

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/307

Estudo da Interação entre Solo e Postes de Distribuição de Energia Elétrica, por Meio de Modelagem Analítica

Amanda Campos de Oliveira
Discente, UTFPR, Toledo, Brasil, amandacampos@alunos.utfpr.edu.br

Guilherme Alan Souza Costa
Docente, UTFPR, Toledo, Brasil, guilhermecosta@utfpr.edu.br

Patrícia Casarotto de Oliveira
Docente, UTFPR, Toledo, Brasil, patriciac@utfpr.edu.br

William Hideki Ito
Docente, UTFPR, Toledo, Brasil, wito@utfpr.edu.br

RESUMO: O método de fixação de postes de redes de distribuição de energia elétrica de todo país é geralmente realizado por engastamento e muitas concessionárias de energia utilizam uma expressão padrão para garantir este embutimento. Sabe-se que tal embutimento deve ser função dos esforços solicitantes (carga de vento, peso próprio e tensões nos cabos) e das reações de empuxo do solo, o qual é bastante variável devido as dimensões continentais do país. Em locais onde a rede de distribuição é aérea é comum se observar postes inclinados, os quais necessitam de estruturas adicionais de ancoragem com tirantes, em alguns casos. Visando abordar este tema o presente trabalho analisou a interação solo-poste utilizando modelagem analítica com o intuito de avaliar a eficácia da solução padrão adotada pelas empresas. Partindo de um caso típico de poste, verificou-se que a adoção de comprimento padrão é válida apenas para condições ideais de fixação nas quais não há deficiências de compactação na base do engastamento.

PALAVRAS-CHAVE: Engastamento, esforços solicitantes, interação solo-poste, postes, compactação.

ABSTRACT: The installation method of power poles for electric networks systems is generally carried out by simply embedding, and many companies have adopt standard solution to implement it. It is known that such solution should be function of the external forces (wind load, self-weight, and tensile stresses at the wires) and the soil thrust reactions, which may vary due to the extension of our country. In areas where the power distribution lines develop overhead, it is commonly verified tilted poles which might require additional anchoring structures. To address this problem it is proposed to evaluate the soil-pole interaction using analytical modeling to evaluate the effectiveness of the standard solution adopted by many companies. Considering a typical pile, it is shown that the assumption of a standard embedding length is effective only under some conditions in which soil compaction problems are negligible.

KEYWORDS: Embedding, applied forces, soil-pile interaction, poles, compaction.

1 INTRODUÇÃO

O Sistema Interligado Nacional (SIN) conecta as fontes geradoras (hidro-termo-eólicas) ao sistema de transmissão de energia por meio de uma malha espalhada em todas as regiões do país (norte, sul, sudeste, centro-oeste e nordeste). Através do SIN a energia gerada no sul do país, como em Itaipu, por exemplo, pode ser utilizada nas demais regiões e vice-versa. O sistema elétrico brasileiro é composto por três grandes setores: geração, transmissão e distribuição. O primeiro é predominantemente composto por usinas hidroelétricas, sendo complementadas por fontes solares, eólicas, térmicas e nucleares. O segundo setor, composto por cerca de 100.000 km de linhas de transmissão, leva a energia produzida até as subestações de transmissão. Por fim, o setor de distribuição é responsável por levar a energia das subestações de transmissão ao consumidor final.

As linhas de transmissão são compostas por torres cujas tensões variam de 138 kV a 765 kV. A altura destas torres é definida em função da resistência do meio (do ar, por exemplo) e a tensão transmitida a fim de se evitar problemas com arco-elétrico. Já o setor de distribuição opera com tensões inferiores (da ordem de 1kV) e, portanto, podem ser utilizadas estruturas de menor porte, como os postes convencionais. Azevedo (1978) aponta que no Brasil os postes e as torres são cruciais para a infraestrutura da distribuição aérea de energia elétrica já que a localização das usinas hidrelétricas devem favorecer o potencial hídrico e isto faz com que a transposição de energia da fonte aos centros consumidores enfrente longas distâncias. Os postes, as torres de alta tensão e outros elementos presentes na distribuição/transmissão possibilitam a transferência de energia em larga escala e longos por trechos. Obviamente, a estabilidade estrutural e geotécnica destas estruturas é fundamental para garantir o pleno funcionamento do sistema e também a segurança da população.

