



Proposta para Calibração de Parâmetros de Projeto Mediante Retroanálise Numérica e Registros de Instrumentação de Aterro Assente em Camadas Turfosas

Daniel B. R. B. do Couto
COPPE-UFRJ, Programa de Engenharia Civil
Rio de Janeiro, Brasil, daniel.couto@coc.ufrj.br

Maria do Carmo Cavalcanti, DSc.
Professora Convidada, COPPE-UFRJ, Programa de Engenharia Civil
Rio de Janeiro, Brasil, carminha.cavalcanti@coc.ufrj.br

Márcio de Souza Soares de Almeida, DSc.
Professor Titular, COPPE-UFRJ, Programa de Engenharia Civil
Rio de Janeiro, Brasil, almeida@coc.ufrj.br

RESUMO: Os solos orgânicos turfosos são desafiadores em razão de sua heterogeneidade, anisotropia e da ausência de correlações bem estabelecidas para a estimativa de parâmetros geotécnicos. Métodos de investigação usuais como o SCPTu quando aplicados em turfas tendem a produzir resultados inconsistentes, impelindo a recorrer-se a técnicas custosas de melhoria do solo ou aplicação do método observacional. Este estudo apresenta uma abordagem integrada, combinando modelagem numérica, leituras de placas de recalque e dados laboratoriais e de campo, objetivando avaliar o comportamento preditivo de recalque de um aterro construído sobre turfa e argila mole e estimar os possíveis parâmetros de resistência e deformabilidade para estas turfas em projeto realizado na região da Colúmbia Britânica, Canadá.

PALAVRAS-CHAVE: Turfas, Modelagem Numérica, Plaxis2D, Soft-Soil.

ABSTRACT: Organic peat-rich soils pose challenges in geotechnical engineering due to their heterogeneity, anisotropy, and lack of reliable correlations for strength parameters. Standard investigation methods such as SCPTu tend to yield inconsistent data, and often projects dealing with peats rely in the use of expensive ground improvement techniques or the observational method. Given the limitations of traditional testing, this study uses a combined approach—numerical modeling, settlement plate readings, and lab and field data—to assess the settlement behavior of an embankment over peat and clay in British Columbia, aiming to estimate possible project design parameters for peaty soils.

KEYWORDS: Peats, Numerical Modelling, Plaxis2D, Soft-Soil.

1. INTRODUÇÃO

Turfas são solos predominantemente orgânicos em estágios variados de decomposição, depositados de forma frequentemente não-estruturada e quase sempre encontrados em condição saturada. Entre as características marcantes que distinguem o comportamento mecânico das turfas daquele observado em solos inorgânicos destacam-se uma macroestrutura definida por elevados volumes de vazios e teores de umidade, ambos muito superiores aos verificados em argilas e siltes, promovendo recalques rápidos e significativos durante o processo de adensamento, o qual tende a se desenvolver em fases que não seguem fielmente a Teoria do Adensamento de Terzaghi uma vez que observam-se simultaneamente a expulsão de água dos vazios, a reestruturação da matriz do solo e uma rápida redução da permeabilidade sob carregamento, apresentando um adensamento primário acelerado, geralmente concluído em semanas ou meses, seguido por um longo período de adensamento secundário, que pode se estender por anos até atingir a estabilização (Hendry, 2011). Não obstante, esses materiais apresentam elevados ângulos de atrito sob condições de cisalhamento drenado, variando no seu patamar superior entre 50° e 70° conforme observado na literatura.



Considerando as particularidades do comportamento de depósitos turfosos no que se refere ao desenvolvimento de recalques, bem como as dificuldades enfrentadas na caracterização desses depósitos por meio de técnicas de investigação de campo e correlações comumente aplicadas na prática geotécnica, o presente trabalho busca apresentar o processo de retroanálise e calibração para avaliar o comportamento desses solos em uma obra localizada na Colúmbia Britânica, Canadá, sendo utilizados recursos de modelagem numérica, leituras de placas de recalque e ensaios de campo e de laboratório.

