



Estudo dos Parâmetros de Deformabilidade de um Solo Residual do Estado do Pará por Meio de Ensaios de Campo e Laboratório

Fabio Conterato

Engenheiro Civil, FGS Geotecnia, Porto Alegre, Brasil, conterato@fgs.eng.br

Felipe Gobbi

Engenheiro Civil, FGS Geotecnia, Porto Alegre, Brasil, felipe@fgs.eng.br

Alvaro Pereira

Engenheiro Civil, FGS Geotecnia, Porto Alegre, Brasil, alvaro@fgs.eng.br

RESUMO: A previsão de deformações e deslocamentos de estruturas geotécnicas sob cargas de serviço não é trivial e, por vezes, apresenta acurácia limitada. Especificamente para estruturas de contenção do tipo cortina atirantada, o conhecimento acerca dos parâmetros de deformabilidade do solo é fundamental para o entendimento do comportamento real da estrutura e a distribuição de esforços sobre o paramento. O estudo apresenta resultados de ensaios de carga diretas sobre o terreno (ensaio de placa) e ensaios laboratoriais (triaxiais e adensamento) realizados em solos residuais presentes no tardo e na fundação de quatro cortinas atirantadas localizadas no município de Canaã dos Carajás (PA). Paralelamente, também são apresentadas medidas de deslocamentos feitas no paramento das cortinas durante as etapas de ensaio e incorporação dos tirantes. Os parâmetros de deformabilidade obtidos nos diferentes ensaios apresentaram diferenças significativas, sendo este comportamento dependente de diversos fatores, como o nível de deformação, trajetória de tensões e estado de tensão inicial. Quanto às medidas de escala real, alguns ensaios indicaram deslocamentos concentrados na região da placa dos tirantes, comportamento que indica distribuição não linear de tensões no tardo da cortina e pode indicar comportamento anômalo da estrutura frente às solicitações.

PALAVRAS-CHAVE: Ensaio de Placa, Módulo de Deformabilidade, Coeficiente de Reação Vertical, Deslocamento no Paramento da Cortina

ABSTRACT: Predicting deformations and displacements of geotechnical structures under service loads is not trivial and sometimes has limited accuracy. Specifically for retaining structures such as tieback wall, knowledge of soil deformability parameters is essential for understanding the structure's actual behavior and the distribution of stresses on the facing. This study presents the results of direct ground load tests (plate tests) and laboratory tests (triaxial tests and consolidation tests) performed on residual soils present in the back and foundation of four cable-stayed walls located in the municipality of Canaã dos Carajás, Pará. Displacement measurements taken on the walls' facings during testing and prestress. The deformability parameters obtained in the different tests showed significant differences, with this behavior dependent on several factors, such as the deformation level, stress path, and initial stress state. Regarding real-scale measurements, some tests indicated the occurrence of displacements concentrated in the region of the tie rod plate, a behavior that indicates non-linear distribution of stresses at the back of the curtain and may indicate anomalous behavior of the structure, when faced with demands.

KEYWORDS: Plate Tests, Deformability Module, Vertical Reaction Coefficient, Wall Face Displacement

1 INTRODUÇÃO

O comportamento de estruturas geotécnicas, como fundações ou cortinas atirantadas, são dependentes das deformações do solo. Por vezes, a ausência de informações precisas sobre os parâmetros de deformabilidade dos solos em seu estado de serviço ou solicitação conduzem à utilização de valores conservadores ou simplificações lineares, que podem não condizer com o comportamento real.

Correia (2004) indica que, em obras geotécnicas, as deformações nos terrenos, excluindo casos particulares, costumam ter magnitudes muito pequenas, associado a isto, os solos exibem um comportamento



não linear no domínio das deformações que interessam à funcionalidade das estruturas. Assim, a obtenção de parâmetros de deformabilidade para as zonas de deformações representativas exigem equipamentos e ensaios sofisticados e podem gerar economia no dimensionamento, assegurar melhor funcionalidade das estruturas e evitar danos às estruturas adjacentes, especificamente para o caso de escavações.

