

# Ensaio de Adensamento CRS com dimensões de corpos de prova reduzidas

Rhamira Duarte Gautério Pascual  
Doutoranda COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, rhamira.pascual@coc.ufrj.br

Graziella Maria Faquim Jannuzzi  
Professora Adjunta, Escola Politécnica da UFRJ, Brasil, jannuzzi@poli.ufrj.br

Fernando Artur Brasil Danziger  
Professor titular COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, danziger@coc.ufrj.br

George Lício Vieira Telles  
Engenheiro Civil, COPPETEC/UFRJ, Brasil, georgeteles@coc.ufrj.br

**RESUMO:** Este trabalho apresenta os resultados de ensaios de adensamento do tipo CRS (*constant rate of strain*) executados em corpos de prova com dimensões reduzidas, comparando-os com ensaios realizados com dimensões em conformidade com as especificações da norma ASTM D4186/2012. Destaca-se que a máxima razão H/D (altura/diâmetro) igual a 0,4 é respeitada. O solo ensaiado é a argila mole do campo experimental de Sarapuú II. Os resultados indicam boa concordância entre as curvas de deformação *versus* tensão vertical efetiva de ensaios com dimensões padrões e aqueles realizados com dimensões reduzidas. Ambos satisfizeram a condição da norma ASTM que estabelece que a razão entre o excesso de poro-pressão desenvolvido na base e a tensão vertical total atuante no corpo de prova,  $u_b/\sigma_v$ , deve situar-se entre 3% e 15%, no domínio normalmente adensado. Ademais, indicam também que a velocidade de deformação do ensaio pode ser aumentada em corpos de prova com altura drenante menor, obtendo-se resultado similar ao do ensaio realizado com velocidade de deformação menor e altura drenante maior. Este fato implica diretamente na redução do tempo de ensaio. Conclui-se, portanto, que realizar ensaios de adensamento CRS com corpos de prova de dimensões reduzidas permite diminuir o tempo de ensaio sem afetar a qualidade dos resultados.

**PALAVRAS-CHAVE:** ensaio de adensamento, CRS, solo mole, geometria do corpo de prova.

**ABSTRACT:** This work presents the results of CRS (constant rate of strain) consolidation tests carried out on reduced specimen geometry, comparing them with tests carried out with standard specimen geometry according to ASTM D4186/2012. Despite unusual specimen geometry, the maximum height-to-diameter ratio 0.4 is satisfied. The soil tested is soft clay from the Sarapuú II. The results indicate good agreement between the axial strain versus effective vertical stress curves of tests with standard specimen geometry and those carried out with reduced specimen geometry. Both caused a base excess pressure ratio between 3% and 15%, according to ASTM, in the normally consolidated range during the loading phase of the test. Furthermore, they also indicate that the strain rate can be increased in specimens with a lower drainage height, obtaining a result like that of the test carried out with a lower strain rate and a greater drainage height. This fact directly implies a reduction in testing time. It is concluded, therefore, that carrying out CRS consolidation tests with specimens of reduced geometry allows to decrease test time without affecting the quality of the results.

**KEYWORDS:** consolidation test, CRS, soft soil, specimen geometry.

## 1 INTRODUÇÃO

Os programas de investigações geotécnicas envolvem dentre várias técnicas a obtenção de amostras indeformadas. Atualmente, existem equipamentos e ferramentas que possibilitam a realização deste procedimento. Contudo, a obtenção de amostras indeformadas de boa qualidade não é tarefa simples, podendo envolver custos elevados, principalmente tratando-se de amostras offshore.

Lambe (1951) afirma que a dimensão do corpo de prova do ensaio de adensamento é importante por vários motivos: i) economia: geralmente, o custo das operações de amostragem aumenta consideravelmente à medida que o diâmetro da amostra de solo aumenta. ii) tempo de adensamento: quanto mais fino for o corpo de prova, menor será a distância que a água dos poros percorrerá e, portanto, menor será o tempo necessário para o adensamento; iii) atrito lateral: quanto mais fino for o corpo de prova para um determinado diâmetro, menor será o atrito lateral; isto é verdade devido à menor área de superfície lateral em contato com a parede do anel. Por outro lado, uma consideração de grande importância que aponta para a utilização de corpos de prova maiores é a perturbação na estrutura do solo que ocorre durante o preparo dos corpos de prova, quanto mais fina a amostra, mais importante é o efeito da perturbação. Por este motivo, Lambe (1951) recomenda uma relação entre o diâmetro da amostra e a espessura, ou seja, altura do corpo de prova, de cerca de três a quatro.

