XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.5/81

Modelagem Geomecânica de uma Estaca Sujeita a Carregamentos Horizontais Assimétricos

Vinicius Verdelli Fernandes
Engenheiro Civil de Infraestrutura, Serra do Mar Engenharia., Joinville, Brasil, vinicius@serradomar.eng.br

Marcelo Heidemann
Engenheiro Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, Brasil, marcelo.heidemann@ufsc.br

RESUMO: Este trabalho apresenta a modelagem geomecânica de uma estaca sujeita a carregamentos horizontais assimétricos, induzidos pela execução de um aterro de 2,0 m sobre solo mole. A análise foi conduzida por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF), utilizando o software RS2. O comportamento das camadas de solo mole foi representado pelo modelo Cam-Clay modificado, com parâmetros calibrados a partir de ensaios de campo (CPTu) e laboratoriais de forma a modelar o processo de adensamento e a dissipação de poropressões ao longo de 20 anos. A estaca de concreto protendido foi modelada como elemento elástico com topo engastado. Os resultados foram comparados com a formulação analítica de Tschebotarioff (1962), incorporando o conceito de reação horizontal do solo a cada metro do perfil estratigráfico. As análises numéricas evidenciaram que, já no momento de aplicação da sobrecarga, os momentos fletores superaram a capacidade resistente da estaca, indicando ruptura estrutural. A camada superior de argila mostrou-se a mais afetada pela sobrecarga aplicada, gerando os maiores carregamentos horizontais. O estudo aponta ainda a limitação das abordagens analíticas simplificadas e reforça a necessidade de modelagem numérica avançada para uma avaliação confiável da interação solo-estrutura em solos moles sujeitos a carregamentos assimétricos.

PALAVRAS-CHAVE: Efeito Tschebotarioff; modelagem geomecânica; solos moles

ABSTRACT: This work presents the geomechanical modeling of a pile subjected to asymmetric horizontal loads induced by the construction of a 2.0 m high embankment on soft soil. The analysis was conducted using the Finite Element Method (FEM) through the RS2 software. The behavior of the soft soil layers was represented by the Modified Cam-Clay model, with parameters calibrated with field (CPTu) and laboratory tests in order to model the consolidation process and pore pressure dissipation over 20 years. The prestressed concrete pile was modeled as an elastic element with a fixed head. The results were compared with the analytical formulation of Tschebotarioff (1962), incorporating the concept of horizontal soil reaction for each meter along the stratigraphic profile. The numerical analyses evidenced that, immediately after the surcharge application, the bending moments exceed the pile's load capacity, indicating structural failure. The upper clay layer proved to be the most affected by the applied surcharge, generating the highest horizontal loads. The study also highlights the limitations of simplified analytical approaches and reinforces the need for advanced numerical modeling for a reliable assessment of soil-structure interaction in soft soils under asymmetric loadings.

KEYWORDS: Tschebotarioff effect; geomechanical modeling; soft soils.

1 INTRODUÇÃO

O aumento da demanda por infraestrutura em áreas urbanas tem levado à ocupação de regiões onde são frequentes problemas associados a eventos climáticos, destacando-se áreas sujeitas a inundações, caracterizadas pela predominância de solos moles. Nesse contexto, a elevação das cotas do terreno através do emprego de aterros é comumente utilizada, exigindo uma avaliação cuidadosa do impacto de seu carregamento sobre o substrato para que se obtenha níveis adequados de segurança (Palmeira; Ortigão, 2004).

Dentre as consequências da execução de aterros sobre solos moles, destaca-se a ocorrência de carregamentos horizontais assimétricos em profundidade em elementos de fundações, como estacas. Tal

fenômeno é denominado efeito Tschebotarioff, sendo resultado do processo de adensamento das camadas de solo mole sob a sobrecarga do aterro, gerando incrementos de tensão horizontal que atuam sobre as estacas, gerando esforços adicionais como momentos fletores e forças cisalhantes (Velloso e Lopes, 2010).

A avaliação do efeito Tschebotarioff pode ser realizada mediante métodos analíticos simplificados, como os propostos por Wenz (1963), De Beer e Wallays (1972) e Stewart et al. (1994), os quais se fundamentam nas formulações iniciais de Tschebotarioff (1962). O método de Tschebotarioff propõe, como aproximação, que os empuxos laterais gerados ao longo da camada compressível podem ser representados por um carregamento triangular ao longo da estaca, cujo valor máximo ocorre no centro da camada adensável. A magnitude do carregamento horizontal (ρ_h) é determinada, através da multiplicação de duas vezes a largura da estaca (B), coeficiente de empuxo (K_e) e a pressão correspondente do aterro (γH_a).