Conforme Biarez et al. (1999), a deformação nos solos e materiais granulares de pavimentos de estradas é da ordem dos 10^{-4} , para túneis da ordem de 10^{-3} , para fundações 10^{-2} e para aterros em solos moles 10^{-1} . Generalizando, pode-se concluir que a maioria das estruturas apresentam valores de deformação da ordem dos 5×10^{-3} sendo, portanto, o domínio das pequenas deformações são muito importante para o dimensionamento em serviço das estruturas. Conforme Jardine et al, 1984, infere-se que o domínio elástico-linear se situa, em condições normais, a níveis de deformações inferiores a 10^{-5} . A partir deste valor e até cerca de 10^{-4} , o comportamento dos solos é não linear, mas reversível, o que significa que se está perante deformações permanentes desprezíveis, apesar de num ciclo de carga-descarga a curva tensão-deformação apresentar histereses.

A deformação dos solos, quando os mesmos estão associados a outras estruturas, é ainda mais complexa. A reprodução das propriedades do solo é um dos pontos mais complexos da interação solo estrutura, sendo que a resposta do solo às cargas aplicadas possui um papel fundamental na avaliação geotécnica. O conceito de rigidez relativa é utilizado para entender a distribuição de tensões em estruturas como as cortinas atirantadas, onde cargas elevadas são transmitidas através de um paramento de concreto armado ao solo. Conforme Ranzini e Negro Junior (1998), uma cortina ou parede é flexível quando seus deslocamentos por flexão são suficientes para influenciar significativamente a distribuição de tensões aplicadas pelo maciço. Entende-se que quanto mais flexível for o paramento de uma cortina mais as pressões de contato refletirão o carregamento, ou seja menos uniforme é a distribuição de tensões sobre o solo, enquanto que quanto mais rígido for o paramento de forma mais homogênea ocorre esta distribuição de tensões.

Conforme Farias (2018), a representação do maciço do solo como um modelo contínuo pode ser feita por equacionamento analítico ou com análises numéricas. O mesmo autor cita que diversos métodos já foram desenvolvidos para simular a distribuição de tensões no solo, sendo que o módulo de deformabilidade e o coeficiente de reação vertical ou horizontal solo são parâmetros fundamentais nas análises.

A determinação dos parâmetros de deformabilidade dos solos pode ser realizada por meio de ensaios de campo, como ensaios de placa, e de laboratório, como ensaios triaxiais e edométricos.

O ensaio de placa pode fornecer diferentes tipos de módulos de acordo com o procedimento de ensaio e com o modo de interpretação. Estudos de Gambin et al (2002) *apud* Correia (2004) mostraram que os módulos secantes em ensaios com descarga e carga ficaram associados à níveis de deformações da ordem de 0,1%. O mesmo autor cita que é corrente nos ensaios obter-se uma parte inicial da curva de carregamento com maior imprecisão, devido ao mau contato solo/placa e à presença de uma camada superficial perturbada pela escavação. Ainda, as curvas obtidas nos ensaios por vezes possuem formato de “S”, revelando a influência da rigidez do solo com o nível de tensão. Outros resultados que são obtido neste ensaios são os valores de coeficiente de reação vertical equivalente e tensões admissíveis, após efetuar-se a correção em função da geometria da placa utilizada.

No que se refere a ensaios triaxiais, Correia (2004), cita que os ensaios permitem obter valores confiáveis de parâmetros de deformação a partir de deformações axiais da ordem de 1%, sendo que este valor pode ser maior em ensaios dinâmicos ou cíclicos.

Já em relação à ensaio edométricos, Montemezzo (2005), cita que a realização do ensaio possibilita determinar a deformação vertical, tensão de pré-adensamento, coeficiente de compressibilidade, coeficiente de variação volumétrica, módulo edométrico índice de compressão, índice de recompressão, índice de descarregamento, coeficiente de adensamento e coeficiente de compressão secundária dos solos.

