

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/267

## Análise de Fundações em Obra de Arte para suporte ao Efeito Tschebotarioff: caso de obra no Contorno Viário de Florianópolis

André Querelli

Diretor Técnico, M.Sc., **Solotechnique Engenharia e Consultoria Geotecnica**, Jundiaí, Brasil,  
andre.querelli@solotechnique.com.br

Tiago de Jesus Souza

Diretor Técnico, D.Sc., **Solotechnique Engenharia e Consultoria Geotecnica**, Jundiaí, Brasil,  
tiago.souza@solotechnique.com.br

**RESUMO:** O chamado “efeito Tschebotarioff” é conhecido como a ocorrência de esforços horizontais em estacas devido à compressão de solos por ocasião de uma sobrecarga assimétrica. Ele desempenha um papel crucial no projeto de fundações para obras de engenharia e é bastante aplicável em obras de arte especial com presença de solos moles no entorno. Este fenômeno fora particularmente relevante na obra de arte especial chamada “OAE 6”, parte integrante do Contorno de Florianópolis. O artigo investigou o comportamento das estacas em solos moles sob o efeito Tschebotarioff, empregando abordagens analíticas e numéricas. Inicialmente, parâmetros geotécnicos foram avaliados e modelos constitutivos foram estabelecidos. Utilizando um modelo analítico clássico de Tschebotarioff, os momentos máximos foram estimados em duas geometrias distintas. Posteriormente, o software Plaxis 2D foi utilizado para uma análise numérica mais detalhada. Os resultados destacaram diferenças significativas entre as abordagens analítica e numérica, ressaltando a complexidade do fenômeno e a sensibilidade aos parâmetros utilizados. Embora o método analítico forneça uma estimativa inicial, a análise numérica oferece uma representação mais realista do comportamento das estacas. No entanto, as discrepâncias entre os resultados destacam a importância de considerar cuidadosamente os parâmetros geotécnicos e estruturais. Em resumo, a berma estendida resultou em reduções de 17% no deslocamento horizontal, 18% no momento e 13% no esforço cortante. A disparidade entre os métodos analíticos e numéricos foi de 42%. O estudo demonstrou a relevância da avaliação de diferentes métodos de cálculo e a sensibilidade das estacas em solos moles.

**PALAVRAS-CHAVE:** Efeito Tschebotarioff, estacas de fundação, solos moles compressíveis, obra de arte especial, Contorno viário de Florianópolis.

**ABSTRACT:** The Tschebotarioff effect is known as the occurrence of horizontal forces in piles due to soil compression under asymmetric loading. It plays a crucial role in foundation design for engineering works and is highly applicable in bridges foundation with soft soils in the surroundings. This phenomenon was particularly relevant in the special structure called "OAE 6", which is part of the Contorno de Florianópolis. The article investigated the behavior of piles in soft soils under the Tschebotarioff effect, employing analytical and numerical approaches. Initially, geotechnical parameters were evaluated, and constitutive models were established. Using a classical analytical Tschebotarioff model, maximum moments were estimated for two distinct geometries. Subsequently, the 2D Plaxis software was used for a more detailed numerical analysis. The results highlighted significant differences between the analytical and numerical approaches, emphasizing the complexity of the phenomenon and sensitivity to the parameters used. Although the analytical method provides an initial estimate, the numerical analysis offers a more realistic representation of pile behavior. However, the discrepancies between the results underscore the importance of carefully considering geotechnical and structural parameters. In summary, the extended berm resulted in reductions of 17% in horizontal displacement, 18% in moment, and 13% in shear force. The disparity between analytical and numerical methods was 42%. The study demonstrated the relevance of evaluating different calculation methods and the sensitivity of piles in soft soils.

**KEYWORDS:** Tschebotarioff Effect, foundation piles, compressible soft soils, bridge structure, Florianópolis Bypass.

## 1 INTRODUÇÃO

A aplicação de uma sobrecarga carga unilateral e assimétrica sobre o solo de fundação ocasionará tensões e deslocamentos tanto verticais quanto horizontais dentro do maciço de solo. No caso de haver estacas nas proximidades desse carregamento, estas funcionarão como obstáculos à deformação do solo, e consequentemente, estarão sujeitas aos esforços gerados por essa restrição (MARCELINO, 2022).

