $\times \sigma'_{v \text{ médio}}$  (log)” do corpo de prova CPNR-RM2.

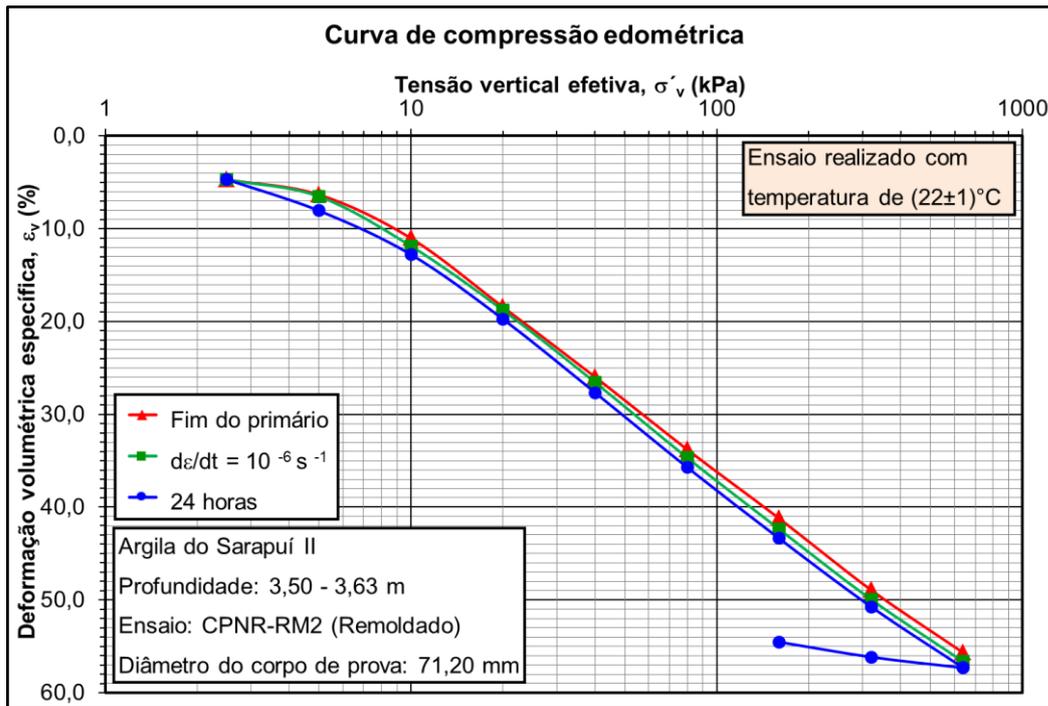


Figura 4.52 – Curvas de compressão edométrica “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v(\log)$ ” do corpo de prova CPNR-RM2.



Figura 4.53 – Inspeção do corpo de prova CPNR-RM2 após o ensaio.

Relatório de inspeção: Grande quantidade de fragmentos de conchas.

#### 4.2.15.

#### Teor de umidade ao longo do raio da amostra

Os procedimentos seguidos para determinação do teor de umidade ao longo do raio da amostra foram detalhados no item 3.6 “Materiais e métodos”.

Na Tabela 4.7, a seguir, são apresentados os resultados dos ensaios realizados no corpo de prova CPRP-WN1, moldado na amostra NGI-RP, extraída com o amostrador que teve a parede interna revestida com o FEP, e nos corpos de prova CPNR-WN1 e CPNR-WN2, moldados na amostra NGI-NR, extraída com o amostrador que não teve a parede interna revestida. A Tabela 4.8 indica o intervalo de tempo compreendido entre a cravação da amostrador no campo e a determinação do teor de umidade no laboratório ( $\Delta t$ ) dos referidos corpos de prova.

Tabela 4.7 – Teor de umidade ao longo do raio das amostras NGI-RP e NGI-NR.

Ensaio/ Corpo de prova	Teor de umidade, $w_n$ (%)		
	Região 1	Região 2	Região 3
	Raio: 35,50 a 26,70 (mm)	Raio: 25,18 a 15,89 (mm)	Raio: 14,84 a 0,00 (mm)
CPRP-WN1	140,9	143,7	144,2
CPNR-WN1	148,5	148,3	142,4
CPNR-WN2	137,8	133,0	133,9

Tabela 4.8 – Intervalo de tempo compreendido entre a cravação da amostrador no campo e a determinação do teor de umidade no laboratório.

Ensaio/ Corpo de prova	Profundidade (m)	$\Delta t$ (horas/dias)
CPRP-WN1	3,90 - 3,95	1320 / 55
CPNR-WN1	3,75 - 3,80	21 / 1
CPNR-WN2	3,88 - 3,93	24 / 1

Da Tabela 4.7, observa-se que o corpo de prova CPRP-WN1 apresentou um resultado de variação do teor de umidade com o raio condizente com fenômeno descrito no item 3.6 – “Materiais e métodos”, com base em Bjerrum (1973), isto é, teores de umidade tanto maiores quanto menores os raios de delimitação das regiões.

Por outro lado, os corpos de prova CPNR-WN1 e CPNR-WN2 não apresentaram os resultados esperados. O corpo de prova CPNR-WN1 apresentou um teor de umidade menor na região 3 do que nas regiões 1 e 2, ao passo que o corpo de prova CPNR-WN2 apresentou um teor de umidade maior na região 1 do que nas regiões 2 e 3. Ou seja, ambos os corpos de prova apresentaram teor de umidade maior na periferia da amostra (região 1) do que no centro da amostra (região 3).

Nos corpos de prova CPNR-WN1 e CPNR-WN2, o que poderia ser esperado era uma menor variação do teor de umidade com o raio em relação ao CPRP-WN1 devido ao tratamento interno do amostrador NGI-NR com o FEP, mas, ainda sim, era esperado um aumento do teor de umidade com a diminuição do raio.

Certamente, o comportamento não esperado nos corpos de prova CPNR-WN1 e CPNR-WN2 não podem ser justificados com base no período  $\Delta t$  muito menor para amostra NGI-NR em relação à amostra NGI-RP, uma vez que mesmo  $\Delta t = 21$  horas é um período suficiente para equalização de grande parte dos excessos de poropressão gerados quando da cravação do amostrador no campo ao longo do raio da amostra, igual a 38,1 mm.

Um dos fatores que pode ter contribuído para a não observação de aumento do teor de umidade com a diminuição do raio nestes corpos de prova foi a presença excessiva de conchas distribuídas de forma heterogênea ao longo da seção transversal.

De qualquer forma, como o padrão esperado de aumento do teor de umidade com a diminuição do raio foi observado em apenas um dos três dos corpos de prova ensaiados, tal comportamento não pode assumir caráter conclusivo nesta pesquisa. Cabe ao autor desta dissertação apenas recomendar que este tipo de investigação seja repetido, ensaiando um número maior de corpos de prova, esculpindo ao longo de um domínio de profundidade maior dentro da amostra, e tomando-se o cuidado de evitar trechos da amostra com grandes quantidades de fragmentos de conchas.

## 5.

### **Análise dos resultados dos ensaios de adensamento edométrico**

#### 5.1.

##### **Considerações iniciais**

Conforme mencionado no item 1.3 “*Objetivos*”, os principais objetivos deste trabalho são:

- 1) Avaliar a qualidade de amostras coletadas do depósito de argila mole do campo experimental Sarapuí II com amostradores tubulares de pistão estacionário Geonor/NGI 76 mm;
- 2) Avaliar o efeito da aplicação do FEP na superfície interna do tubo de amostragem na qualidade da amostra.
- 3) Avaliar a influência do diâmetro do corpo de prova em relação ao diâmetro da amostra na qualidade dos corpos de prova.

Dito isto, neste capítulo, com base na interpretação dos resultados dos ensaios de adensamento edométrico, são analisadas questões relativas aos objetivos supramencionados, além de outros aspectos.

#### 5.2.

##### **Tensão de sobreadensamento e razão de sobreadensamento**

Para todos os ensaios de adensamento edométrico, os valores de tensão de sobreadensamento ( $\sigma'_{vm}$ ) foram determinados pelo método de Silva (1970) nas curvas de compressão edométrica “e *versus*  $\sigma'_v(\log)$ ” plotadas em termos de: “fim do primário”,  $\dot{\epsilon}_v = 10^{-6} \text{ s}^{-1}$  e 24 horas de duração do estágio.

Os valores de tensão de sobreadensamento ( $\sigma'_{vm}$ ), bem como os valores de razão de sobreadensamento (OCR) são apresentados na Tabela 5.1 à Tabela 5.4. A Tabela 5.1 apresenta os valores dos ensaios da bateria EDO-RP, a

Tabela 5.2 apresenta os valores dos ensaios da bateria EDO-NR(SEC), a Tabela 5.3 apresenta os valores dos ensaios da bateria EDO-NR(26D) e a Tabela 5.4 apresenta os valores dos ensaios da bateria EDO-NR(RM), estes últimos realizados em corpos de prova remoldados.

Os valores de OCR foram calculados pela definição:

$$\text{OCR} = \frac{\sigma'_{vm}}{\sigma'_{v0}} \quad (5.1)$$

,onde  $\sigma'_{v0}$  é a tensão vertical efetiva *in situ* na profundidade média do corpo de prova.

Os valores de tensão vertical efetiva *in situ* ( $\sigma'_{v0}$ ) nas profundidades médias dos corpos de prova foram calculados considerando que, no depósito de argila mole do Sarapuí II, de 0 a 2,0 m de profundidade o peso específico natural ( $\gamma_{nat}$ ) é igual a 12,7 kN/m<sup>3</sup>, de 2,0 a 5,0 m de profundidade o  $\gamma_{nat}$  é 12,9 kN/m<sup>3</sup> e que o nível d'água encontra-se coincidente ou acima do nível do terreno natural (Jannuzzi et al., 2015). Lembrando que o peso específico natural ( $\gamma_{nat}$ ) corresponde ao próprio peso específico saturado ( $\gamma_{sat}$ ), já que são valores determinados em amostras indeformadas com grau de saturação ( $S_r$ ) igual ou muito próximo de 100 %.

Os resultados apresentados na Tabela 5.1 à Tabela 5.4 mostram que:

- 1) Considerando os corpos de prova intactos (baterias EDO-RP, EDO-NR(SEC) e EDO-NR(26D)), os valores de  $\sigma'_{vm}$  obtidos das curvas de compressão edométrica de 24 horas, denotados por  $\sigma'_{vm}$  (24 horas), são menores do que os valores de  $\sigma'_{vm}$  obtidos das curvas de  $\dot{\epsilon}_v = 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ , denotados por  $\sigma'_{vm}$  ( $\dot{\epsilon}_v = 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ), que são, via de regra, inferiores aos valores de  $\sigma'_{vm}$  obtidos das curvas de “fim do primário”, denotados  $\sigma'_{vm}$  (“fim do primário”). Isso é consequência do fato da curva de compressão edométrica de 24 horas ficar situada à esquerda da curva de  $\dot{\epsilon}_v = 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ , que, por sua vez, situa-se à esquerda da curva de “fim do primário”, conforme pode ser visto nas figuras apresentadas no item 4.2. “*Resultados Obtidos*”.
- 2) Na bateria de ensaios EDO-RP, os valores de  $\sigma'_{vm}$  (24 horas) ficaram compreendidos entre 25,9 kPa e 33,7 kPa, com os valores de OCR (24

horas) variando entre 2,2 e 3,0. Os valores de  $\sigma'_{vm}$  ( $\dot{\epsilon}_v = 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ) ficaram compreendidos entre 29,2 kPa e 37,0 kPa, com os valores de OCR ( $\dot{\epsilon}_v = 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ) situados entre 2,6 e 3,3. Os valores de  $\sigma'_{vm}$  (fim do primário) variaram entre 34,5 kPa e 39,5 kPa, com os valores de OCR (fim do primário) compreendidos entre 3,1 e 3,6, excluindo o corpo de prova CPRP-C, cujo valor de  $\sigma'_{vm}$  (fim do primário) foi significativamente superior aos dos demais corpos de prova.

Os valores das razões [ $\sigma'_{vm}$  (24 horas) /  $\sigma'_{vm}$  (fim do primário)] ficaram compreendidos entre 0,67 e 0,85, com valor médio de 0,75. Isto é,  $\sigma'_{vm}$  (24 horas) corresponde a 75 % de  $\sigma'_{vm}$  (fim do primário) em média, o que implica em dizer que  $\sigma'_{vm}$  (fim do primário) corresponde a 133 % de  $\sigma'_{vm}$  (24 horas) em média.

Os valores das razões [ $\sigma'_{vm}$  (24 horas) /  $\sigma'_{vm}$  ( $\dot{\epsilon}_v = 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ )] ficaram compreendidos entre 0,85 e 0,91, com valor médio de 0,88. Isto é,  $\sigma'_{vm}$  (24 horas) correspondente a 88 % de  $\sigma'_{vm}$  ( $\dot{\epsilon}_v = 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ) em média, o que implica em dizer que  $\sigma'_{vm}$  ( $\dot{\epsilon}_v = 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ) corresponde a 113 % de  $\sigma'_{vm}$  (24 horas) em média.

- 3) Na bateria de ensaios EDO-NR(SEC), excluindo de todos os intervalos a seguir apresentados o corpo de prova CPNR-D, o qual apresentou todos os valores de  $\sigma'_{vm}$  bastante inferiores aos dos demais corpos de prova, teve-se que: os valores de  $\sigma'_{vm}$  (24 horas) ficaram compreendidos entre 27,7 kPa e 30,7 kPa, com os valores de OCR (24 horas) situados entre 2,3 e 2,8; os valores de  $\sigma'_{vm}$  ( $\dot{\epsilon}_v = 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ) ficaram situados entre 31,8 kPa e 36,7 kPa, com os valores de OCR ( $\dot{\epsilon}_v = 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ) situados entre 2,6 e 3,3; e os valores de  $\sigma'_{vm}$  (fim do primário) ficaram situados entre 37,9 kPa e 40,0 kPa, com os valores de OCR (fim do primário) compreendidos entre 3,1 e 3,6.

Os valores das razões [ $\sigma'_{vm}$  (24 horas) /  $\sigma'_{vm}$  (fim do primário)] ficaram compreendidos entre 0,71 e 0,77, com valor médio de 0,74. Isto é,  $\sigma'_{vm}$  (24 horas) corresponde a 74 % de  $\sigma'_{vm}$  (fim do primário) em média, o que implica em dizer que  $\sigma'_{vm}$  (fim do primário) corresponde a 135 % de  $\sigma'_{vm}$  (24 horas) em média. Ressalta-se que estes valores médios são praticamente iguais aos obtidos acima para a bateria EDO-RP.

Os valores das razões  $[\sigma'_{vm} (24 \text{ horas}) / \sigma'_{vm} (\dot{\epsilon}_v = 10^{-6} \text{ s}^{-1})]$  ficaram compreendidos entre 0,84 e 0,87, com o valor médio de 0,86. Isto é,  $\sigma'_{vm} (24 \text{ horas})$  corresponde a 86 % de  $\sigma'_{vm} (\dot{\epsilon}_v = 10^{-6} \text{ s}^{-1})$  em média, o que implica em dizer que  $\sigma'_{vm} (\dot{\epsilon}_v = 10^{-6} \text{ s}^{-1})$  corresponde a 116 % de  $\sigma'_{vm} (24 \text{ horas})$ . Estes valores também são muito próximos aos obtidos acima para a bateria EDO-RP.

- 4) Na bateria de ensaios EDO-NR(26D), excluindo de todos os intervalos a seguir apresentados o corpo de prova CPNR-E, o qual apresentou todos os valores de  $\sigma'_{vm}$  bastante inferiores aos dos demais corpos de prova, teve-se que: os valores de  $\sigma'_{vm} (24 \text{ horas})$  ficaram compreendidos entre 30,6 kPa e 31,2 kPa, com os valores de OCR (24 horas) situados entre 2,4 e 2,5; os valores de  $\sigma'_{vm} (\dot{\epsilon}_v = 10^{-6} \text{ s}^{-1})$  ficaram situados entre 33,1 kPa e 37,2 kPa, com os valores de OCR ( $\dot{\epsilon}_v = 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ) situados entre 2,6 e 3,0; e os valores de  $\sigma'_{vm}$  (fim do primário) ficaram situados entre 35,2 kPa e 35,5 kPa, com os valores de OCR (fim do primário) compreendidos entre 2,8 e 2,9.

Os valores das razões  $[\sigma'_{vm} (24 \text{ horas}) / \sigma'_{vm} (\text{fim do primário})]$  ficaram compreendidos entre 0,85 e 0,89, com valor médio de 0,87. Isto é,  $\sigma'_{vm} (24 \text{ horas})$  corresponde a 87 % de  $\sigma'_{vm} (\text{fim do primário})$  em média. Estes valores são superiores aos obtidos para as baterias EDO-RP e EDO-NR(SEC), o que pode ser explicado pela melhor definição das curvas de compressão edométrica na vizinhança da tensão de sobreadensamento com a introdução do estágio de carregamento de 30 kPa entre os estágios de 20 kPa e 40 kPa. Assim,  $\sigma'_{vm} (\text{fim do primário})$  corresponde a 115 % de  $\sigma'_{vm} (24 \text{ horas})$  em média.

Os valores das razões  $[\sigma'_{vm} (24 \text{ horas}) / \sigma'_{vm} (\dot{\epsilon}_v = 10^{-6} \text{ s}^{-1})]$  ficaram compreendidos entre 0,84 e 0,92, com o valor médio de 0,88. Isto é,  $\sigma'_{vm} (24 \text{ horas})$  corresponde a 88 % de  $\sigma'_{vm} (\dot{\epsilon}_v = 10^{-6} \text{ s}^{-1})$  em média, o que implica em dizer que  $\sigma'_{vm} (\dot{\epsilon}_v = 10^{-6} \text{ s}^{-1})$  corresponde a 113 % de  $\sigma'_{vm} (24 \text{ horas})$  em média. Esses valores de  $[\sigma'_{vm} (24 \text{ horas}) / \sigma'_{vm} (\dot{\epsilon}_v = 10^{-6} \text{ s}^{-1})]$  são muito semelhantes aos obtidos para as baterias EDO-RP e EDO-NR(SEC), sendo o valor médio exatamente igual ao obtido para a bateria EDO-RP.