Este trabalho apresenta os resultados referentes a uma campanha de ensaios de campo (ensaio de placa instrumentados) e ensaios de laboratório (edométricos e triaxiais), no que se refere a parâmetros de deformabilidade medidos e sua interpretação. Também serão apresentados os dados de deslocamentos medidos em paramentos de cortinas atirantadas durante as etapas de execução de ensaios e incorporação de tirantes. As cortinas foram executadas em cortes do terreno natural e estão implementadas nos mesmos locais dos solos ensaiados.

3 METODOLOGIA

3.1 Localização da área de estudo

O estudo foi realizado em uma obra de contenção no estado do Pará, por questões de sigilo de informações, tanto o cliente quanto a localização exata da obra serão omitidas neste trabalho.

A obra consiste em cortinas atirantadas, com altura de até 18m, pelo método descensional, em solo residual e saprólitos, alteração W4 e W5 e resistência R2 e R1. O espaçamento médio dos tirantes é de 2,10m, nas direções horizontais e verticais.

3.2 Ensaios laboratoriais

Foram efetuados ensaios de compressão triaxial consolidados e drenados (ASTM D7181–11: *Standard Test Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils*) além de ensaios de adensamento unidimensionais (NBR-16853/2020 – Solo – Ensaio de Adensamento Unidimensional) em 9 amostras indeformadas de solo, sendo dois exemplares mostrados na Figura 1. Complementarmente, foram realizadas campanhas de ensaios de caracterização básica em cada um dos solos amostrados.



Figura 1. Imagens de blocos indeformados em processo de retirada de campo

3.3 Ensaios de placa instrumentados

Para cada solo amostrado e ensaiado em laboratório foi realizado um ensaio de placa in situ, conforme procedimento ABNT NBR 6489: Solo – Prova de carga estática em fundação direta, através da metodologia de ensaio com carregamento lento seguido de carregamento rápido. Este consiste na aplicação de estágios de carga, até o valor de 1,2 vezes a capacidade estimada do solo (Ft). Em cada um dos estágios foram medidos os deslocamentos verticais pelo tempo mínimo de 30min ou até a estabilização dos deslocamentos. Após o carregamento previsto a carga foi mantida pelo intervalo de tempo de tempo mínimo de 12h e então foi efetuado o descarregamento, em estágios, medindo-se os deslocamentos. O ensaio com carregamento rápido consistiu na aplicação de carregamentos em estágios sucessivos, medindo-se os deslocamentos por 10min após a aplicação do carregamento. Após a finalização do carregamento foi efetuado o descarregamento, em estágios, medindo-se os deslocamentos. O sistema de reação utilizado para a realização dos ensaios foi composto por um conjunto de 3 vigas metálicas acopladas a 4 grampos ancorados no terreno. A placa utilizada possuía formato circular de diâmetro 60cm.

O controle das carga e dos deslocamentos foi efetuado em duplicata, de forma analógica e de forma digital, aquisição automática (Figura 2). A forma analógica consistiu no controle das cargas aplicadas por meio de manômetro instalado no conjunto de aplicação de carga macaco hidráulico/bomba, devidamente aferidos, enquanto que os deslocamentos foram medidos por meio de conjunto de quatro relógios comparadores dispostos com angulações de 90° entre si.

O sistema automático de monitoramento consistiu na utilização de uma célula de carga com capacidade de 50 toneladas para controle das cargas, enquanto que os deslocamentos foram monitorados com a utilização de três réguas resistivas (LVDTs), dispostos com angulação de 120° entre si. Estes equipamentos foram conectados a uma caixa de aquisição e armazenamento, além de permitir o acompanhamento dos dados em tempo real.