Os esforços transversais podem ocorrer mesmo quando os fatores de segurança contra a ruptura da camada compressível são considerados satisfatórios (ALONSO, 2019). Quando o fator de segurança é baixo, o impacto nas estacas é significativo em termos de magnitude (DANZIGER; LOPES, 2021). É importante ressaltar que esse fator de segurança se relaciona com as superfícies que interagem com o sistema de estacas.

DANZIGER e LOPES (2021) ressaltam os principais fatores que influenciam na sollicitação lateral de estacas:

- Magnitude da sobrecarga assimétrica;
- Propriedades da camada compressível, fator de segurança do aterro contra a ruptura global;
- Posição relativa entre a sobrecarga assimétrica e a estaca, rigidez e geometria do sistema de estacas;
- Tempo decorrido desde a instalação das estacas.

O presente estudo aborda a análise dos esforços de flexão e cisalhamento que podem surgir em uma estaca devido à sobrecargas assimétricas sobre o terreno, como no caso específico em estudo, onde há um aterro do encontro da Obra de Arte Especial (OAE). Essa condição resulta na geração de um empuxo horizontal atuando no fuste da estaca, provocando sua flexão e cisalhamento máximos à certa profundidade. Dessa forma, considerando que o solo na região avaliada apresenta características compressíveis (argila muito mole), é possível que o empuxo decorrente dessa sobrecarga (aterro) conduza a fundação a deslocamentos e até mesmo à sua ruptura estrutural. Esse fenômeno é amplamente reconhecido na literatura geotécnica como o "Efeito Tschebotarioff".

O estudo de caso em questão corresponde a uma obra de arte especial localizada no contorno de Florianópolis, estado de Santa Catarina. O estudo tem como objetivo avaliar as fundações em solos moles sob a ocorrência do efeito Tschebotarioff, utilizando a abordagem analítica pelo método de Tschebotarioff (1973) e numérica através do método dos elementos finitos.

## 2 Materiais e Métodos

### 2.1 Contextualização do Caso em estudo

A obra de arte especial em estudo está localizada no Contorno de Florianópolis, no trevo com a BR-101. Sua extensão total de aproximadamente 530 metros e o projeto em andamento incluem vigas pré-moldadas, com 16 vãos, dois encontros e 15 apoios centrais. A largura do tabuleiro é de 22,97 metros.

A geometria original indica que a região do encontro 1 e dos apoios 1 a 3 estarão situados em uma espécie de "vale" entre aterros dos ramos de acesso 3000 e 4000, laterais às fundações. Isso implica em que as fundações do encontro 1 e dos apoios 1 a 3 serão afetadas por deslocamentos horizontais do solo mole, conhecidos como efeito Tschebotarioff (Figura 1).

Se houvesse homogeneidade no subsolo local e ambos os aterros fossem construídos simultaneamente, poderia ocorrer uma compensação de efeitos, resultando em uma redução parcial dos deslocamentos horizontais induzidos. No entanto, dado que não é possível garantir essa situação, especialmente em relação à homogeneidade do subsolo, assume-se que as fundações do encontro 1 até o apoio 3 são suscetíveis ao efeito Tschebotarioff. Na Figura 1, é apresentada a planta baixa da geometria do projeto original.