O objetivo do presente trabalho é apresentar resultados de ensaios de adensamento do tipo CRS (*constant rate of strain*) executados em corpos de prova com dimensões reduzidas, comparando-os com ensaios realizados com dimensões em conformidade com as especificações da norma ASTM D4186/2012, que padroniza este ensaio. Cabe destacar que, apesar de se tratar de dimensão reduzida, a máxima razão H/D (altura/diâmetro) igual a 0,4 é respeitada.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios de adensamento CRS foram realizados com equipamento de fabricação GEOTAC modelo Sigma 1. O conjunto é composto por uma câmara de adensamento, bomba e prensa, dispondo dos seguintes elementos de medição: uma célula de carga, um LVDT e dois transdutores de pressão, conforme ilustram as Figuras 1a e 1b. Todos os ensaios foram executados nas instalações do Laboratório de Ensaio de Campo e Instrumentação Prof. Márcio Miranda Soares, da COPPE/UFRJ, com temperatura controlada de  $20^{\circ}\pm 1^{\circ}\text{C}$ .

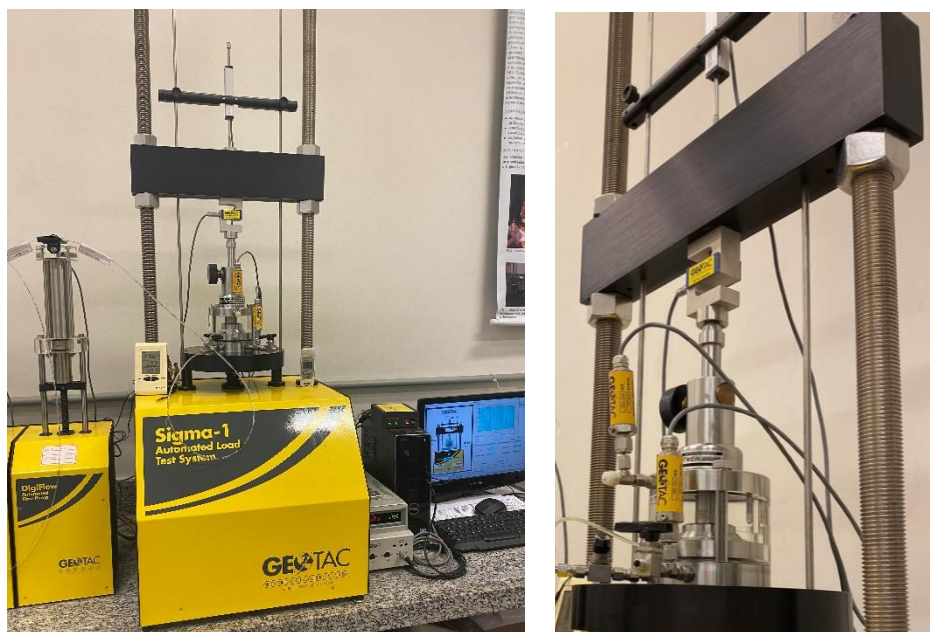


Figura 1. a) Visão geral do equipamento; b) Detalhes da instrumentação do equipamento.

O solo ensaiado é a argila mole do campo experimental de Sarapuú II, localizado na Estação Rádio da Marinha do Brasil em Duque de Caxias/RJ. Para maiores informações ver: Jannuzzi, (2009), Jannuzzi, (2013), Jannuzzi et al. (2015) e Danziger et al. (2019). Na Figura 2 são apresentadas algumas destas características. Cabe ressaltar a elevada plasticidade do depósito, com IP atingindo o valor de 170%.