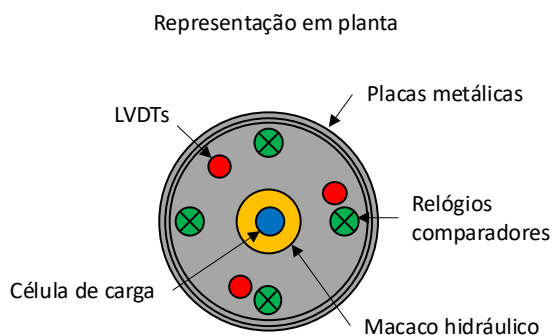


Figura 2. Disposição dos instrumentos para ensaios de placa.

3.4 Medição de deslocamentos do paramento (ensaio de escala real)

Os ensaios de escala real consistiram na medição dos deslocamentos do paramento da cortina durante os ensaios e protensão dos tirantes. A posição dos ensaios foram escolhidos em locais e solos representados pelos ensaios laboratoriais e de placa.

Para cada ensaio foram instalados três relógios comparadores, sendo o primeiro deles na placa metálica, o segundo a uma distância de $1/8EH$ e o terceiro à distância de $1/2EH$ do tirante adjacente (distância horizontal), esta disposição é apresentada na Figura 3.

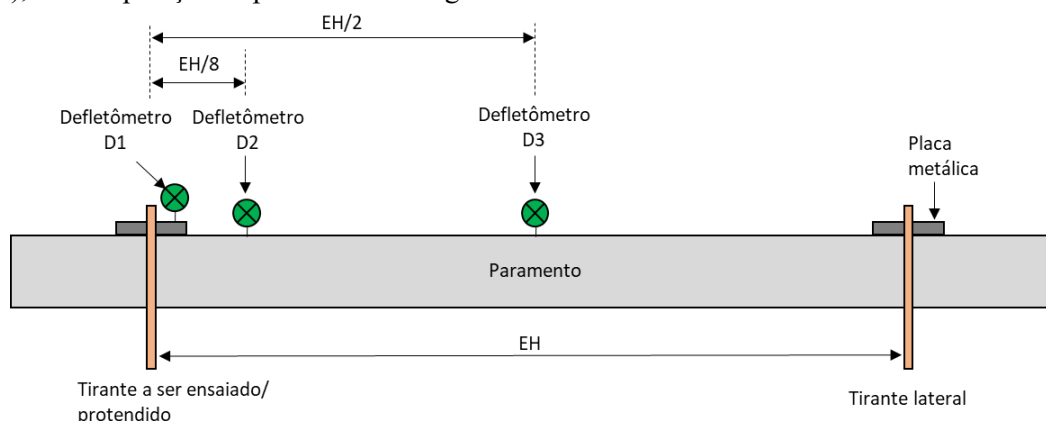


Figura 3. Croqui dos ensaios em escala real.

Quanto ao procedimento, com os equipamentos posicionados (Figura 4), era aplicada uma carga de aproximadamente 2 toneladas ao tirante com o objetivo de acomodação da placa. Após a aplicação desta carga eram efetuadas as leituras iniciais dos defletômetros (zero). Com as leituras iniciais anotadas era efetuada a continuação do ensaio, com a aplicação de incrementos de carregamentos até a carga especificada para cada tirante. Após o carregamento era efetuado o descarregamento, com leituras em cada estágio. Após a finalização o ciclo de carregamento e de descarregamento, em alguns tirantes foi procedido com a protensão final do elemento. Nesses casos também foi efetuada a leitura dos deslocamentos, seguindo o mesmo procedimento descrito acima. Para cada tirante ensaiado, os tirantes adjacentes poderiam estar incorporados ou não apresentarem cargas incorporadas, estas condições podem interferir nos resultados, entretanto, isto não será abordado no trabalho.