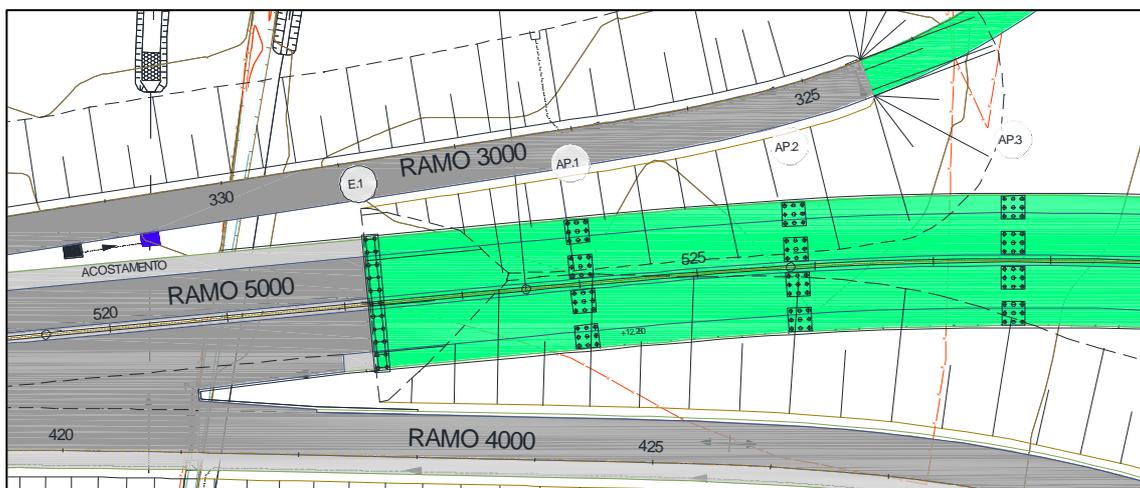


Figura 1. Implantação da obra de arte.

### 2.1.1 Avaliação do Subsolo e Parâmetros Geotécnicos de análise

Na área avaliada foram conduzidas três sondagens mistas, denominadas SM 8012, SM 8013 e SM 8014. Na primeira sondagem, a SM 8012, verificou-se que a camada inicial consistia em areia fina a média argilosa, com uma profundidade de 3,60 metros e um Nspt (índice de resistência à penetração) de 1/59. Logo após, encontrava-se uma camada de argila siltosa mole a mole, com tonalidade cinza escuro, que se estendia até 13,00 metros de profundidade. Seguindo adiante, a sondagem revelou uma camada de areia média muito grossa, com coloração acinzentada, até a profundidade de 21,00 metros. Entre 27,10 metros e 29,30 metros, identificou-se uma camada de silte arenoso mole a duro, com um Nspt de 9. Entre 27,10 metros e 29,30 metros, observou-se uma camada de rocha pouco alterada com fragmentos angulares de Riolito, com recuperação de 12% e R.Q.D 0,0%. Mais adiante, a sondagem revelou uma camada rochosa de Riolito, Quartzo alterado, terminando com milonito fragmentado pouco alterado na faixa de 31,30 metros a 31,70 metros. O nível de água (NA) foi encontrado a 1 metro de profundidade.

Na segunda sondagem, a SM 8013, constatou-se uma camada inicial de argila arenosa muito mole, com uma profundidade de 5,35 metros e tonalidade cinza escuro. Posteriormente, entre 16,00 metros e 21,20 metros, observou-se uma camada de areia fina a média muito compacta. Mais adiante, encontrou-se uma camada de argila pouco arenosa com baixo Nspt. Nas camadas de 24,00 metros a 26,00 metros, identificou-se rocha sã fragmentada, e entre 26,00 metros a 30,13 metros, fragmentos de Riolito alterando entre rocha sã e fragmentada com R.Q.D = 7% e recuperação = 32%. Por fim, identificou-se Riolito com grau de alteração variável de sã a fragmentada. O nível de água encontrado foi de 0,51 metros.

Na terceira sondagem, a SM 8014, notou-se uma camada inicial até 18,00 metros alternando entre argila siltosa e areia fina pouco argilosa. Entre 18,00 metros e 22,00 metros, encontrou-se areia grossa com cascalho muito compacto cinza. Nas camadas de 22,00 metros a 30,10 metros, observou-se alternância entre fragmentos de rocha sã e fragmentada, com recuperação variando entre 8% a 13%, e finalizando até o limite de parada de sondagem com profundidade de 33,65 metros com camada de Riolito fragmentado a rocha sã, com recuperação entre 28% a 33%. O R.Q.D foi de 0% para todas as manobras realizadas. O nível de água encontrado foi de 1,06 metros. A Tabela 1 traz um compilado de parâmetros geotécnicos adotados nos modelos e cálculos realizados para a fundação em questão. O coeficiente de Poison foi adotado com base na proposta de Teixeira e Godoy (1996) apud Cintra, Aoki e Albiero (2011).