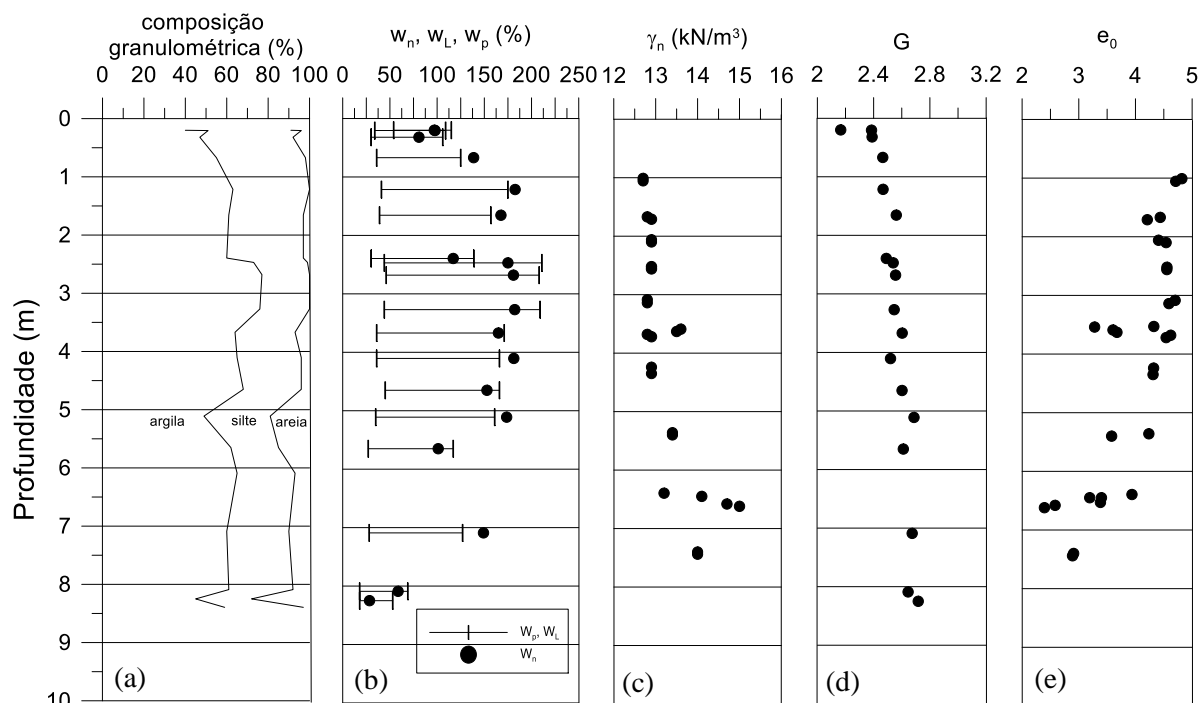


Figura 2. Dados de Sarapuí II: (a) composição granulométrica; (b) teor de umidade natural ( $w_n$ ), limites de liquidez ( $w_L$ ) e plasticidade ( $w_P$ ), (c) peso específico natural ( $\gamma_n$ ); (d) densidade real dos grãos ( $G_s$ ) e (e) índice de vazios (e) (adaptado de Jannuzzi, 2013)

As amostras indeformadas foram coletadas com o amostrador do tipo pistão estacionário NGI/GEONOR 76mm de diâmetro interno na profundidade nominal de 3m.

Sobre a geometria da amostra a norma ASTM D4186/2012 estabelece que as dimensões devem estar em conformidade com as seguintes especificações: i) diâmetro mínimo deve ser de cerca de 50 mm [2,0 pol.]; ii) a altura mínima deve ser de cerca de 20 mm [0,75 pol.], mas não deve ser inferior a 10 vezes o diâmetro máximo da partícula, conforme determinado de acordo com o Método de Ensaio D6913. Se, após a conclusão deste ensaio, for constatado, com base na observação visual, que partículas de tamanho grande ( $> 2$  mm [0,075 pol.]) estão presentes, tal informação deve ser inserida no relatório do ensaio; iii) a relação altura-diâmetro máxima deve ser de 0,4.