Contudo, esse método adota hipóteses simplificadoras quanto à distribuição de tensões no solo e ao seu comportamento mecânico, o que pode limitar a precisão e a confiabilidade dos resultados, especialmente em solos estratificados e sob condições de carregamento tempo-dependentes.

Dessa forma, a modelagem numérica do problema em questão apresenta-se como alternativa frente às limitações impostas pelos métodos tradicionais, uma vez que tais modelagem são realizadas com auxílio de softwares que utilizam o Método dos Elementos Finitos (MEF). A utilização da modelagem numérica permite uma representação mais realista da interação solo-estrutura, incorporando a não linearidade dos materiais, as condições de contorno reais e a evolução temporal dos fenômenos de adensamento. Nesse contexto, modelos constitutivos como o Cam-Clay modificado, são capazes de representar adequadamente o comportamento de solos sedimentares argilosos.

O presente estudo trata da modelagem numérica de uma estaca representativa das condições existentes em um empreendimento localizado no município de Tijucas/SC, submetida ao efeito Tschebotarioff, decorrente da construção de um aterro com 2,0 metros de altura em um empreendimento vizinho. O trabalho aborda a caracterização geotécnica detalhada do local, baseada em ensaios de campo e laboratoriais, os quais são utilizados para estabelecimento de um modelo geomecânico e definição dos parâmetros constitutivos. O objetivo é avaliar a capacidade da estaca em resistir aos esforços transversais induzidos, comparando os resultados da modelagem numérica com as estimativas fornecidas pelo método analítico de Tschebotarioff (1962), de forma a contribuir para uma avaliação mais confiável da segurança de fundações.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A análise do comportamento da estaca frente aos carregamentos horizontais impõe a necessidade de compreensão do contexto geotécnico no qual a fundação está inserida. A estaca investigada localiza-se em terreno adjacente à área onde se pretende implantar um empreendimento comercial, no município de Tijucas/SC. A Figura 1 apresenta o contexto geológico e a estratigrafia real indicada por uma das sondagens CPTu realizadas na região de estudo.

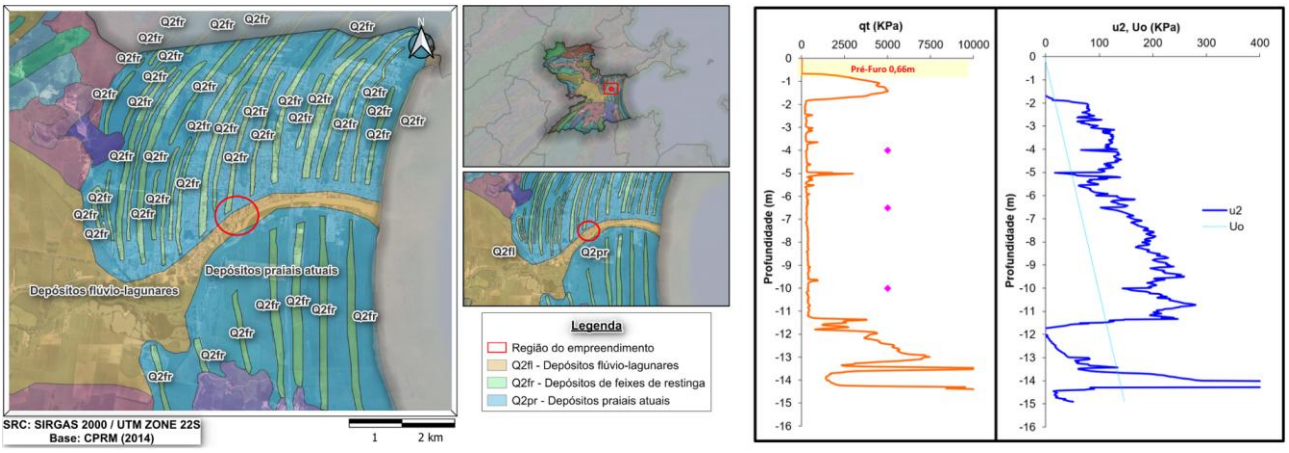


Figura 1. Mapa geológico e perfis de resistência de ponta e poropressão.

A região do empreendimento abrange duas unidades distintas. A parcela predominante encontra-se assente sobre depósitos flúvio-lagunares, caracterizados por intercalações de areias e lamas lagunares com matéria orgânica vegetal, interdigitadas a cascalhos e areias grossas a finas provenientes de sedimentação fluvial. Uma fração menor situa-se sobre depósitos praiais recentes, compostos por areias quartzosas finas a médias, bem selecionadas e de coloração clara (CPRM, 2014).