Tabela 1. Parâmetros Geotécnicos.

Material	Argila mole	Argila mole com drenos
Cor		
$e_0$ , índice de vazios inicial	1,8	1,8
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ), peso específico do solo	14	14
OCR, razão de consolidação	1,5	1,5

Material	Argila mole	Argila mole com drenos
Cc, índice de compressão	0,93	0,93
Cr, índice de recompressão	0,093	0,093
$\nu$ , coeficiente de Poisson	0,35	0,35
$\phi'$ (°), ângulo de atrito efetivo	-	-
$c'$ (kPa), coesão efetiva	6	6
k (m/dia), coeficiente de permeabilidade	1,3E-4	1,3E-2
Ky/kx razão entre a permeabilidade vertical (Ky) e a permeabilidade horizontal (Kx)	0,7	0,7

### 2.3. Análise Analítica

Para fornecer uma estimativa inicial e referência para a análise numérica, foi realizado o cálculo por um modelo analítico baseado na concepção clássica de Tschebotarioff (1973). Devido às incertezas relacionadas à estrutura da ponte/viaduto e ao momento de sua execução, adotou-se a hipótese de estaca rotulada junto ao bloco. O método segue a seguinte premissa:  $P_h = 2BK\gamma H$ . Onde B refere-se a largura da estaca,  $\gamma H$  corresponde a tensão vertical correspondente a um aterro vizinho de altura H e K ao coeficiente de empuxo.

### 2.4. Análise Numérica

Para a análise numérica do comportamento das estacas pré-moldadas em solos moles, foi utilizado o *software* Plaxis (versão 20). O modelo adotado para os materiais de argila mole e argila mole com drenos foi o modelo *soft soil* disponível na ferramenta computacional. Esse modelo oferece características como rigidez variável com o estado de tensões, distinção entre adensamento na reta virgem ou descarregamento e recarregamento abaixo da tensão de pré-adensamento, memória da tensão de pré-adensamento e critério de plastificação baseado no critério de Mohr-Coulomb. Já para os demais materiais, foi empregado o modelo linear elástico perfeitamente plástico, também com critério de plastificação baseado em Mohr-Coulomb. Quanto ao projeto dos aterros, previu-se o uso de geogrelhas para garantir a condição de estabilidade.

No entanto, para a análise em questão, que visa definir os esforços induzidos pelo efeito Tschebotarioff nas estacas de fundação, optou-se por modelar a última porção do aterro como material elástico. Essa abordagem possibilita a contemplação dos esforços induzidos por essa porção do aterro sem comprometer a estabilidade ou exigir a modelagem conjunta da geogrelha. A análise da malha foi conduzida de forma que os valores na aba de malha excedem 0,60, indicando que a qualidade da malha é adequada. Os parâmetros utilizados na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros Geotécnicos adotados nos modelos constitutivos.

Material	Cor	$e_0$	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Efetivo (kPa)	$\nu$	$\phi'$ (°)	$c'$ (kPa)	k (m/dia)	Ky/kx
Areia fofa		0,8	16	5.000	0,3	25	0	8,640	1,0
Areia média		0,8	16	21.000	0,3	25	0	8,64	1,0
Areia compacta		0,7	18	70.000	0,3	35	0	8,640	1,0
Areia muito compacta		0,6	19	150.000	0,3	35	10	0,864	1,0
Argila média		0,7	18	15.000	0,3	25	5	0,0864	1,0
Aterro compactado		0,7	18	15.000	0,3	25	10	0,0864	1,0
Aterro elástico		0,7	18	15.000	0,3	-	-	0,0864	1,0

Foi usado o modelo chamado de "*embedded beam*" para permitir a análise do Efeito Tschebotarioff, que é intrinsecamente tridimensional, usando modelos bidimensionais. Esta formulação cria uma malha de elementos para o solo que difere da malha da estaca. As molas, cuidadosamente calibradas para aproximar uma simulação tridimensional, conectam essas malhas entre si. Esse modelo permite um deslocamento

diferenciado entre a estaca e o solo, o que é uma grande vantagem em relação à simulação clássica de elementos de placa embutidos no solo. Isso o torna ideal para aproximar-se de resultados tridimensionais usando modelos bidimensionais.