Com base nessas premissas dois conjuntos de anéis de adensamento com seus respectivos *top caps* foram adquiridos: (i) o anel padrão GEOTAC 2,5” (63,5 mm) de diâmetro e 1” (25,4 mm) de altura, que resulta no corpo de prova de mesmo diâmetro e altura de 22,5 mm, em função da espessura da pedra porosa superior; (ii) o anel especial de 40mm de diâmetro por 1” de altura (25,4 mm) também fabricado pela GEOTAC, que permite corpo de prova com 40 mm de diâmetro e 13 mm de altura, conforme Figura 3. A relação altura/diâmetro (H/D) foi respeitada para evitar problemas com atrito lateral entre o anel e o corpo de prova. A Tabela 1 resume estas informações.

Tabela 1. Geometria dos anéis de adensamento utilizados.

Anel CRS	Diâmetro Interno(mm)	Altura (mm)	Dimensões do Corpo de prova	H/D*
Padrão	63,5	25,4	63,5 x 22,5	0,35
Especial	40,0	25,4	40,0 x 13,0	0,32

\* A relação altura diâmetro recomendada deve ser inferior a 0,4 (ASTM D4186/2012)



Figura 3. À esquerda anel padrão 2,5” e seu top cap, no centro anel especial 40mm e seu top cap e à direita anel auxiliar de 40mm.

O anel especial fabricado pela GEOTAC possui 40 mm de diâmetro por 25,4 mm de altura, além da base alargada com 76 mm. Essas dimensões são necessárias para o encaixe perfeito na câmara de acrílico, no entanto, torna a moldagem extremamente difícil. A solução encontrada foi a fabricação um anel auxiliar em aço inox com 40 mm de diâmetro por 13 mm de altura. Assim, que o corpo de prova é moldado no anel auxiliar e transferido para o anel fabricado pela GEOTAC onde será ensaiado. O procedimento de moldagem e montagem do equipamento é descrito em detalhe no trabalho de Pascual (2020).

O ensaio consiste em três etapas: seating, saturação por contrapressão e adensamento propriamente dito. No presente trabalho configurou-se 0,2% de deformação axial durante a etapa de seating, 200 kPa de contrapressão na etapa de saturação e adotou-se as velocidades de 0,72 %/h (para os corpos de prova de dimensão 63,5mm x 22,5mm ) e 1,8%/h (para os corpos de prova de dimensão 40mm x 13mm), determinadas nos trabalhos de Pascual (2020) e Pascual *et al.*(2022).

### 3 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados apresentados nas Figuras 4a e 4b indicam boa concordância entre as curvas de compressão (deformação *versus* tensão vertical efetiva e índice de vazios *versus* tensão vertical efetiva) dos ensaios realizados com dimensões padronizadas (65,3mm x 22,5mm) e dimensões reduzidas (40mm x 13mm). Os resultados obtidos são semelhantes aos dos ensaios convencionais do tipo carregamento incremental (incremental loading) realizados em amostras de 70mm de diâmetro e 20mm de altura moldados em segmentos de tubo amostrador shelly extraídos na mesma profundidade do depósito. Os valores correspondentes ao fim do primário (EOP – end of primary), dos ensaios do tipo incremental loading realizados por Jannuzzi (2013) são plotados juntamente com os resultados dos ensaios CRS.

No que diz respeito à seleção das velocidades dos ensaios é possível afirmar que ambas satisfizeram a condição da norma ASTM que estabelece que a razão entre o excesso de poro-pressão desenvolvido na base e a tensão vertical total atuante no corpo de prova,  $u_b/\sigma_v$ , deve situar-se entre 3% e 15%, no domínio normalmente adensado (NA), conforme apresentado na Figura 5a. Conclui-se portanto, que houve uma compensação entre velocidade adotada e a altura drenante. Uma vez que, a velocidade de deformação do ensaio de 1,8%/h realizado no corpo de prova de 13mm resultou na razão média  $u_b/\sigma_v$  de 6% no domínio NA, valor igual à razão média  $u_b/\sigma_v$  do ensaio executado com velocidade de deformação 0,72%/h no corpo de prova de 22,5 mm. A evolução das poropressões na base dos corpos de prova pode ser vista na Figura 5b e mostra comportamento coerente com as observações anteriores apresentando valor ligeiramente superior de excesso de poropressão para o ensaio padrão.