No presente trabalho será abordado uma patologia bastante recorrente no sistema de distribuição de energia, bem como as recomendações de instalação de postes urbanos estabelecidas em normas e procedimentos e suas deficiências. O estudo se dará por meio de análise paramétrica utilizando modelos analíticos com postes-padrão de diferentes alturas. O objetivo é analisar o comportamento do sistema solo-poste sobre ação de carregamentos laterais e os deslocamentos horizontais decorrentes destas ações.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Redes de distribuição de energia

O engastamento padrão para postes utilizado pelas concessionárias de energia tem como base a norma NBR 15688 (ABNT, 2012) a qual ampara alguns tipos de postes-padrão, entre eles os circulares de concreto armado, especificados na NBR 8451-2 (ABNT, 2020), que será o tipo utilizado no desenvolvimento do trabalho. As principais ações sobre essas estruturas são: força do vento (no poste e nos condutores), tração dos cabos e peso próprio do poste. Existe uma variedade de metodologias disponíveis para o dimensionamento dos esforços nestas estruturas, aqui adotou-se o modelo apresentado no manual *Projeto de Rede de Distribuição - Cálculo Mecânico* (CPFL, 2020), já que ele serve de modelo para outras empresas distribuidoras de energia em outros estados.

Os postes, assim como as estacas, possuem parte do seu comprimento engastado, fazendo com que o solo seja responsável pelo equilíbrio do sistema solo-poste-cabo, por meio de reações que o solo desempenha sobre tal estrutura. Azevedo (1978) afirma que para o estudo das estacas, algumas simplificações são aplicadas e cabíveis apenas à estas, como a idealização de comportamento de uma viga sobre base elástica com comprimento infinito. Porém, desde que não sejam utilizadas, é possível analisar elementos como postes a partir dos estudos de estacas com carregamentos laterais, com uma simplificação adicional de considerá-los como corpos rígidos.

Basu, Salgado e Prezzi (2008), afirmam que apesar de os maiores esforços aos quais as estacas são comumente sujeitas serem verticais, vale estudar os esforços horizontais que podem afetá-las. Os principais exemplos cotidianos que justificam são as rajadas de vento que afetam os prédios, gerando esforços horizontais e momentos adicionais na fundação que os suportam, bem como os efeitos de frenagem e dilatação térmica em estruturas de pontes e viadutos.

Em redes de distribuição de energia o efeito do vento é minimizado, quando comparado às edificações, em função da dimensão da estrutura. No entanto, há esforços adicionais, como a tração nos cabos de energia, que podem causar reações adicionais. O engastamento do poste de distribuição de energia é comumente adotado como 60 cm mais 10% do comprimento deste. Este valor, a princípio, faz-se suficiente para garantir a estabilidade da estrutura, já que grandes empresas como a CELESC (SC), a COPEL (PR), a EDP (SP) e inúmeras outras adotam o mesmo padrão. Entretanto, não é raro a identificação de deslocamentos não usuais, como ilustrado na Figura 1. Dentre as diversas causas que resultam nesta patologia, aborda-se uma que pode ser fundamental e que é geralmente negligenciada devido à carência de conhecimento e/ou instrução geotécnico(a) do setor de instalação e manutenção de redes de distribuição.