Para a caracterização geotécnica do local foram disponibilizados nove boletins de sondagem SPT e nove boletins de sondagens CPTu, sendo os resultados condizentes com o contexto geológico apresentado. A determinação do perfil estratigráfico se deu a partir das sondagens CPTu, através da aplicação da metodologia proposta por Robertson (1990). A interpretação dos resultados produziu uma estratigrafia refinada do terreno. Porém, para aplicação dos métodos analíticos e numéricos fez-se necessário a simplificação do perfil. A Figura 2 apresenta o perfil estratigráfico utilizado nas análises e o posicionamento da estaca e do aterro.

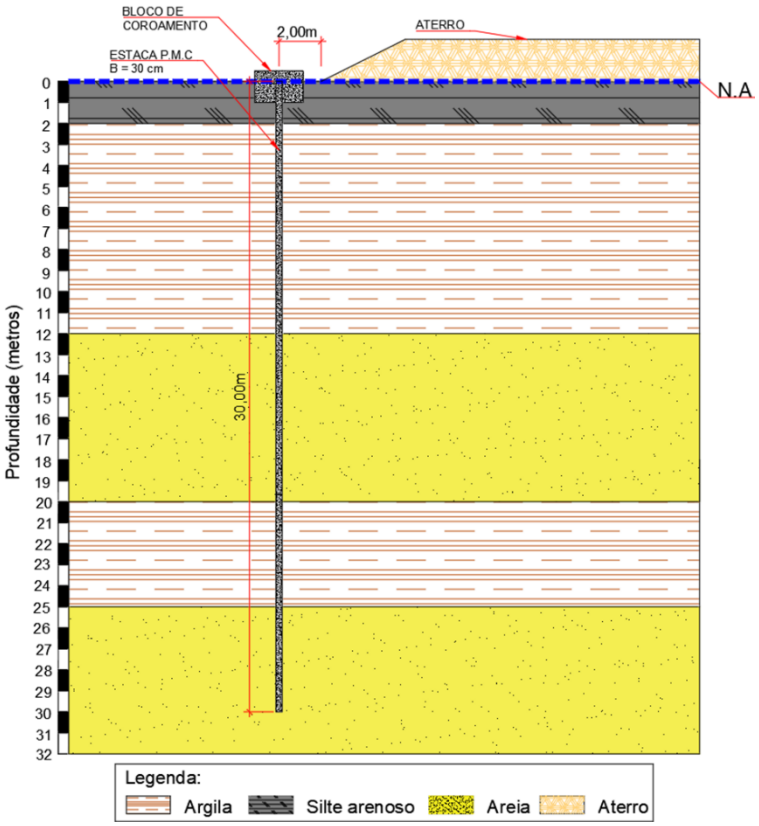


Figura 2. Perfil estratigráfico, estaca e aterro considerados nas análises

Os parâmetros de comportamento geotécnico das camadas argilosas foram obtidos a partir de ensaios de caracterização e adensamento conduzidos pelo Laboratório de Mecânica dos Solos (LMS) do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina (CTJ/UFSC). Adicionalmente, dispôs-se de resultados de ensaios de palheta (Vane Test) realizados nos mesmos locais das amostragens indeformadas.

Para as demais camadas e para os parâmetros não determinados em laboratório, empregaram-se correlações estabelecidas com base nos resultados dos ensaios CPTu, complementadas por valores de referência da literatura. Adotaram-se as formulações propostas por Teixeira e Godoy (1996), Meyerhof (1976) e Robertson e Cabal (2010, 2022). Os parâmetros utilizados nas análises são apresentados na Tabela 1.

A estaca analisada é do tipo pré-moldada de concreto protendido, com seção transversal quadrada de 0,30 m de aresta e comprimento de 30 m, assentada na camada de areia mais profunda do perfil. Seus parâmetros estruturais foram definidos conforme as normas NBR 6118 (ABNT, 2023) e NBR 16258 (ABNT, 2014), resultando em força cortante resistente de 127,23 kN. Com base em catálogos técnicos, estabeleceu-se a carga vertical máxima admissível de 320 kN e o momento fletor limite de 44 kN.m. Adotou-se ainda o limite de 25 mm para deslocamentos horizontais em condições de serviço (PCI, 2021).

Tabela 1. Parâmetros de comportamento para os materiais de interesse.