Ressalta-se ainda que o corpo de prova CPNR-G foi o único entre todos os corpos de prova intactos a apresentar o valor de  $\sigma'_{vm}$  (fim do primário) inferior ao valor de  $\sigma'_{vm}$  ( $\dot{\epsilon}_v = 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ). É possível que tal fato esteja relacionado a algum erro decorrente da dificuldade na determinação, pelo método de Taylor, do ponto correspondente ao “fim do primário” na curva de adensamento do estágio de carregamento de 30 a 40 kPa, devido ao fato da forma da curva afastar-se da forma da teoria de Terzaghi & Fröhlich (1936) basicamente por duas razões, a saber: (1) trata-se da região da “vizinhança” da tensão de sobreadensamento, na qual o coeficiente de adensamento ( $c_v$ ) sofre forte variação com o aumento de  $\sigma'_v$ , ao passo que a teoria de Terzaghi & Fröhlich (1936) assume que  $c_v$  é constante; (2) o valor do incremento de tensão vertical  $\Delta\sigma/\sigma = 0,5$ , bastante inferior a 1,0, faz com que o efeito do chamado “adensamento secundário” ocorrendo concomitantemente ao chamado “adensamento primário” passe a ser mais significativo, ao passo que a teoria de Terzaghi & Fröhlich (1936) ignora o efeito do “adensamento secundário”.

- 5) Na bateria de ensaios EDO-NR(RM), realizada em corpos de prova remoldados, os valores de  $\sigma'_{vm}$  obtidos foram extremamente baixos, chegando a ser inferiores aos valores de  $\sigma'_{v0}$  e, conseqüentemente, levando a valores de OCR menores do que um. Isto é uma consequência do próprio processo de amolgamento da amostra no laboratório, que destruiu a estrutura original da argila, apagando completamente a sua “memória” de tensões. Lembra-se aqui que a diminuição do valor obtido para a tensão de sobreadensamento ( $\sigma'_{vm}$ ) é uma das consequências apontadas por Ladd (1973) do amolgamento da argila na curva de compressão edométrica. Neste caso, a remoldagem, que consiste no completo amolgamento do corpo de prova no laboratório, tal como efetuado nesta pesquisa e descrita no item 3.3.7 “*Materias e métodos*”, faz com que a curva de compressão edométrica obtida seja um limite inferior de qualidade.
- 6) Dos onze corpos de prova intactos ensaiados nas baterias EDO-RP, EDO-NR(SEC) e EDO-NR(26D), excluindo somente os corpos de prova CPNR-D e CPNR-E, os valores de  $\sigma'_{vm}$  (24 horas) ficaram compreendidos entre 25,9 kPa e 33,7 kPa, com valores de OCR (24

horas) situados entre 2,2 e 3,0. Esses valores de OCR são semelhantes aos obtidos por Jannuzzi et al. (2015) na Argila do Sarapuí II entre as profundidades de 3,00 m e 3,80 m, também determinados em curvas de compressão edométrica traçadas em termos de 24 horas de duração do estágio.

Em nenhuma das baterias realizadas nos corpos de prova intactos, EDO-RP, EDO-NR(SEC) e EDO-NR(26D), foi observada influência do diâmetro do corpo de prova (cerca de 50 mm ou cerca de 70 mm) nos valores obtidos de tensão de sobreadensamento ( $\sigma'_{vm}$ )

- 7) Comparando os valores de  $\sigma'_{vm}$  obtidos dos corpos de prova intactos moldados na amostra extraída com o amostrador revestido com o FEP (bateria EDO-RP) com os valores de  $\sigma'_{vm}$  obtidos dos corpos de prova intactos moldados na amostra extraída com o amostrador não revestido (baterias EDO-NR(SEC) e EDO-NR(26D)), não se observa influência clara do revestimento, embora os dois valores mais elevados de  $\sigma'_{vm}$  (24 horas) tenham sido obtidos de corpos de prova da bateria EDO-RP, a saber, CPRP-B e CPRP-C.
- 8) Finalmente, comparando os valores de  $\sigma'_{vm}$  obtidos dos corpos de prova intactos, provenientes do amostrador não revestido e ensaiados no dia seguinte à moldagem (bateria EDO-NR(SEC)) com os valores de  $\sigma'_{vm}$  obtidos dos corpos de prova intactos, provenientes do mesmo amostrador, porém ensaiados 26 dias após a moldagem (bateria EDO-NR(26D)), não se observa influência do período entre a moldagem e o início do ensaio nos valores obtidos.

Tabela 5.1 – Bateria de ensaios EDO-RP: Tensões e razões de sobreadensamento obtidas das curvas de compressão edométrica traçadas sob diferentes critérios.

Ensaio/ Corpo de prova	Profundidade (m)	Diâmetro (mm)	$\sigma'_{v0}$ (kPa)	$\sigma'_{vm}$ 24 horas (kPa)	$\sigma'_{vm}$ $\dot{\epsilon}_v = 10^{-6} s^{-1}$ (kPa)	$\sigma'_{vm}$ Fim do primário (kPa)	OCR 24 horas	OCR $\dot{\epsilon}_v = 10^{-6} s^{-1}$	OCR Fim do primário
CPRP-A	3,65 - 3,70	71,09	11,0	26,0	29,2	34,5	2,4	2,7	3,1
CPRP-B	3,70 - 3,75	50,36	11,1	33,7	37,0	39,5	3,0	3,3	3,6
CPRP-C	3,75 - 3,80	71,16	11,3	32,4	36,9	45,0	2,9	3,3	4,0
CPRP-D	3,85 - 3,90	50,32	11,6	25,9	30,4	38,9	2,2	2,6	3,4

Tabela 5.2 – Bateria de ensaios EDO-NR(SEC): Tensões e razões de sobreadensamento obtidas das curvas de compressão edométrica traçadas sob diferentes critérios.

Ensaio/ Corpo de prova	Profundidade (m)	Diâmetro (mm)	$\sigma'_{v0}$ (kPa)	$\sigma'_{vm}$ 24 horas (kPa)	$\sigma'_{vm}$ $\dot{\epsilon}_v = 10^{-6} s^{-1}$ (kPa)	$\sigma'_{vm}$ Fim do primário (kPa)	OCR 24 horas	OCR $\dot{\epsilon}_v = 10^{-6} s^{-1}$	OCR Fim do primário
CPNR-B	3,70 - 3,75	50,36	11,1	30,7	36,7	40,0	2,8	3,3	3,6
CPNR-C	3,83 - 3,88	71,16	11,5	29,3	33,7	38,5	2,5	2,9	3,3
CPNR-D	3,93 - 3,98	50,32	11,8	19,4	23,1	27,2	1,6	2,0	2,3
CPNR-F	4,04 - 4,09	71,03	12,2	27,7	31,8	37,9	2,3	2,6	3,1

Tabela 5.3 – Bateria de ensaios EDO-NR(26D): Tensões e razões de sobreadensamento obtidas das curvas de compressão edométrica traçadas sob diferentes critérios.

Ensaio/ Corpo de prova	Profundidade (m)	Diâmetro (mm)	$\sigma'_{v0}$ (kPa)	$\sigma'_{vm}$ 24 horas (kPa)	$\sigma'_{vm}$ $\dot{\epsilon}_v = 10^{-6} s^{-1}$ (kPa)	$\sigma'_{vm}$ Fim do primário (kPa)	OCR 24 horas	OCR $\dot{\epsilon}_v = 10^{-6} s^{-1}$	OCR Fim do primário
CPNR-E	3,98 - 4,04	50,34	12,0	22,5	25,3	26,5	1,9	2,1	2,2
CPNR-G	4,09 - 4,14	70,97	12,3	31,2	37,2	35,2	2,5	3,0	2,9
CPNR-H	4,14 - 4,19	50,35	12,5	30,6	33,1	35,5	2,4	2,6	2,8

Tabela 5.4 – Bateria de ensaios EDO-NR(RM): Tensões e razões de sobreadensamento obtidas das curvas de compressão edométrica traçadas sob diferentes critérios.

Ensaio/ Corpo de prova	Profundidade (m)	Diâmetro (mm)	$\sigma'_{v0}$ (kPa)	$\sigma'_{vm}$ 24 horas (kPa)	$\sigma'_{vm}$ $\dot{\epsilon}_v = 10^{-6} s^{-1}$ (kPa)	$\sigma'_{vm}$ Fim do primário (kPa)	OCR 24 horas	OCR $\dot{\epsilon}_v = 10^{-6} s^{-1}$	OCR Fim do primário
CPNR-RM1	3,50 - 3,63(*)	50,32	10,6	4,7	5,0	5,8	0,4	0,5	0,5
CPNR-RM2	3,50 - 3,63(*)	71,20	10,6	6,4	5,9	6,0	0,6	0,6	0,6

(\*) corpos de prova remoldados do mesmo segmento de amostra

### 5.3.

#### Parâmetros de compressibilidade

Para todos os ensaios de adensamento edométrico, na curva de compressão edométrica “*e versus  $\sigma'_v$  (log)*” plotada em termos de 24 horas de duração do estágio, foram determinados os seguintes parâmetros de compressibilidade: índice de recompressão ( $C_r$ ), índice de compressão virgem ( $C_c$ ) e índice de expansão ( $C_e$ ).

Os parâmetros de compressibilidade supracitados foram determinados conforme procedimento recomendado por Andrade (2009), ilustrado na Figura 5.1, abaixo. O ponto M é o ponto de inflexão, onde ocorre a mudança de concavidade, do domínio de compressão virgem da curva. Alternativamente, o ponto M também pode ser identificado como o ponto que marca o fim do trecho inicial aproximadamente retilíneo do trecho de compressão virgem da curva.

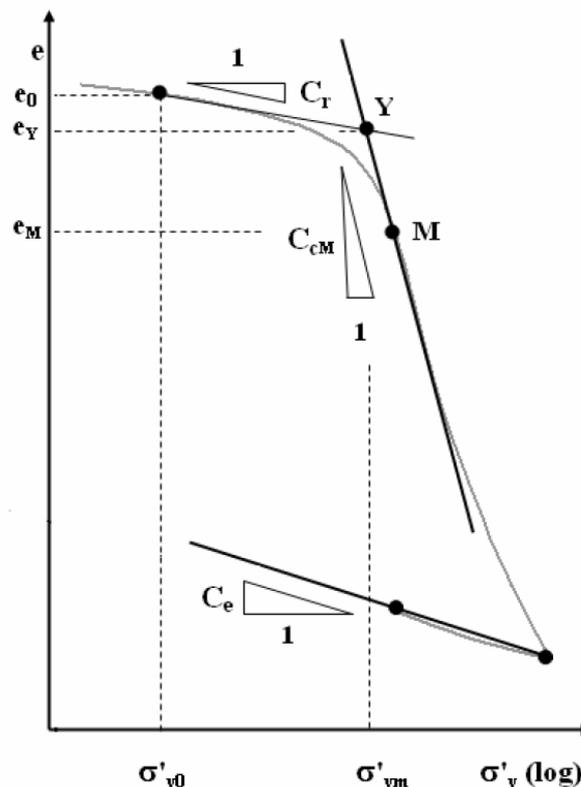


Figura 5.1 – Determinação do índice de recompressão ( $C_r$ ), índice de compressão ( $C_c$ ), e do índice de expansão ( $C_e$ ) (Andrade, 2009).

Os valores de índice de recompressão ( $C_r$ ), índice de compressão virgem ( $C_c$ ) e índice de expansão ( $C_e$ ), bem como os respectivos valores calculados de  $C_c/(1+e_0)$  e  $C_r/C_c$ , são apresentados na Tabela 5.5 à Tabela 5.8. A Tabela 5.5

apresenta os valores obtidos dos ensaios da bateria EDO-RP, a Tabela 5.6 apresenta os valores obtidos dos ensaios da bateria EDO-NR(SEC), a Tabela 5.7 apresenta os valores obtidos dos ensaios da bateria EDO-NR(26D) e a Tabela 5.8 apresenta os valores obtidos dos ensaios da bateria EDO-NR(RM).

Com base nos resultados apresentados na Tabela 5.5 à Tabela 5.8, constata-se que:

- 1) Na bateria de ensaios EDO-RP, executada em corpos de prova intactos provenientes do amostrador revestido com o FEP, os valores de  $C_v/(1+e_0)$  ficaram compreendidos entre 0,52 e 0,64, sendo o valor médio igual a 0,59. Os valores de  $C_r/C_c$  ficaram compreendidos entre 0,13 e 0,15, sendo o valor médio igual a 0,14. Nesta bateria, não se observa uma influência clara do diâmetro do corpo de prova nos valores de  $C_v/(1+e_0)$  e  $C_r/C_c$ , embora o menor valor de  $C_v/(1+e_0)$  tenha sido obtido do corpo de prova CPRP-A, cujo diâmetro era 71,09 mm.
- 2) Na bateria de ensaios EDO-NR(SEC), executada em corpos de prova intactos provenientes do amostrador não revestido, os valores de  $C_v/(1+e_0)$  ficaram compreendidos entre 0,46 e 0,64, sendo o valor médio igual a 0,53. Os valores de  $C_r/C_c$  ficaram compreendidos entre 0,08 e 0,16, sendo o valor médio igual a 0,13. Nesta bateria, também não se observa uma influência clara do diâmetro do corpo de prova nos valores de  $C_v/(1+e_0)$  e  $C_r/C_c$ , embora destacadamente o maior valor de  $C_v/(1+e_0)$  tenha sido obtido do corpo de prova CPNR-B, cujo diâmetro era 50,36 mm. Ressalta-se também que o valor médio de  $C_v/(1+e_0)$  obtido nesta bateria é inferior ao da bateria EDO-RP.
- 3) Na bateria EDO-NR(26D), executada em corpos de prova intactos provenientes do amostrador não revestido, ensaiados 26 dias após a moldagem, os valores de  $C_v/(1+e_0)$  ficaram compreendidos entre 0,51 e 0,58, sendo o valor médio igual a 0,53. Os valores de  $C_r/C_c$  ficaram compreendidos entre 0,10 e 0,11, sendo o valor médio igual a 0,10. Ressalta-se que o corpo de prova CPNR-G, cujo diâmetro era de 70,97 mm, apresentou valor de  $C_v/(1+e_0)$  destacadamente superior aos dos outros dois corpos de prova da bateria, ambos com diâmetro de cerca de 50 mm.

O valor médio de  $C_v/(1+e_0)$  obtido nesta bateria é um pouco inferior ao da bateria EDO-NR(SEC) e, principalmente, menor que o da bateria EDO-RP. Com isso, ressalta-se que os corpos de prova provenientes do amostrador revestido com FEP (bateria EDO-RP) apresentaram, em média, valores de  $C_v/(1+e_0)$  superiores aos dos corpos de prova provenientes do amostrador sem revestimento (baterias EDO-NR(SEC) e EDO-NR(26D)).

O valor médio de  $C_r/C_c$  da bateria EDO-NR(26D) é inferior aos das baterias EDO-RP e EDO-NR(SEC). Este aspecto está relacionado à inclusão do estágio de carregamento de 30 kPa entre os estágios de 20 kPa e 40 kPa nos ensaios da bateria EDO-NR(26D), o que possibilitou uma melhor definição do trecho de recompressão próximo à tensão de sobreadensamento.

- 4) Na bateria EDO-NR(RM), executada em dois corpos de prova remoldados, os valores de  $C_v/(1+e_0)$  foram iguais a 0,25 e 0,28, muito inferiores aos valores obtidos dos corpos de prova intactos. Estes valores refletem a redução acentuada da compressibilidade no domínio de compressão virgem, que é um dos efeitos do amolgamento apontados por Ladd (1973). Os valores de  $C_r$  foram iguais a 1,41 e 1,58, muito superiores aos dos corpos de prova intactos. Estes valores denunciam o acentuado aumento da compressibilidade no domínio de recompressão, o que também é um dos efeitos do amolgamento apontados por Ladd (1973). Obviamente, com a diminuição dos valores de  $C_c$  e aumento dos valores de  $C_r$ , os valores de  $C_r/C_c$ , iguais a 1,09 e 1,18, são muito superiores aos dos corpos de prova intactos. Estes valores mostram que o completo amolgamento provocado na remoldagem dos corpos de prova destruiu de tal forma a estrutura original da argila, apagando completamente a sua história de tensões, a ponto de não haver mais diferença de compressibilidade entre os domínios de recompressão e de compressão virgem.

Contudo, ressalta-se que os valores de  $C_e$  obtidos dos corpos de prova remoldados foram muito semelhantes aos obtidos dos corpos de prova intactos.

- 5) Considerando todos os corpos de prova intactos (baterias EDO-RP, EDO-NR(SEC) e EDO-NR(26D)), os valores de  $C_v/(1+e_0)$  ficaram

compreendidos entre 0,46 e 0,64, sendo o valor médio igual a 0,55. Esses valores são similares aos apresentados por Jannuzzi et al. (2015) para a Argila do Sarapuí II entre as profundidades de 3,00 m e 3,80 m.

Tabela 5.5 – Bateria de ensaios EDO-RP: Parâmetros de compressibilidade.

Ensaio/ Corpo de prova	Profundidade (m)	Diâmetro (mm)	$e_0$	$C_r$	$C_c$	$C_e$	$\frac{C_c}{(1 + e_0)}$	$C_r/C_c$
CPRP-A	3,65 - 3,70	71,09	3,90	0,35	2,56	0,24	0,52	0,14
CPRP-B	3,70 - 3,75	50,36	3,91	0,46	3,12	0,24	0,64	0,15
CPRP-C	3,75 - 3,80	71,16	3,88	0,46	3,07	0,24	0,63	0,15
CPRP-D	3,85 - 3,90	50,32	3,67	0,34	2,63	0,22	0,56	0,13

Tabela 5.6 – Bateria de ensaios EDO-NR(SEC): Parâmetros de compressibilidade.