2. CARACTERIZAÇÃO GERAL DA OBRA

Os dados utilizados no trabalho foram obtidos de obra situada próxima às margens do rio Fraser, na divisa entre as cidades de Surrey e New Westminster, na Colúmbia Britânica, Canadá. Esta consistia na expansão de um pátio ferroviário e instalação de novos trilhos sobre aterro assente em área de depósitos sedimentares glaciais e glacio-marinhos, intercalados com areia siltosa com pedregulhos, areia fina e siltes argilosos, que encontram-se sobrepostos por depósitos recentes de argila siltosa e, mais superficialmente, por camadas de solos orgânicos turfosos, de espessura entre 2 e 14 metros. Sendo esperados recalques significativos e acima dos limites aceitáveis para trilhos ferroviários, foi instalado no local um aterro instrumentado de aproximadamente 1,5 m de altura e 14 metros de largura em seção transversal, com o objetivo de acelerar o processo de adensamento e ganho de resistência das camadas moles inferiores. A obra foi monitorada até a estabilização dos recalques, possibilitando a liberação para o erguimento do aterro final e a subsequente instalação dos trilhos.

3. DADOS OBTIDOS E INTERPRETAÇÃO

Foram analisados 3 ensaios de cone sísmico (SCPTu) e 10 sondagens sônicas com ensaios de cravação de amostrador-padrão (SPT) e Shelby, para fins de caracterização e obtenção de amostras, tendo sido coletadas 19 amostras deformadas com uso de amostrador SPT e 3 amostras indeformadas utilizando amostrador Shelby. Estas foram submetidas a ensaios de limites de Atterberg, análise granulométrica, teor de umidade, ensaios de compressão edométrica, perda de matéria orgânica por ignição, dentre outros. Além destes ensaios também foram instaladas 13 placas para leitura de recalques em locais variados, sob o aterro. Não foram considerados na análise quaisquer outros ensaios in situ ou especializados, tais como os ensaios de palheta ou triaxiais.

3.1. *Ensaios do tipo SCPTu*

Ensaios do tipo SCPTu constituem uma das ferramentas mais relevantes na investigação geotécnica por possibilitarem simultaneamente a definição de perfis estratigráficos e de parâmetros geotécnicos, mediante registro contínuo de dados de resistência de ponta (qc), atrito lateral (fs), poropressão (u_1 ou u_2) e, neste caso, perfil de ondas cisalhantes (V_s) e de dissipação de poropressão. Estes ensaios foram conduzidos conforme as normas internacional e americana — IRTP/ISSMFE-99 e ASTM D5778-20, respectivamente — com avanço contínuo a uma velocidade de 20 mm/s, utilizando ponteira cônica com área projetada de 10 cm^2 e medição única de poropressão na base do cone (posição u_2).

Os dados obtidos diretamente foram tratados no software CpeT-IT v. 3.0 (Geologimiski) e seus resultados verificados de acordo com as correlações publicadas por Robertson & Cabal (2022), adotando-se um fator de cone inicial $N_k = 14$. No caso de solos com comportamento não-drenado foi possível estimar a resistência não-drenada (S_u), o módulo confinado (D') e a razão de sobredensamento (RSA), entre outros. Para solos com comportamento drenado, foram estimados o ângulo de atrito efetivo (ϕ') e o módulo de Young (E'), entre outros. Além disso, foram avaliados o módulo de cisalhamento inicial (G_0), do índice de vazios (e) e de outras propriedades comuns a ambos os regimes de comportamento. A partir dessas informações, foi possível desenvolver planilhas próprias destinadas à verificação e consolidação dos parâmetros geotécnicos obtidos. Um exemplo dos resultados obtidos se encontra nas Fig. 1a a Fig. 1d e Fig. 2a a Fig. 2c.