O deslocamento do paramento, medido neste trabalho, é condicionado pela aplicação de esforços horizontais pelos tirantes, enquanto os ensaios laboratoriais assim como os ensaios de placa foram realizados tomando como referência a aplicação de esforços verticais. Por questões executivas e por entender-se que o solo possui comportamento isotrópico, esta diferença não deve possuir influência significativa nos resultados. Entretanto, cita-se que mesmo que em solos com comportamento isotrópico, os valores de módulo e coeficiente de reação podem ser afetados por diferentes situações de carregamentos e estados de tensões e isto deve ser avaliado caso a caso.



Figura 4. Equipamentos instalados para ensaios de escala real.

4 RESULTADOS

Para a análise dos resultados dos ensaios de placa, foram considerados os deslocamentos em meio elástico em camada semi-infinita. A avaliação do módulo de deformabilidade do solo ensaiado foi realizada conforme Equação 1.

$$E = \frac{\sigma \cdot D}{\rho} \cdot (1 - \nu^2) \cdot \frac{\pi}{4} \quad (1)$$

Onde:

E – Módulo de deformabilidade;

σ – Tensão média aplicada à placa;

D – Diâmetro da placa;

ρ – Recalque provocado pela tensão σ ;

ν – Coeficiente de Poisson;

O coeficiente de reação vertical do solo (K_v) foi calculado pela Equação 2.

$$k_v = \frac{F}{\rho \cdot A} \quad (2)$$

Onde:

K_v – Coeficiente de reação vertical do solo.

Foram calculados os módulos e coeficientes de reação para a reta de carregamento virgem e para o ciclo de recarga. As curvas de tensão *versus* deslocamento para cada um dos ensaios de placa podem ser vistas na Figura 5, tanto para o sistema convencional (linha escura com marcador circular, onde o marcador representa o ponto de estabilização dos deslocamentos) quanto para o sistema automático (linha vermelha, com leituras a cada 1 segundo de ensaio). A compilação completa dos resultados pode ser conferida na Tabela 1, com a descrição do tipo de solo ensaiado.

Ao comparar os resultados obtidos pelo método convencional e pelo sistema automatizado, foi observada coerência entre os dados, destaca-se que o número de dados obtidos pelo sistema automático é muito superior, o que permite avaliar de forma mais detalhada o comportamento do solo sob carregamento e descarregamento, especialmente no que se refere à variação do módulo de deformabilidade e do coeficiente de reação vertical.

Nos três ensaios realizados no saprólito, ensaios 2, 7 e 8, para os trechos de carregamento, nota-se enrijecimento do solo. Para os solos residuais, ensaios 1, 3, 4, 5, 6 e 9, este comportamento não é visto em tensões mais elevadas, possivelmente pela maior proximidade com a tensão de ruptura do solo, afetando o formato da curva de deslocamento.

Para todos os ensaios em solo residual foram obtidas as tensões de ruptura, todas abaixo de 600kPa, com valor médio em torno de 450kPa. Especificamente para os ensaios 5 e 6, nota-se proximidade com os valores obtidos para a tensão de pré-adensamento obtida no ensaio de adensamento edométrico. Para os solos saprolíticos, a tensão de ruptura não foi atingida durante os ensaios.