No modelo *embedded beam* do Plaxis, que faz o uso do modelo linear elástico, é possível considerar diretamente as características da estaca, que são utilizadas para definir a rigidez da estaca e das molas responsáveis por sua interação com o solo. Os parâmetros adotados são resumidos na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros das Estacas.

Material	Cor	E (kPa)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Diâmetro (m)	Espaçamento (m)
Estaca Escavada de Grande Diâmetro $\phi$ 200cm		23,5 E6	23	2,0	6,0

As tensões iniciais no solo foram obtidas na etapa inicial, considerando a geometria atual do terreno e adotando coeficientes de empuxo ( $K_0$ ). O primeiro nível de aterro foi realizado ao longo de um intervalo de 30 dias durante a etapa de Aterro 1, durante a qual ocorreu uma consolidação do solo mole. Os elementos das estacas, modelados como *embedded beams*, foram ativados na etapa de Estacas.

O segundo nível de aterro foi executado ao longo de 30 dias na etapa de Aterro 2, resultando em um adensamento adicional do solo mole. O sobre aterro foi realizado em um intervalo de 30 dias durante a etapa de Aterro 3, também implicando em adensamento do solo mole. Na etapa de Consolidação, o modelo foi evoluído pelo programa até a dissipação dos excessos de poro-pressão, representando a situação de longo prazo com o término do adensamento.

Essas etapas simulam o processo executivo esperado, considerando o momento de execução das estacas em relação às fases de aterro.

O dimensionamento estrutural das estacas foi considerado até o término do modelo após a consolidação do solo mole, pois representa a situação na qual os deslocamentos alcançam valores máximos e estáveis, induzindo os maiores esforços na fundação. A geometria do modelo numérico pode ser visualizada na Figura 2. Foram consideradas duas condições: (a) geometria 1 e (b) geometria 2: berma estendida.