Parâmetros	Camadas				
	Silte arenoso	Argila superior	Areia superior	Argila inferior	Areia inferior
Peso específico natural – γ_{nat} (kN/m³)	17,34	15,56	18,83	16,00	19,00
Ângulo de atrito – φ (°)	28,45	26,00	35,25	26,00	35,00
Coesão - c' (kPa)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Resistência não drenada - S_u (kPa)	0,00	13,30	0,00	14	0,00
Coeficiente de Poisson - ν	0,30	0,50	0,40	0,50	0,40
Módulo de elasticidade do solo - E_s (MPa)	15,85	2,31	18,78	2,80	19,50
Parâmetro M	-	1,026	-	1,026	-
Kappa - κ	-	0,04	-	0,04	-
Lambda - λ	-	0,29	-	0,29	-
Índice de vazios - e	-	1,961	-	1,961	-

Para estimativa das pressões horizontais, deslocamentos e momentos fletores, empregou-se a formulação analítica de Tschebotarioff (1962). De forma complementar, foram desenvolvidos modelos no software Ftool, onde a estaca foi discretizada com a inclusão de molas a cada metro. O coeficiente de rigidez (Km) de cada mola foi calculado a partir do módulo de reação de cada camada, de forma a representar a reação horizontal do solo. As condições de contorno consideraram o topo da estaca engastado, simulando o bloco de coroamento, e a base rotulada no limite inferior da camada compressível, com apoio na camada de areia subjacente. Foram atribuídos à estaca suas propriedades dimensionais e estruturais conforme já descrito, e aplicadas as pressões horizontais calculadas, obtendo-se os diagramas de momento fletor e deslocamentos ao longo do fuste.

As simulações numéricas foram realizadas no software RS2 (Rocscience) que utiliza o Método dos Elementos Finitos (MEF), incorporando a geometria do problema, os parâmetros do solo e da estaca, a posição do lençol freático, o carregamento aplicado à estaca pela superestrutura, as condições de contorno e a discretização da malha. Para as camadas arenosas adotou-se comportamento elástico e critério de ruptura de Mohr-Coulomb, enquanto para as camadas argilosas empregou-se o modelo Cam-Clay modificado. A malha foi discretizada com elementos tetraédricos de quatro nós, com densidade variável conforme a complexidade geométrica de cada região.

A análise foi estruturada em doze etapas sequenciais que incluem a instalação da estaca submetida a sua carga vertical máxima admissível (320 kN) no dia 1, a execução do aterro no dia 2, e os efeitos da execução do aterro após 4, 8, 12, 16, 20, 24, 60, 120 e 240 meses. Essa segmentação permite avaliar a dissipação das poropressões ao longo do tempo e a redistribuição gradual dos esforços e deslocamentos na estaca com o adensamento.

4 RESULTADOS

Inicialmente, avaliou-se o comportamento da estaca por meio da formulação analítica de Tschebotarioff (1962). A Tabela 2 apresenta os principais resultados obtidos para as pressões horizontais, momentos fletores e deslocamentos.

Tabela 2. Resumo dos resultados obtidos – Método de Tschebotarioff

Carregamento horizontal - ρ_h (kN/m) – Argila superior	9,60
Carregamento horizontal - ρ_h (kN/m) – Argila inferior	12,00
$M_{máx}$ (kN.m) - Método	67,81
$M_{máx}$ (kN.m) - Ftool	39,20
Deslocamento máximo na estaca (mm) – Via Ftool	21,00

Observa-se que os momentos fletores obtidos no Ftool (39,20 kN.m) ficaram abaixo do limite suportado pela estaca, de 44 kN.m, e os deslocamentos (21 mm) abaixo de 25 mm, indicando operação em regime de

serviço. Contudo, as formulações diretas de Tschebotarioff resultaram em 67,81 kN.m, superando a capacidade resistente e indicando potencial ruptura.

Assim, os resultados obtidos pelo método de Tschebotarioff apresentam comportamentos distintos a depender da forma de análise, em função das limitações da formulação. O método não considera a profundidade real das camadas, a presença de camadas intermediárias com diferentes propriedades e a dissipação progressiva do excesso de poropressão ao longo do tempo, fornecendo apenas uma condição final após o adensamento completo. Essas simplificações podem não representar adequadamente a complexidade do fenômeno real, justificando as divergências observadas entre as diferentes abordagens de cálculo.

Diante dessas limitações, prosseguiu-se com a modelagem numérica. A Tabela 3 apresenta a progressão dos valores de pressão horizontal através de seis dos doze estágios simulados, enquanto a Figura 3, Figura 4 e Figura 5 apresentam a evolução dos momentos fletores, forças cortantes e deslocamentos ao longo do fuste, respectivamente.