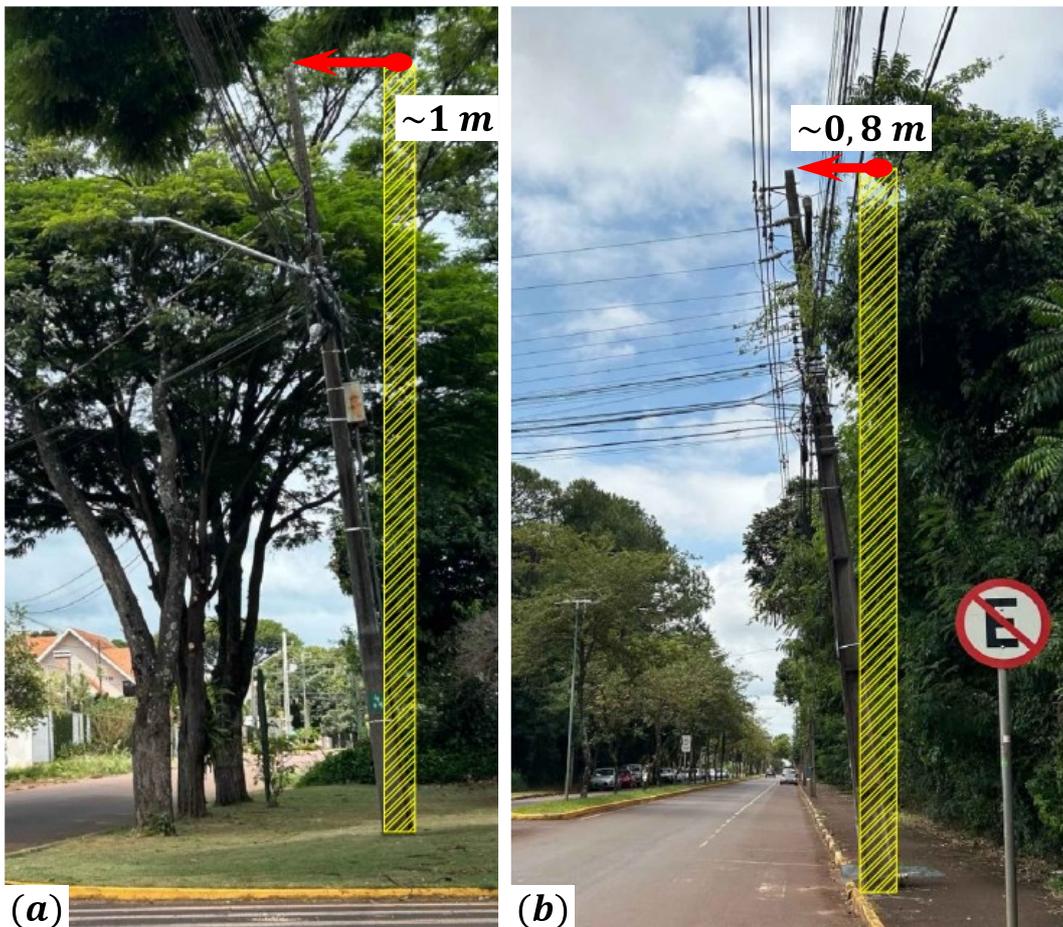


Figura 1. Exemplos de postes com deslocamento de prumada estimados. a) Poste em situação fim de linha. b) Poste primário com derivação.

Fonte: Acervo dos autores (2024.)

2.2 Considerações sobre os esforços e as reações na rede

2.2.1 Esforços solicitantes no sistema poste-solo

Neste trabalho admite-se que as reações do solo no poste ocorrem de forma similar às reações em estacas submetidas a carregamentos horizontais. Este carregamento horizontal gera comportamentos diferentes no sistema solo-estaca e que podem ser classificados em estacas ativas ou passivas. Segundo Basu et al. (2008), estacas ativas são caracterizadas por cargas horizontais externas conhecidas *a priori* (intensidade e ponto de aplicação); já em estacas passivas, não são.

Considerando o sistema solo-poste-cabo verifica-se que este se aproxima das estacas ativas, visto que os esforços causados nos postes que geram reações no solo que são conhecidos previamente. Segundo CPFL (2020), deve-se levar em consideração no cálculo de esforços horizontais os efeitos causados pelo vento nos condutores e no poste, bem como a tração dos cabos devido ao tensionamento dos condutores elétricos. A força de vento no poste (F_{vp}) é aplicada no centro de gravidade desta estrutura. A força de vento no condutor (F_{vc}) é perpendicular à direção do cabo e aplicada no ponto de engastamento deste com o poste. Em uma situação específica, na qual a direção do vento tem o mesmo sentido dos condutores, tem-se que a parcela de força de vento sobre os condutores é nula (ou seja, não é considerado o arraste dos cabos), restando a força de vento aplicada no centro de gravidade do poste (F_{vp}) e a força de tração do cabo de rede secundária (F_s) aplicada nos pontos de engastamento, conforme esquema representado na Figura 2. Este modelo foi utilizado no trabalho pois o intuito era realizar avaliações paramétricas do problema registrado na Figura 1 através de modelos analíticos.