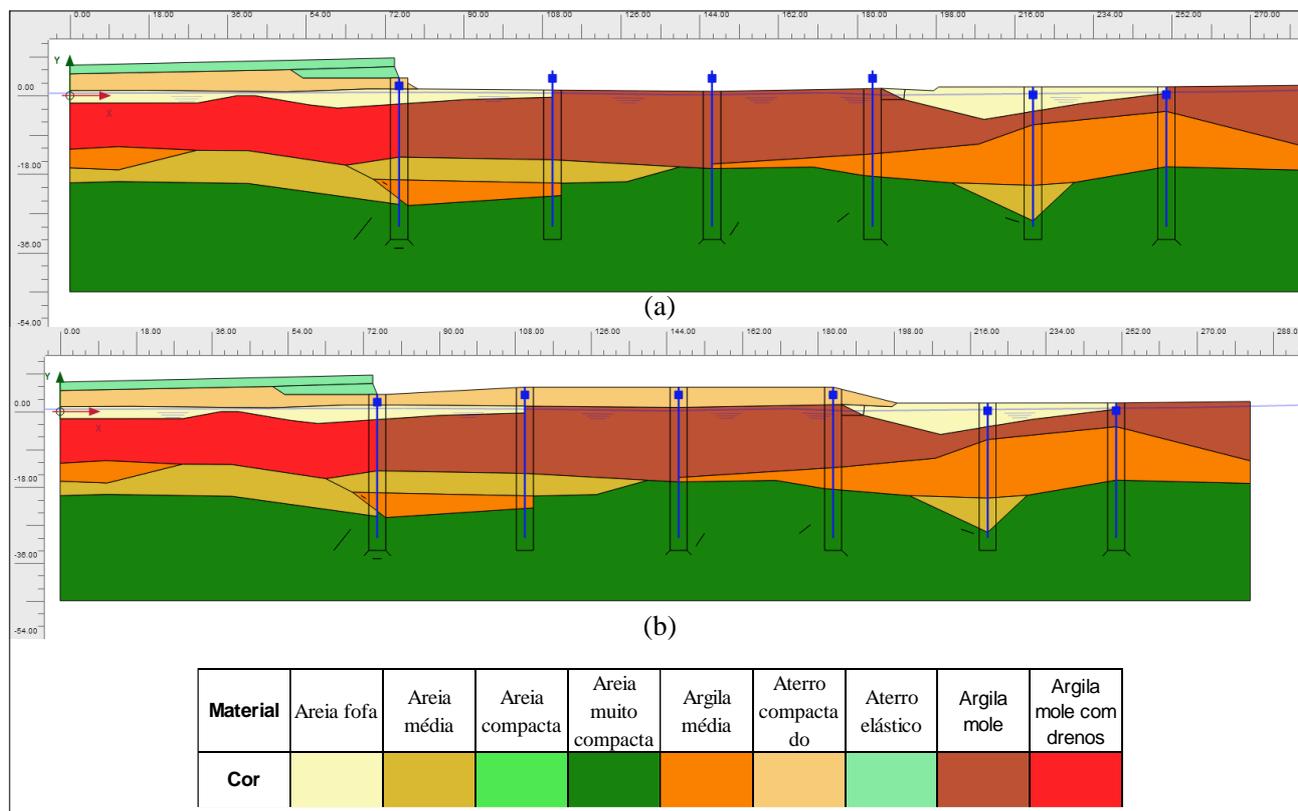


Figura 2. Modelo Numérico e discretização de camadas de solo.

### 3 RESULTADOS

Em relação ao modelo analítico, na vertical da estaca (crista do aterro), o carregamento simétrico é triangular. Portanto, adotou-se uma sobrecarga de 203,90 kN/m para a geometria 1 e de 117,50 kN/m para a geometria 2 (com a berma estendida). Com base nisso, o momento máximo calculado de forma analítica para a geometria 1, utilizando as premissas do método de Tschebatorioff, foi de 3374,7 kN/m, enquanto para a geometria 2 foi de 1944,7 kN/m. Houve uma redução de 42% no momento máximo com a extensão da berma (Geometria 2). Esses resultados podem ser observados na Figura 3.

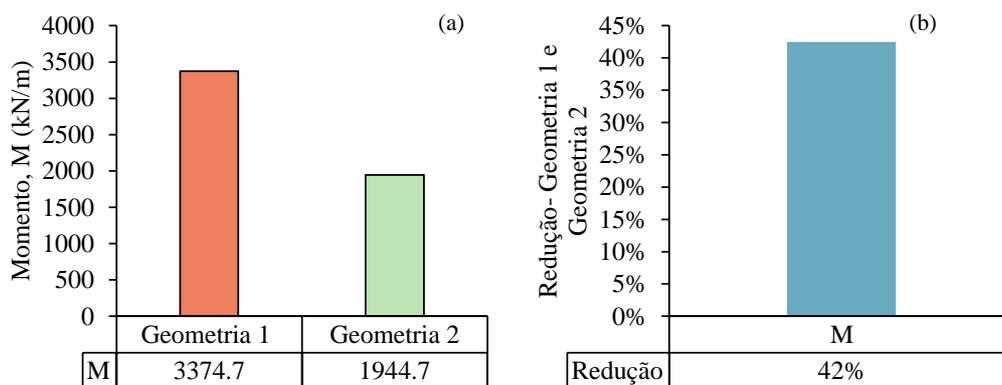


Figura 4. Resultados do modelo analítico: (a) momentos, (b) redução do momento entre a Geometria 1 e 2.