Tabela 3. Resumo dos carregamentos horizontais gerados

Estágio	Tempo	ρ_h (kN/m) – Argila superior	ρ_h (kN/m) – Argila inferior
3	0,07 meses	6,03	1,13
6	12 meses	32,39	1,09
9	24 meses	37,77	1,08
10	60 meses	49,91	1,07
11	120 meses	58,08	1,07
12	240 meses	60,73	1,07

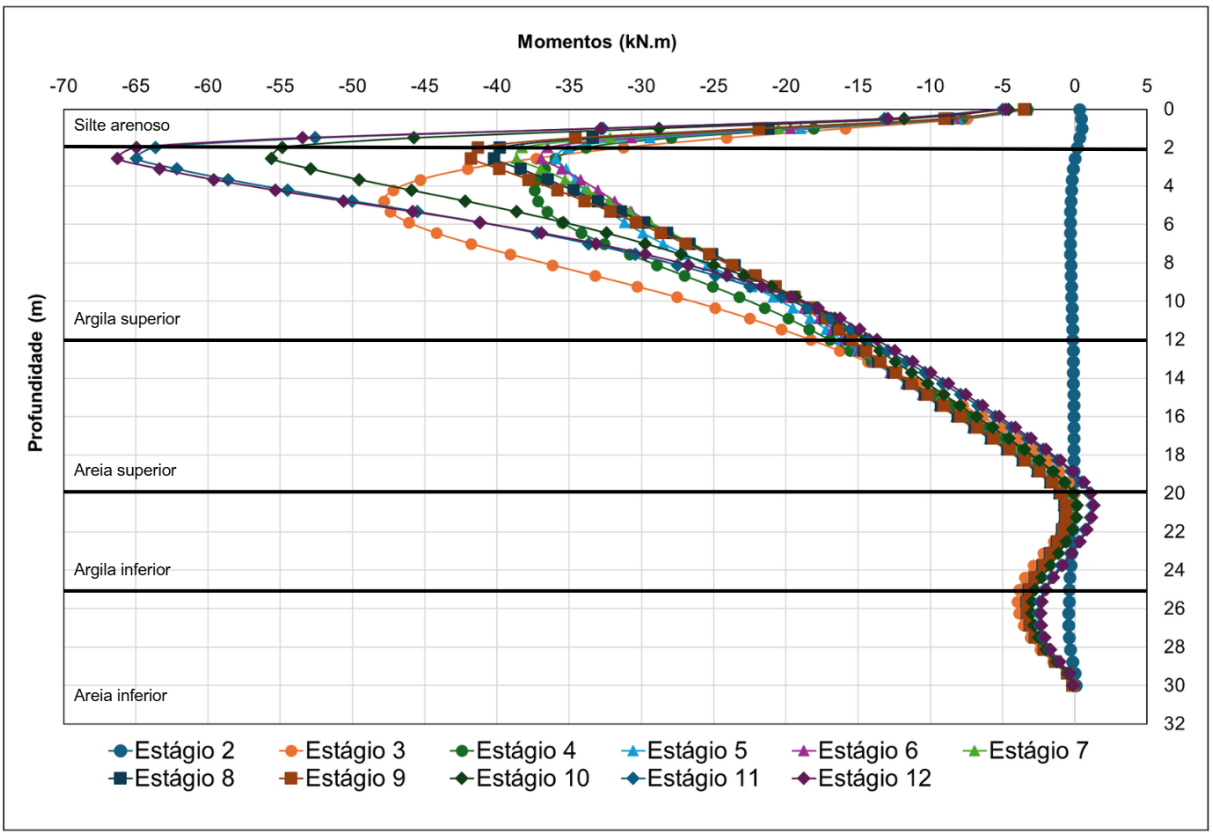


Figura 3. Momentos fletores – Método numérico

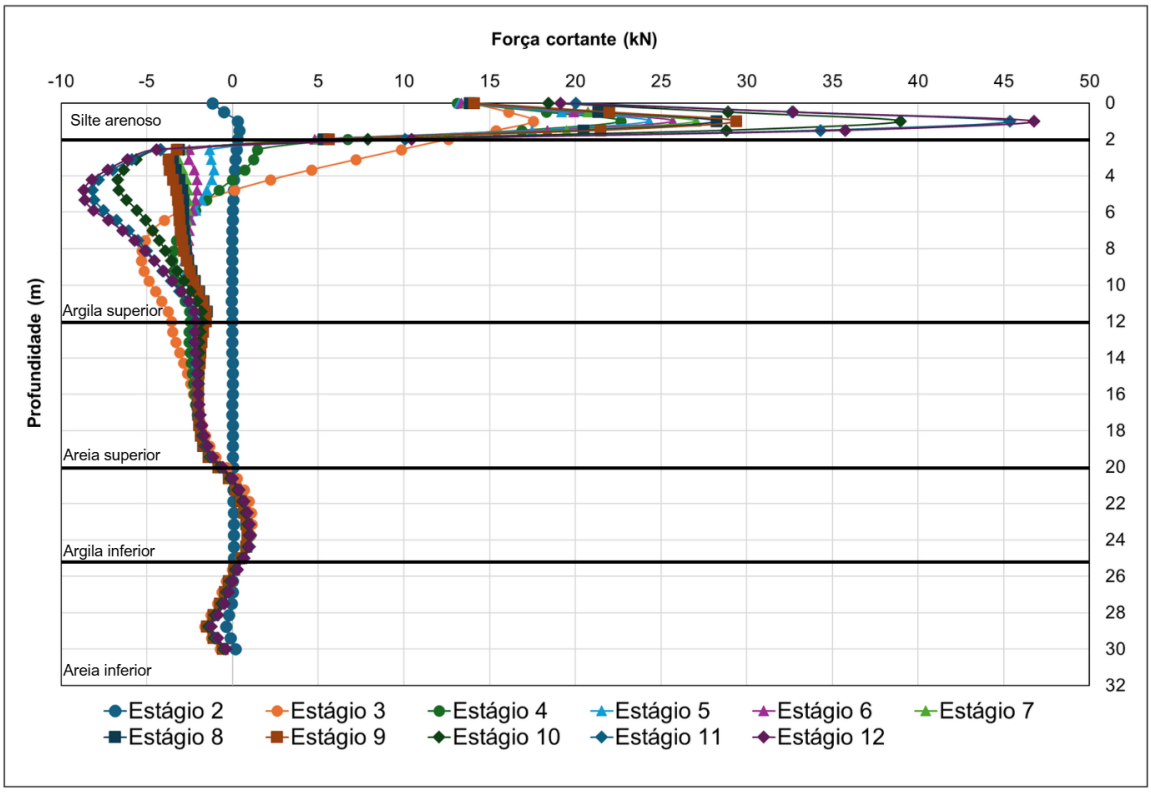


Figura 4. Força cortante – Método numérico.

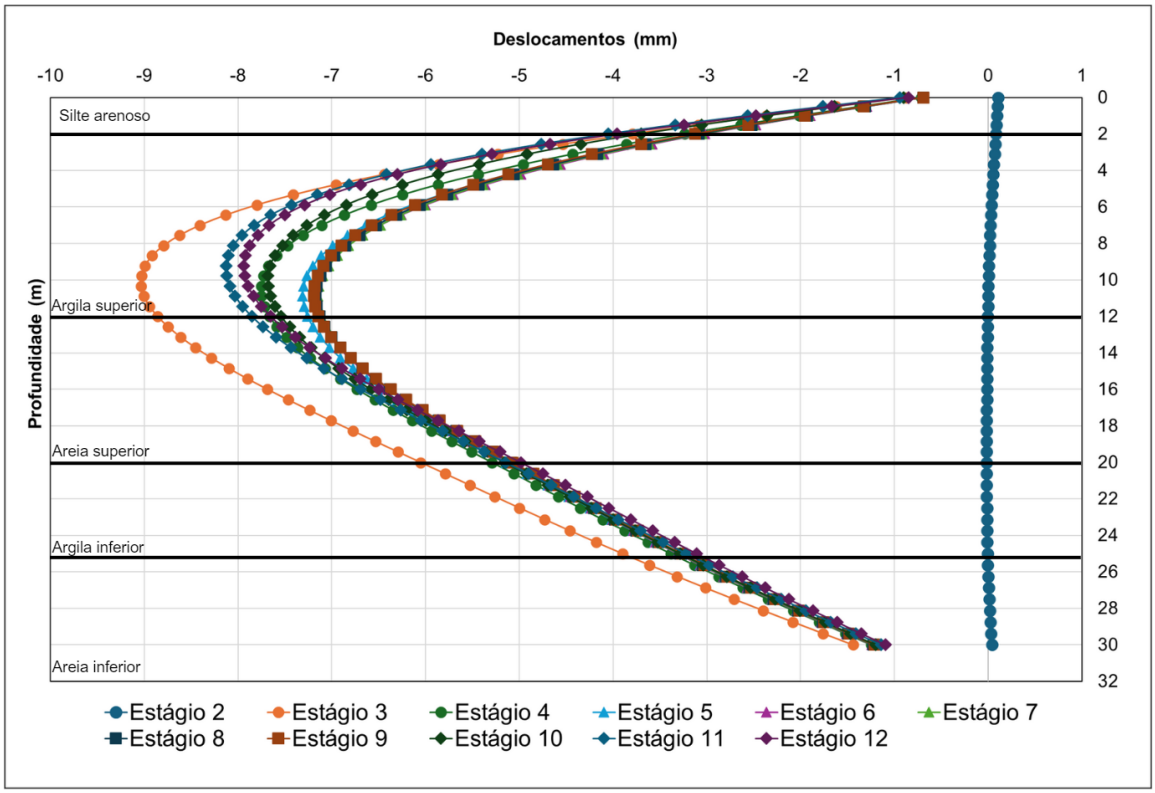


Figura 5. Deslocamentos – Método numérico.