Ensaio/ Corpo de prova	Profundidade (m)	Diâmetro (mm)	$e_0$	$C_r$	$C_c$	$C_e$	$\frac{C_c}{(1 + e_0)}$	$C_r/C_c$
CPNR-B	3,70 - 3,75	50,36	3,91	0,45	3,13	0,23	0,64	0,15
CPNR-C	3,83 - 3,88	71,16	3,71	0,39	2,41	0,22	0,51	0,16
CPNR-D	3,93 - 3,98	50,32	3,83	0,19	2,21	0,21	0,46	0,08
CPNR-F	4,04 - 4,09	71,03	3,67	0,36	2,41	0,21	0,52	0,15

Tabela 5.7 – Bateria de ensaios EDO-NR(26D): Parâmetros de compressibilidade.

Ensaio/ Corpo de prova	Profundidade (m)	Diâmetro (mm)	$e_0$	$C_r$	$C_c$	$C_e$	$\frac{C_c}{(1 + e_0)}$	$C_r/C_c$
CPNR-E	3,98 - 4,04	50,34	3,72	0,26	2,40	0,23	0,51	0,11
CPNR-G	4,09 - 4,14	70,97	3,63	0,27	2,67	0,25	0,58	0,10
CPNR-H	4,14 - 4,19	50,35	3,63	0,23	2,35	0,23	0,51	0,10

Tabela 5.8 – Bateria de ensaios EDO-NR(RM): Parâmetros de compressibilidade.

Ensaio/ Corpo de prova	Profundidade (m)	Diâmetro (mm)	$e_0$	$C_r$	$C_c$	$C_e$	$\frac{C_c}{(1 + e_0)}$	$C_r/C_c$
CPNR-RM1	3,50 - 3,63(*)	50,32	4,11	1,41	1,29	0,21	0,25	1,09
CPNR-RM2	3,50 - 3,63(*)	71,20	3,85	1,58	1,34	0,22	0,28	1,18

(\*) corpos de prova remoldados do mesmo segmento de amostra.

## 5.4.

### Coeficiente de adensamento

Para todos os ensaios de adensamento edométrico, dos estágios de carregamento a partir de 10 kPa inclusive, foram determinados os valores de coeficiente de adensamento por drenagem vertical ( $c_v$ ), ajustando-se a curva de adensamento teórica, da teoria de Terzaghi & Fröhlich (1936), à curva de adensamento experimental. Os valores de  $c_v$  foram determinados tanto pelo método de Taylor, aplicado nas curvas de adensamento plotadas em termos da raiz quadrada do tempo, quanto pelo método de Casagrande, aplicado nas curvas de adensamento plotadas em termos de tempo em escala logarítmica. As curvas “ $c_v(\log)$  versus  $\sigma'_v(\log)$ ” de todos os ensaios, onde os valores de  $\sigma'_v$  correspondem aos valores médios dos estágios de carregamento, foram apresentadas no item 4.2 “*Resultados obtidos*”.

A Figura 5.2 reúne as curvas “ $c_v(\log)$  versus  $\sigma'_v(\log)$ ” de todos os treze corpos de prova ensaiados, com os valores de  $c_v$  determinados pelo método de Taylor. A Figura 5.3 reúne as curvas “ $c_v(\log)$  versus  $\sigma'_v(\log)$ ” de todos os treze corpos de prova, com os valores de  $c_v$  determinados pelo método de Casagrande.

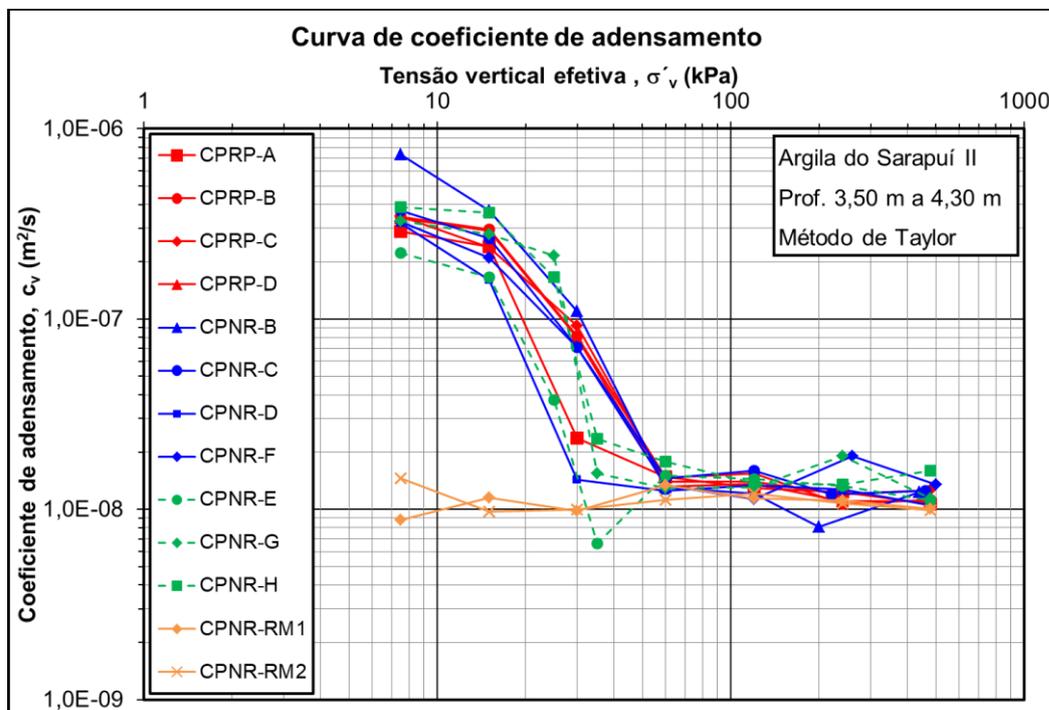


Figura 5.2 – Curvas de coeficiente de adensamento “ $c_v(\log)$  x  $\sigma'_v$  médio (log)” de todos os corpos de prova (método de Taylor).

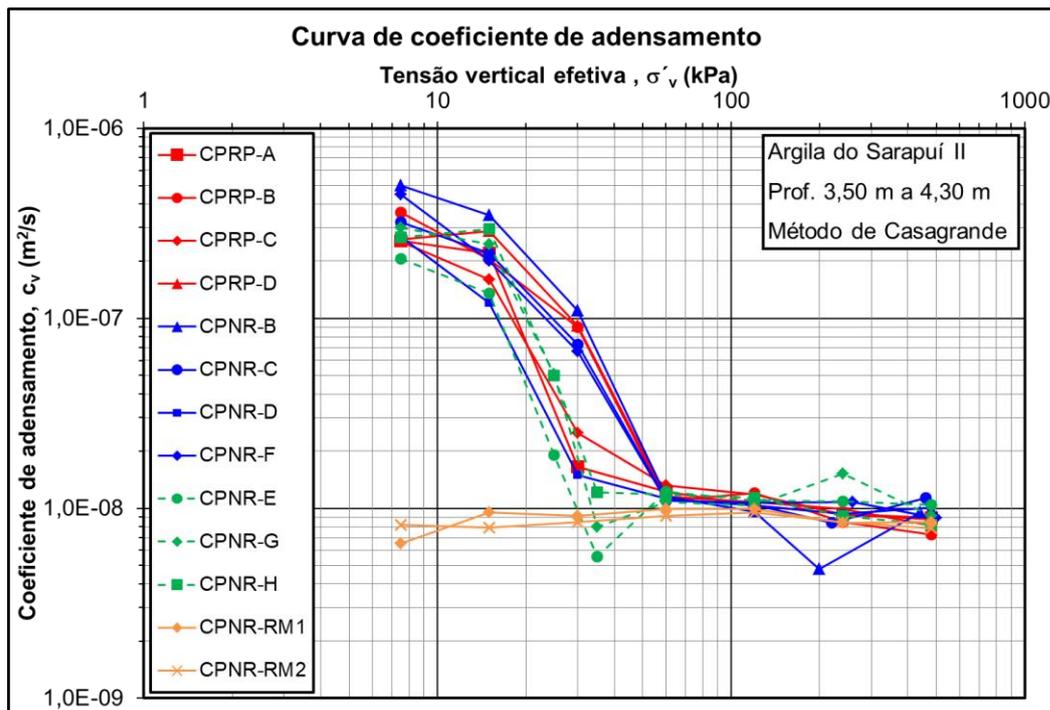


Figura 5.3 – Curvas de coeficiente de adensamento “ $c_v$  (log) x  $\sigma'_v$  médio (log)” de todos os corpos de prova (método de Casagrande).

Conforme pode ser visto nas curvas “ $c_v$ (log) versus  $\sigma'_v$ (log)” apresentadas no item 4.2, para todos os ensaios, de uma forma geral, os valores de  $c_v$  determinados pelo método de Taylor são superiores aos valores de  $c_v$  determinados pelo método Casagrande, principalmente dentro do domínio de compressão virgem. Isto pode ser explicado pelo fato de que, no método de Casagrande, o procedimento gráfico para a determinação do tempo correspondente ao “fim do primário” ( $t_{100}$ ) na curva de adensamento, que envolve a retro-extrapolação da “cauda” do adensamento secundário”, faz com que o valor de  $t_{100}$  seja majorado e, por conseguinte, o valor de  $c_v$  seja minorado em relação ao valor de  $c_v$  determinado pelo método de Taylor.

Da Figura 5.2 e Figura 5.3, observa-se que, nos corpos de provas intactos, os valores de  $c_v$  sofrem uma queda vertiginosa quando a tensão vertical efetiva ( $\sigma'_v$ ) ultrapassa a tensão de sobreadensamento ( $\sigma'_{vm}$ ). Tal fato está relacionado ao aumento brusco da compressibilidade da argila ao sair do domínio de recompressão e entrar no domínio de compressão virgem, conforme discutido no item 2.5.2 “*Revisão bibliográfica*”. Para os corpos de prova intactos, no trecho de recompressão, considerando os estágios de carregamento de 10 kPa e de 20 kPa, ou seja, inteiramente aquém da tensão de sobreadensamento ( $\sigma'_{vm}$ ), os valores de  $c_v$  determinados pelo método de Taylor ficaram compreendidos entre

$1,6 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  e  $7,3 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  (Figura 5.2), sendo o valor médio igual a  $3,1 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ . Já os valores de  $c_v$  determinados pelo método de Casagrande variaram entre  $1,2 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  e  $5,0 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  (Figura 5.3), sendo o valor médio igual a  $2,7 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ . Logo, no trecho de recompressão, a razão entre a média dos valores de  $c_v$  determinados pelo método de Taylor e a média dos valores de  $c_v$  determinados pelo método de Casagrande é de 1,15.

Para os corpos de prova intactos, no trecho de compressão virgem, considerando os estágios de carregamento de 80 kPa (inclusive) até 640 kPa, ou seja, garantidamente além da tensão de sobreadensamento ( $\sigma'_{vm}$ ), e desconsiderando os estágios nos quais  $\Delta\sigma_v/\sigma_v < 1$ , os valores de  $c_v$  determinados pelo método de Taylor ficaram compreendidos entre  $1,1 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$  e  $1,9 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$  (Figura 5.2), sendo o valor médio igual a  $1,3 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ . Já os valores de  $c_v$  determinados pelo método de Casagrande variaram entre  $0,7 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$  e  $1,5 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$  (Figura 5.3), sendo o valor médio igual a  $1,0 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ . Assim, no trecho de compressão virgem, a razão entre a média dos valores de  $c_v$  determinados pelo método de Taylor e a média dos valores de  $c_v$  determinados pelo método de Casagrande é de 1,30.

Ressalta-se, portanto, que, para os corpos de prova intactos, os valores de  $c_v$  determinados no domínio de recompressão são cerca de 30 vezes maiores do que os valores de  $c_v$  determinados no domínio de compressão virgem, em média.

Para os corpos de prova remoldados (CPNR-RM1 e CPNR-RM2), os valores de  $c_v$  permaneceram praticamente constantes ao longo de todo domínio de  $\sigma'_v$ , sendo da mesma ordem de grandeza dos valores de  $c_v$  determinados no domínio de compressão virgem para os corpos de prova intactos (Figura 5.2 e Figura 5.3). Conforme discutido no item 2.5.2 “*Revisão bibliográfica*”, tal comportamento deve-se, pelo menos em parte, ao substancial aumento da compressibilidade no domínio de recompressão decorrente do amolgamento provocado pelo processo de remoldagem do corpo de prova. Para os corpos de prova CPNR-RM1 e CPNR-RM2, os valores de  $c_v$  determinados pelo método de Taylor variaram entre  $0,9 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$  e  $1,5 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$  (Figura 5.2), ao passo que os valores de  $c_v$  determinados pelo método de Casagrande variaram entre  $0,7 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$  e  $1,0 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$  (Figura 5.3).

Nos corpos de prova CPNR-E, CPNR-G e CPNR-H, o estágio de carregamento de 30 kPa foi introduzido entre os estágios de 20 kPa e de 40 kPa para refinar a curva de compressão edométrica nos arredores da tensão de sobreadensamento ( $\sigma'_{vm}$ ). Com isso, nos estágios de carregamento de 30 kPa e de 40 kPa, os valores de  $\Delta\sigma_v/\sigma_v$  foram iguais a 0,50 e 0,33, respectivamente, e, portanto, bastante inferiores a 1. Isto implicou na diminuição dos valores de  $c_v$  determinados nestes estágios em relação aos dos demais corpos de prova para esse mesmo domínio de tensão vertical efetiva ( $\sigma'_v$ ), uma vez que, sob baixos valores de  $\Delta\sigma_v/\sigma_v$ , o chamado “adensamento secundário” passa a exercer maior influência no chamado “adensamento primário”. Destaca-se o estágio de carregamento de 40 kPa do corpo de prova CPNR-E, do qual se obteve um valor de  $c_v$  muito baixo tanto pelo método de Taylor (Figura 5.2) quanto pelo método de Casagrande (Figura 5.3). O mesmo ocorreu francamente dentro do domínio de compressão virgem para o estágio de carregamento de 240 kPa do corpo de prova CPNR-B. Neste estágio, a tensão vertical ( $\sigma_v$ ) foi incrementada de 160 kPa para 240 kPa e, portanto, teve-se  $\Delta\sigma_v/\sigma_v = 0,50$ . Com isso, os valores de  $c_v$  obtidos neste estágio pelo método de Taylor (Figura 5.2) e pelo método de Casagrande (Figura 5.3) foram inferiores aos dos demais estágios dentro do domínio de compressão virgem do próprio corpo de prova e dos outros corpos de prova.

## 5.5.

### Qualidade das amostras/ corpos de prova

#### 5.5.1.

#### Aplicação de critérios para a avaliação das qualidades dos corpos de prova

As qualidades das amostras/corpos de prova foram avaliadas mediante a análise dos resultados dos ensaios de adensamento edométrico. Para tanto, foram adotados os critérios de Lunne et al. (1997), Coutinho (2007) e Coutinho modificado por Andrade (2009), os quais são baseados na relação  $\Delta e/e_0$ , onde  $\Delta e$  é a diferença entre o índice de vazios inicial do corpo de prova ( $e_0$ ) e o índice de vazios obtido da curva de compressão edométrica associado à tensão vertical efetiva no campo ( $e_{\sigma'_v0}$ ). Os critérios foram aplicados nas curvas “e x  $\sigma'_v(\log)$ ” plotadas em termos de 24 horas de duração do estágio.

As classificações quanto à qualidade atribuídas aos corpos de prova segundo os três critérios supracitados são apresentadas na Tabela 5.9 à Tabela 5.12. Observa-se que todos os corpos de prova intactos foram classificados como de qualidade “*Excelente a muito boa*” segundo os três critérios aplicados, com valores de  $\Delta e/e_0$  variando de 0,010 (CPRP-C) a 0,032 (CPNR-E). Obviamente, os dois corpos de prova remoldados (CPNR-RM1 e CPNR-RM2) foram classificados como “*Muito pobre*”, com valores de  $\Delta e/e_0$  iguais a 0,178 e 0,177, respectivamente.

Tabela 5.9 – Qualidade dos corpos de prova da bateria de ensaio EDO-RP segundo diferentes critérios de classificação.

Ensaio	Profundidade (m)	Diâmetro (mm)	$\sigma'_{v0}$ (kPa)	$\sigma'_{vm}$ (kPa)	OCR	$e_0$	$e (\sigma'_{v0})$	$\Delta e/e_0$	Qualidade		
									Lunne et al. (1997)	Coutinho (2007)	Coutinho modificado (2009)
CPRP-A	3,65 - 3,70	71,09	11,0	26,0	2,4	3,90	3,82	0,021	Excelente a muito boa	Excelente a muito boa	Excelente a muito boa
CPRP-B	3,70 - 3,75	50,36	11,1	33,7	3,0	3,91	3,84	0,018	Excelente a muito boa	Excelente a muito boa	Excelente a muito boa
CPRP-C	3,75 - 3,80	71,16	11,3	32,4	2,9	3,88	3,84	0,010	Excelente a muito boa	Excelente a muito boa	Excelente a muito boa
CPRP-D	3,85 - 3,90	50,32	11,6	25,9	2,2	3,67	3,58	0,025	Excelente a muito boa	Excelente a muito boa	Excelente a muito boa

Tabela 5.10 – Qualidade dos corpos de prova da bateria de ensaio EDO-NR(SEC) segundo diferentes critérios de classificação.