Os resultados da análise numérica são apresentados na Figura 4. Esses resultados foram obtidos ao final da etapa de consolidação, representando uma situação em que todo o excesso de poro-pressão foi dissipado e os recalques se estabilizaram. Em termos de deslocamentos horizontais, a geometria 1 gerou um deslocamento horizontal de 0,2966 m, enquanto a geometria 2 apresentou 0,2473 m. Com a extensão da berma, observou-se uma redução de aproximadamente 16% nos valores de deslocamento horizontal. No que diz respeito ao momento, foram registrados valores de 1518 kN/m para a geometria 1 e 1249 kN/m para a geometria 2, indicando uma redução de 18% no momento na estaca da extremidade devido ao prolongamento da berma (fortemente influenciada pelo efeito *Tschebotarioff*). Quanto ao esforço cortante, a geometria 1 apresentou um valor de 191,1 kN/m, enquanto a geometria 2 registrou 166,5 kN/m.

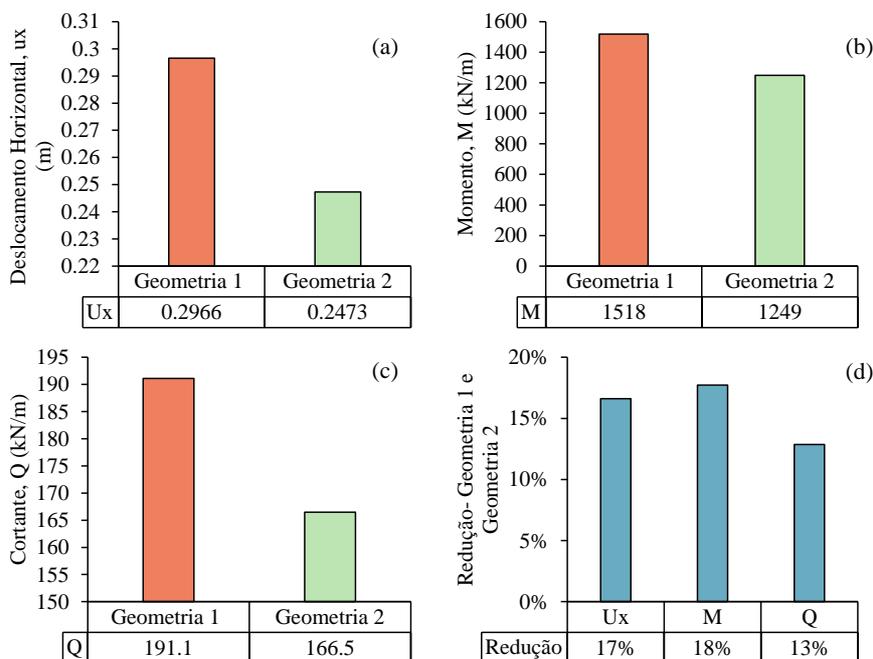


Figura 4. Resultados do modelo numérico: (a) deslocamentos em x, (b) momentos, (c) esforço cortante e (d) redução dos valores com a extensão da berma.

Os esforços provenientes do Plaxis são apresentados sempre divididos por metro, representando um metro de estaqueamento. Para o dimensionamento dos estacões, os esforços serão multiplicados pelo próprio diâmetro do estaqueamento (2 m) e também por um fator de mobilização do passivo, considerado como 2 vezes, assim como foi feito no modelo analítico de Tschebotarioff. Deste modo, os esforços para dimensionamento estrutural, já considerando a berma estendida, são: momento de 4.996 kN.m e cortante de 764,4 kN.

A comparação entre os resultados analíticos e numéricos é apresentada na Figura 5. Observa-se que o método Tschebotarioff (1973) resultou em valores maiores do que os numéricos. A variação entre a Geometria 1 foi de 55,02% e em relação à geometria 2 de 35,77%.