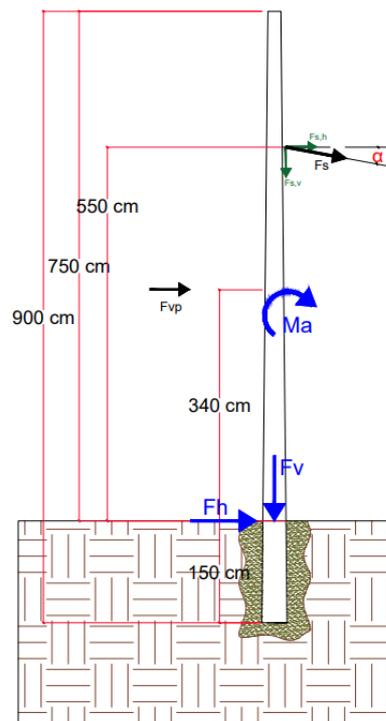


Figura 2: Representação de esforços no poste de 9 m.

A força de vento foi dada por:

$$F_{vp} = P_v \cdot S_p \quad (1)$$

$$P_v = 0,00471 \cdot V^2 \quad (2)$$

$$S_p = (D_s + D_t) \cdot H_{\text{útil}}/2 \quad (3)$$

$$D_s = H_{\text{útil}} \cdot C + D_t \quad (4)$$

onde,

P_v : pressão do vento sobre superfícies cilíndrica;

D_s : diâmetro no solo;

D_t : diâmetro no topo;

$H_{\text{útil}}$: comprimento do poste – engastamento;

C : conicidade (adotado 20 mm/m).

Para determinar os esforços aplicados no nível do terreno é necessário calcular a resultante dos esforços no ponto desejado como ilustrado anteriormente.

2.2.2 Reações de apoio no sistema poste-solo

O parâmetro que define a reação do solo é o módulo de reação horizontal (K), conforme descrito por Cintra (1981), como a relação entre a reação do solo p (força por comprimento da estaca) e y (respectivo deslocamento), Equação (5).

$$K = \frac{p}{y} \quad (5)$$

Segundo Alonso (1989), a variação deste módulo de reação com a profundidade, pode ser considerada nula, ou ter uma proporção entre deformação e profundidade a depender se o solo de estudo tem comportamento de argila pré-adensada (dura) ou comportamento de normalmente adensada (argila mole ou solo arenoso).

$$K = \eta_h \cdot z \quad (6)$$

Também se caracteriza com base no tipo de solo, o comportamento da estaca até certas profundidades. No caso de areias ou argilas moles, esse comportamento é movido pelo solo presente até a profundidade $z = T$, Equação 7. Já para argilas pré-adensadas, o valor de K deve sofrer restrição à certa profundidade $z = 0,4R$, Equação 8.

$$T = \sqrt[5]{\frac{EI}{\eta_h}} \quad (7)$$

$$R = \sqrt[4]{\frac{EI}{K}} \quad (8)$$

sendo que:

E = módulo de elasticidade da estaca;

I = momento de inércia na base da estaca;

η_h e K = parâmetros tabelados em Alonso (1989), para diferentes classificações de solos moles ou arenosos e argilas duras, respectivamente.

Segundo Rojas (2007), a interação solo-estaca pode ser interpretada como um sistema de molas independentes entre si, representado pela hipótese de Winkler ou como um meio contínuo elástico. Os modelos que acatam a teoria de Winkler são seguidos há muito tempo, por representarem a situação real de carregamento com similaridade e simplicidade. Dentro dessa interpretação diversos métodos foram desenvolvidos para cálculo de deslocamentos horizontais no topo, como o Método de Miche, Matlock e Reese, o Método Russo e outros.

O Método de Miche leva em consideração uma solução com viga sobre base elástica da solução de Winkler, que diferente de métodos elaborados anteriormente, não considera a estaca como corpo rígido (Rojas (2007). Ainda, a solução de Miche considera uma estaca longa em base elástica tendo o módulo de reação horizontal com variação linear de acordo com a profundidade e a força horizontal aplicada no topo do terreno, sendo o primeiro a apresentar um resultado analítico da integração do modelo de Winkler para estacas inseridas em meio elástico (Alonso, 1989).

A formulação de Miche permite o cálculo do deslocamento no topo da estaca (nível do solo) através da Equação (9). E um momento fletor que pode ser obtido pela Equação (10), que acontece na profundidade $z = 1,32T$.

$$y_0 (m) = 2,4 \frac{T^3 H}{EI} \quad (9)$$

$$M_{máx} = 0,79 \times H \times T \quad (10)$$

Já o Método Russo é aplicado como solução considerando uma estaca curta. Neste caso, o sistema funciona como um corpo rígido em base elástica e é dado pelas equações de equilíbrio nos três deslocamentos básicos: o horizontal, vertical e de rotação. Neste método obtêm-se o deslocamento no topo do tubulão (nível do solo) através da Equação (11) e o ponto de giro da estrutura pela Equação (12).

$$y_0 (m) = \frac{2H}{K_l D_f} + \frac{2}{3} l \alpha \quad (11)$$

$$z_0 = \frac{\Delta y}{\alpha} \quad (12)$$

2.3 Deslocamento no topo do poste

No presente trabalho optou-se por utilizar o Método Russo em detrimento do modelo proposto por Miche, pois aquele considera a influência adicional do momento fletor na base (importante para representar as cargas de vento e dos fios, conforme apresentado na Figura 2). Além disto, ao tratar o deslocamento do mesmo como sendo de um corpo rígido, pode-se calcular o deslocamento no topo a partir do vetor de deslocamento ocorrido no nível do solo através da semelhança de triângulos e da proporcionalidade entre os lados dos triângulos formados na situação, como observado na Figura 3.

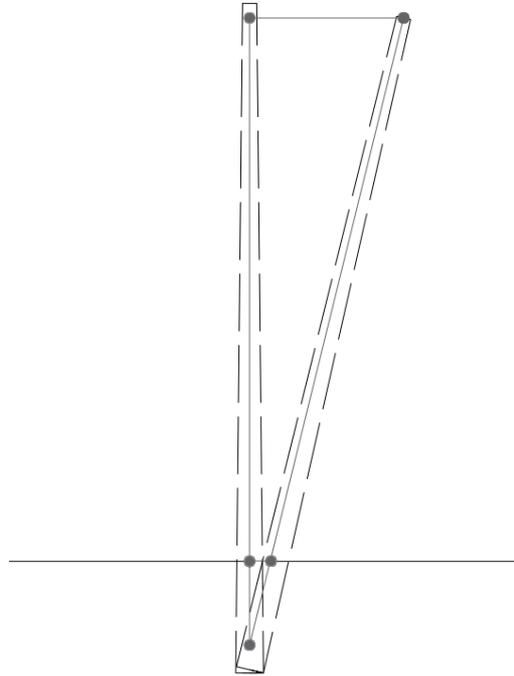


Figura 3: Esquema de deslocamento no topo do poste calculado por semelhança de triângulos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O problema analisado aborda esforços em postes circulares de 9 m, com estrutura S3 (Figura 2) baseada na NBR 15688 (ABNT, 2012) e que ilustra situação de poste em “fim de linha” de uma rede secundária (apenas baixa tensão) com 5 cabos. As tensões mais utilizadas em áreas urbanas não industriais são de média e baixa, porém, o estudo se aplica a um poste com fornecimento apenas de baixa tensão (1 kV), já que é sempre necessária pois fornece a tensão mais básica utilizada para o abastecimento elétrico de residências. O cabo escolhido na caracterização do problema, seguindo a nomenclatura da NBR 7271 (ABNT, 2009), é de alumínio nu tipo *Iris* de diâmetro nominal 7,41 mm e massa nominal de 92,5 kg/km, em um vão de 35 m.

Considerando também o uso de postes com resistências nominais comerciais de 600daN, com camada de concreto armado de 8 cm, para cálculo da área da seção circular vazada e do momento de inércia na mesma. Com módulo de elasticidade (E) calculado de acordo com as recomendações da NBR 6118 (ABNT, 2023), indicada na Equação (13), com parâmetro de agregado graúdo para granito e gnaiss $\alpha_E = 1,0$ e f_{ck} mínimo admissível para classe de concreto que atende de agressividade ambiental II ($\geq C25$).

$$E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}} \quad \text{para concretos com } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \quad (13)$$

O engastamento é definido conforme estipulado na NBR 15688 (ABNT, 2012), pela Equação (14).