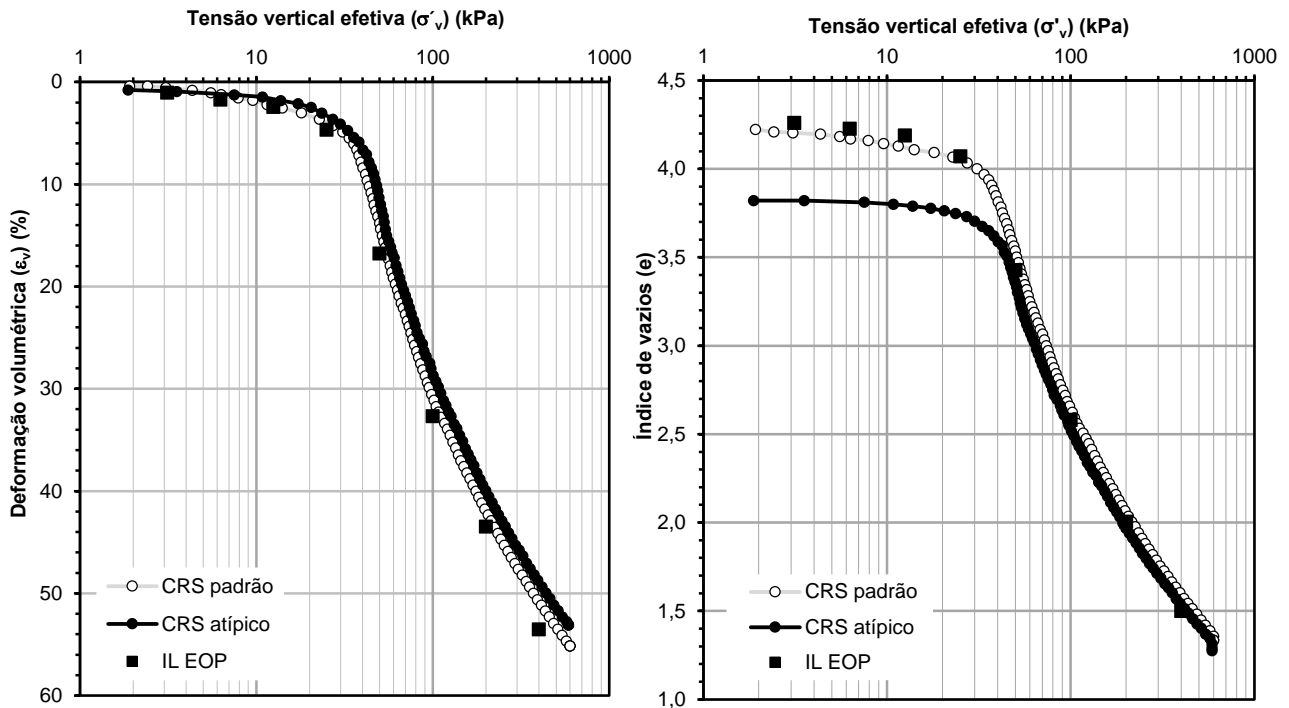


Figura 4. a) Curva de Compressão  $\epsilon \times \log \sigma'_v$ ; b) Curva de Compressão  $e \times \log \sigma'_v$ .