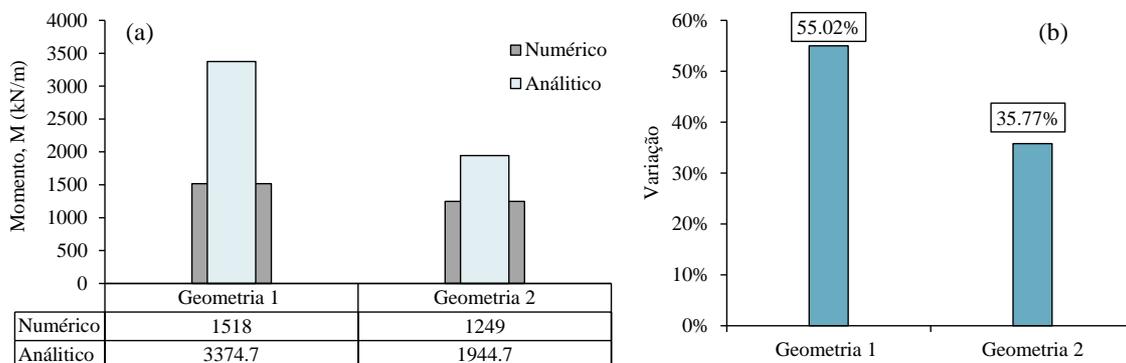


Figura 5. Comparação dos resultados analíticos e numéricos (a) e variação entre os métodos (b).

#### 4 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos da análise analítica e numérica, bem como nos parâmetros geotécnicos adotados e na contextualização do caso em estudo, pode-se chegar às seguintes conclusões consideradas principais:

- Os resultados obtidos pelo método analítico baseado em Tschebotarioff (1973) apresentaram valores mais elevados em comparação com a análise numérica realizada na simulação computacional 2D.
- A variação entre os métodos analítico e numérico foi significativa, com uma diferença de 55,02% para a Geometria 1 e 35,77% para a Geometria 2 (considerada a condição da berma estendida).
- A solução de berma estendida promoveu uma redução do deslocamento horizontal de 17%, nos momentos máximos de 18% e no esforço cortante de 13%.
- Embora os resultados numéricos, em geral, possam fornecer uma representação mais realista do comportamento das estacas, é preciso considerar as limitações e incertezas dos modelos geotécnicos e estruturais usados. É fundamental ter cautela ao fazer afirmações desse tipo, pois a precisão dos resultados depende da adequação dos modelos e parâmetros utilizados.

Os resultados obtidos desta análise, que combinou métodos analíticos e numéricos, fornecem conclusões importantes sobre o comportamento das estacas em solos moles sujeitos ao efeito *Tschebotarioff*. A comparação entre os resultados analíticos e numéricos indica diferenças significativas, destacando a complexidade do fenômeno e a necessidade de abordagens integradas para sua compreensão completa. Enquanto o método analítico fornece uma estimativa inicial e referência útil, a análise numérica no *software* Plaxis 2D oferece uma representação mais realista e detalhada do comportamento das estacas. No entanto, as discrepâncias entre os resultados indicam a importância de considerar cuidadosamente os parâmetros geotécnicos e estruturais, bem como as limitações de cada abordagem. Em particular, a variação nos esforços calculados destaca a sensibilidade do sistema às condições específicas do solo e da carga aplicada. Conclui-se que os resultados fornecem uma base sólida para o dimensionamento estrutural das estacas e destacam a necessidade contínua de pesquisa e desenvolvimento para aprimorar a compreensão e a previsão do comportamento das fundações em solos moles.

## AGRADECIMENTOS

A **Solotechnique** agradece à Arteris pela confiança de todos os anos de construção do Contorno de Florianópolis e pela oportunidade de desenvolvimento de estudos como esse para a obra de arte em questão.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALONSO, U. R. Dimensionamento de Fundações Profundas. 3. ed. [s.l.] Blucher, 2019.

DANZIGER, B. R.; LOPES, F. R. Fundações em Estacas. 1. ed. [s.l.: s.n.].

CINTRA, J. C. A., AOKI, N., ALBIERO, J. H. Fundações diretas: projeto geotécnico. São Paulo: Oficinas de Textos, 2011

MARCELINO, L. E. M. Efeito de Tschebotarioff em estacas: comparação entre dados de instrumentação e resultados de modelagem numérica e de métodos semiempíricos. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2022.

TSCHEBOTARIOFF, G. P. Foundations, retaining and earth structures: the art of design and construction and its scientific basis in soil mechanics. 1973.