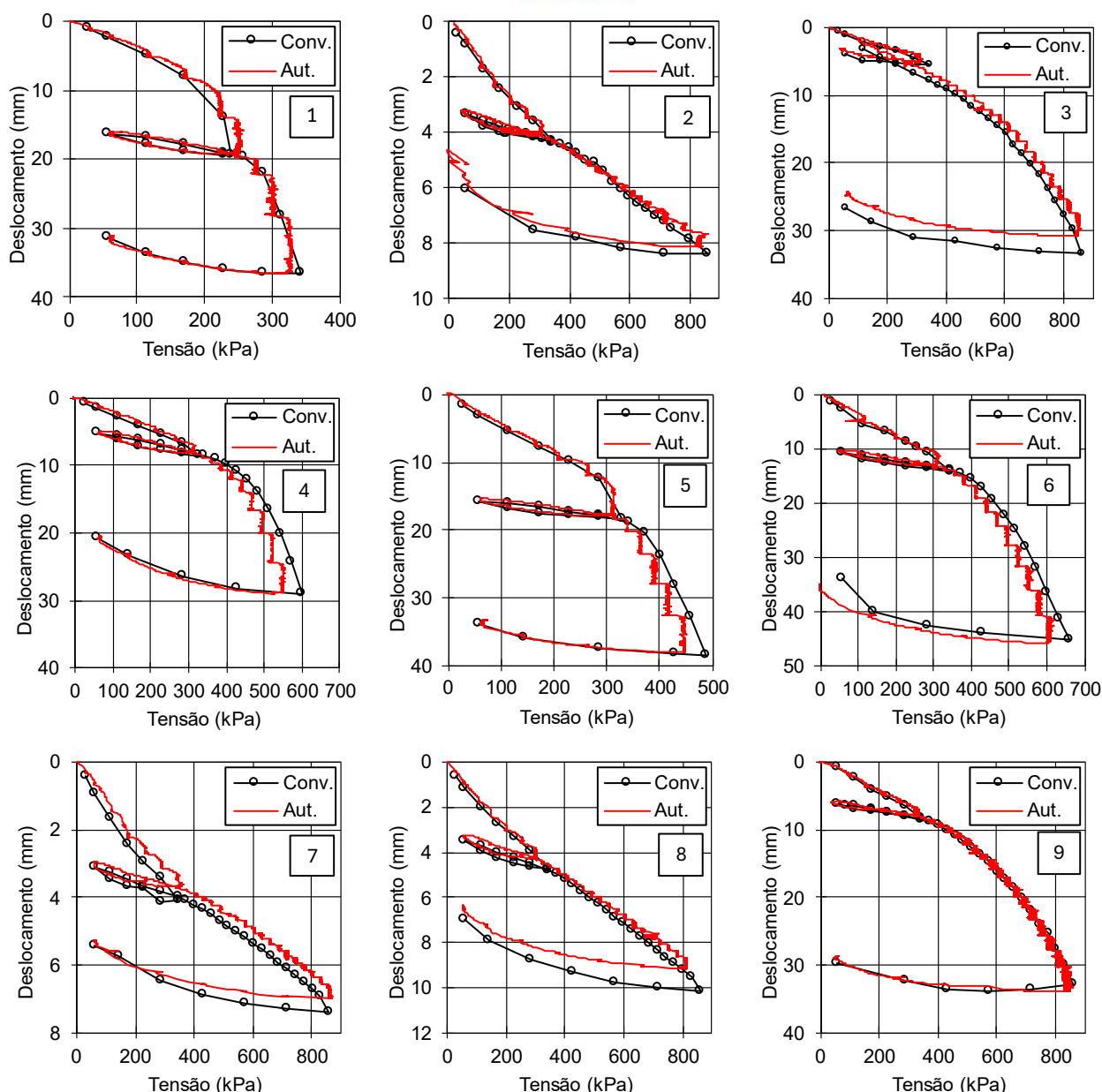


Figura 5. Comportamento Tensão x Deslocamento para os ensaios de placa.

Quando comparados os valores de módulos de deformabilidade obtidos para os ciclos de carregamento e recarregamento, nota-se que o aumento é da ordem de 3,5 vezes para os solos saprolíticos e de 2,5 vezes para os solos residuais. Este mesmo comportamento, obviamente, é observado para o coeficiente de reação vertical. Os valores de módulos obtidos no primeiro ciclo de carga comparados com os valores obtidos na menor tensão confinante dos ensaios triaxiais tendem a ser menores, cerca de 1,5 vezes, para os solos residuais. Para os solos saprolíticos os valores tendem a ser próximos e maiores. Quando é avaliado o ciclo de recarga, os valores de módulos tendem a ficar mais próximos ao valor obtido para a tensão confinante de 200kPa para ambos os solos. Os que os valores de módulos determinados em ensaios triaxiais correspondem à módulos secantes para deformação axial da ordem de 0,1% a 0,2%.