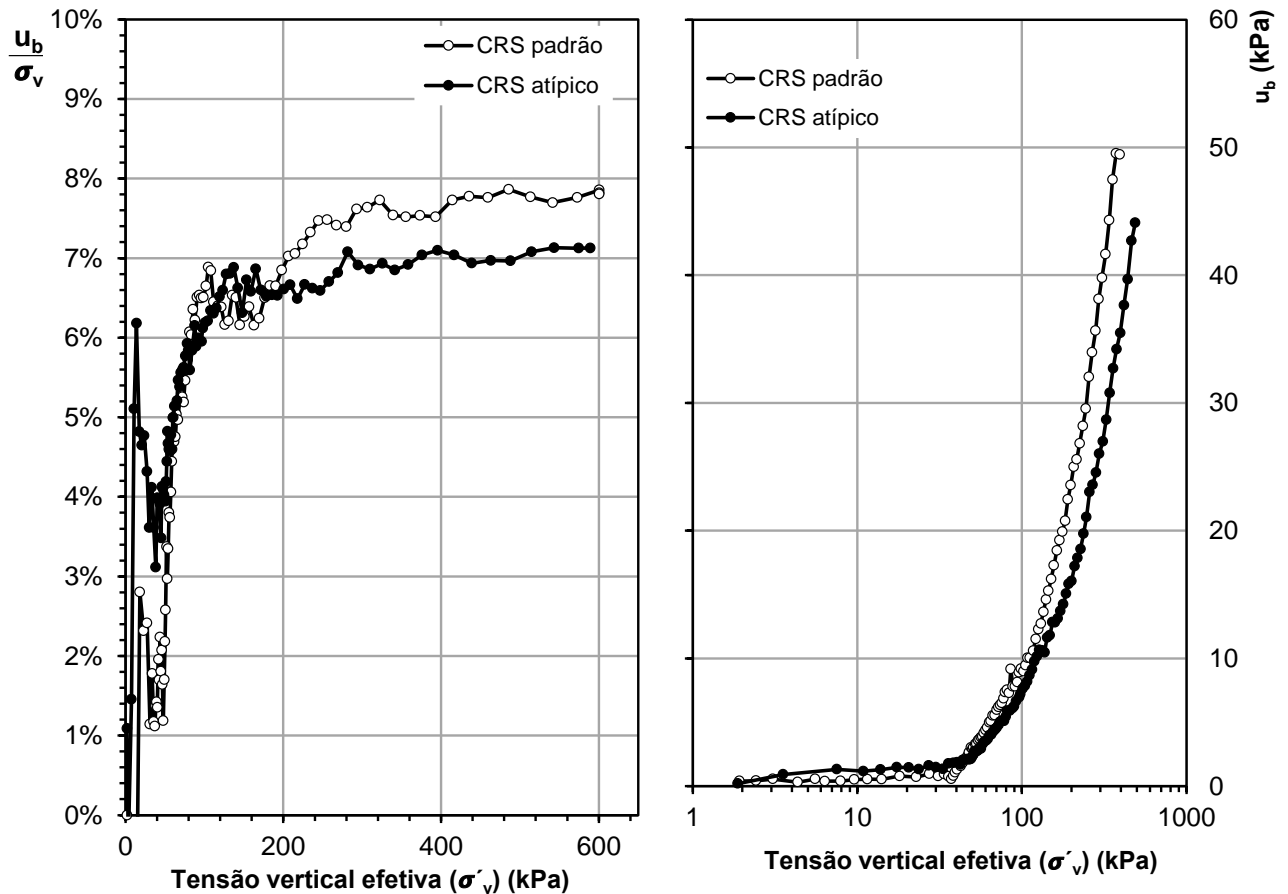


Figura 5. a) Valores  $u_b/\sigma_v$  para ensaios CRS; b) Evolução de  $u_b$  durante ensaios CRS.

As amostras apresentaram teores de umidade e índice de vazios iniciais próximos: 157% e 4,24 respectivamente para o ensaio CRS dimensão padrão e 147% e 3,85 para CRS de dimensão reduzida.



Com relação a qualidade da amostra é possível concluir considerando a Figura 4b que o ensaio de dimensão reduzida apresentou qualidade superior. Este fato pode ser explicado em virtude da maior dimensão da amostra em relação ao corpo de prova. Nos ensaios CRS deste trabalho as amostras foram moldadas em segmentos extrudados do tubo amostrador de pistão estacionário GEONOR/NGI de 76mm de diâmetro, logo na moldagem do corpo de prova menor dimensão, diâmetro de 40mm, foram excluídas as influências na interface solo/tubo e possíveis perturbações e/ou amolgamento. Cabe salientar que todas as amostras foram classificadas como sendo de boa a excelente qualidade pelo método de Lunne *et al* (1997). Conclusão semelhante foi encontrada por Lopes *et al* (2022) quando os autores avaliaram a influência do diâmetro na qualidade da amostra de ensaios adensamento usando corpos de prova de 70mm de diâmetro moldados em amostras de pistão estacionário GEONOR/NGI de 76 mm de diâmetro.