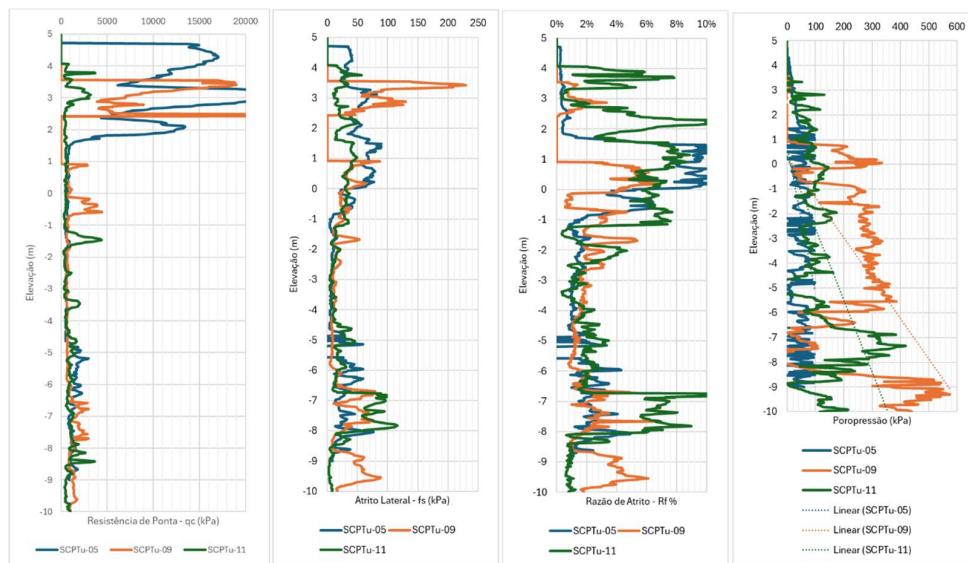


Fig. 1a, 1b, 1c e 1d . Registros de qc , fs , $R\%$ e $u2$ obtidos pelo piezocone sismico

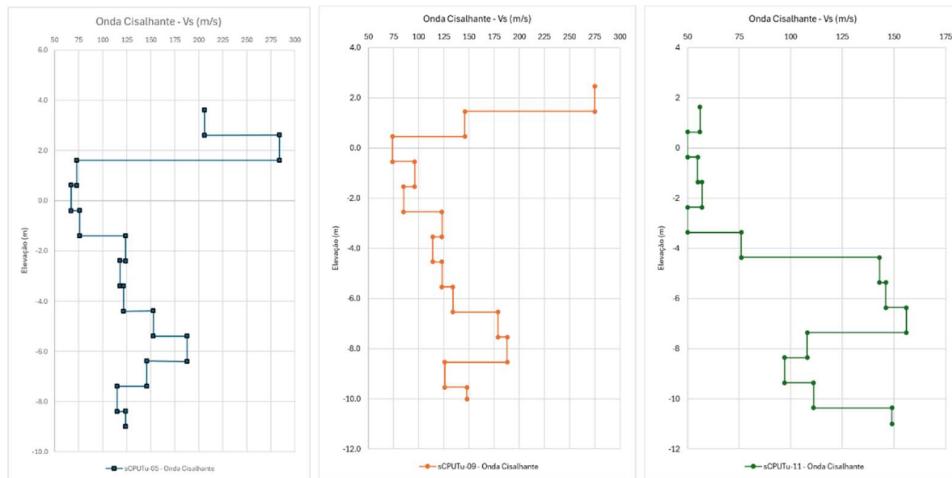


Fig. 2a, 2b e 2c. Perfis de Ondas Cisalhantes (V_s) obtidos pelo piezocone sismico

Foram também realizados 6 ensaios de dissipação de excesso de poropressão *in situ* (do tipo t_{50}), sendo dois em cada local sondado e executados em diferentes elevações, com o objetivo de estimar a permeabilidade *in situ* dos depósitos orgânicos e de argila siltosa e consideradas correlações como a de Teh & Housby (1991) apud Robertson et al. (1992), e Mayne & Campanella (2006) sendo que os resultados que apresentaram maior proximidade com aqueles obtidos nos ensaios de compressão edométrica no caso das argilas foram os derivados da correlação de Parez e Fauriel (1988):

$$k \text{ (cm/s)} = \left(\frac{1}{251 \cdot t_{50.} \text{ (sec)}} \right)^{1.25} \quad (1)$$

3.2. Ensaios laboratoriais

Para a caracterização de solos inorgânicos (areais, argilas e siltos) foram realizados 19 ensaios de curva granulométrica e testes de sedimentação; 3 ensaios de compressão edométrica nas argilas; 4 ensaios para determinação dos limites de Atterberg em amostras selecionadas de argilas, coletadas com amostradores



do tipo Shelby, e três testes de perda de massa por ignição para determinação do teor de matéria orgânica presente nestas amostras de argila. Para efeitos de seleção da razão de sobreadensamento (RSA) em argilas, foram considerados tanto os valores obtidos pelo cone quanto a correlação empírica de Jamiolkowski (1985) assumindo Cu=Su, sendo identificado que os obtidos pelo cone eram 30% maiores em média. No caso da tensão de sobreadensamento foram consideradas, além dos resultados do cone sísmico, também as expressões propostas por Kulhawy (1990) e Mesri et al (2019), apud Robertson (2022). Os resultados da caracterização encontram-se apresentados na Tabela 1.