Ensaio	Profundidade (m)	Diâmetro (mm)	$\sigma'_{v0}$ (kPa)	$\sigma'_{vm}$ (kPa)	OCR	$e_0$	$e (\sigma'_{v0})$	$\Delta e/e_0$	Qualidade		
									Lunne et al. (1997)	Coutinho (2007)	Coutinho modificado (2009)
CPNR-B	3,70 - 3,75	50,36	11,1	30,7	2,8	3,91	3,83	0,020	Excelente a muito boa	Excelente a muito boa	Excelente a muito boa
CPNR-C	3,83 - 3,88	71,16	11,5	29,3	2,5	3,71	3,64	0,019	Excelente a muito boa	Excelente a muito boa	Excelente a muito boa
CPNR-D	3,93 - 3,98	50,32	11,8	19,4	1,6	3,83	3,72	0,029	Excelente a muito boa	Excelente a muito boa	Excelente a muito boa
CPNR-F	4,04 - 4,09	71,03	12,2	27,7	2,3	3,67	3,58	0,025	Excelente a muito boa	Excelente a muito boa	Excelente a muito boa

Tabela 5.11 – Qualidade dos corpos de prova da bateria de ensaio EDO-NR(26D) segundo diferentes critérios de classificação.

Ensaio	Profundidade (m)	Diâmetro (mm)	$\sigma'_{v0}$ (kPa)	$\sigma'_{vm}$ (kPa)	OCR	$e_0$	$e (\sigma'_{v0})$	$\Delta e/e_0$	Qualidade		
									Lunne et al. (1997)	Coutinho (2007)	Coutinho modificado (2009)
CPNR-E	3,98 - 4,04	50,34	12,0	22,5	1,9	3,72	3,60	0,032	Excelente a muito boa	Excelente a muito boa	Excelente a muito boa
CPNR-G	4,09 - 4,14	70,97	12,3	31,2	2,5	3,63	3,57	0,017	Excelente a muito boa	Excelente a muito boa	Excelente a muito boa
CPNR-H	4,14 - 4,19	50,35	12,5	30,6	2,4	3,63	3,57	0,017	Excelente a muito boa	Excelente a muito boa	Excelente a muito boa

Tabela 5.12 – Qualidade dos corpos de prova da bateria de ensaio EDO-NR(RM) segundo diferentes critérios de classificação.

Ensaio	Profundidade (m)	Diâmetro (mm)	$\sigma'_{v0}$ (kPa)	$\sigma'_{vm}$ (kPa)	OCR	$e_0$	$e (\sigma'_{v0})$	$\Delta e/e_0$	Qualidade		
									Lunne et al. (1997)	Coutinho (2007)	Coutinho modificado (2009)
CPNR-RM1	3,50 - 3,63	50,34	10,6	4,7	0,4	4,11	3,38	0,178	Muito Pobre	Muito Pobre	Muito Pobre
CPNR-RM2	3,50 - 3,63	70,97	10,6	6,4	0,6	3,85	3,17	0,177	Muito Pobre	Muito Pobre	Muito Pobre

(\*) corpos de prova remoldados do mesmo segmento de amostra.

### 5.5.2.

#### Comparação entre os resultados dos corpos de prova intactos e dos corpos de prova remoldados

Neste item, é feita uma comparação geral entre os resultados dos onze corpos de prova intactos (baterias de ensaio EDO-RP, EDO-NR(SEC) e EDO-NR(26D)) e os resultados dos dois corpos de prova remoldados (bateria EDO-NR(RM)). Tal comparação tem objetivo de avaliar o efeito do amolgamento provocado pela remoldagem nas curvas “ $\varepsilon_v$  versus  $\sigma'_v(\log)$ ”. Para tanto, a Figura 5.4 reúne as curvas “ $\varepsilon_v$  versus  $\sigma'_v(\log)$ ” de todos os treze corpos de prova ensaiados nesta pesquisa.

Da Figura 5.4, observa-se que, de uma forma geral, as curvas “ $\varepsilon_v$  versus  $\sigma'_v(\log)$ ” dos corpos de prova intactos apresentam boa concordância entre si. Observa-se também que a destruição da estrutura original da argila provocada pela remoldagem dos corpos de prova afetou a forma das curvas “ $\varepsilon_v$  versus  $\sigma'_v(\log)$ ” de forma expressiva. Todos os efeitos do amolgamento na curva de compressão edométrica “ $\varepsilon_v$  versus  $\sigma'_v(\log)$ ” descritos por Ladd (1973), e apresentados no item 2.5.2 “*Parâmetros de compressibilidade*”, foram observados nos corpos de prova remoldados, CPNR-RM1 e CPNR-RM2, a saber: (1) Redução da deformação volumétrica específica ( $\varepsilon_v$ ) para qualquer valor de tensão vertical efetiva ( $\sigma'_v$ ); (2) Dificuldade para a definição do ponto de menor raio de curvatura, obscurecendo a tensão de sobreadensamento ( $\sigma'_{vm}$ ); (3) Redução do valor estimado de  $\sigma'_{vm}$ ; (4) Aumento da compressibilidade na região de recompressão; (5) Diminuição da compressibilidade na região de compressão virgem.

Nota-se que a destruição da estrutura original da argila provocada pela remoldagem dos corpos de prova foi de tal ordem que quase não se observa diferença entre as compressibilidades do trecho de recompressão e do trecho de compressão virgem. Ressalta-se também a concavidade do trecho de compressão virgem das curvas de compressão edométrica dos corpos de prova intactos, o que corrobora a excelente qualidade dos mesmos. Por outro lado, nas curvas de compressão dos corpos de prova remoldados, o trecho de compressão virgem é quase retilíneo. Conforme a tensão vertical efetiva ( $\sigma'_v$ ) aumenta, a própria compressão vertical se encarrega de fazer com que a estrutura da argila nos corpos de prova intactos se aproxime daquela dos corpos

de prova remoldados, de modo que para as tensões verticais mais elevadas, as inclinações das curvas de compressão virgem são muito semelhantes e todas as curvas tendem a convergir.

O efeito da destruição da estrutura original da argila provocada pela remoldagem na variação do coeficiente de adensamento ( $c_v$ ) com a tensão vertical efetiva ( $\sigma'_v$ ) foi avaliada no item 5.4 “Coeficiente de adensamento”.

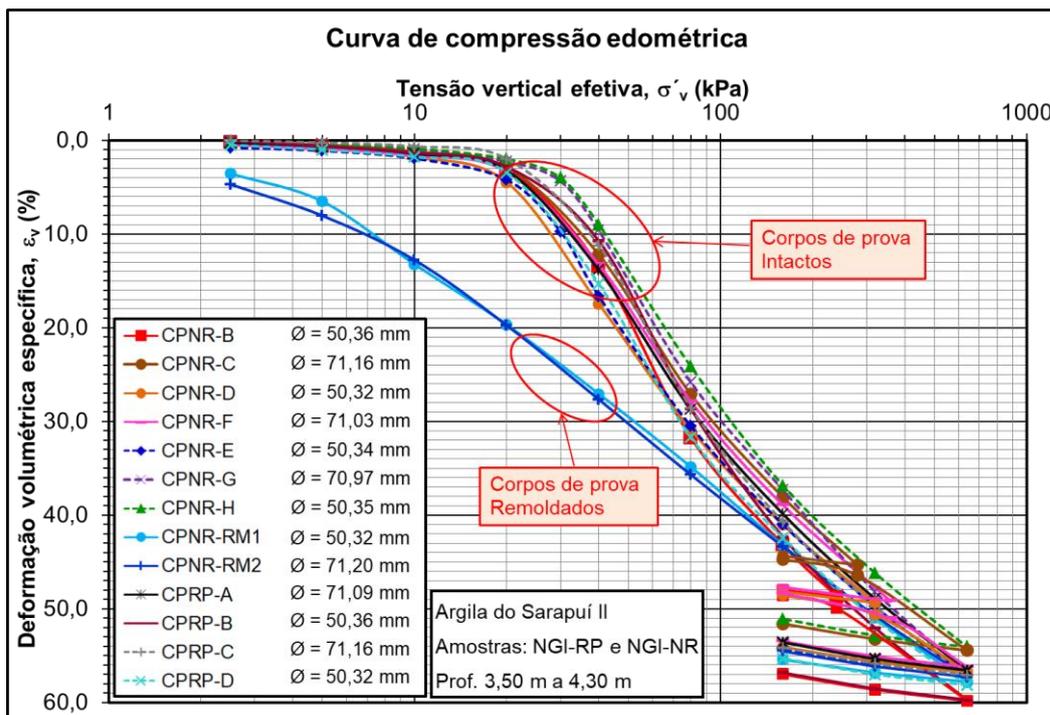


Figura 5.4 – Curvas de compressão edométrica “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v(\log)$ ” de todos os corpos de prova.

Na tentativa de realizar uma análise comparativa mais refinada dos possíveis fatores que podem ter influenciado a qualidade das amostras/corpos de prova intactos, entre os subitens 5.5.3 e 5.5.7, a seguir, são apresentadas curvas de compressão edométrica “ $\varepsilon_v$  versus  $\sigma'_v(\log)$ ” e curvas de coeficiente de adensamento “ $c_v(\log)$  versus  $\sigma'_v(\log)$ ” dos ensaios reunidas de acordo com:

- a bateria de ensaio;
- a amostra de onde foram esculpido os corpos de prova: extraída com o amostrador revestido com o FEP (NGI-RP) ou com o amostrador não revestido (NGI-NR);
- o diâmetro do corpo de prova: cerca de 50 mm ou cerca de 70 mm.

Nestes subitens, além dos valores de  $\Delta e/e_0$  apresentados na Tabela 5.9 à Tabela 5.12, outros elementos são levados em consideração para a avaliação

comparativa da qualidade das amostras/corpos de prova, tais como: a inclinação e a análise visual da curvatura do trecho de compressão virgem da curva de compressão edométrica e o valor de  $\sigma'_{vm}$  (24 horas) dela obtido.

### 5.5.3.

#### **Comparação entre os resultados dos corpos de prova da bateria EDO-RP**

Neste item, é feita uma comparação entre os resultados obtidos dos quatro corpos de prova da bateria de ensaios EDO-RP, sendo dois moldados com cerca de 50 mm de diâmetro e dois moldados com cerca de 70 mm de diâmetro. Para tanto, a Figura 5.5 reúne as curvas “ $\varepsilon_v$  versus  $\sigma'_v(\log)$ ”, ao passo que a Figura 5.6 reúne as curvas “ $c_v(\log)$  versus  $\sigma'_v(\log)$ ”, com os valores de  $c_v$  determinados pelo método de Taylor, de todos os corpos de prova da bateria EDO-RP. Tal comparação tem o objetivo de avaliar, de forma mais apurada, o eventual efeito do diâmetro do corpo de prova na qualidade dos corpos de prova moldados na amostra NGI-RP, a qual foi extraída com o amostrador que teve a sua superfície interna revestida com o FEP.

Da Tabela 5.9, observa-se que os corpos de prova CPRP-B ( $\phi = 50,36$  mm) e CPRP-C ( $\phi = 71,16$  mm) apresentaram relações  $\Delta e/e_0$  inferiores às dos corpos de prova CPRP-A ( $\phi = 71,09$  mm) e CPRP-D ( $\phi = 50,32$  mm). Além disso, da Figura 5.5, observa-se que as inclinações dos trechos iniciais no domínio de compressão virgem das curvas de compressão edométrica dos corpos de prova CPRP-B e CPRP-C foram mais acentuadas que as dos demais corpos de prova. Soma-se a isto, o fato dos corpos de prova CPRP-B e CPRP-C terem apresentado os maiores valores de  $\sigma'_{vm}$  (24 horas). Ressalta-se ainda que o corpo de prova CPRP-C ( $\phi = 71,16$  mm) foi o que apresentou a menor relação  $\Delta e/e_0$  e curvatura do trecho de compressão virgem mais acentuada, ao passo que o corpo de prova CPRP-D ( $\phi = 50,32$  mm) foi o que apresentou maior relação  $\Delta e/e_0$  e curvatura do trecho de compressão virgem menos acentuada.

Com base nas observações feitas acima, é possível alegar que o diâmetro do corpo de prova não exerceu influência na qualidade dos corpos de prova moldados na amostra extraída com o amostrador NGI-RP, o qual teve a sua superfície interna tratado com o FEP. Chama a atenção o fato de mesmo corpos de prova com cerca de 70 mm de diâmetro, esculpido de uma amostra de 76,2 mm de diâmetro, terem apresentado qualidade “*Excelente a muito boa*” segundo

o critério de Lunne *et al.* (1997), que é o mais rigoroso dos critérios aplicados. Este fato aponta a competência do amostrador Geonor/NGI de 76 mm na extração de amostras intactas de excelente qualidade do depósito de argila mole do campo experimental Sarapuí II.

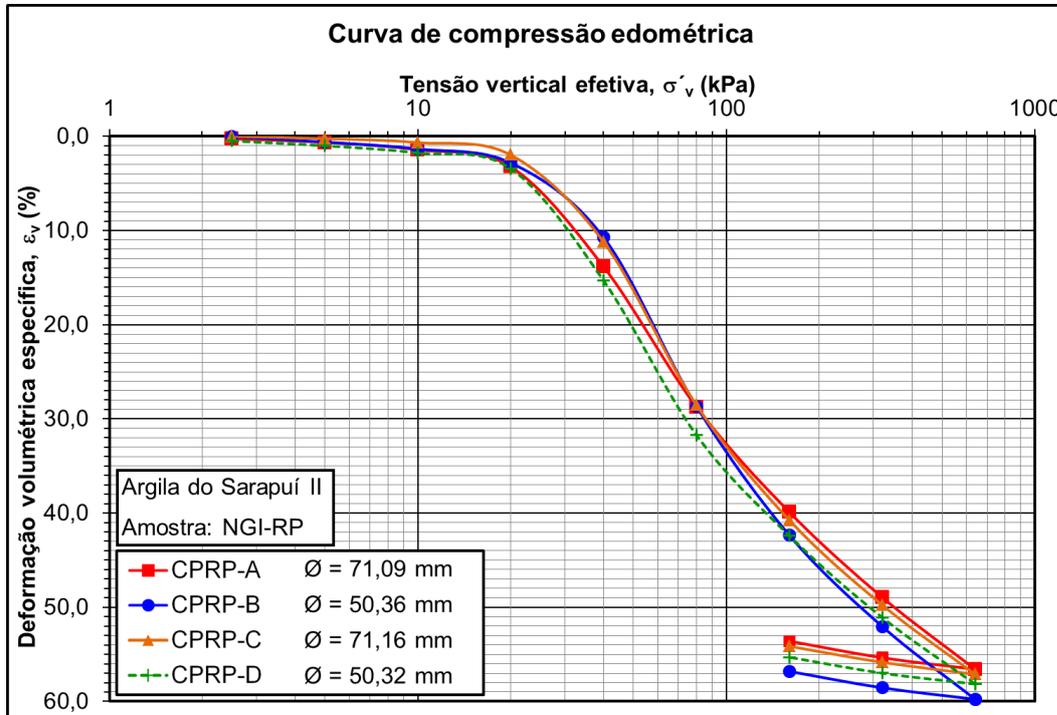


Figura 5.5 – Curvas de compressão edométrica “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v(\log)$ ” da bateria de ensaios EDO-RP.

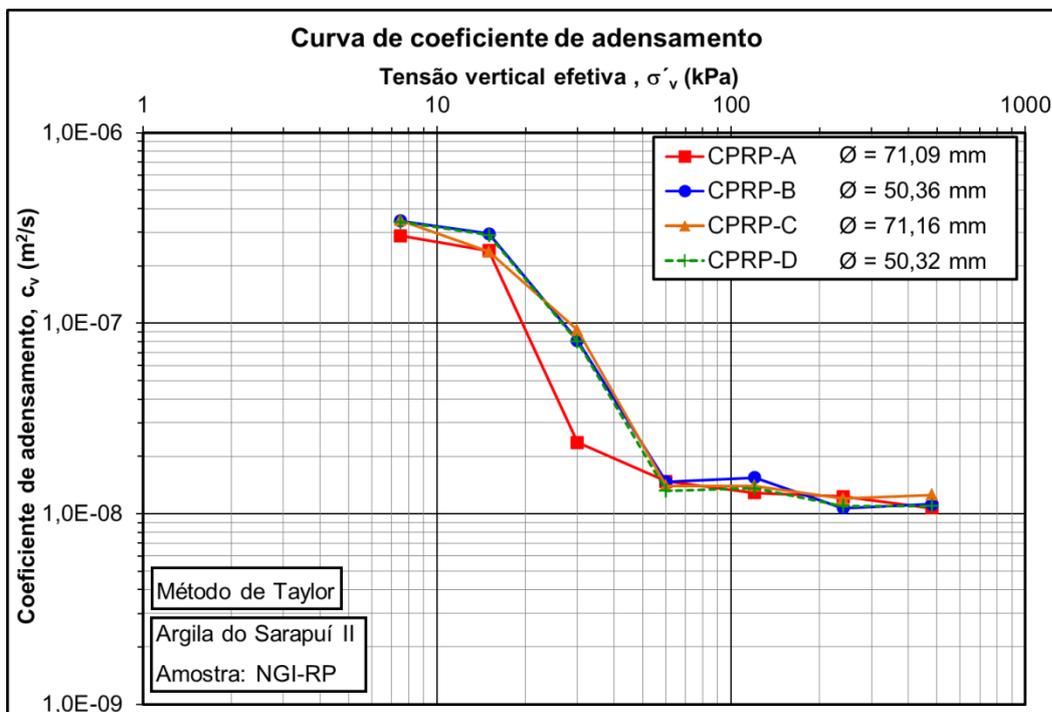


Figura 5.6 – Curvas de coeficiente de adensamento “ $c_v(\log) \times \sigma'_{v \text{ médio}}(\log)$ ” da bateria de ensaios EDO-RP.