A fim de compreender o diferente comportamento dos esforços ao longo do tempo, a Figura 6 apresenta a dissipação do excesso de poropressão nas camadas argilosas para os estágios analisados.

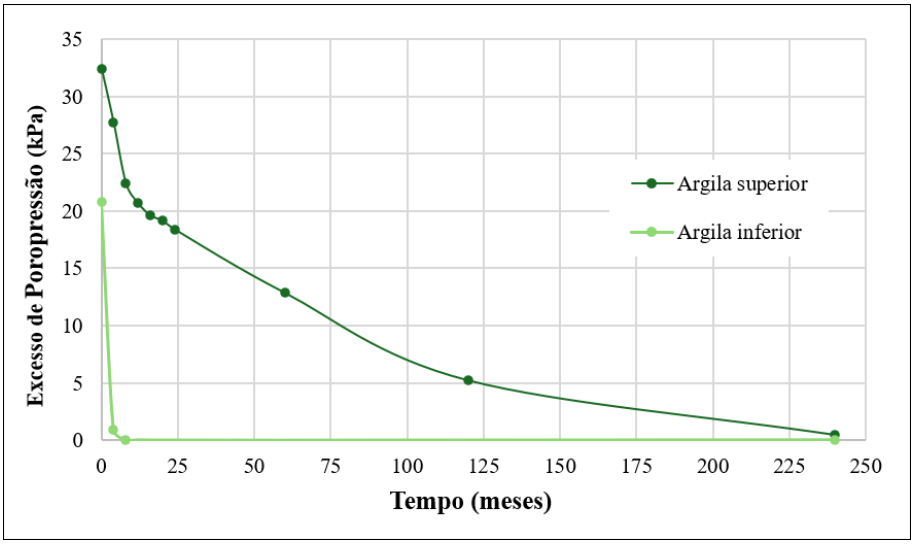


Figura 6. Dissipação do excesso de poropressão ao longo do tempo

Observa-se que as pressões horizontais atuantes na estaca aumentam progressivamente à medida que o excesso de poropressão gerado pela sobrecarga é dissipado nas camadas argilosas, acompanhando o processo de adensamento. Imediatamente após a execução do aterro, a carga é transferida integralmente para a água, conforme preconiza a teoria de Terzaghi, gerando excesso de poropressões que dão origem às tensões horizontais nesse instante, e que atingem valor máximo de 6,03 kN. Após vinte anos ainda são observados valores residuais de excesso de poropressão na camada superior de argila. Na camada inferior, a dissipação ocorre de forma mais rápida, concluindo-se em aproximadamente oito meses, o que evidencia a menor influência da sobrecarga superficial nessa região. Esse comportamento decorre da presença da camada de areia sobrejacente, relativamente espessa, que atenua a transmissão das tensões para camadas mais profundas e acelera a dissipação das poropressões, justificando a manutenção de pressões horizontais praticamente constantes e de baixa magnitude desde a execução do aterro.

Em relação aos momentos fletores, a camada superior de argila apresentou variações significativas ao longo do tempo. No momento da aplicação do aterro, os valores situaram-se em torno de 49 kN.m, reduzindo-se para aproximadamente 39 kN.m após oito meses, em função da compensação inicial entre a poropressão gerada no lado oposto e as deformações do solo. Com o progresso do adensamento, os momentos voltaram a se elevar, atingindo cerca de 66 kN.m ao final do período analisado, superando o limite de 44 kN.m e indicando condição de ruptura desde o início da obra. Na camada inferior, os momentos mantiveram-se estáveis e com valores reduzidos, da ordem de 2 kN.m, confirmando sua participação limitada nos esforços totais.

Os esforços cortantes concentraram-se predominantemente nas camadas de silte arenoso e argila superior. No silte, tais esforços estão associados à reação provocada pelo engastamento da estaca no bloco de coroamento. Na argila superior relacionam-se às deformações laterais decorrentes do adensamento. Os valores máximos observados foram de aproximadamente 47 kN, situando-se abaixo dos limites estabelecidos pelos critérios de projeto, não representando risco estrutural. Na camada inferior, os esforços cortantes foram praticamente nulos.