$$c_u / \sigma'_v = (0.23 \pm 0.04) \cdot (RSA)^{0.8} \quad (2)$$

$$\sigma'_p = (0.33) \cdot (q_t - \sigma_v) \quad (3)$$

$$S_u = (0.26) \cdot (\sigma'_p) \quad (4)$$

Tabela 1. Principais resultados obtidos dos ensaios para argilas

Amostra	El. (m)	e0	Cc	Cs	w%	Cv (cm ² /s)	% Org.
Argila 1	-4.80	2.406	0.482	0.077	87.4	7.5E-4	3
Argila 2	-4.15	2.482	0.475	0.094	99.8	8.10E-4	6.6
Argila 3	-5.80	1.403	0.189	0.033	52.2	8.4E-4	5.7

Para a caracterização das turfas foram completados 4 testes para determinação do teor de umidade e 2 testes de perda de massa por ignição para determinação do teor de matéria orgânica, realizados em amostras deformadas. No caso das turfas foram ainda consideradas correlações propostas por Huat et al. (2014) para efeitos de avaliação da tensão de sobreadensamento assumindo Cu=Su. Quando calculada diretamente com valores obtidos desta correlação e de tensão efetiva in situ obtida do cone, foram identificados valores mais coerentes para RSA que os obtidos pelos ensaios de cone. Uma vez que não foram completados ensaios de compressão edométrica ou ensaios triaxiais drenados nas turfas, os valores para e₀, C_c e C_s foram obtidos mediante o emprego de correlações da literatura técnica (Terzaghi e Peck (1967); Azzouz et al. (1976); Mesri et al. (2007) e Huat et al. (2014), respectivamente) conforme indicado na Tabela 2:

$$C_s = C_c / 10 \quad (5)$$

$$C_c = 0.0115 \cdot w\% \quad (6)$$

$$e0 = C_c / 0.45 \text{ a } C_c / 0.75 \quad (7)$$

$$e_0 = \frac{30.65(w+0.88)^{0.116}}{1.12} \quad (8)$$

$$c_u / \sigma'_p = 0.45 \quad (9)$$

Tabela 2. Principais resultados obtidos de ensaios e correlações para turfas

Amostra	El. (m)	N _{SPT}	e0 ⁽²⁾	e0 ⁽³⁾	Cc	Cs	w%	% Org.
Turfa 1	4.6	-	10.67	27.69	7.12	0.712	619	94.1
Turfa 2	4.0	2	10.43	27.54	6.96	0.07	605	⁽¹⁾
Turfa 3	-4.4	3	4.33	21.97	2.89	0.29	251	⁽¹⁾
Turfa 4	-0.6	2	9.12	26.65	6.08	0.61	529	88.7

(1) Amostra não testada para teor de matéria orgânica

(2) De acordo com Mesri et al (2007)

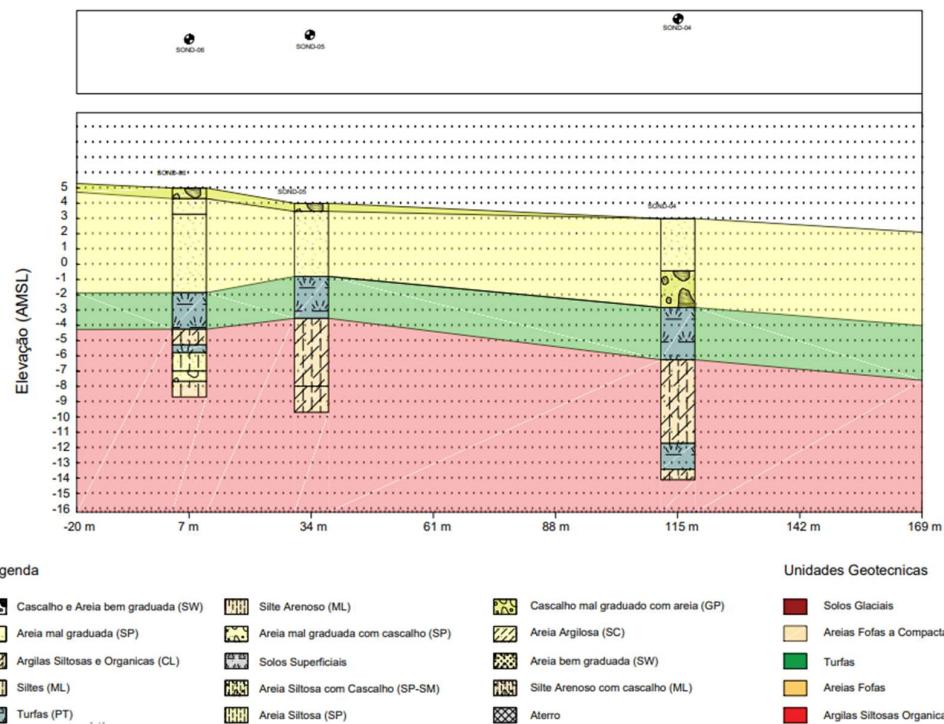
(3) De acordo com Huat et al (2014)

3.3. Leituras das Placas de Recalque

Foram coletadas as leituras de 13 placas de recalque instaladas quando da construção do aterro, posicionadas ao centro e na borda ao longo do percurso do trilho. Considerou-se que uma das sondagens (SOND-05) consistia no ponto ótimo de tomada de dados, tendo completadas investigação por SPT e SCPTu no mesmo local além de ensaios de peneiramento e classificação tático-visual. Desta forma, para efeitos de elaboração deste trabalho foram consideradas as leituras das Placas 7 e 8, próximas ao ponto de tomada de dados e distante dele aproximadamente 9 e 11 metros, respectivamente.

3.4. Estabelecimento do Perfil Estratigráfico e Observações

Considerados os boletins de sondagem e a classificação dos materiais geotécnicos obtidos com os ensaios de cone sísmico, foi elaborado um perfil estratigráfico preliminar baseando-se a priori na identificação tático-visual, classificação SBT (Robertson, 2022) e perfil de onda cisalhante (V_s). Este perfil foi refinado e simplificado com o uso dos resultados de ensaios de laboratório, com seus horizontes estratigráficos redefinidos mediante um critério multifatorial que considerava em ordem decrescente de peso: a razão de atrito ($Rf\%$), peso unitário (γ_s), comportamento SBT Modificado (Robertson, 2022), ensaios de laboratório e comportamento drenado ou não-drenado, bem como os valores para permeabilidade observados em ensaios de dissipaçao in situ e obtidos do ensaio de cone, salientando-se que as amostras deformadas coletadas em ensaios SPT tiveram seus respectivos ensaios laboratoriais considerados para esta caracterização, mas o registro N_{SPT} não foi utilizado além da estimativa de grau de compacidade ou consistência, e o nível d'água foi considerado como equivalente ao da camada de turfa, conforme observações dos boletins de sondagem e interpretações dos ensaios de cone sísmico. Foram elaboradas duas seções para fins de estabelecimento de um perfil estratigráfico simplificado para a análise, sendo uma longitudinal, incorporando todos os dados disponíveis, e uma transversal, centrada ao redor do ponto de tomada de dados SOND-05, apresentada na Fig. 3 abaixo:



Durante o processo de interpretação dos dados observou-se que alguns dos parâmetros extraídos por meio dos ensaios de cone sísmico diferiam dos resultados esperados para solos turfosos na literatura em relação aos valores obtidos para índice de vazios e RSA. Embora a análise realizada não permita conclusões definitivas acerca dos comportamentos observados, a literatura técnica apresenta possíveis explicações. Dentre elas, destaca-se a hipótese de que o processo de decomposição da matéria orgânica promove a formação de gases que, em condição oclusa, possuem o potencial de alterar significativamente a resposta hidráulica e mecânica das turfas quando submetidas a carregamentos (Muraro & Jommi, 2020) e, não sendo os gráficos de classificação por poropressão calibrados para presença de gás ocluso nos solos orgânicos, infere-se que ocorreria uma resposta de poropressão pouco confiável. Lengkeek & Brinkgraeve (2022) identificaram que as correlações existentes baseadas em CPTu foram elaboradas para argilas minerais e não representam adequadamente o comportamento de argilas orgânicas e turfas e, portanto, a principal limitação desses métodos se encontra na classificação imprecisa de solos orgânicos. De acordo com estes autores, em muitos casos as correlações de Robertson (2012) classificam erroneamente camadas de turfa (SBT=2) como argila (SBT=3) como também não distinguem entre turfas e argilas orgânicas. A Fig. 4a abaixo apresenta os resultados para comportamento SBT obtidos em um dos ensaios de cone sísmico, onde verifica-se que materiais identificados em campo e em ensaios de laboratório como sendo turfas (em verde) encontram-se plotados na área de SBT=3, em classificação errônea, enquanto a Fig. 4b indica a presença de solos orgânicos turfosos, mediante avaliação do comportamento de onda cisalhante no mesmo local.

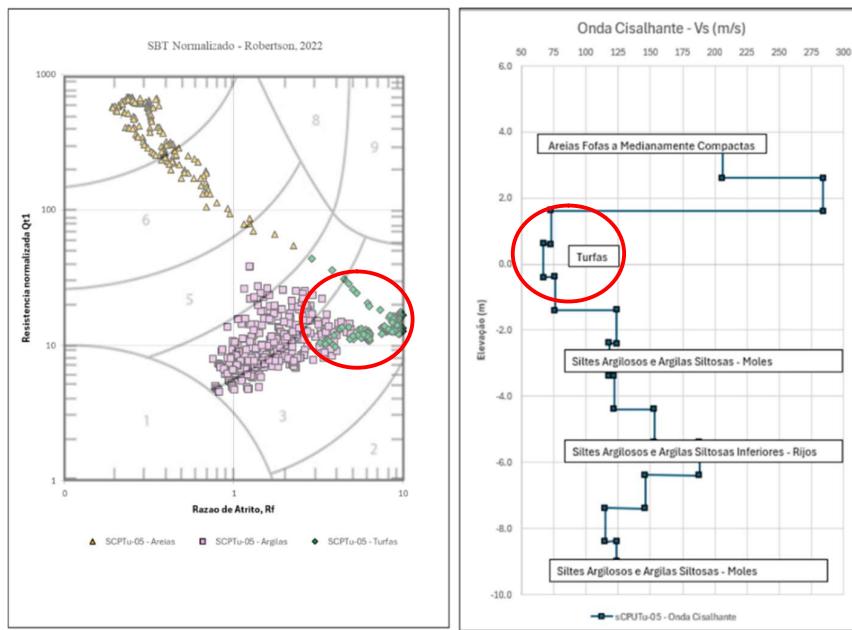


Fig. 4a e 4b. Comportamento SBT para ensaio SCPTu (Robertson, 2022) e perfil de Onda Cisalhante

4. MODELAGEM NUMÉRICA E RESULTADOS

Consideradas a variabilidade de resultados obtidos bem como a ausência de ensaios laboratoriais específicos para as turfas encontradas, o presente trabalho propôs avaliar a aplicabilidade de ferramentas numéricas baseadas no Método de Elementos Finitos com o objetivo de simplificar o processo iterativo de ajuste do coeficiente de permeabilidade e de seleção de parâmetros de deformação em função das observações em campo registradas nas leituras das placas de recalque durante um período de 45 dias, subdividido em três fases distintas de 15 dias de acordo com a magnitude das leituras e sua interpretação, sendo observado em ambas as placas que o período de estabilização dos recalques ocorreu entre o 40º e o 45º dia. A metodologia aplicada consistiu na simulação da sequência executiva de construção do aterro, conforme registro pelas datas das leituras das placas de recalque, Foi utilizado na modelagem o software Plaxis2D (Bentley, 2025), empregando o modelo constitutivo Soft Soil (SS), adotado usualmente para o

comportamento de solos moles — como argilas, turfas e siltos — em estado normalmente adensado ou levemente sobreadensado. Como os ensaios de piezocone sísmico indicavam comportamento não-drenado nas camadas de turfa, foram aplicadas inicialmente condições de contorno que permitiam livre drenagem vertical para fins de simulação do adensamento, como normalmente é adotado para argilas nesta condição. No caso das Areias e Argilas os parâmetros de resistência e deformabilidade considerados adviriam dos ensaios de piezocone sísmico, ensaios laboratoriais e valores consultados na literatura técnica, e no caso das Turfas inteiramente de valores observados na literatura técnica e o uso de correlações, respectivamente, em função da ausência de ensaios triaxiais drenados e correlações aplicáveis estabelecidas para intercepto de coesão e ângulo de atrito efetivo. Estes encontram-se sumarizados na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros considerados para a modelagem numérica em Soft-Soil

Material	γ_{sat} (kN/m ³)	v	E' (kPa)	e0	λ^*	k*	c' (kPa)	ϕ' (DEG)	k _v (m/dia)	RSA
Aterro	20	0.4	200.0E3	0.50	-	-	2	42	-	-
Areia	19	0.4	32.85E3	0.50 0.97	-	-	8	42	1.1	-
Turfa	11	0.03	-	10.67	0.265	0.026	0.1-2	45-60	1.0E-1 1.0E-3	1.5 2.0
Argilas Orgânicas	15	0.4	-	2.480	0.059	0.006	0.5	18	4.0E-3	1.7
Argilas Inferiores	15	0.4	-	1.403	0.034	0.188	0.5	18	4.0E-3	1.5

* Parâmetros λ e k do Cam-Clay, modificados para representar a deformação volumétrica e normalizados por (1+e0)

Obtidas curvas de recalques no modelo Plaxis2D, estas foram comparadas às leituras das placas de recalque e um novo processo iterativo realizado, alterando-se no modelo o coeficiente de permeabilidade das turfas para ajuste das curvas. Análises de sensibilidade também foram realizadas, com alterações nos parâmetros de resistência, deformabilidade e sobreadensamento das turfas.

Ao fim do exercício numérico, em 5 iterações foi possível aproximar o comportamento do aterro instrumentado no que tange os valores totais obtidos para o recalque máximo, condizente com a leitura da Placa 8 que se encontra mais próxima ao meio do aterro, validando-se que o fim do adensamento ocorria de forma similar em campo e no modelo pela verificação da dissipação de poropressão total. Contudo, não foi possível aproximar os resultados obtidos na leitura da Placa 7 utilizando os mesmos parâmetros, o que se julgou ser função da adoção de uma geometria de horizontes uniformes, sem possíveis variações locais da estratigrafia. Por último, identificou-se que o valor encontrado para a permeabilidade da turfa no modelo era 2 ordens de grandeza maior que o obtido pelo ensaio de cone e de dissipação da poropressão in situ ($k_v = 10^{-6}$ m/s contra 10^{-8} m/s). A Fig. 5a abaixo apresenta os resultados obtidos, enquanto a Fig. 5b apresenta a estratigrafia considerada, em imagem ajustada.

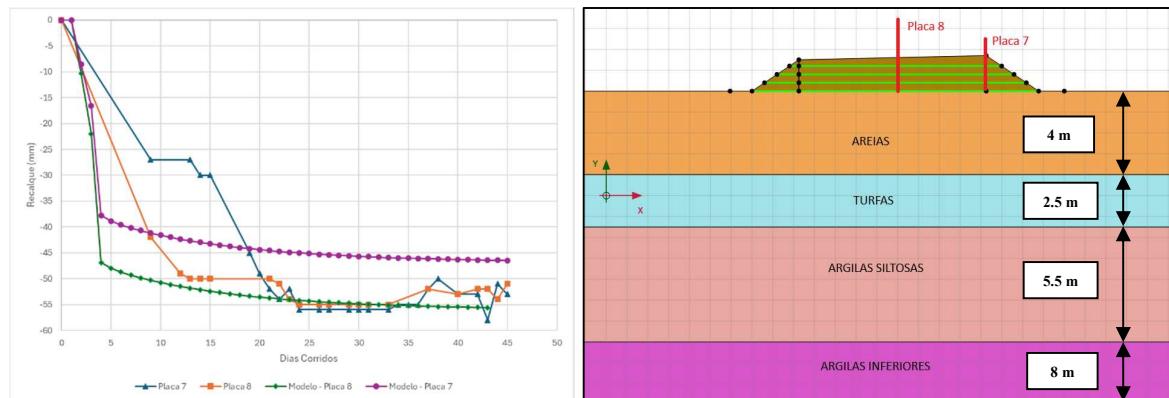


Fig. 5a e 5b. Resultados do modelo em Soft-Soil e estratigrafia considerada



5. CONCLUSÕES

Considera-se que o uso de modelagem numérica, para fins de aferição de parâmetros de projeto de baixa complexidade e baixo risco envolvendo turfas, mediante a retroanálise da leitura de recalques no campo, pode representar uma alternativa expedita em relação a outros métodos observacionais aplicados a solos moles, sendo especialmente vantajosa no caso de projetos executados sobre perfis estratigráficos variados, onde a aplicação de métodos observacionais como o Método de Asaoka — que assume um coeficiente de adensamento único e se baseia na hipótese de solo homogêneo — pode ser impraticável.