#### 5.5.4.

#### Comparação entre os resultados dos corpos de prova da bateria EDO-NR(SEC)

Neste item, é feita uma comparação entre os resultados obtidos dos quatro corpos de prova da bateria de ensaios EDO-NR(SEC), sendo dois moldados com cerca de 50 mm de diâmetro e dois moldados com cerca de 70 mm de diâmetro. Para tanto, a Figura 5.7 reúne as curvas “ $\varepsilon_v$  versus  $\sigma'_v(\log)$ ”, ao passo que a Figura 5.8 reúne as curvas “ $c_v(\log)$  versus  $\sigma'_v(\log)$ ”, com os valores de  $c_v$  determinados pelo método de Taylor, de todos os corpos de prova da bateria EDO-NR(SEC). Tal comparação tem o objetivo de avaliar, de forma mais apurada, o eventual efeito do diâmetro do corpo de prova na qualidade dos corpos de prova moldados na amostra NGI-NR, a qual foi extraída com o amostrador que não teve a sua superfície interna revestida.

Embora moldados na mesma amostra, os resultados dos corpos de prova da bateria EDO-NR(26D) não são aqui reunidos com os resultados dos corpos de prova da bateria EDO-NR(SEC), uma vez que aqueles foram ensaiados 26 dias após a moldagem, ao passo que estes foram ensaiados no dia seguinte à moldagem. A avaliação do efeito do tempo compreendido entre a moldagem e o início do ensaio será feita em um item adiante.

Da Tabela 5.10, observa-se que o corpo de prova CPNR-D ( $\phi = 50,32$  mm) é o que apresenta destacadamente o maior valor de  $\Delta e/e_0$  e o menor valor de  $\sigma'_{vm}$ , o que também pode ser constatado nas curvas de compressão edométrica apresentadas na Figura 5.7. Por outro lado, o corpo de prova CPNR-B ( $\phi = 50,36$  mm) apresenta o segundo valor mais baixo de  $\Delta e/e_0$  e o maior valor de  $\sigma'_{vm}$ . O corpo de prova CPNR-B também apresenta a curvatura mais acentuada no trecho de compressão virgem da curva de compressão edométrica (Figura 5.7).

Portanto, assim como na bateria de ensaios EDO-RP, também não se observa uma relação clara entre o diâmetro do corpo de prova e a sua qualidade para os corpos de prova moldados na amostra NGI-NR, a qual foi extraída com o amostrador que não teve a sua superfície interna revestida.

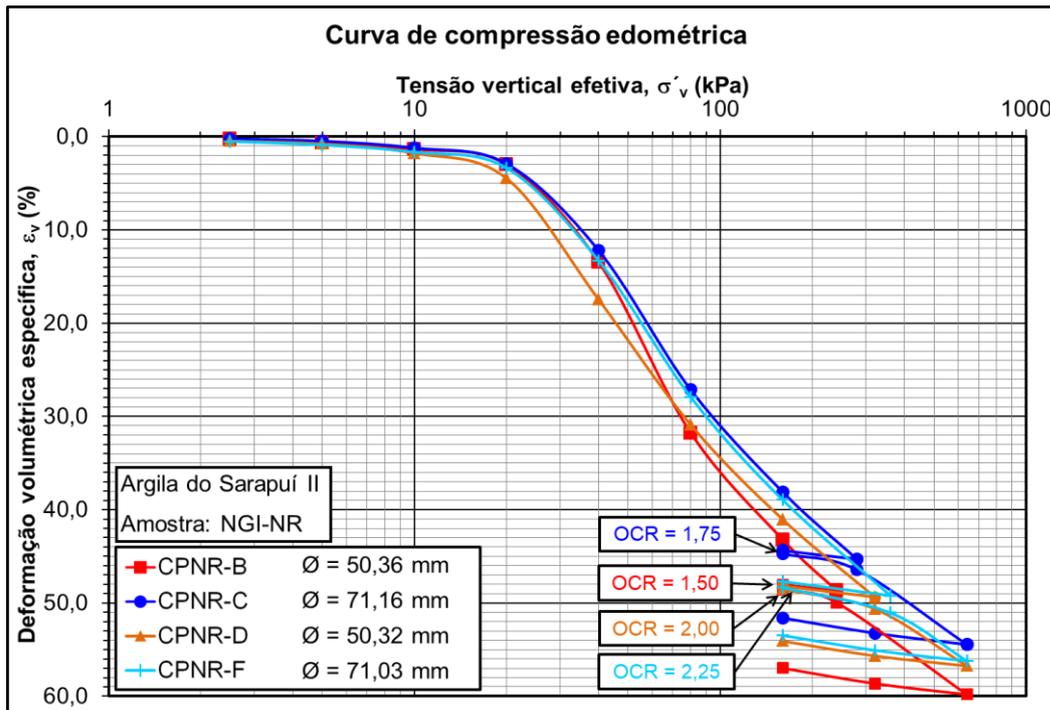


Figura 5.7 – Curvas de compressão edométrica “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v(\log)$ ” da bateria de ensaios EDO-NR(SEC).

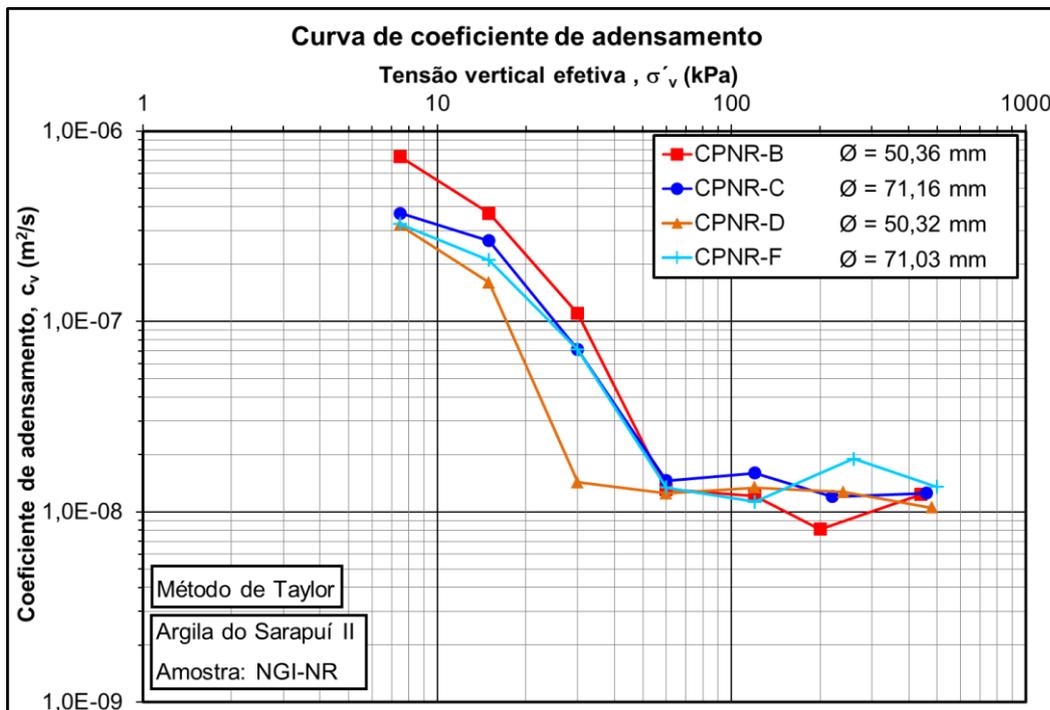


Figura 5.8 – Curvas de coeficiente de adensamento “ $c_v(\log) \times \sigma'_{v \text{ médio}}(\log)$ ” da bateria de ensaios EDO-NR(SEC).

Embora as curvas de compressão edométrica dos três corpos de prova da bateria EDO-NR(26D) não tenham sido apresentadas neste item, da Tabela

5.11, observa-se que o corpo de prova CPNR-E ( $\phi = 50,34$  mm) é o que apresenta maior valor de  $\Delta e/e_0$  e menor valor de  $\sigma'_{vm}$ . Por outro lado, os corpos de prova CPNR-G ( $\phi = 70,97$  mm) e CPNR-H ( $\phi = 50,35$  mm) apresentam exatamente o mesmo valor de  $\Delta e/e_0$  e valores muito parecidos de  $\sigma'_{vm}$ . Isto posto, esses resultados corroboram a constatação de que o diâmetro do corpo de prova parece não ter exercido influência nesses corpos de prova moldados na amostra NGI-NR.

### 5.5.5.

#### **Comparação entre os resultados dos corpos de prova com cerca de 50 mm de diâmetro**

Neste item, é feita uma comparação entre os resultados dos dois corpos de prova com cerca de 50 mm de diâmetro da bateria EDO-RP, provenientes do amostrador revestido com o FEP, e os resultados dos dois corpos de prova com cerca de 50 mm de diâmetro da bateria EDO-NR(SEC), provenientes do amostrador não revestido. Tal comparação tem o objetivo de avaliar o eventual efeito da aplicação do FEP na superfície interna do tubo de amostragem na qualidade dos corpos de prova moldados com cerca de 50 mm de diâmetro.

As curvas “ $\varepsilon_v$  versus  $\sigma'_v(\log)$ ” e as curvas “ $c_v(\log)$  versus  $\sigma'_v(\log)$ ” dos corpos de prova com cerca de 50 mm de diâmetro das baterias EDO-RP e EDO-NR(SEC) são reunidas na Figura 5.9 e na Figura 5.10, respectivamente.

Os dois corpos de prova da bateria EDO-RP (amostrador revestido), a saber, CPRP-B e CPRP-D, apresentam valores de  $\Delta e/e_0$  iguais a 0,018 e 0,025 e valores de  $\sigma'_{vm}$  iguais a 33,7 kPa e 25,9 kPa, respectivamente. Os dois corpos de prova da bateria EDO-NR(SEC) (amostrador não revestido), a saber, CPNR-B e CPNR-D, apresentam valores de  $\Delta e/e_0$  iguais a 0,020 e 0,029 e valores de  $\sigma'_{vm}$  iguais a 30,7 kPa e 19,4 kPa, respectivamente. Não apenas com base nesta comparação como nas comparações anteriores, é interessante notar que, em geral, quanto menor o valor de  $\Delta e/e_0$ , maior o valor de  $\sigma'_{vm}$  obtido.

Da Figura 5.9, observa-se que as posições relativas das curvas de compressão edométrica “ $\varepsilon_v$  versus  $\sigma'_v(\log)$ ” dos referidos corpos de prova estão em concordância com os seus respectivos valores de  $\Delta e/e_0$ , isto é: a curva do corpo de prova com o menor valor de  $\Delta e/e_0$  (CPRP-B) está situada à direita (ou acima) da curva do CPNR-B, que está localizada à direita (ou acima) da curva do

CPRP-D, que, por sua vez, está à direita (ou acima) da curva do CPNR-D, que é o corpo de prova com o maior valor de  $\Delta e/e_0$ . Tal resultado está em consonância com um dos efeitos do amolgamento apresentados no item 2.5.2 “*Amostragem em solos moles*”, que é o aumento da deformação volumétrica específica ( $\varepsilon_v$ ) para uma dada tensão vertical efetiva ( $\sigma'_v$ ). Ademais, observa-se que a inclinação do trecho inicial no domínio de compressão virgem da curva de compressão do corpo de prova CPNR-D é inferior às dos demais corpos de prova.

Embora haja indícios, não é possível afirmar que a aplicação do FEP na superfície interna do tubo de amostragem melhorou a qualidade dos corpos de prova com cerca de 50 mm de diâmetro. Ressalta-se, porém, que a amostra NGI-RP (amostrador revestido) ficou armazenada por um período de 55 dias até que fossem realizadas as moldagens dos corpos de prova, enquanto a amostra NGI-NR (amostrador não revestido) ficou armazenada por menos de um dia até a moldagem dos corpos de prova.

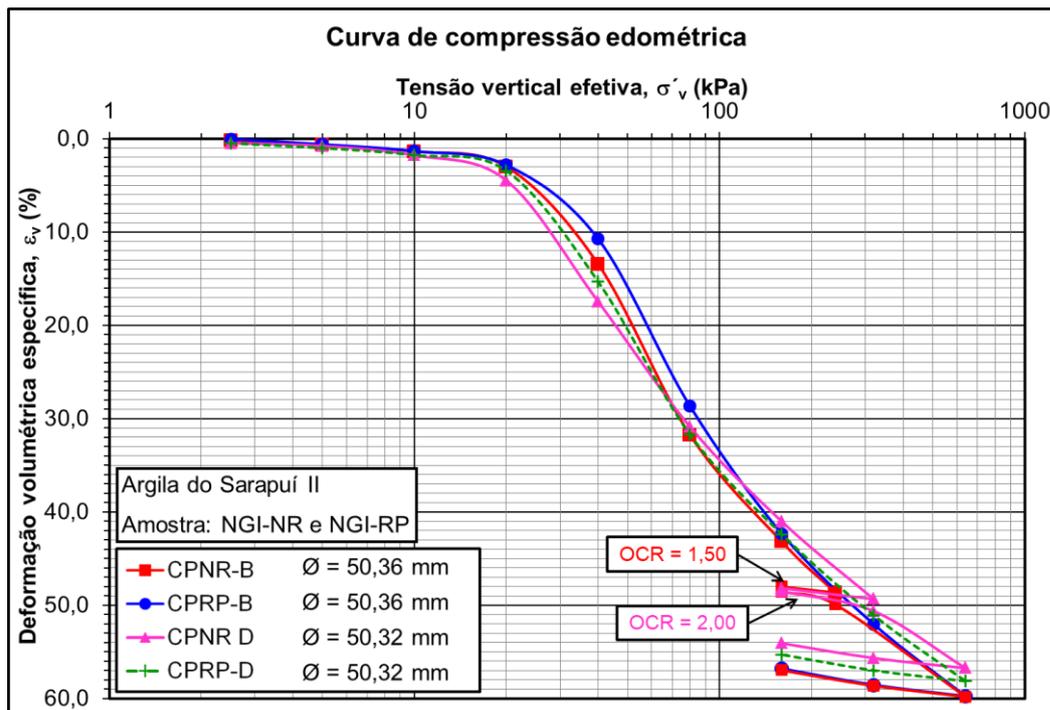


Figura 5.9 – Curvas de compressão edométrica “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v(\log)$ ” de corpos de prova com cerca de 50 mm de diâmetro das baterias EDO-RP e EDO-NR(SEC).

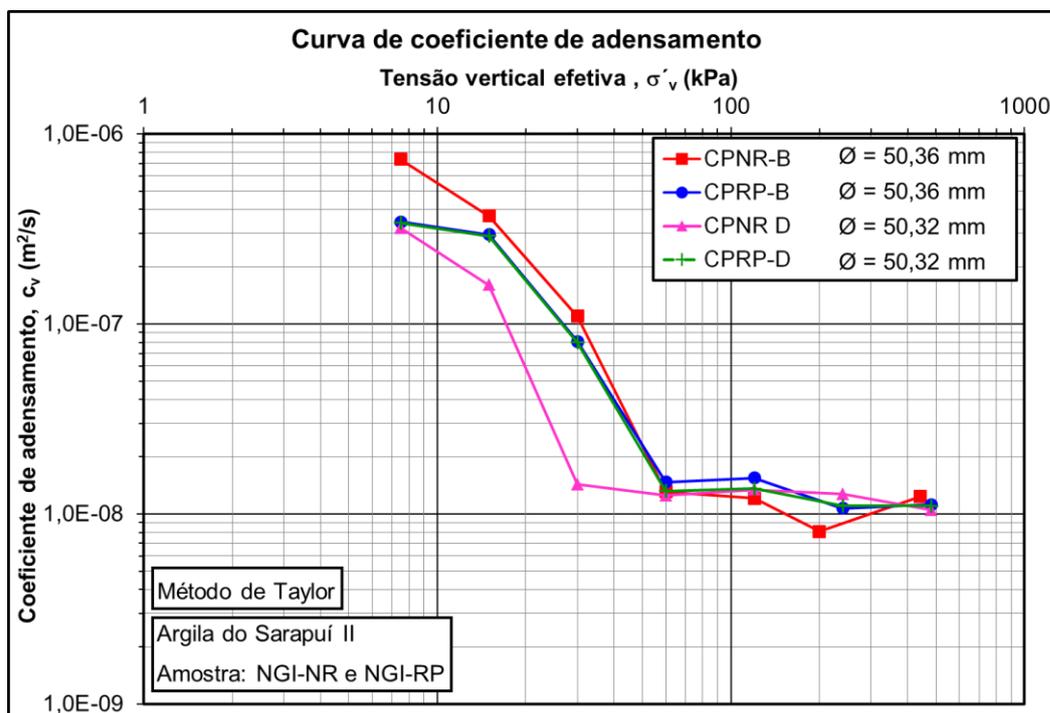


Figura 5.10 – Curvas de coeficiente de adensamento “ $c_v(\log) \times \sigma'_{v\text{ médio}}(\log)$ ” de corpos de prova com cerca de 50 mm de diâmetro das baterias EDO-RP e EDO-NR(SEC).

### 5.5.6.

#### Comparação entre os resultados dos corpos de prova com cerca de 70 mm de diâmetro

Neste item, é feita uma comparação entre os resultados dos dois corpos de prova com cerca de 70 mm de diâmetro da bateria EDO-RP, provenientes do amostrador revestido com o FEP, e os resultados dos dois corpos de prova com cerca de 70 mm de diâmetro da bateria EDO-NR(SEC), provenientes do amostrador não revestido. Tal comparação tem o objetivo de avaliar o possível efeito da aplicação do FEP na superfície interna do tubo de amostragem na qualidade dos corpos de prova moldados com cerca de 70 mm de diâmetro.

As curvas “ $\varepsilon_v$  versus  $\sigma'_v(\log)$ ” e as curvas “ $c_v(\log)$  versus  $\sigma'_v(\log)$ ” dos corpos de prova com cerca de 70 mm de diâmetro das baterias EDO-RP e EDO-NR(SEC) são reunidas na Figura 5.11 e na Figura 5.12, respectivamente.