Para as medidas de deslocamentos do paramento foram observados dois movimentos que ocorrem durante o carregamento, o deslocamento do paramento contra o solo, que tende a ser homogêneo e as deformações do paramento quando este é solicitado pela reação do solo e depende das condições de vinculação do paramento nas adjacências do tirante solicitado. Alguns resultados valem ser citados, como os ensaios 1 e 2 que apresentaram deslocamentos relativamente elevados para os 3 pontos, o que indica um comportamento semelhante ao primeiro modelo citado acima. Já o ensaio 8 (exemplo da Tabela 2) apresentou deslocamento elevado, entretanto, concentrado na região da placa, o que remete a uma distribuição não homogênea de tensões no tardo da cortina e pode estar associado a um comportamento estrutural anômalo.



Tabela 1. Resumos dos resultados dos ensaios de placa e laboratoriais.

ID	Descrição	Ensaio de placa					Ensaaios de laboratório						
		E (MPa)	K _v (MN/m ³)	E (MPa)	K _v (kN/m ³)	σ _{rup} (kPa)	y _n (kN/m ³)	y _d (kN/m ³)	c' (kPa)	Ø' (°)	E (MPa)*	σ _{vm} (kPa)	Cc
		1º carregamento		Recarregamento									
1	Solo residual maduro	9,1	21,2	19,3	44,5	230	16,6	12,9	23	25	19,5 24,0 30,5 20,5	522	0,437
2	Saprólito	33,0	73	75,0	175	**	15,5	11,9	31	28	49,8 33,6 50,1 86,5	538	0,756
3	Solo residual maduro	26,0	61	21,0	49	550	15,9	12,4	45,8	25,9	31,8 27,1 46,1 42,1	***	
4	Solo residual maduro	17,0	38,2	40,0	93	475	16,7	12,5	29	26	33,9 35,4 54,4 43,6	***	
5	Solo residual maduro	9,1	21	42,0	99	340	17,1	13,1	3,1	27	5,9 10,5 18,8 28,3	353	0,593
6	Solo residual maduro	10,8	25,2	33,5	78	460	14,3	12,2	7,3	24	20,0 34,3 39,2 33,2	368	0,846
7	Saprólito	38,0	88	160,0	350	**	18,6	15,5	20*	30*	38,2 43,9 85,2 152,6	***	
8	Saprólito	28,0	62	103,0	240	**	16,8	12,5	6,9	30,5	7,5 28,7 55,4 127,6	***	
9	Solo residual maduro	20,0	45	48,0	110	600	16,2	13,1	2,8	25,4	5,0 8,2 11,6 15,8	***	

*Para σ'3 (kPa): 25, 50, 100, 200. / ** Tensão de ruptura não obtida no ensaio / *** Ensaio não efetuado.

Tabela 2. Resumos dos resultados dos deslocamentos do paramento.

Ensaio	Referente a:	Deslocamento paramento (mm)			Exemplo de gráfico obtido para o deslocamento do paramento (Ensaio 8)
		D1	D2	D3	
1	ID 1	-3,46	-3,02	-2,37	
2	ID 2	-2,18	-1,55	-1,02	
3	ID 3	-0,51	-0,25	-0,27	
4		-0,66	-0,51	-0,05	
5		-1,02	*	-0,14	
6		-0,58	-0,01	-0,11/+0,15	
7	ID 4	-0,25	-0,23	-0,07	
8		-3,11	-0,41	-0,12	
9		-0,06	+0,02	+0,04	
10	ID 5	-0,23	-0,39	-0,36	
11		-0,63	-0,11	-0,01	
12	ID 7	-0,74	-0,40	-0,06/+0,16	
13		-1,17	+1,06	-0,36/+0,25	
14	ID 8	-1,47	-0,44/+0,06	-0,09/+0,04	
15	ID 9	-2,71	-0,51	-0,41	

* Medida não realizada / ** Ensaio referente à ID 6 não foi realizado.