Os deslocamentos horizontais máximos ocorreram na região central da camada de argila superior, alcançando cerca de 9 mm, valor inferior ao limite de 25 mm recomendado. A evolução dos deslocamentos acompanhou a tendência observada para os momentos fletores, com redução inicial seguida de novo acréscimo após a consolidação das deformações por adensamento.

Assim, observa-se a camada superior é responsável pelos principais esforços e, embora os valores de cortante e deslocamento permaneçam dentro de faixas aceitáveis, os momentos fletores superam a capacidade resistente do elemento em grande parte dos estágios analisados, caracterizando situação de ruptura estrutural.

5 CONCLUSÃO

A análise comparativa entre os métodos analítico e numérico evidenciou as limitações da formulação de Tschebotarioff, que não considera a profundidade das camadas, a presença de camadas intermediárias e a

dissipação progressiva das poropressões, resultando em superestimativa das pressões horizontais na camada inferior de argila. Os momentos fletores obtidos no Ftool diferiram dos calculados diretamente pelas formulações analíticas, evidenciando incertezas do método. Contudo, o momento obtido analiticamente aproximou-se do valor oriundo da simulação numérica ao final do adensamento, indicando que o método pode estimar razoavelmente a condição de longo prazo, mas não a evolução temporal dos esforços.

As simulações numéricas, baseadas no MEF com modelo Cam-Clay modificado, permitiram descrever a evolução temporal do adensamento e a dissipação das poropressões. Os resultados mostraram que a camada superior de argila é a mais crítica, com momentos fletores que superam a capacidade resistente da estaca desde a aplicação do aterro, caracterizando ruptura estrutural já nos primeiros estágios. A camada inferior apresentou esforços reduzidos devido à atenuação promovida pela camada de areia sobrejacente, confirmando que a sobrecarga superficial tem influência limitada em profundidade.

Conclui-se, assim, que a execução do aterro compromete a integridade da estaca vizinha. Reforça-se também as limitações dos métodos analíticos simplificados, com resultados bastante divergentes e maior grau de incerteza. A modelagem geomecânica por elementos finitos se mostra uma ferramenta indispensável para avaliações confiáveis da interação solo-estrutura em solos moles sob carregamentos assimétricos. Destaca-se, ainda, que os valores de esforços e deslocamentos obtidos são frutos dos parâmetros adotados para o solo e podem variar com a alteração destes, ressaltando a importância dos parâmetros de entrada para a confiabilidade dos resultados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2023). NBR 6118. *Projeto de estruturas de concreto*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2014). NBR 16258. *Estacas pré-fabricadas de concreto - Requisitos*. Rio de Janeiro.

Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (2014). *Geologia e recursos minerais do estado de Santa Catarina. Serviço Geológico do Brasil.* Porto Alegre.

Meyerholf GG (1976) Bearing capacity and settlement of pile foundations, *J. Geotech. Eng.* v.102, p.197-228.

Palmeira EM; Ortigão, A (2004) Manual brasileiro de geossintéticos. In: Vertematti, J, C. (coord.) – Blucher, São Paulo, p.72-83.

Prestresses Concrete Piling (2021) Recommend practice for design, manufacture, and installation of prestressed concrete piling, *PCI Journal.*

Robertson, P.K. (1990) Soil classification using the cone penetration test. Can.Geotech. J., 27(1):151–158.

Robertson, P,K; Cabal, K,L. (2010) Estimating soil unit weight from CPT. In: 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, USA.

Robertson, P,K; Cabal, K,L. (2022) *Guide to Cone Penetration Testing,* 7 ed., Gregg Drilling LLC, Signal Hill, CA.

Schnaid, F; Odebrecht, E. (2012) *Ensaios de campo e suas aplicações à engenharia de fundações,* 2 ed., Oficina de Textos, São Paulo.

Teixeira, A.H; Godoy, N.S. (1996) *Análise, projeto e execução de fundações rasas*. In: HACHICH et al (ed.). Fundações: teoria e prática. Pini, p. 227-264.

Tschebotarioff, G, P. (1962) *Retaining structures in foundation engineering*, McGraw-Hill Book, New York.

Velloso, D, A; Lopes, F, R. (2010) *Fundações profundas*, 2 ed., Oficina de Textos, São Paulo.

Verdelli, V, F. (2025) *Modelagem geomecânica de uma estaca sujeita a carregamentos horizontais assimétricos*. Trabalho de Conclusão de Curso, Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura, Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina.