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/COBRAMSEG2026.5/18

Análise do Efeito Tchebotarioff em Estacas em Encontros de Ponte

Thamirys Limeira Torres
Engenheira Civil, Universidade de Pernambuco, Recife, Brasil, thamirys.l.torres@gmail.com

Andréa Batista de Farias Dias
Professora Adjunto, Universidade de Pernambuco, Recife, Brasil, abfd1@poli.br

Airton Ruan Alexandre da Silva
Engenheiro Civil, Universidade de Pernambuco, Olinda, Brasil, ruanaintonabc@gmail.com

João Batista Pereira Alves de Almeida
Engenheiro Civil, Universidade de Pernambuco, Recife, Brasil, jbatistapaa2@gmail.com

Pedro Eugênio Silva de Oliveira
Professor Adjunto, Universidade de Pernambuco, Recife, Brasil, pedro.oliveira@poli.br

RESUMO: O Efeito Tchebotarioff é caracterizado pelo empuxo adicional gerado pelo deslocamento lateral de aterros sobre elementos estruturais rígidos, como as fundações de pontes. Este fenômeno é uma das principais causas de patologias em encontros de pontes e obras que envolvem interação solo-estrutura, podendo levar a danos estruturais significativos e exigir intervenções onerosas. Este estudo teve como objetivo analisar em detalhe os mecanismos de transferência de esforços de um aterro em adensamento para as estacas metálicas de fundações profundas de uma ponte. A metodologia de pesquisa empregou o Método dos Elementos Finitos (MEF), utilizando o software RS2 para simulações numéricas. Buscou-se quantificar e compreender como o empuxo mobilizado pelo movimento horizontal do maciço, resultante da dissipação de poropressões, afeta as tensões e as deformações nos elementos estruturais. O Modelo Base adotou o modelo constitutivo Mohr Coulomb e simulou a interação completa do sistema, considerando a estrutura com o carregamento da ponte sobre as estacas e o aterro compressível adjacente. Os resultados e discussões evidenciaram boa concordância entre o método de Tschebotarioff, o modelo de De Beer e Wallays e a modelagem numérica, com valores de deslocamento bastante semelhantes entre si e comportamento praticamente simétrico entre as estacas. Ainda assim, observa-se que a análise numérica apresenta maior capacidade de representar cenários mais complexos de perfil e interação solo-estrutura, enquanto os métodos tradicionais tendem a superestimar os deslocamentos laterais.

PALAVRAS-CHAVE: Efeito Tchebotarioff, Estacas, Método dos Elementos Finitos (MEF).

ABSTRACT: The Tschebotarioff Effect is characterized by the additional pressure generated by the lateral displacement of embankments acting on rigid structural elements, such as bridge foundations. This phenomenon is one of the main causes of pathologies in bridge abutments and in works involving soil–structure interaction, potentially leading to significant structural damage and requiring costly interventions. This study aimed to analyze in detail the mechanisms of load transfer from a consolidating embankment to the steel piles of deep bridge foundations. The research methodology employed the Finite Element Method (FEM), using RS2 software for numerical simulations. The objective was to quantify and understand how the pressure mobilized by the horizontal movement of the soil mass, resulting from pore pressure dissipation, affects stresses and deformations in structural elements. The Base Model adopted the Mohr–Coulomb constitutive model and simulated the complete system interaction, considering the structure with bridge loading on the piles and the adjacent compressible embankment. The results and discussions showed good agreement between the Tschebotarioff method, the De Beer and Wallays model, and the numerical modeling, with very similar

displacement values and nearly symmetrical behavior among the piles. Nevertheless, the numerical analysis demonstrated a greater capacity to represent more complex soil profiles and soil–structure interaction scenarios, while traditional methods tend to overestimate lateral displacements.

KEYWORDS: Tschebotarioff Effect, Piles, Finite Element Method (FEM).

1 INTRODUÇÃO

A expansão da infraestrutura viária tem ampliado significativamente a ocorrência de obras executadas sobre solos moles, caracterizados por elevada compressibilidade, baixa resistência ao cisalhamento e baixa permeabilidade. Nessas condições, aterros rodoviários e encontros de pontes estão sujeitos a recalques expressivos e deslocamentos laterais ao longo do tempo, os quais podem comprometer o desempenho estrutural de fundações profundas e gerar manifestações patológicas relevantes (Almeida; Marques, 2014; Massad, 2010).

Entre os mecanismos de interação solo-estrutura associados a esse tipo de obra, destaca-se o Efeito Tschebotarioff, que ocorre quando o adensamento de um maciço compressível submetido a carregamento assimétrico induz deslocamentos horizontais do solo, resultando em esforços laterais adicionais sobre estacas cravadas ou moldadas em camadas profundas. Esse fenômeno, originalmente descrito por Tschebotarioff (1962), é frequentemente negligenciado em projetos convencionais de fundações, embora possa gerar esforços de flexão e cisalhamento significativos nas estacas (Velloso; Lopes, 2010).

Estudos recentes indicam que o Efeito Tschebotarioff está diretamente associado à evolução das poropressões no solo mole e à redistribuição progressiva das tensões efetivas durante o processo de adensamento, podendo manifestar-se meses ou anos após a conclusão da obra (Marcelino, 2022; Faria et al., 2025). Em encontros de pontes, onde aterros de acesso são implantados adjacentes a fundações profundas, esse mecanismo se intensifica devido à rigidez das estacas em contraste com a deformabilidade do maciço de solo, favorecendo a mobilização de empuxos laterais não previstos.

Nesse contexto, a modelagem numérica por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF) tem se consolidado como uma ferramenta eficaz para a análise do comportamento acoplado solo-estrutura, permitindo a simulação do processo construtivo, da dissipação das poropressões e da evolução temporal dos deslocamentos e tensões. Assim, este estudo propõe uma análise detalhada do Efeito Tschebotarioff em estacas metálicas de um encontro de ponte, utilizando o software RS2 para investigar os mecanismos de transferência de esforços do aterro em adensamento para as fundações profundas, contribuindo para a compreensão do fenômeno e para a melhoria das práticas de projeto em solos moles.

Diante disso, a realização de uma análise comparativa entre métodos tradicionais e a modelagem numérica é fundamental para o aprofundamento da compreensão do comportamento solo-estrutura em problemas envolvendo carregamentos laterais induzidos por aterros. A comparação entre os métodos de Tschebotarioff, De Beer e Wallays e a modelagem numérica permite a variabilidade de respostas obtidas, indicando tendências mais conservadoras e uma abordagem de aplicabilidade mais complexa. Dessa forma, a análise integrada dos resultados contribui para a construção de um estudo interpretativo mais sólido, aumentando a confiabilidade das previsões e fornecendo resultados mais consistentes em obras geotécnicas.

2 EFEITO TSCHEBOTARIOFF

O Efeito Tschebotarioff refere-se à solicitação lateral adicional imposta a estacas quando ocorre deslocamento horizontal do solo adjacente em função de carregamentos superficiais assimétricos, como aterros construídos próximos a fundações profundas. Diferentemente dos empuxos clássicos de terra, esse efeito não decorre apenas do peso do maciço, mas da deformação volumétrica do solo compressível ao longo do tempo, associada ao processo de adensamento (Tschebotarioff, 1962; Velloso; Lopes, 2010).

Em solos moles saturados, a aplicação de uma sobrecarga resulta inicialmente no aumento das poropressões, que passam a suportar grande parte da tensão aplicada. Com a dissipação gradual dessas poropressões, ocorre o incremento das tensões efetivas e a consequente deformação do esqueleto do solo,

manifestando-se por recalques verticais e deslocamentos laterais do maciço (Terzaghi; Peck; Mesri, 1996; Almeida; Marques, 2014). Quando esse deslocamento ocorre em proximidade a estacas, o solo passa a atuar como agente solicitante, impondo esforços laterais ao fuste.

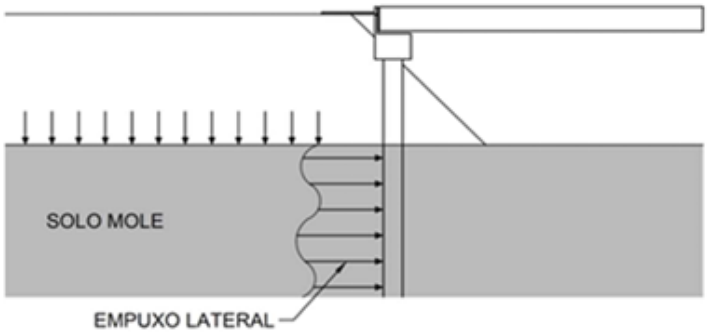


Figura 1. Empuxo lateral nas estacas devido aos deslocamentos do aterro sobre solo mole, DNIT (2022).

Tschebotarioff (1962) observou que, em solos argilosos moles, o deslocamento horizontal ocorre praticamente sem redução volumétrica imediata, fazendo com que a massa de solo se mova como um corpo contínuo contra os elementos estruturais rígidos. Nessas condições, as estacas deixam de atuar apenas como elementos resistentes verticais e passam a ser solicitadas por esforços de flexão e cisalhamento, cuja magnitude depende da rigidez da estaca, da espessura da camada compressível e da distância ao carregamento.

A literatura técnica aponta que o empuxo mobilizado pelo Efeito Tschebotarioff apresenta distribuição não uniforme ao longo do comprimento da estaca, sendo frequentemente representado por um carregamento triangular ou trapezoidal, com máximos localizados nas zonas de maior deformação do solo (Velloso; Lopes, 2010). Esse comportamento torna-se particularmente crítico em encontros de pontes, onde os aterros de acesso exercem sobrecargas elevadas em regiões próximas às fundações.

2 ENCONTRO DE PONTES E ATERRO SOBRE SOLO MOLE

As pontes são formadas por elementos estruturais que desempenham funções específicas para garantir sua estabilidade e funcionalidade. Componentes como apoios, tabuleiros e pilares são essenciais para sustentar e distribuir as cargas. Entre esses elementos, destacam-se os encontros, estruturas localizadas nas extremidades da ponte, cuja função principal é transmitir as cargas da superestrutura ao solo. Além disso, como mostra a Figura 2, os encontros são responsáveis por conter o aterro de acesso.

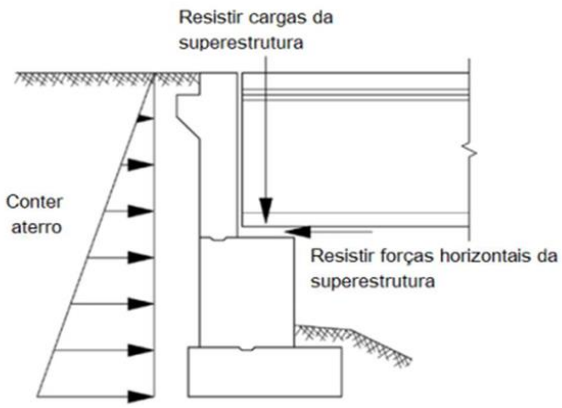


Figura 2. Principais funções de um encontro de ponte, Dias, et al. (2017), adaptado de WisDOT Bridge Manual (2017).

Nos aterros de acesso a encontros de ponte, o recalque é uma das patologias mais comuns e críticas, especialmente devido à interação entre o aterro deformável e a estrutura rígida, o que pode gerar deformações diferenciais. Esses problemas estão associados à compactação inadequada, materiais impróprios e condições geotécnicas desfavoráveis, sobretudo em solos moles. O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, por meio da norma DNIT 108/2009-SE, destaca a importância de métodos construtivos adequados para minimizar esses efeitos. Além disso, conforme Coutinho e Bello (2005), fatores como condição de ruptura, proximidade com o encontro da ponte e atrito negativo em fundações devem ser considerados para garantir o bom desempenho da estrutura.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Caso de Estudo

A obra analisada, após sua conclusão, passou a apresentar manifestações patológicas nos encontros de ponte, conforme ilustrado na Figura 3. Entre as principais ocorrências, destacam-se deformações e deslocamentos diferenciais na região de transição entre o aterro e a estrutura da ponte, indicando possíveis incompatibilidades no comportamento do conjunto solo–estrutura ao longo do tempo.

A ponte foi projetada com um vão de 33 m e acessos constituídos por aterros, implantados sobre um terreno de fundação predominantemente composto por solos moles. Essas condições geotécnicas são reconhecidamente desfavoráveis, uma vez que tais solos apresentam elevada compressibilidade e baixa resistência, tornando-os suscetíveis a recalques significativos e deformações laterais. Nesse contexto, a presença dessas manifestações patológicas sugere a influência de fenômenos como recalques diferenciais e deslocamentos induzidos pelo carregamento dos aterros, a exemplo do efeito Tschebotarioff.



Figura 3. Manifestações patológicas nos encontros de ponte.

3.2 Características da Modelagem Geotécnica

A modelagem foi realizada com base no modelo constitutivo de Mohr-Coulomb. Embora esse modelo não represente de forma ideal o comportamento de solos moles, sua utilização foi adotada como uma aproximação simplificada, em função da limitação de parâmetros geotécnicos disponíveis. A análise foi realizada de forma acoplada, permitindo a consideração simultânea dos efeitos mecânicos e hidráulicos.

Foram adotadas estacas metálicas com comprimento de 24 metros que correspondem ao perfil HP 310x79, fabricado em aço ASTM A572 Grau 50. Para a modelagem e análise estrutural, foram considerados um módulo de elasticidade de 207 GPa e um módulo de cisalhamento de 80 GPa. O perímetro equivalente da seção foi adotado como 1,77 m. A carga de fundação considerada no modelo foi de 494 kN/m². A malha numérica foi composta por 2167 nós, garantindo um nível adequado de discretização para a análise. As condições de fluxo foram definidas com carga hidráulica correspondente à cota do nível d'água.

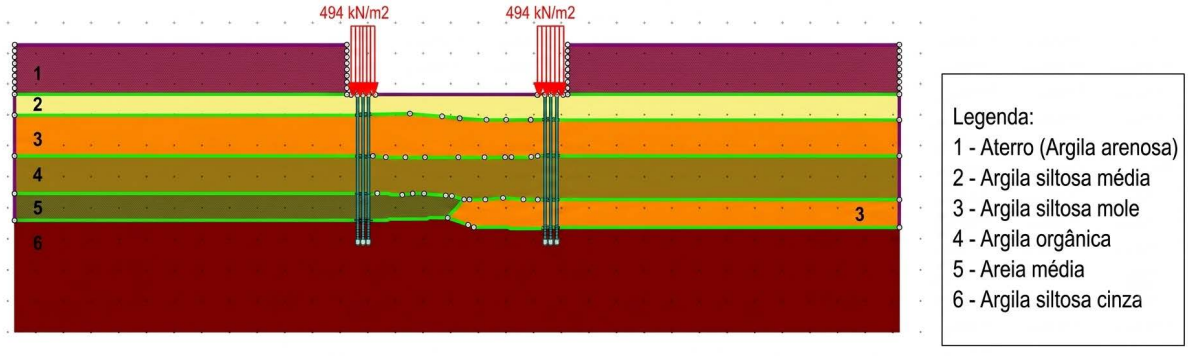


Figura 4. Perfil geotécnico.

Para a modelagem do solo, os parâmetros adotados constam na tabela a seguir:

Tabela 1 - Parâmetros do solo.

Camada de solo	**γ (kN/m³)**	**ν**	**η**	**c (kPa)**	**φc (°)**	**E (kPa)**
Aterro (Argila arenosa)	18	0,33	0,5	30	32	23500
Argila siltosa média	20	0,3	0,72	8	28	25000
Argila siltosa mole	16	0,3	0,72	8	28	20000
Argila orgânica	13	0,3	0,83	8	18	20000
Areia média	16	0,3	0,5	10	35	20000
Argila siltosa cinza	20	0,3	0,72	8	28	20000

3.3 Deslocamentos Laterais

Com base nas tensões cisalhantes, resultantes da modelagem, os deslocamentos laterais das estacas foram estimados. A metodologia adotada baseia-se na teoria da elasticidade aplicada à interação solo–estrutura, conforme apresentado por Timoshenko e Goodier (1970), e amplamente empregada na análise de estacas por Poulos e Davis (1980). A relação entre tensão cisalhante e deformação angular permite a obtenção dos deslocamentos por integração ao longo do comprimento da estaca, sendo essa abordagem consistente com os modelos clássicos de transferência de carga em fundações profundas.

De acordo com a teoria da elasticidade, a partir da relação entre tensão cisalhante e deformação angular do solo, de acordo com a Equação 1 :

$$\tau = G \cdot \gamma \quad (1)$$

τ = Tensão cisalhante;
G = Módulo de cisalhamento do solo;
γ = Deformação angular.

Considerando:

$$\gamma = du/dz, \quad (2)$$

γ = Deformação angular do solo
du = Deslocamento lateral da estaca;
dz = Profundidade ao longo da estaca.

o que permite obter o deslocamento por integração ao longo do comprimento da estaca:

$$u = \int_0^L \tau(z)/G \, dz \quad (3)$$

u = Deslocamento lateral da estaca;
τ(z): Tensão de cisalhamento no solo;
G: Módulo de cisalhamento do solo;
z: Profundidade ao longo da estaca;
L: Comprimento da estaca.

A distribuição de tensões cisalhantes foi obtida por modelagem numérica, apresentando variação com a profundidade e inversão de sinal entre o topo e a base, sendo a integral aproximada pelo valor médio de τ(z). Adotando-se comprimento de 24 m e módulo de cisalhamento do solo de 5000 kPa, os deslocamentos estimados variaram entre 1,0 cm e 2,9 cm.

3.4 Métodos Tradicionais de Cálculo de Deslocamento

Para a análise comparativa do efeito Tschebotarioff nas estacas, além das simulações numéricas realizadas no software RS2, foi desenvolvido um modelo estrutural no software Ftool, com o objetivo de estimar as deformações horizontais nas estacas decorrentes do carregamento imposto pelo aterro.

O carregamento lateral induzido pelo aterro foi estimado a partir de duas formulações: a primeira proposta por Tschebotarioff (1962) e a segunda por De Beer e Wallays (1972). Segundo Lopes e Velloso (2011), a hipótese proposta por Tschebotarioff considera as pressões laterais representadas por um carregamento triangular com ordenada máxima no centro da camada compressível, calculada pela Equação 4:

$$ph = 2 * B * \gamma * H * K \quad (4)$$

onde:

B = largura da face da estaca;
γ = peso específico do solo;
H = altura do aterro;
K = coeficiente de empuxo.

Já o modelo proposto por De Beer e Wallays considera que, para uma sobrecarga uniforme, o carregamento lateral pode ser representado como um carregamento retangular, correspondente à sobrecarga atuante, conforme a Equação 5:

$$ph = \gamma * H \quad (5)$$

Para a aplicação das equações, adotou-se um coeficiente de empuxo (K) igual a 0,31, peso específico do solo (γ) de 18 kN/m³ e altura do aterro (H) correspondente à condição final da obra igual a 8 m. O parâmetro B foi considerado como 0,306 m, correspondente à largura da face da estaca. Com base nesses parâmetros, os carregamentos laterais resultantes obtidos pelos métodos de Tschebotarioff e de De Beer e Wallays foram de 2,708 tf/m e 4,406 tf/m, respectivamente.

Na modelagem estrutural realizada no Ftool, considerou-se engaste no topo das estacas e a utilização de molas laterais espaçadas a cada 1 m ao longo do fuste, com o objetivo de representar o comportamento do solo na interação solo-estrutura. O coeficiente elástico dos apoios foi determinado com base na metodologia proposta por Tietz (1976), considerando a compacidade das areias e a consistência das argilas de acordo com os valores de SPT das camadas de solo.

4 RESULTADOS

Os deslocamentos do solo, que ocorrem ao longo do tempo, têm um impacto direto nas estacas, que podem ser afetadas por tensões e deslocamentos decorrentes dessas mudanças. Este processo de interação entre o solo e as estacas pode comprometer a estabilidade e o desempenho das fundações, sendo um fator importante a ser analisado para compreender os efeitos ao longo do tempo.

Os resultados mostram que, ao longo do comprimento das estacas, as tensões de cisalhamento iniciam com valores positivos nos primeiros metros, indicando tração associada à resistência lateral do solo superficial, e passam a valores negativos com o aumento da profundidade, atingindo aproximadamente -30 kN/m a partir de cerca de 15 m. As estacas 1, 2 e 6 apresentam as maiores amplitudes de variação, enquanto as estacas 3, 4 e 5 permanecem em faixas intermediárias, evidenciando um comportamento mais uniforme nas regiões centrais e maior influência do aterro nas extremidades.

O resultado dos cálculos do deslocamento a partir das tensões cisalhantes ao longo das estacas apresentaram valores variando de 10mm à 29mm, onde os maiores deslocamentos ocorreram nas estacas das extremidades, ou seja, mais próximas ao carregamento do aterro.

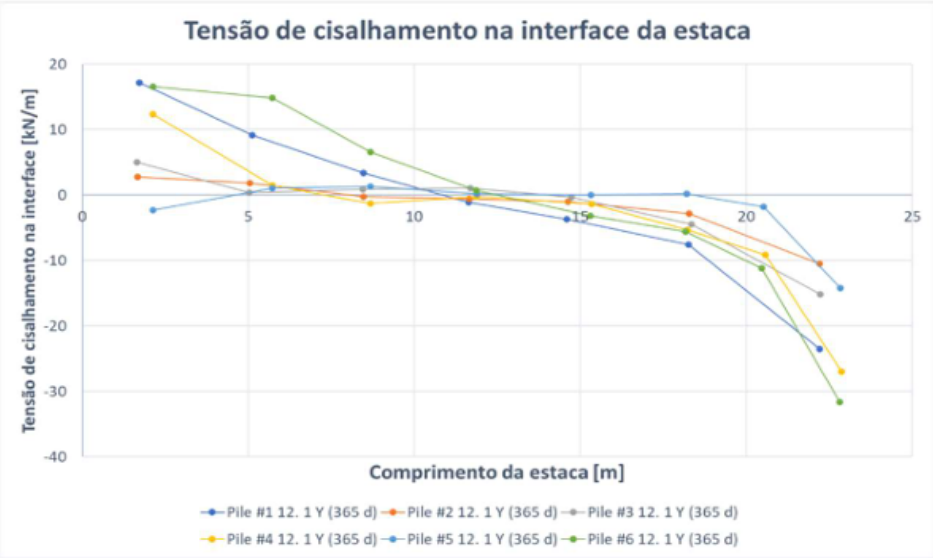


Figura 5. Gráfico de tensão cisalhante nas estacas após um ano de obra.

Após a realização da análise computacional, foram obtidas as deformações horizontais das estacas, cujos resultados estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Deslocamento máximo horizontal

Estaca	Deslocamento máximo horizontal (mm)		
	Tschebotarioff	Beer e Wallays	RS2
Lado Esquerdo	10,856	28,128	14,0
Lado Direito	16,625	37,040	29,0

A análise dos resultados da tabela 2 evidencia uma divergência significativa entre as abordagens, uma vez que os métodos analíticos fornecem estimativas mais elevadas de deslocamento. Destaca-se o modelo de De Beer e Wallays como o mais conservador, com valores de 28,128 mm para a estaca do lado esquerdo e

37,040 mm para a estaca do lado direito, enquanto o método de Tschebotarioff apresenta resultados intermediários, de 10,856 mm e 16,625 mm, respectivamente. Em contrapartida, a modelagem numérica indica deslocamentos consideravelmente menores, da ordem de 14,0 mm no lado esquerdo e 29,0 mm no lado direito.

Observa-se, ainda, que, enquanto os métodos empíricos apontam uma diferença expressiva de comportamento entre as estacas, a análise numérica indica uma resposta praticamente uniforme do sistema, com deformações muito próximas entre si. Esse resultado sugere que a modelagem no RS2 é capaz de captar de forma mais adequada a redistribuição de tensões e a rigidez global da interação solo-estrutura, ao passo que as formulações simplificadas, por considerarem os carregamentos de forma isolada, tendem a superestimar os deslocamentos horizontais.

5 CONCLUSÃO

A análise de encontros de ponte sobre solos moles mostra que os deslocamentos induzidos pelos aterros são decisivos para o desempenho estrutural. Devido à baixa resistência e alta compressibilidade desses solos, parte das cargas verticais é convertida em deslocamentos laterais, ativando o efeito Tschebotarioff. Esse fenômeno gera pressões horizontais adicionais e momentos fletores nas estacas, podendo provocar deformações excessivas e patologias precoces quando não considerado adequadamente em projeto.

Nesse contexto, a modelagem numérica por Método dos Elementos Finitos (MEF), aliada a métodos analíticos, permite uma avaliação mais realista do comportamento solo–estrutura. O uso de modelos constitutivos mais avançados possibilita simular o adensamento e a plasticidade do solo, fornecendo resultados mais consistentes. Assim, essas ferramentas são essenciais para um dimensionamento mais seguro e para garantir a durabilidade de obras em solos moles.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6122 2022: *Projeto e Execução de Fundações*. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ALMEIDA, M. S. S. e MARQUES, M. E. S. *Aterros Sobre Solos Moles: Projeto e desempenho*. São Paulo: Editora oficina de Textos, 2014. 254 p.

De Beer, E.E, Wallays, M. (1972) *Forces induced in piles by unsymmetrical surcharges on the soil around the piles*. In: EUROPEAN CSMFE, 5. 1972, Proceedings, Madrid, 1972. v. 1, p. 325-332.

DIAS, A. G. et al. Aspectos a considerar para projeto, construção e manutenção de encontros de pontes rodoviárias. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017. 165p.

Melo, K. R. de; Faria, A. W.; Borges, M. L.; Molina, F. A. L. (2025). *Análise de Confiabilidade de uma Estaca Submetida ao Efeito Tschebotarioff*. E&S Engineering and Science. 14. 10.18607/ES20251420300.

MARCELINO, L. E. M. *Efeito de Tschebotarioff em estacas: comparação entre dados de instrumentação e resultados de modelagem numérica e de métodos semiempíricos*. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

POULOS, H. G.; DAVIS, E. H. *Pile foundation analysis and design*. New York: John Wiley & Sons, 1980.

Tietz, W (1976). *Fundações profundas sobre tubulões*. Estrutura: revista técnica das construções engenharia e arquitetura. Rio de Janeiro, n°76, p 43-81.

TIMOSHENKO, S. P.; GOODIER, J. N. *Theory of elasticity*. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 1970.

Tschbotarioff, G.P. (1962) *Retaining structures*. McGraw-Hill Book Co., New York.

Velloso, D.A., Lopes, F.R. (2011). *Fundações : critérios de projeto, investigação de subsolo, fundações superficiais, fundações profundas.* São Paulo, Oficina de Textos.

VELLOSO, D. A.; LOPES, F. R. *Fundações*. São Paulo: Ed. Oficina de Textos, 2010.