Os dois corpos de prova da bateria EDO-RP (amostrador revestido), a saber, CPRP-A e CPRP-C, apresentam valores de  $\Delta e/e_0$  iguais a 0,021 e 0,010 e valores de  $\sigma'_{vm}$  iguais a 26,0 kPa e 32,4 kPa, respectivamente. Os dois corpos de prova da bateria EDO-NR(SEC) (amostrador não revestido), a saber, CPNR-C e CPNR-F, apresentam valores de  $\Delta e/e_0$  iguais a 0,019 e 0,025 e valores de  $\sigma'_{vm}$  iguais a 29,3 kPa e 27,7 kPa, respectivamente. Ressalta-se, portanto, que o corpo de prova CPRP-C apresenta um valor de  $\Delta e/e_0$  destacadamente inferior aos dos demais corpos de prova. À propósito, este corpo de prova é o que apresenta o menor valor de  $\Delta e/e_0$  entre todos os corpos de prova ensaiados nesta pesquisa.

Da Figura 5.11, observa-se que as curvas “ $\varepsilon_v$  versus  $\sigma'_v(\log)$ ” dos referidos corpos são bastante semelhantes. Contudo, nota-se que a curva do corpo de prova CPRP-C apresenta o trecho de recompressão menos inclinado e o trecho inicial de compressão virgem mais inclinado do que as curvas dos demais corpos de prova. Além disso, o trecho inicial de compressão virgem da curva do corpo de prova CPRP-C situa-se à direita (ou acima) das curvas dos demais corpos de prova. Todos estes aspectos atestam a melhor qualidade do corpo de prova frente aos demais.

Ainda assim, com base na análise conjunta de todos os corpos de prova, não é possível concluir que a aplicação do FEP na superfície interna do tubo de amostragem exerceu algum tipo de influência na qualidade dos corpos de prova.

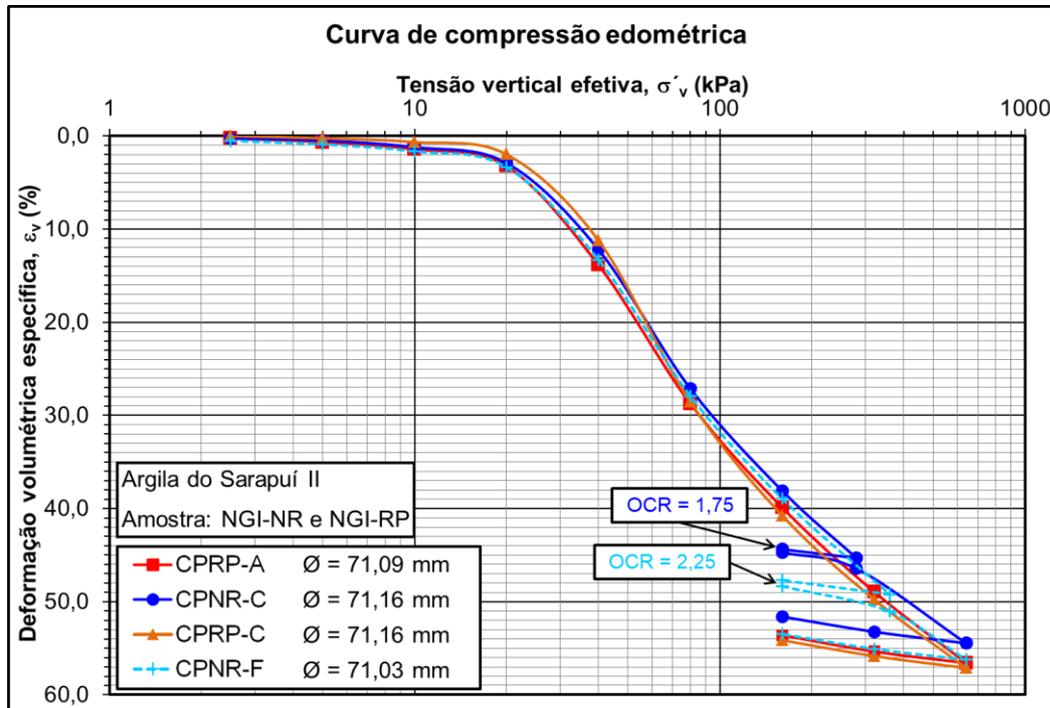


Figura 5.11 – Curvas de compressão edométrica “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v(\log)$ ” dos corpos de prova com cerca de 70 mm de diâmetro das baterias EDO-RP e EDO-NR(SEC).

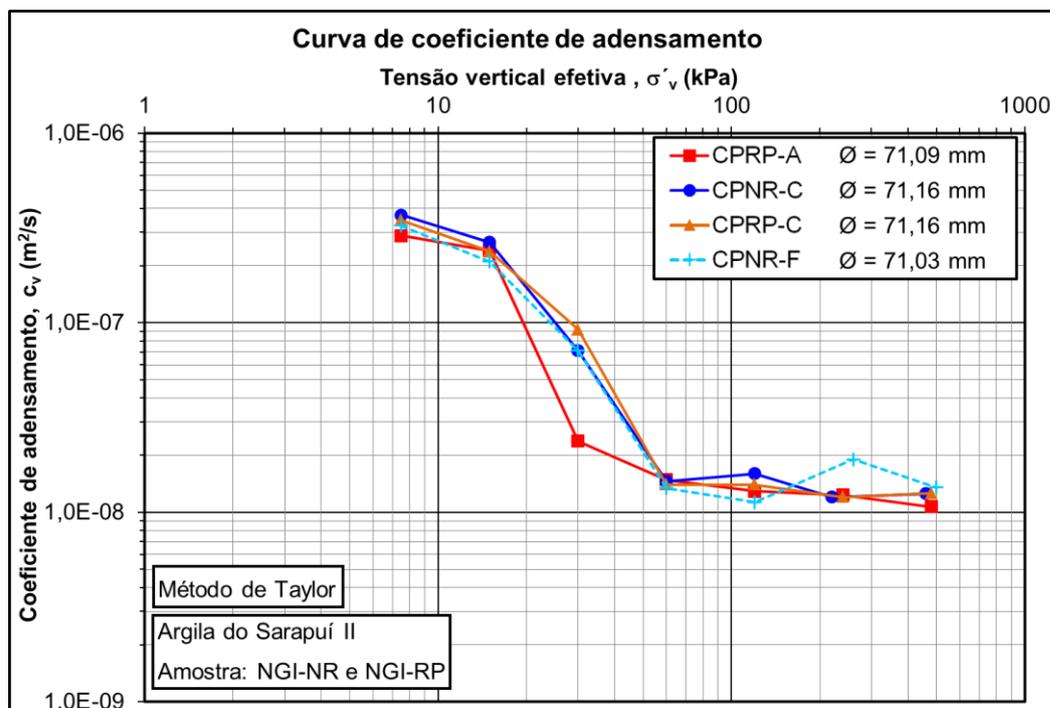


Figura 5.12 – Curvas de coeficiente de adensamento “ $c_v(\log) \times \sigma'_{v \text{ médio}}(\log)$ ” dos corpos de prova com cerca de 70 mm de diâmetro das baterias EDO-RP e EDO-NR(SEC).

### 5.5.7. Comparação entre os resultados dos corpos de prova das baterias EDO-NR(SEC) e EDO-NR(26D)

Neste item, os resultados dos corpos de prova da bateria EDO-NR(26D) são comparados com os resultados dos corpos de prova da bateria EDO-NR(SEC). Os corpos de prova de ambas as baterias foram moldados na amostra NGI-NR, a qual foi extraída com o amostrador que não teve a sua superfície interna revestida. Por outro lado, tais baterias apresentaram três diferenças destacadas, a seguir:

- (1) Entre a moldagem e o início do ensaio, os corpos de prova da bateria EDO-NR(26D) ficaram armazenados por um período de 26 dias na câmara úmida do LGMA, sob temperatura e umidade controladas. Já os corpos de prova da bateria EDO-NR(SEC) foram ensaiados no dia seguinte à moldagem, tendo passado a noite na mesma câmara úmida;
- (2) Nos ensaios da bateria EDO-NR(26D), foi introduzido um estágio de carregamento de 30 kPa, entre os estágios de carregamento de 20 kPa e de 40 kPa, ao passo que, nos ensaios da bateria EDO-NR(SEC), o estágio de carregamento de 30 kPa não foi realizado;
- (3) Os ensaios da bateria EDO-NR(SEC) foram realizados dentro de uma sala pequena do LGMA, separada exclusivamente para a realização da maior parte dos ensaios desta pesquisa e, portanto, com acesso restrito, sob a temperatura de  $20 \pm 1$  °C. Já os ensaios da bateria EDO-NR(26D) foram realizados também no LGMA, porém fora desta sala, sob a temperatura de  $22 \pm 1$  °C.

As curvas “ $\varepsilon_v$  versus  $\sigma'_v(\log)$ ” e as curvas “ $c_v(\log)$  versus  $\sigma'_v(\log)$ ” dos corpos de prova das baterias de ensaios EDO-NR(26D) e EDO-NR(SEC) são apresentadas na Figura 5.13 e na Figura 5.14, respectivamente.

Resultados experimentais mostram que o aumento de temperatura acelera o fenômeno viscoso que rege o chamado “adensamento secundário”, transladando a curva de compressão edométrica plotada em termos de 24 horas de duração do estágio para a esquerda (ou para baixo), ver por exemplo Leroueil & Marques (1996) e Andrade (2009). Todavia, a diferença de temperatura entre as duas baterias de ensaios de apenas 2° C em média não deve ser relevante a ponto de impedir a avaliação comparativa de qualidade dos corpos de prova das duas baterias. Neste sentido, ressalta-se que, dos três corpos de prova

ensaiados sob a temperatura de  $22 \pm 1$  °C, dois corpos de prova (CPNR-G e CPNR-H) possuem suas curvas localizadas à direita de todas as demais curvas, mostrando que o efeito de temperatura não deve invalidar a comparação.

Da Figura 5.13, constata-se que a introdução do estágio de carregamento de 30 kPa propiciou uma melhor definição da curva de compressão edométrica na região onde está localizada a tensão de sobreadensamento ( $\sigma'_{vm}$ ), propiciando a obtenção de um valor mais acurado de  $\sigma'_{vm}$ .

Não obstante, a aplicação do estágio de carregamento de 30 kPa somente na bateria EDO-NR(26D) não interfere na avaliação comparativa da qualidade dos corpos de prova das duas baterias com base nos valores obtidos de  $\Delta e/e_0$ , onde  $\Delta e = e_0 - e_{\sigma'_{v0}}$ , sendo  $e_{\sigma'_{v0}}$  o valor de índice de vazios ( $e$ ) referente à tensão vertical efetiva *in situ* ( $\sigma'_{v0}$ ) na curva de compressão edométrica. Isto porque os valores de  $\sigma'_{v0}$  desses corpos de prova estão situados entre 11,1 kPa e 12,5 kPa (Tabela 5.10 e Tabela 5.11), ou seja, bastante abaixo de 20 kPa, que é a tensão vertical aplicada no estágio de carregamento que antecede o estágio de 30 kPa.

Assim, no que se refere aos valores de  $\Delta e/e_0$  (Tabela 5.10 e Tabela 5.11), os dois corpos de prova que apresentaram os menores valores foram CPNR-G ( $\Delta e/e_0 = 0,017$ ) e CPNR-H ( $\Delta e/e_0 = 0,017$ ), ambos pertencentes à bateria EDO-NR(26D), e cujos trechos de compressão virgem estão situados à direita (ou acima) de todos os demais corpos de prova. Por outro lado, os dois corpos de prova que apresentaram os maiores valores são de baterias diferentes, a saber: CPNR-D ( $\Delta e/e_0 = 0,029$ ), da bateria EDO-NR(SEC), e CPNR-E ( $\Delta e/e_0 = 0,032$ ), da bateria EDO-NR(26D). Não por acaso, estes dois corpos de prova foram os que apresentaram os menores valores de tensão de sobreadensamento ( $\sigma'_{vm}$ ) entre todos os corpos de prova das duas baterias.

Por tudo isso, e pela semelhança entre as curvas de compressão edométrica das duas baterias, pode-se afirmar que o tempo de 26 dias no qual os corpos de prova da bateria EDO-NR-(26D) permaneceram na câmara úmida não interferiu na representatividade dos resultados deles obtidos.

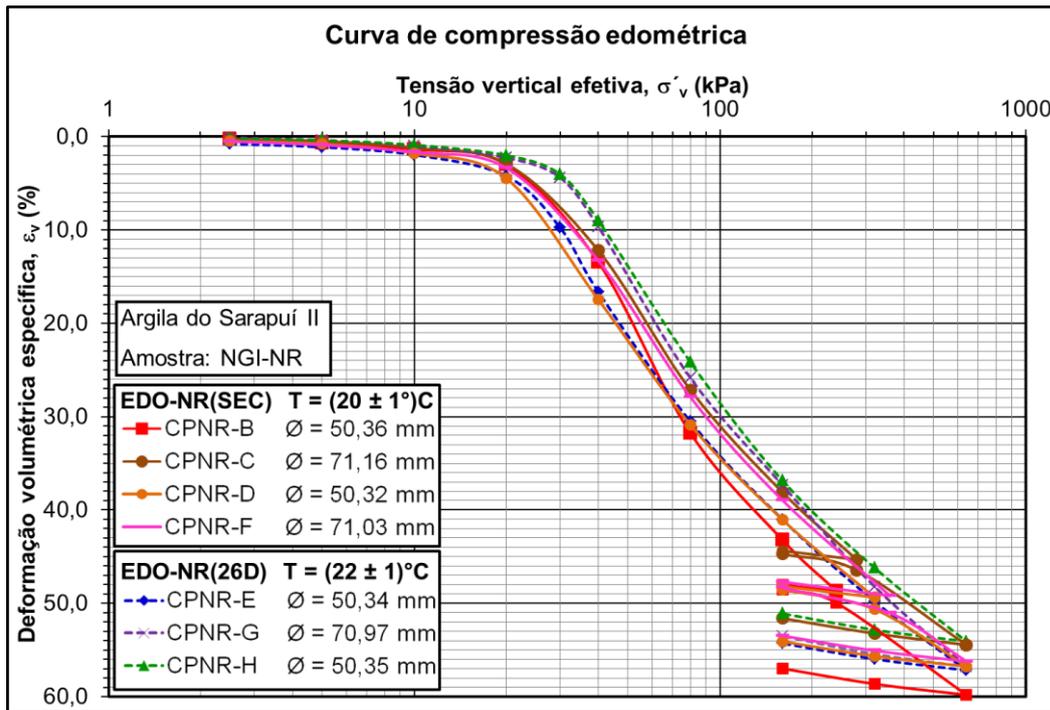


Figura 5.13 – Curvas de compressão edométrica “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v(\log)$ ” das baterias de ensaio EDO-NR(26D) e EDO-NR(SEC).

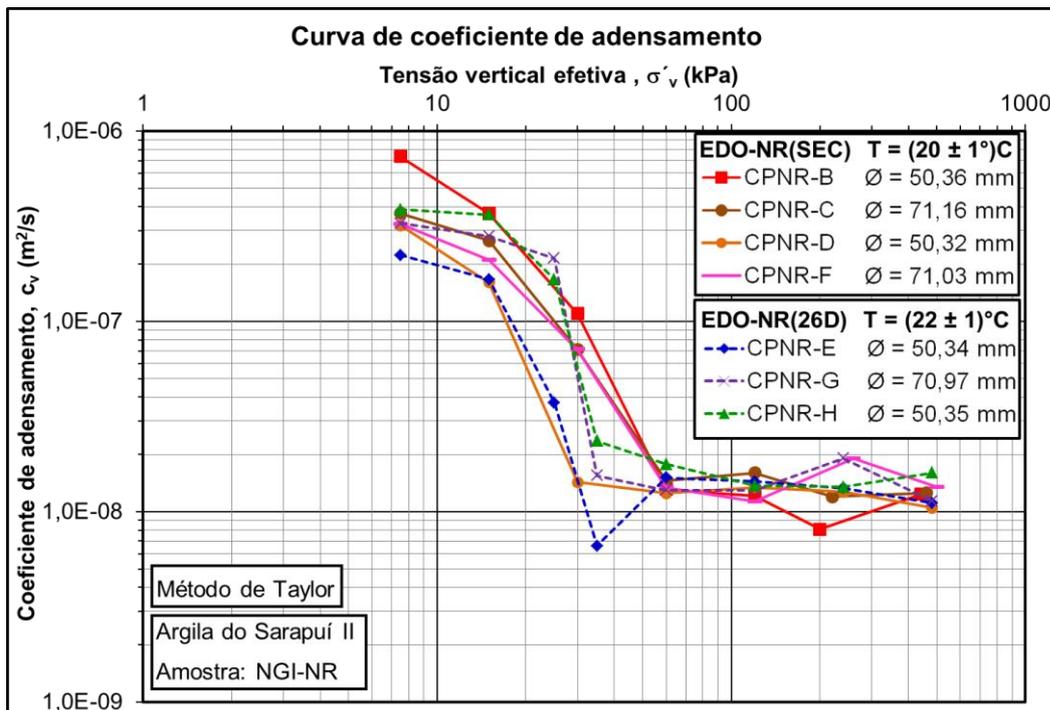


Figura 5.14 – Curvas de coeficiente de adensamento “ $c_v(\log) \times \sigma'_{v\text{ médio}}(\log)$ ” das baterias de ensaio EDO-NR(26D) e EDO-NR(SEC).

## 5.6.

### Estágios de descarregamento de longa duração dos ensaios da bateria EDO-NR(SEC)

Conforme descrito no item 3.5 “*Materiais e métodos*”, nos quatro ensaios de adensamento edométrico da bateria EDO-NR(SEC), foram realizados os seguintes estágios de descarregamento de longa duração:

- e) CPNR-B: de  $\sigma_v = 240$  kPa para  $\sigma_v = 160$  kPa, OCR = 1,50;
- f) CPNR-C: de  $\sigma_v = 280$  kPa para  $\sigma_v = 160$  kPa, OCR = 1,75;
- g) CPNR-D: de  $\sigma_v = 320$  kPa para  $\sigma_v = 160$  kPa, OCR = 2,00;
- h) CPNR-F: de  $\sigma_v = 360$  kPa para  $\sigma_v = 160$  kPa, OCR = 2,25.