$$e = \frac{L}{10} + 0,6 \text{ (m)} \quad (14)$$

O material de preenchimento da sobreescavação foi considerado arenoso, conforme ilustrado na Figura 2. A partir da Equação (6) pode-se obter o coeficiente de reação horizontal, sendo que este parâmetro foi variado para simular diferentes condições de compactação durante o processo de instalação do poste. Para calcular os esforços horizontais e verticais, fez-se necessário calcular a força de tração dos cabos (F_s) e a força do vento no poste (F_{vp}). A velocidade do vento foi adotada em 94 km/h, visando simular a condição de uma tempestade, e com altura útil sendo a diferença entre altura total do poste e comprimento engastado. O diâmetro de topo do poste adotado (9 m) tal como a massa foram de 190 mm e 1000 kg, seguindo a *Tabela A.1* da NBR 8451-2 (ABNT, 2020).

Nos anexos do manual de CPFL (2020) são fornecidos valores de tração de projeto para cada condutor (F_s), que variam de acordo com tipo de cabo escolhido e velocidade do vento, para cada cabo alumínio nu tipo *Iris*. Com a velocidade de vento determinada anteriormente, a tração de projeto foi de 60 daN e, por se tratar de uma rede de baixa tensão, onde são consideradas a contribuição de 5 cabos, sendo estes compostos por cabos de fase, neutro e de controle da rede. A força de tração resultante do grupo de cabos considerou a deflexão em relação a horizontal para levar em conta a flecha dos cabos, a qual foi considerada de 5°.

Para obter reações horizontal (F_h) e vertical (F_v) que agem na base do poste em nível do solo foram realizadas as decomposições de forças em cada direção, lembrando que F_h é a somatória de F_{vp} e as componente horizontal de F_s , já F_v é a somatória da força peso do poste e da componente vertical de F_s . As reações horizontais e verticais foram de 3,8 kN e 10,1 kN, respectivamente.

Através da metodologia apresentada verificou-se que o comportamento dos deslocamentos (topo e base) se aproximam de um comportamento exponencial decrescente assintótico, conforme apresentado na Figura 4, o qual varia em função da reação do solo no entorno do engastamento. Para areias medianamente compactas ou compactas o deslocamento é praticamente desprezível para a estrutura do sistema de distribuição, apresentando deslocamentos na base entre 8 mm e 4 cm para solo com tal característica e no topo deslocamentos entre 6 e 34 cm. Porém, em areias fofas o excedente de deslocamento pode ocasionar esforços adicionais como o efeito de segunda ordem nos postes ou trações adicionais nos cabos. Para areias fofas obtiveram-se deslocamento na base de 8 cm e no topo o deslocamento horizontal resultante é de 70 cm.