Onde, σ_{rup} – tensão de ruptura; γ_n – peso específico natural; γ_d – peso específico aparente seco; c' – intercepto coesivo efetivo; ϕ' – ângulo de atrito efetivo; σ_{vm} – tensão de pré-adensamento; C_c – índice de compressão; D1, D2 e D3 – deslocamentos na respectiva posição (Figura 3).

5 CONCLUSÕES

Foram apresentados os resultados de módulo de deformabilidade para diferentes tipos de ensaios de campo e laboratório. Os resultados são compatíveis entre si em ordem de grandeza, entretanto as diferenças encontradas são esperadas em função das trajetórias de tensão, nível de deformação, estado de tensão inicial, e escala de cada ensaio. Isto não indica vantagem ou desvantagem de um ensaio em relação ao outro, apenas sinaliza que a utilização dos parâmetros elásticos deve ser utilizada com cautela, e observando a representatividade do ensaio em relação à aplicação de cálculo requerida.

A execução de ensaios de placa com medições automáticas mostrou ser viável e com resultados adequados quando comparados com as medidas feitas de forma convencional, a quantidade massiva de dados obtidos durante todo o ensaio permitiu observar de maneira mais detalhada o comportamento dos solos.

Quanto aos deslocamentos dos paramentos das cortinas, o comportamento esperado para as estruturas remete a deslocamentos uniformes tendo em vista a rigidez relativa no projeto em questão. A maior parte dos ensaios apresentou uma deformação normal com base no desempenho esperado da estrutura. Entretanto alguns ensaios apresentaram uma diferença significativa no deslocamento de D1 em relação às medidas de D2 e D3, o que caracterizaria um afundamento da placa do tirante ou uma deformada do paramento mais intensa do que o esperado. Em etapas futuras deste trabalho serão empregadas análises numéricas para retroanalisar o comportamento medido da estrutura.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FGS Geotecnia pelas informações e apoio para realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2019). NBR 6489. *Solo – Prova de carga estática em fundação direta*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). NBR 16853. *Solo – Ensaio de Adensamento Unidimensional*. Rio de Janeiro.
- ASTM International (2015). ASTM D7181-11: *Standard test method for consolidated drained triaxial compression test for soils*.
- Biarez J., Liu H., Gomes Correia A., Taibi S. (1999) *Stress-strain characteristics of soils interesting the serviceability of geomaterials structures*, Proc. II Int. Conf. on Pre-failure Deformation Characteristics of Geomaterials, IS Torino 99, Jamiolkowski, Lancellotta and Lo Presti Eds. Balkema, Rotterdam, Vol. 1, pp. 617-624.
- Correia, A. (2004). *Deformability characteristics of soils interesting the serviceability of structures*. Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia. 100. 130-122.
- Farias, R. S. (2018) *Análise estrutural de edifícios de paredes de concreto com a incorporação da interação solo-estrutura e das ações evolutivas*. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- Jardine R. J., Simes M. J., Burland J. B. (1984) *The measurement of soil stiffness in the triaxial apparatus*, Géotechnique, Vol. 34 N°3, pp. 323-340.
- Montemazzo, R. F. (2005) *Estudo comparativo de ensaios de compressão confinada em argilas e areias saturadas utilizando o ensaio CRS*. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.
- Ranzini, s. M. T.; Negro Júnior, A. *Obras de contenção: tipos, métodos construtivos, dificuldades executivas* (1998), In: HACHICH, W.; FALCONI, F. F.; SAES, J. L.; FROTA, R. G. Q.; CARVALHO, C. C.; NIYAMA, S. *Fundações: teoria e prática*. 2. ed. São Paulo: Pini, p.497-515.