Considera-se que a realização de ensaios oedométricos na argila e a caracterização da turfa através de correlações baseadas no teor de umidade, ensaios rápidos e de baixo valor agregado, mostraram-se aplicáveis, mas carecem de estudos aprofundados que justifiquem sua aplicação mais ampla. Representam, no entanto, um bom paradigma inicial para avaliações preliminares, salientando-se que as correlações de Terzaghi e Peck (1967), Azzouz et al. (1976) e Mesri et al. (2007) mostraram-se de boa aplicação para turfas, quando considerados os resultados obtidos pelas correlações, pelo processo iterativo no modelo e os valores observados na literatura técnica. Entende-se ainda que o uso do SCPTu foi vantajoso, mas correções precisam ser feitas de forma a aumentar a representatividade no caso de solos orgânicos.

Quanto aos valores observados para a permeabilidade, aponta-se que Hendry (2011) observou em estudo de turfas canadenses variações diretamente relacionadas com a profundidade e tensão atuante; com o teor de umidade; e com o teor de matéria orgânica decomposta (grau de humificação), registrando naquele estudo valores da ordem de 10^{-3} m/s próximos à superfície e 10^{-6} e 10^{-5} m/s abaixo de 2 metros de profundidade. Huat et al. (2014), apontam que esta característica ocorre em função de uma macroestrutura diplotélmica, ou seja, dividida em duas zonas distintas em função do seu comportamento hidráulico e mecânico denominadas acrotélio e catotélio, podendo-se inferir que os diferentes ensaios de dissipaçāo da poropressão in situ podem ter sido realizados em turfas com alguma variabilidade local.

Sugere-se para trabalhos futuros um aprofundamento acerca da variabilidade da permeabilidade e dos parâmetros de resistência das turfas mediante o uso de ensaios triaxiais drenados e ensaios in situ, bem como a avaliações acerca da aplicabilidade das correlações usadas — se possível em estudo paralelo com retroanálise de placa de recalque de forma a comparar as estimativas com o comportamento real em campo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Hendry, M. T. (2011). *The geomechanical behaviour of peat foundations below rail-track structures* (Doctoral dissertation). University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada.
- Huat, B. B. K., Prasad, A., Asadi, A., & Kazemian, S. (2014). *Geotechnics of Organic Soils and Peat*. CRC Press.
- Jamiolkowski, M., Ladd, C.C., Germaine, J.T., & Lancellotta, R. (1985). *New Developments in Field and Laboratory Testing of Soils*. Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, August 12–16, 1985, pp. 57–153
- Lengkeek, H. J.; Brinkgreve, R. B. J. CPT-based classification of soft organic clays and peat. In: Gottardi, G.; Tonni, L. (org.). *Cone penetration testing 2022*. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 2022. p. 503–508. Mayne, P. W., & Campanella, R. G. (2006). *Versatile site characterization by seismic piezocone*. In *Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering* (pp. 721–724). IOS Press.
- Mesri, G., & Kane, T. (2019). *Preconsolidation Pressure of Post-Glacial Soft Clay and Silt Deposits*. In N. P. López-Acosta et al. (Eds.), *Geotechnical Engineering in the XXI Century: Lessons Learned and Future Challenges* (pp. 244–251). IOS Press.
- Muraro, S., & Jommi, C. (2020). *Modelling free gas overpressure in peat layers*. E3S Web of Conferences, 195, Article 02027.
- Robertson, P. K., & Cabal, K. (2022). *Guide to Cone Penetration Testing* (7th ed.). P. K. Robertson Consulting.
- Kulhawy, F. H., & Mayne, P. W. (1990). *Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design*. Electric Power Research Institute (EPRI), Report EL-3870.