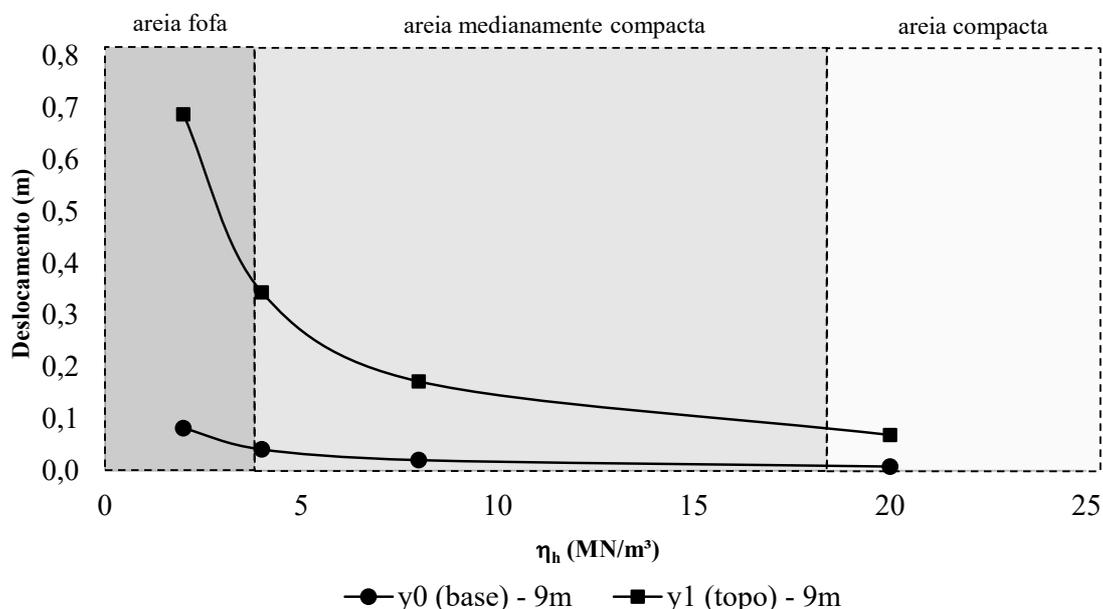


Figura 4: Deslocamentos da base (y_0) e do topo (y_1) do poste.

4 CONCLUSÕES

O trabalho discorreu sobre uma patologia verificada frequentemente em sistemas de distribuição de energia em diversos estados. Apesar de haver influência de diversos fatores, tais como o comprimento de engastamento ou a verticalidade da escavação, sabe-se que a sobreescavação, bem como o preenchimento e compactação adequada desta área são essenciais para garantir o bom desempenho da estrutura. Relembra-se,

ainda, sobre a dificuldade de compactação devido ao espaço reduzido de trabalho, resultando em uma região mal compactada, em parte considerável dos casos. Julga-se que as instruções e padronizações adotadas pelas empresas de distribuição são coerentes com os deslocamentos esperados, porém, há necessidade de se enfatizar a importância do processo executivo e da compactação adequada da região sobreescavada durante o processo de instalação dos postes, tal como o material utilizado para preenchimento, visto que a areia fofa pode causar deslocamentos maiores principalmente no topo da estrutura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alonso, U.R. *ESTACAS CARREGADAS TRANSVERSALMENTE NO TOPO*. In: DIMENSIONAMENTO de Fundações Profundas, 1989. p. 67-104.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). NBR 7271. *Cabos de alumínio nus para linhas aéreas - Especificação*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022). NBR 12655. *Concreto de Cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). NBR 8451-2. *Postes de concreto armado e protendido para redes de distribuição e de transmissão de energia elétrica - Parte 2: Padronização de postes para redes de distribuição de energia elétrica*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2021). NBR 8451-6. *Postes de concreto armado e protendido para redes de distribuição e de transmissão de energia elétrica - Parte 6: Postes de concreto armado e protendido para linhas de transmissão e subestações de energia elétrica - Requisitos, padronização e ensaios complementares*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2023). NBR 6118. *Projeto de Estruturas de Concreto*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012). NBR 15688. *Redes de distribuição aérea de energia elétrica com condutores nus*. Rio de Janeiro.
- Azevedo, R.V.B. *Um Estudo Teórico das Fundações dos Postes*, 1978. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal da Paraíba – Campina Grande, PB.
- Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/10382>. Acesso em: 9 jan. 2024.
- Basu, D. *Analysis of laterally loaded piles in multilayered soil deposits*. Purdue University, p. 1-147, maio de 2008. Disponível em:
<https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1802&context=jtrp/1000>. Acesso em: 11 jan. 2024.
- Cintra, J.C.A. *Uma análise de provas de carga lateral em estacas e comparação com os métodos da teoria de reação horizontal do solo*. 1981. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade de São Paulo, 1981. DOI <https://doi.org/10.11606/D.18.1981.tde-16062021-171119>. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-16062021-171119/pt-br.php>. Acesso em: 15 dez. 2023.
- Companhia Paulista de Força e Luz (2020). *Projeto de Rede de Distribuição - Cálculo Mecânico*. Campinas, SP: CPFL.
- Rojas, J.W.J. *Estacas sob esforços transversais*, 2007. Disponível em: https://www.academia.edu/43231165/NOTAS_DE_AULA_DE ESTRUTURAS_DE FUNDA%C3%87%C3%95ES_ESTACAS_SOB_ESFOR%C3%87OS_TRANSVERSAIS. Acesso em: 22 jan. 2024.
- Silva, B.V. *Análise dos esforços atuantes em postes de concreto armado devido a cabos*. 2019. Dissertação (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará, 2019. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/49677>. Acesso em: 20 jan. 2024.