A partir das curvas de compressão foram calculadas as tensões de sobreadensamento pelo método do engenheiro Pacheco Silva resultando valor de 35 kPa para ensaio CRS padrão e 35,5 kPa para ensaio CRS atípico. Os índices de recompressão ( $C_r$ ) e compressão ( $C_c$ ), foram respectivamente para o ensaio padrão (0,31 e 1,64) e para o ensaio atípico (0,20 e 1,83).

A Figura 6 a seguir apresenta a distribuição do coeficiente de adensamento ( $c_v$ ) ao longo dos ensaios CRS com dimensão padrão, dimensão reduzida e ensaio incremental loading. É possível afirmar que há consoância entre todos os ensaios. Contudo, os valores de  $c_v$  para os ensaios CRS foram ligeiramente superiores ao ensaio IL. Este fato esta de acordo com a literatura. Smith (1967) *apud* Wissa e Heiberg (1969) afirma que o valor de  $c_v$  obtido no ensaio CRS geralmente fica acima do valor obtido pelo ensaio convencional. Wissa e Heiberg (1969) afirmam ainda que o valor de  $c_v$  aumenta com a velocidade de deformação. Segundo dados experimentais para a argila de Sarapuú II a curva de compressão final do primário está associada à velocidade  $10^{-6}/s$  ou 0,37%/h (considerando corpos de prova de 20 mm de altura e distância de drenagem de 10 mm). Logo, a distribuição de  $c_v$  na Figura 6 está coerente com essa afirmativa.

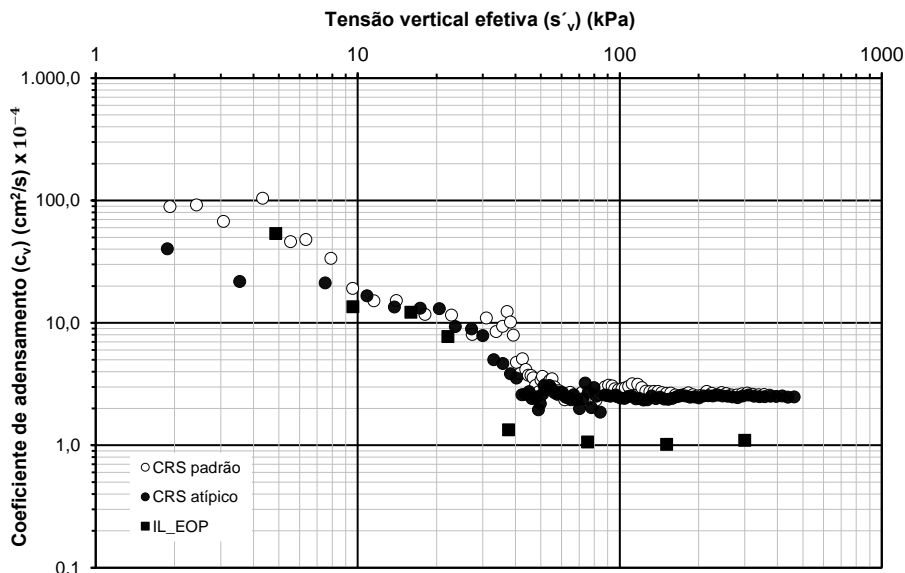


Figura 6. Distribuição do coeficiente de adensamento ao longo do ensaio.

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos dados apresentados é possível concluir que o ensaio de adensamento CRS com dimensões reduzidas apresentou bons resultados para o solo testado.