Os quatro ensaios permaneceram descarregados sob  $\sigma_v = 160$  kPa por 99.960 min, cerca de 70 dias, quando então foram recarregados para as respectivas tensões verticais a partir das quais tinham sido descarregados.

A Figura 5.15 e a Figura 5.16 mostram, respectivamente, as curvas “ $\Delta\varepsilon_v$  versus t (log)” e “ $\Delta\varepsilon_v$  versus t” dos estágios de descarregamento de longa duração dos ensaios da bateria EDO-NR(SEC).

Os resultados indicam que, após a expansão primária promovida pelo descarregamento, todos os corpos de prova passaram a experimentar compressão secundária, sendo que:

- O corpo de prova CPNR-B (OCR = 1,50) apresentou uma variação de deformação volumétrica específica ( $\Delta\varepsilon_v$ ) igual a - 1,26 % após um tempo (t) de cerca de 1 dia, quando então passou a comprimir.
- O corpo de prova CPNR-C (OCR = 1,75) apresentou uma variação de deformação volumétrica específica ( $\Delta\varepsilon_v$ ) igual a - 1,75 % após um tempo (t) de cerca de 3 dias, quando então passou a comprimir.
- O corpo de prova CPNR-D (OCR = 2,00) apresentou uma variação de deformação volumétrica específica ( $\Delta\varepsilon_v$ ) igual a - 2,39 % após um tempo (t) de cerca de 4 dias, quando então passou a comprimir.
- O corpo de prova CPNR-F (OCR = 2,25) apresentou uma variação de deformação volumétrica específica ( $\Delta\varepsilon_v$ ) igual a - 3,00 % durante um período de cerca de 4 dias, quando então passou a comprimir.

O comportamento observado nestes estágios de descarregamento de longa duração difere dos resultados apresentados por Feijó (1991) para a Argila do Sarapuí I, RJ, Andrade (2009) para a Argila do Canal do Porto de Santos, SP, e Conte (2019) para a Argila da Ilha do Fundão, RJ. Com base nos resultados obtidos pelos referidos autores, era esperado que os corpos de prova com valores de OCR iguais a 1,50 e 1,75 sofressem compressão secundária após a expansão primária, com a velocidade de deformação sendo tão menor quanto maior o valor do OCR. Entretanto, não era esperado que os corpos de prova com OCR iguais a 2,00 e 2,25 sofressem compressão secundária após a expansão primária. Além disso, mesmo para os corpos de prova com valores de OCR inferiores a 2,00, não eram esperadas velocidades de deformação por adensamento secundário e magnitudes de deformação por compressão secundária tão grandes como as observadas nesta pesquisa.

No depósito de argila mole do campo experimental Sarapuí II, no intervalo de profundidade correspondente às amostras ensaiadas nesta pesquisa (3,50 a 4,30 m), o teor de sais varia de 22 a 27 g/L (Jannuzzi et al., 2015). Assim, é provável que os comportamentos não esperados apresentados durante os estágios de longa duração dos corpos de prova CPNR-B, CPNR-C, CPNR-D e CPNR-F tenham sido influenciados pela alteração do teor de sais dos corpos de provas ao longo do tempo, uma vez que, as células de adensamento foram inundadas com água destilada durante a montagem dos ensaios.

Após um período de 60.885 min (cerca de 42 dias) do descarregamento, as águas das células de adensamento foram substituídas por uma solução de NaCl e água destilada com concentração de 30 g/L, não se constatando mudança clara nos comportamentos dos corpos de prova CPNR-B (OCR = 1,50) e CPNR-F (OCR = 2,25), mas algumas perturbações nos comportamentos dos corpos de prova CPNR-C (OCR = 1,75) e CPNR-D (OCR = 2,00), conforme pode ser visto na Figura 5.15 e na Figura 5.16.

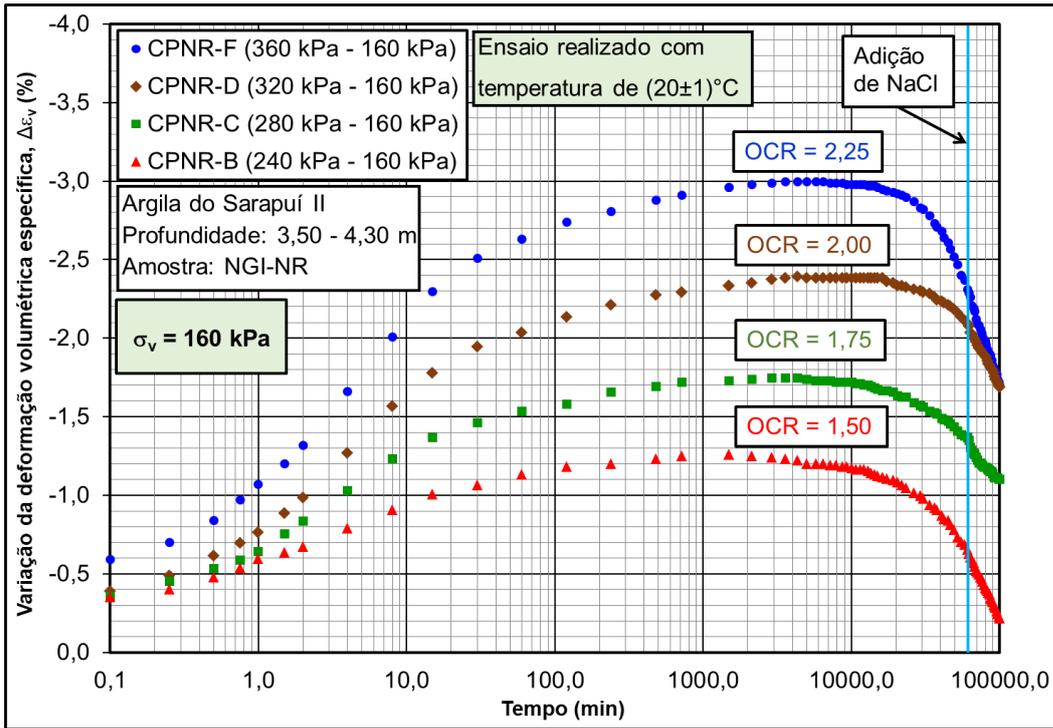


Figura 5.15 – Curvas “ $\Delta\epsilon_v$  versus t (log)” dos estágios de descarregamento de longa duração da bateria de ensaios EDO-NR(SEC)

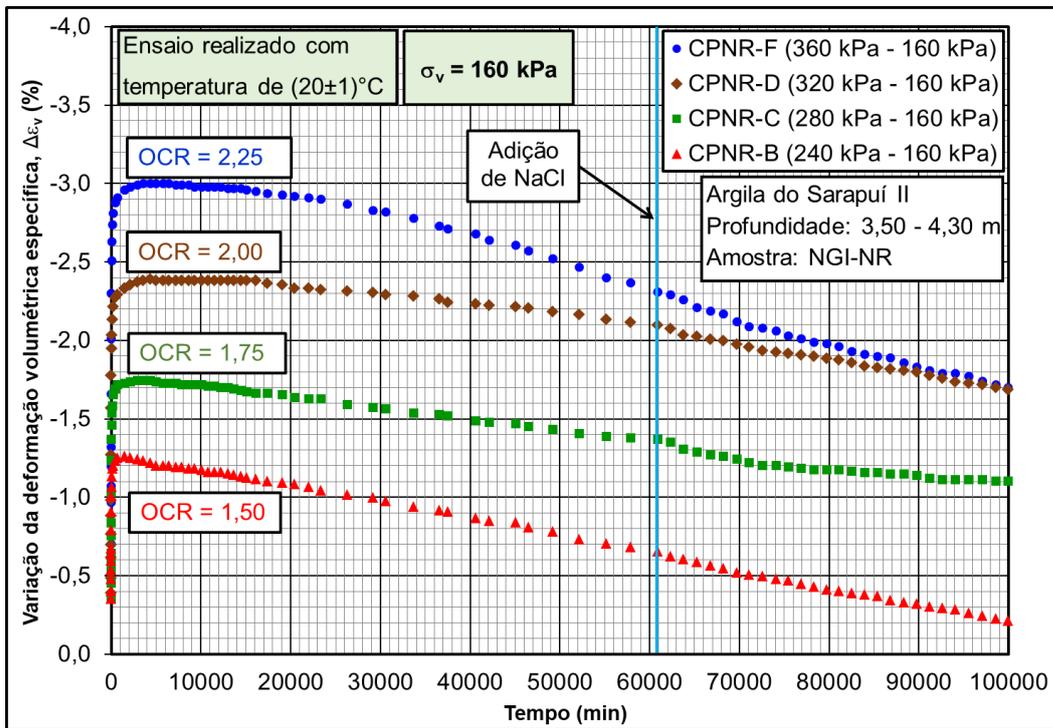


Figura 5.16 – Curvas “ $\Delta\epsilon_v$  versus t” dos estágios de descarregamento de longa duração da bateria de ensaios EDO-NR(SEC)

## 6.

### Conclusões e sugestões para pesquisas futuras

#### 6.1.

##### Conclusões.

Dos resultados obtidos nesta pesquisa destacam-se as seguintes conclusões:

A) Quanto à caracterização das amostras coletadas:

- Os valores de granulometria, limites de consistência, teor de matéria orgânica, teor de umidade natural, índice de vazios e peso específico natural determinados nas duas amostras investigadas nesta pesquisa, extraídas do depósito de argila mole do campo experimental Sarapuí II, Duque de Caxias, RJ, no intervalo de profundidade de 3,50 m a 4,30 m, são bastante similares aos valores obtidos por Jannuzzi et al. (2015) no mesmo intervalo de profundidade.

B) Quanto às técnicas de amostragem, armazenamento das amostras e moldagem dos corpos de prova:

- As técnicas adotadas na amostragem, no armazenamento das amostras e na moldagem dos corpos de prova possibilitaram que todos os onze corpos de prova intactos submetidos aos ensaios de adensamento edométrico de carga incremental fossem classificados como de qualidade “*Excelente a muito boa*” segundo o critério de Lunne et al. (1997).

C) Quanto à tensão de sobreadensamento e razão de sobreadensamento:

- Para todos os ensaios de adensamento edométrico, as curvas de compressão “*e versus  $\sigma'_v$  (log)*” e “ *$\varepsilon_v$  versus  $\sigma'_v$  (log)*” plotadas em

termos de 24 horas de duração do estágio ficaram situadas à esquerda (ou abaixo) das curvas de compressão plotadas em termos de  $\dot{\epsilon}_v = 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ , as quais ficaram situadas à esquerda (ou abaixo) das curvas de compressão plotadas em termos de “fim do primário” calculado pelo método de Taylor. Como consequência, o valor da tensão de sobreadensamento ( $\sigma'_{vm}$ ) obtido da curva de compressão plotada em termos de 24 horas de duração do estágio [ $\sigma'_{vm}(24 \text{ horas})$ ] foi menor do que o valor de  $\sigma'_{vm}$  obtido da curva plotada em termos de  $\dot{\epsilon}_v = 10^{-6} \text{ s}^{-1}$  [ $\sigma'_{vm}(\dot{\epsilon}_v = 10^{-6} \text{ s}^{-1})$ ], que, por sua vez, foi menor do que o valor de  $\sigma'_{vm}$  obtido da curva plotada em termos de “fim do primário” [ $\sigma'_{vm}$ (“fim do primário”)].

- Os valores de  $\sigma'_{vm}(24 \text{ horas})$  obtidos dos onze corpos de prova intactos ficaram compreendidos entre 19,4 kPa e 33,7 kPa, sendo o valor médio igual a 28,1 kPa, com valores de OCR(24 horas) situados entre 1,6 e 3,0, sendo o valor médio igual a 2,4. Os valores de OCR(24 horas) são bastante semelhantes aos obtidos por Jannuzzi et al. (2015) entre as profundidades de 3,00 m e 3,80 m. Os valores de  $\sigma'_{vm}(\dot{\epsilon}_v = 10^{-6} \text{ s}^{-1})$  ficaram situados entre 23,1 kPa e 37,2 kPa, sendo o valor médio igual 32,2 kPa, e os valores de  $\sigma'_{vm}$  (“fim do primário”) ficaram situados entre 26,5 kPa e 45,0 kPa, sendo o valor médio igual a 36,2 kPa. Assim,  $\sigma'_{vm}(\dot{\epsilon}_v = 10^{-6} \text{ s}^{-1})$  correspondeu, em média, a 115 % de  $\sigma'_{vm}(24 \text{ horas})$  e  $\sigma'_{vm}$  (“fim do primário”) correspondeu, em média, a 129 % de  $\sigma'_{vm}(24 \text{ horas})$ .
- Para os ensaios de adensamento edométrico nos quais foi incluído um estágio de carregamento de 30 kPa, entre os estágios de carregamento de 20 kPa e de 40 kPa, domínio dentro do qual estava situada a tensão de sobreadensamento ( $\sigma'_{vm}$ ), foi possível obter uma melhor definição da curva de compressão edométrica na vizinhança de  $\sigma'_{vm}$ , propiciando, por conseguinte, a obtenção do valor de  $\sigma'_{vm}$  com mais acurácia.
- Para os dois corpos de prova remoldados, o amolgamento induzido na argila fez com que os valores obtidos de  $\sigma'_{vm}$  ficassem bem abaixo dos respectivos valores de tensão vertical efetiva *in situ* ( $\sigma'_{v0}$ ), levando a obtenção de valores de OCR bem inferiores a um.

- Não foram observadas influências do diâmetro do corpo de prova (cerca de 50 mm e cerca de 70 mm) e do revestimento da superfície interna do amostrador com etileno-propileno fluorado (FEP) nos valores obtidos de tensão de sobreadensamento ( $\sigma'_{vm}$ ) dos corpos de prova intactos.

D) Quanto aos parâmetros de compressibilidade:

- Para todos os onze corpos de prova intactos, os valores de  $C_c/(1+e_0)$  ficaram compreendidos entre 0,46 e 0,64, sendo o valor médio igual a 0,55. Tais valores são bastante semelhantes aos obtidos por Jannuzzi et al. (2015) entre as profundidades de 3,00 m e 3,80 m.
- Para os dois corpos de prova remoldados, os valores de  $C_c/(1+e_0)$  obtidos foram iguais a 0,25 e 0,28, muito inferiores aos valores obtidos dos corpos de prova intactos. O amolgamento induzido na amostra resultou em uma acentuada redução da compressibilidade no domínio de compressão virgem, e em um acentuado aumento da compressibilidade no domínio de recompressão. No entanto, ressalta-se que os valores de  $C_e$  obtidos dos corpos de prova remoldados foram muito semelhantes aos obtidos dos corpos de prova intactos.
- Os corpos de prova intactos moldados na amostra extraída com o amostrador revestido com o FEP apresentaram, em média, valores de  $C_c/(1+e_0)$  levemente superiores aos dos corpos de prova provenientes do amostrador sem revestimento. Em contrapartida, não foi observada uma influência do diâmetro do corpo de prova nos valores obtidos de  $C_c/(1+e_0)$ .

E) Quanto ao coeficiente de adensamento por drenagem vertical ( $c_v$ ):

- Para todos os corpos de prova, os valores de coeficiente de adensamento ( $c_v$ ) determinados pelo método de Taylor foram superiores aos valores de  $c_v$  determinados pelo método Casagrande, principalmente dentro do domínio de compressão virgem.

- Para os corpos de prova intactos, no domínio de recompressão, os valores de  $c_v$  determinados pelo método de Taylor ficaram compreendidos entre  $1,6 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  e  $7,3 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ , sendo o valor médio igual a  $3,1 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ . No domínio de recompressão, os valores de  $c_v$  determinados pelo método de Taylor foram, em média, 15 % superiores aos valores de  $c_v$  determinados pelo método de Casagrande.
- Para os corpos de prova intactos, no domínio de compressão virgem, os valores de  $c_v$  determinados pelo método de Taylor ficaram compreendidos entre  $1,1 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$  e  $1,9 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ , sendo o valor médio igual a  $1,3 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ . No domínio de compressão virgem, os valores de  $c_v$  determinados pelo método de Taylor foram, em média, 30 % superiores aos valores de  $c_v$  determinados pelo método de Casagrande.
- Nos corpos de prova intactos, os valores  $c_v$  sofreram uma queda brusca quando a tensão vertical efetiva ( $\sigma'_v$ ) ultrapassou a tensão de sobreadensamento ( $\sigma'_{vm}$ ). Por outro lado, para os corpos de prova remoldados, os valores de  $c_v$  permaneceram praticamente constantes ao longo de todo domínio de  $\sigma'_v$ , sendo próximos àqueles determinados no domínio de compressão virgem para os corpos de prova intactos.

F) Quanto às qualidades das amostras/ corpos de prova avaliadas pelos resultados dos ensaios de adensamento edométrico de carga incremental

- A comparação entre as curvas de compressão edométrica dos corpos intactos e dos corpos remoldados revelaram todos os efeitos de amolgamento apontados por Ladd (1973), Coutinho (1976) e Martins (1983).
- Para corpos de prova de uma mesma amostra, moldados em um curto intervalo de profundidade, observou-se uma relação clara entre os valores obtidos de  $\Delta e/e_0$  e de  $\sigma'_{vm}$ , a saber, quanto menor o valor de  $\Delta e/e_0$ , maior o valor de  $\sigma'_{vm}$ . Pequenas variações nos valores de  $\Delta e/e_0$  resultaram em alterações expressivas nos valores de  $\sigma'_{vm}$ .