Parâmetros geotécnicos como a tensão de sobreadensamento ( $\sigma'_m$ ), os índices de recompressão ( $C_r$ ) e compressão ( $C_c$ ), bem como, o coeficiente de adensamento ( $c_v$ ) podem ser obtido sem prejuízo quando comparado a ensaios padrões, desde que seja respeitada a relação H/D e utilizada uma velocidade de deformação adequada.

Observou-se que a velocidade de deformação pode ser aumentada em corpos de prova com altura drenante menor, obtendo-se resultado similar ao do ensaio realizado com velocidade de deformação menor e altura drenante maior. Isto implica diretamente na redução do tempo de ensaio. Conclui-se, portanto, que

realizar ensaios de adensamento CRS com corpos de prova de dimensões reduzidas permite aumentar a produtividade sem afetar a qualidade dos resultados.

Cabe ressaltar a importância da saturação do corpo de prova, elementos porosos e transdutores de poropressão, uma vez que a análise dos resultados é baseada nos valores de poropressão aquisitados durante o ensaio. Este ensaio não se aplica para o caso dos solos não saturados no qual deseja-se ensaiar o material na condição natural, ou seja, sem a saturação.

Sugere-se que trabalhos futuros incluam uma variedade maior de solos e condições de teste a fim de generalizar os resultados para diferentes contextos geotécnicos.

## AGRADECIMENTOS

À PETROBRAS pelo subsídio e colaboração para realização deste trabalho. À equipe do Laboratório de Ensaios de Campo Instrumentação Prof. Márcio Miranda Soares pela coleta das amostras indeformadas e a todos os envolvidos na execução dos ensaios de laboratório. Este trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil(CAPES) - Cód de Financiamento 001.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Society for Testing and Materials. (2012) *Standard Test Method for One-Dimensional Consolidation Properties of Saturated Cohesive Soils Using Controlled-Strain Loading*. ASTM D4186/D4186M-12, West Conshohocken, PA, EUA.
- Danziger, F.A.B., Jannuzzi, G.M.F, and Martins, I.S.M. (2019). *The relationship between sea-level change, soil formation and stress history of a very soft clay deposit*. AIMS Geosciences, no. 5: 461-479. Disponível em: <<https://doi.org/10.3934/geosci.2019.3.461>>. Acesso em: 05 jul. 2024.
- Jannuzzi, G.M.F. (2009). *Caracterização do Depósito de Solo Mole de Sarapuú II através de Ensaio de Campo*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- Jannuzzi, G.M.F. (2013). *Inovadoras, modernas e tradicionais metodologias para a caracterização geológico-geotécnica da argila mole de Sarapuú II*. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- Jannuzzi, G.M.F., Danziger, F.A.B., Martins, I.S.M. (2015). *Geological-geotechnical characterization of Sarapuú II clay*. Engineering Geology, 190, p. 77–86.
- Lambe, T. William. (1951) Soil Testing for Engineers. Volume 9. Wiley Series in Geotechnical Engineering.
- Lopes, V. G., Aguiar, V. N., Martins, I. S. M., Jannuzzi, G. M. F., Danziger, F. A. B. (2022) Avaliação da qualidade de amostras da Argila do Sarapuú II extraídas com amostradores tubulares de pistão estacionário Geonor/NGI 76 mm. In: XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Campinas-SP. *Anais...ABMS*.
- Lunne, T.; Berre, T.; Strandvik, S. (1997) *Sample Disturbance Effects in Soft Low Plastic Norwegian Clay*. In: Proceedings of the Symposium on Recent developments in Soil and Pavement Mechanics, pp. 81– 102, Rio de Janeiro.
- Pascual, R. D. G. (2020) Efeito das Deformações Cisalhantes nas Propriedades de Adensamento da Argila Mole De Sarapuú II. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, COPPE/UFRJ, 269 p.
- Pascual, R. D. G., Martins, I. S. M., Jannuzzi, G. M. F., Danziger, F. A. B. (2022) Sobre a determinação da velocidade de ensaios CRSC: um exemplo de caso. In: XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica , Campinas-SP. *Anais...ABMS*.
- Wissa, E. Z.; Heiberg, S. (1969) A New One-dimensional Consolidation Test. School of Engineering Massachusetts Institute of Technology, Department of Civil Engineering.