- Não se observou diferença entre as qualidades dos corpos de prova com cerca de 50 mm de diâmetro e com cerca de 70 mm de diâmetro moldados na mesma amostra; tanto para a amostra extraída com o amostrador revestido com o FEP quanto para aquela extraída com o amostrador sem revestimento. Ressalta-se que mesmo os corpos de prova com cerca de 70 mm de diâmetro moldados nas amostras, que tinham 76,2 mm de diâmetro, foram todos classificados como de qualidade “*Excelente a muito boa*” segundo o critério de Lunne et al. (1973), que é o mais rigoroso entre os critérios aplicados.
- Não foi observada diferença clara entre as qualidades dos corpos de prova provenientes do amostrador que teve a parede interna revestida com o FEP e os corpos de prova provenientes do amostrador que não teve a parede interna revestida.
- As duas constatações acima indicam que o efeito das tensões cisalhantes estabelecidas no contato entre a superfície lateral da amostra e a parede interna do amostrador (aço inoxidável e FEP), tanto durante a cravação do tubo amostrador no campo quanto durante a extrusão da amostra no laboratório, não foi relevante a ponto de prejudicar a qualidade das amostras. É provável que a ausência de pré-furo pra a realização da amostragem tenha sido um fator relevante para a excelente qualidade das amostras obtidas.
- Os resultados encontrados nesta pesquisa divergem da tese de que a proposta de Lunne et al. (1997) para avaliação de qualidade de amostras é muito rigorosa para argilas muito plásticas como a Argila do Sarapuí II.

## 6.2.

### **Sugestões para futuras pesquisas.**

- Avaliar a qualidade de amostras mais profundas extraídas do depósito de argila mole do Sarapuí II com o amostrador Geonor/NGI 76 mm, com base em resultados de ensaios de adensamento edométrico de carga incremental.

- Realizar ensaios de adensamento edométrico em duas amostras extraídas exatamente na mesma profundidade e em verticais minimamente distantes no depósito de argila mole do Sarapuí II, ambas com o amostrador Geonor/NGI 76 mm, porém uma sem e a outra com a execução de pré-furo, a fim de avaliar a influência da extensão causada na amostra devido ao alívio de tensão vertical total decorrente da execução de pré-furo na qualidade.
- Realizar ensaios de adensamento edométrico de carga incremental em corpos de prova com diâmetros de 50 mm e 70 mm em solos com menor plasticidade a fim de comparar os resultados com os obtidos neste trabalho.
- Revestir a superfície interna de anéis de adensamento com FEP com o objetivo de avaliar os efeitos do revestimento durante a realização de ensaios de adensamento edométrico.
- Repetir os ensaios de medição do teor de umidade em função do raio da amostra, conforme executados nesta pesquisa, porém em corpos de prova de argila do Sarapuí II livres de fragmentos de conchas, com o intuito de avaliar a migração de água da periferia para o centro da amostra devido ao excesso de poropressão positivo causado pelas distorções não drenadas provocadas pelas tensões cisalhantes estabelecidas entre a amostra e o tubo amostrador durante a cravação do tubo no solo.
- Realizar uma campanha de ensaios de cisalhamento direto para a medição da resistência ao cisalhamento estabelecida em interfaces argila-metal e argila-revestimento, testando diferentes tipos de metal (aço inox, latão ou alumínio, por exemplo) e diferentes tipos de revestimento, com o intuito de investigar a influência do tipo de metal e do tipo de revestimento na resistência ao cisalhamento.

## 7.

### Referências bibliográficas

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502:** rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9820:** coleta de amostras indeformadas de solos em furos de sondagem. Rio de Janeiro, 1997.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181:** solo - análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457:** amostras de solo - preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6458:** grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459:** solo -determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180:** solo -determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13600:** solo -determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°C. Rio de Janeiro, 2016.

AGUIAR, V. N. **Características de Adensamento da Argila do Canal do Porto de Santos na Região da Ilha Barnabé.** 2008. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.

AGUIAR, V. N. **Contribuição ao estudo das relações tensão-deformação - resistência-Tempo das argilas moles.** 2014. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2014.

ALVES, A. M. L. **The Influence of Soil Viscosity and Time on the Dynamic Pile–Soil Interaction in Clays (in Portuguese)**. (Ph.D. thesis). COPPE, Federal University of Rio de Janeiro, 2004.

ALVES, A. M. L., LOPES, F.R., RANDOLPH, M.F., DANZIGER, B.R. Investigations on the dynamic behavior of a small-diameter pile driven in soft clay. **Can. Geotech. J.** v. 46, n. 12, p. 1418–1430, 2009.

AMUNDSEN, H. A.; V. THAKUR AND A. EMDAL. Comparison of two sample quality assessment methods applied to oedometer test results. **Proceedings of the 6th International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials**, Buenos Aires, 2015.

ANDRADE, M. E. S. **Contribuição ao Estudo das Argilas Moles da Cidade de Santos**. 2009. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009.

ANDRESEN, A. **Site investigation**. Exploration, Sampling and in-situ testing of soft clay. In: *Soft Clay Engineering*. E.W. Brand and R.P. Brenner (eds), *Developments in Geotechnical Engineering*, No 20, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, pp. 241 – 308, 1999.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D653**: standard terminology relating to soil, rock and contained fluids. 2021.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D1587/D1587M**: standard practice for thin-walled tube sampling of fine-grained soils for geotechnical purposes. 2021/2015b.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D4220/D4220M**: standard practices for preserving and transporting soil samples. 2014.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D6519**: standard practice for sampling of soil using the hydraulically operated stationary piston sampler. 2015a.

BALIGH, M. M. Strain path method. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, ASCE 111, No. GT9, 1108-1136, 1985.

BALIGH, M. M.; AZZOUZ, A. S.; CHIN, C. T. Disturbance due to ideal tube sampling disturbance. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, ASCE 113, No. GT7, 739-757, 1987.

BJERRUM, L. Problems of soil mechanics and construction on soft clays. State-of-the-art report. **Proceedings of the 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**, Moscow, 1973.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. LTC, Rio de Janeiro, RJ, 1988.

CASAGRANDE, A. The determination of preconsolidation load and its practical significance. **Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**, Harvard, v. 3, p. 60-64, 1936.

CHUNG, SUNG & LEE, JUNG & JANG, W.Y. Comparing the Quality of Samples obtained by Three Types of Fixed Piston Samplers for Soft Sensitive Clay. **Engineering Geology**. v. 179, p. 50-58, 2014.

CLAYTON C. R. I.; SIMONS N. E; MATTHEWS M. C. **Site investigation**. 3. ed. University of Surrey, United Kingdom, 1995.

CLAYTON, C. R. I.; SIDDIQUE, A. Tube sampling disturbance – forgotten truths and new perspectives. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering**, 137: p. 127-135, 1999.

CLAYTON, C. R. I.; HIGHT, D. W.; HOPPER, R. J. Progressive destructuring of Bothkennar clay: implications for sampling and reconsolidation procedures', **Géotechnique**, v. 42, n. 2, p. 219-239, 1992.

CLAYTON, C. R. I.; SIDDIQUE, A.; HOOPER, R. J. Effects of sampler design on tube sampling disturbance – numerical and analytical investigations. **Géotechnique**, v. 48, n. 6, p. 847-867, 1998.

CONTE, M. A. G. **Investigação da relação Índice de Vazios-Tensão Vertical Efetiva na Compressão Pedométrica de uma Argila Mole da Ilha do Fundão, RJ**. 2019. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2019.

COOPER, A. W.; MCCREERY, W. F. Plastic Surfaces for Tillage Tools. **ASAE Paper** no, p. 61-649, 1961.

COUTINHO, R. Q. **Características de Adensamento com Drenagem Vertical e Radial em Argila Mole na Baixada Fluminense**. 1976. 206 p. Dissertação de Mestrado - COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1976.

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 – **XI COBRAMSEG** – v. 2, p. 927-936-Brasília – DF, 1998b.

COUTINHO, R. Q. Characterization and Engineering Properties of Recife Soft Clays- Brazil. **Characterization and Engineering Properties of Natural Soils**, Taylor and Francis – Balkema, Editors Tan, Phoon, Hight and Leroueil, v. 3, p. 2049-2100, 2007.

DEGROOT, D. J.; POIRIER, S. E.; LANDON, M. M. Sample Disturbance – Soft Clays. **Studia Geotechnica et Mechanica**, v. 27, n. 3-4, p. 107-120, 2005.

Danziger, F.A.B., Jannuzzi, G.M.F., Martins, I.S.M.,. The relationship between sea-level change, soil formation and stress history of a very soft clay deposit. **AIMS Geosci.** 5 (3),pp. 462–479, 2019.

DNER – PRO 002/94, Coleta de amostras indeformadas de solos. 1994

DONOHUE, S.; LONG, M. Assessment of sample quality in soft clay using shear wave velocity and suction measurements. **Geotechnique**, 2009.

FERREIRA, S. R. M.; COUTINHO, R. Q. Quantificação do Efeito do Amolgamento nas Características de Compressibilidade de Argila Mole – Rio de Janeiro e Recife, **SIDEQUA**, Rio de Janeiro. v. 1, p. 3.55-3.69, 1988.

FERREIRA, S.R.M. **Características de Compressibilidade de uma Argila Orgânica Mole do Recife**. Tese de Mestrado - COPPE/UFRJ, 1982.

FRANCISCO, G.M. **Time Effect on Piles in Soft Clay** (in Portuguese). Ph.D. thesis. COPPE/UFRJ, 2004.

FEIJÓ, R. L. **Relação entre a compressão secundária, razão de sobreadensamento e coeficiente de empuxo no repouso**. 1991. p. 167. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Coordenação dos Programas de Pós-Graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

GERMAINE, J. T.; GERMAINE, A. V. **Geotechnical Laboratory Measurements for Engineers**, John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. 2009.

GEONOR – Instruction for use Piston Sampler K-200, 54mm, Oslo, Norway, n.d.

HIGHT D.W. “Sampling effects in soft clay: An update on Ladd and Lambe (1963), Soil Behavior and Soft Ground Construction”. **ASCE GSP 119**, MIT, p. 86-122, 2001.

HIGHT, D.W.; BÖESE, R., BUTCHER, A.P.; CLAYTON, C.R.I.; SMITH, P.R. Disturbance of Bothkennar clay prior to laboratory testing. **Geotechnique**, v. 42, n. 2, p. 199-217, 1992

HVORSLEV, M.J. **Subsurface Exploration and Sampling of Soils for Civil Engineering Purposes** – Waterways Experiment Station. Vicksburg, Mississipi. 1949.

JAMIOLKOWSKI, M.; LADD, C. C.; GERMAINE, J. T. E LANCELLOTA, R. **New developments in field and laboratory testing of soil**, Theme Lecture, 11th ICSMFE, San Francisco, USA, v. 1, p. 57-153, 1985.

JANUZZI, G. M. F. **Inovadoras, Modernas e Tradicionais Metodologias para Investigações Geológico-Geotécnicas de Sarapuí II**. Tese de Doutorado - COPPE/UFRJ, 2013.

JANNUZZI, G. M. F.; DANZIGER, F. A. B.; MARTINS, I. S. M. Geological-geotechnical characterisation of Sarapuí II clay. **Engineering Geology**. v.190, p.77-86, 2015.

KALLSTENIUS, T. Studies on clay samples taken with standard piston sampler. **Swedish Geotech. Inst.**, Proc. n. 21, p. 210, 1963.

LA ROCHELLE, P.; SARRAILH J.; ROY, M.; TAVENAS, F. Effect of Storage and Reconsolidation on the Properties of Champlain Clays. Soil Specimen Preparation for Laboratory Testing, **ASTM STP 599. American Society for Testing and Materials**, 126-146, 1976.

LA ROCHELLE, P.; SARRAILH J.; ROY, M.; TAVENAS, F.; LEROUEIL, S. Causes of Sampling Disturbance and Design of a new Sampler for Sensitive Soils – **Canadian Geotechnical Journal**, v. 18, n. 1, p. 52-66, 1981.

LADD, C. C. Estimating settlements of structures supported on cohesive soils. Paper originally prepared for MIT 1971 Special Summer Program, 1.34s, “**Soft Ground Construction**”. Massachussets, USA, p. 99, 1973.

LADD, C. C.; DEGROOT, D. J. “Recommended Practice for Soft Ground Site Characterization”, **Arthur Casagrande Lecture, 12th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering**. 2013.

LADD, C. C.; LAMBE, T., "The Strength of "Undisturbed" Clay Determined from Undrained Tests," in Laboratory Shear Testing of Soils. **ASTM International**. West Conshohocken, PA:, p. 342-371, 1964. Disponivel em <<https://doi.org/10.1520/STP30011S>>.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. **Soil Mechanics**. John Wiley e Sons, Inc., New York, p. 553, 1969.

LANDON, M.; DEGROOT, D.; SHEAHAN, T. Nondestructive Sample Quality Assessment of a Soft Clay Using Shear Wave Velocity. **J. Geotech. Geoenviron. Eng.** v. 133, n. 4, p. 424-432.

LEFEBVRE, G.; POULIN, C. A New Method of Sampling in Sensitive Clay. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 16, p. 226-233, 1979.

LEROUEIL, S.; JAMIOLKOWSKI, M. Exploration of soft soil and determination of design parameters - General Report , Session 1 - **GEO-COAST '91** – Japan, 1991.

LEROUEIL, S.; MARQUES, M.E.S. Importance of strain rate and temperature effects in geotechnical engineering. **Proceedings of Geotech. Special Publication - Session on Measuring and Modelling Time Dependent Behavior** - ASCE Convention, Washington 61, 1-60.

LUNNE, T.; BERRE, T.; STRANDVIK, S. Sample Disturbance Effects in Soft Low Plastic Norwegian Clay, **Recent Developments in Soil and Pavement Mechanics.**, Balkema, Rotterdam, p. 81-102, 1997.

LUNNE, T.; BERRE, T.; ANDERSEN, K. H.; STRANDVIK, S.; SJURSEN, M. Effects of sample disturbance and consolidation procedures on measured shear strength of soft marine Norwegian clays. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 43, n. 7, p. 726-750, 2006.

MARTINS, I. S. M. **Sobre uma nova Relação Índice de Vazios – Tensão nos Solos**, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 1983.

MARTINS, I. S. M.; LACERDA, W. A. Sobre a Relação Índices de Vazios – Tensão Vertical Efetiva na Compressão Unidimensional, **Solos e Rochas, ABMS/ ABGE**, v. 17, n. 3, p. 157-166, 1994.

MAZZARONE, R. **Comparação e avaliação da qualidade de amostras indeformadas de argila mole, utilizando o NGI/Geonor piston sampler 76 mm e novo amostrador desenvolvido pela COPPE/RJ**, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2021.

NOORANY, I.; SEED, H. B. In-Situ Strength Characteristics of Soft Clays. **American Society of Civil Engineers - Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division.** v.91, n.2, 1965.

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

OLSSON, J. Kolvborrh, ny borrhyp for upptagning av lerprov (Piston sampler, new sampler for obtaining samples of clay) - *Teknisk Tidskrift*, v. 55, p. 17-20, 1925.

ORTIGÃO, J. A. R. **Aterro Experimental Levado à Ruptura Sobre Argila Cinza do Rio de Janeiro**, Tese D. Sc., COPPE/UFRJ, p. 715, 1980.

PACHECO SILVA, F. Uma nova construção gráfica para a determinação da pressão de pré-adensamento de uma amostra de solo. In: IV CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABMS, 1970, v. 2, tomo I. p.225-232, 1970.

PINTO, S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3.e.d. São Paulo: Oficina dos Textos, 2006.

RAYMOND, G. P.; TOWNSEND, D. L.; LOJKA5EK, M. J. Evaluation of sample quality on undrained soil properties, **Proceedings Speciality Session on Quality in Soil Sampling, 4th Asian Regional Conference**, Int. Soc. Soil Mech. and Found. Eng, Bangkok, p. 88-92, 1971.

SALOKHE, V. M.; GEE-CLOUGH, D. Coating of Cage Wheel Lugs to Reduce Soil Adhesion. **Journal of Agricultural Engineering**, v. 41, p. 201-210, 1988.

SALOKHE, V. M.; SUHARNO; GEE-CLOUGH, D. Effect of enamel coating on the field performance of a mouldboard plough. **Soil & Tillage Research**, v. 24, p. 285-297, 1992.

SANDRONI, S. S. Amostragem indeformada em argilas moles - 1º. **Simpósio da ABMS-NE** - Prospecção do subsolo – Recife, p. 81-106, 1977.

SANDVIK. FEP Wire insulations and coatings. Folha de dados, 2019. Disponível em: <<https://www.materials.sandvik/pt-br/centro-de-materiais/datasheets-do-material/coatings/fep/>>. Acesso em: 30 set. 2021.

SCHMERTMANN, J. H. The undisturbed consolidation behavior of clay. **Trans. Soc. Civ. Eng.**, 120: p. 1201-1233, 1955.

SKEMPTON, A. W.; SOWA, V. A. The Behaviour of Saturated Clays During Sampling and Testing. **Géotechnique**, v. 13, n. 4, p. 269-290, 1963.

TANAKA, H.; TANAKA, M. Key factors governing sample quality, 1999 **Proc. Int. Symp. on Characterization of Soft Marine Clays** - eds. by Tsuchida, T. and Nakase, A., Balkema, 57-81, 1999.

TANAKA, H.; TANAKA, M.; SHIWAKOTI, D. R. Characteristics of soils with a low plasticity: intermediate soil from Ishinomaki, Japan and lean clay from Drammen, Norway. **Soils and Foundations**, v. 41, n. 1, p. 83-96, 2001

TERZAGHI, K. FROLICHT, O. K., Theorie der Setzung von Tonschichten. Vienna: Deuticke, 1936.

TERZAGHI, K., Undisturbed Clay Samples and Undisturbed Clays. **Journal of the Boston Society of Civil Engineers**, v. 28, n. 3, p. 45-65, 1941.

USACE- US ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Engineer Manual – Geotechnical Investigations**. Washington, DC EM 1110-1-1804, 2001.