

Deslocamento admissível para fundações de torres de linhas de transmissão de energia

João Manoel Sampaio Mathias dos Santos Filho

Pós-doutorando, Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, jmsmfilho@sc.usp.br

Rafael de Barros Aranha Piccolo

Engenheiro Civil, Diretoria de Transmissão, Neoenergia, Campinas, Brasil, rafael.piccolo@neoenergia.com

Cristina de Hollanda Cavalcanti Tsuha

Professora Titular, Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, chctsuha@sc.usp.br

RESUMO: As fundações de estruturas devem ser projetadas e executadas para atender a critérios de segurança e desempenho. A norma brasileira que rege o projeto de fundações indica que os deslocamentos de fundações devem ser avaliados para cargas características, ou seja, sem a aplicação de coeficientes de majoração. No entanto, as memórias de cálculo de estruturas normalmente apresentam os carregamentos sobre fundações somente em valores últimos. Assim, no presente artigo é apresentada uma metodologia para avaliação dos carregamentos sobre fundações em valores característicos para que a verificação de desempenho da fundação seja realizada adequadamente, conforme preconizado na norma vigente. É apresentado um estudo de caso para validação da metodologia proposta. Além disso, são compilados valores de deslocamentos e distorções admissíveis para fundações de torres de linhas transmissão de energia e são sugeridos valores a serem adotados nos projetos.

PALAVRAS-CHAVE: Fundações, Torres de linha de transmissão de energia, Deslocamento admissível.

ABSTRACT: Structure foundations must be designed and built to meet safety and performance criteria. The Brazilian standard that governs the design of foundations indicates that foundation displacements must be evaluated for characteristic loads, that is, without the application of weighting coefficients. However, structure calculation memories normally present loads on foundations only in ultimate values. This paper presents a methodology for evaluating loads on foundations at characteristic values so that the foundation's performance verification is carried out properly, as recommended in the current standard. A case study is presented to validate the proposed methodology. In addition, values of displacements and distortions allowable for foundations of transmission structures are compiled and values to be adopted in projects are suggested.

KEYWORDS: Foundations, Transmission line towers, Allowable displacement.

1 INTRODUÇÃO

De acordo com a NBR 6122 (2022), ao se projetar fundações de estruturas devem ser verificados dois aspectos relativos à segurança: o estrutural (verificação da segurança à ruína do elemento estrutural de fundação) e o geotécnico (segurança à ruptura do maciço de solo/rocha de apoio da fundação direta ou o qual à estaca encontra-se imersa). Além da verificação da segurança à ruptura, deve ser feita também uma análise dos deslocamentos das fundações quando em carga de serviço, pois, todas as fundações se deslocam quando submetidas a algum carregamento. Desta forma, o projetista deve dimensionar fundações que, além de atender à carga requerida pelo projeto com margem de segurança adequada, igualmente, deve apresentar deslocamentos na condição de serviço que não prejudiquem a funcionalidade nem cause danos à estrutura nela

apoiada. De acordo com IEEE 691 (2001), o estabelecimento de critérios adequados de performance é essencial para o desenvolvimento de projetos de fundações seguros e econômicos.

Segundo a NBR 6122 (2022) o deslocamento da fundação (E_k) deve ser estimado considerando-se parâmetros geotécnicos característicos e cargas características. O deslocamento assim obtido deve ser comparado ao valor limite de serviço, ou deslocamento admissível (C), satisfazendo a desigualdade (Equação 1).

$$E_k \leq C \quad (1)$$

Embora a NBR 6122 (2022) estabeleça que o deslocamento admissível deva ser avaliado, ela não especifica qual o valor limite.

No setor elétrico, de maneira geral, não é usual que o projeto contemple estimativa sistemática dos deslocamentos das fundações por métodos teóricos, ficando esta verificação para a fase de implantação, onde os deslocamentos são verificados por meio de provas de carga em fundações protótipo (na fase de consolidação de projeto, denominados ensaios de convalidação) ou já nas fundações definitivas (denominados ensaios de rotina). Assim, para que seja feita a verificação do deslocamento da fundação, conforme preconizado pela NBR 6122 (2022), necessita-se conhecer a magnitude das cargas em valores característicos (ou nominais).

No Brasil, os projetos de estruturas de transmissão são elaborados com base na norma IEC 60826 (2017), onde o nível de confiabilidade (ou segurança) é definido com base no tempo de retorno. De acordo com os Critérios e Requisitos definidos pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS, 2022) em seus Procedimentos de Rede (ONS, 2022) o tempo de retorno a ser considerado para projetos de linhas de transmissão aéreas deve ser:

- Igual ou superior a 150 anos para LT com tensão nominal igual ou inferior a 230 kV;
- Igual ou superior a 250 anos para LT com tensão nominal superior a 230 kV;

Assim, as envoltórias de cargas nas fundações são apresentadas nas memórias de cálculo das estruturas em valores últimos, ou valores de cálculo (S_d), conforme nomenclatura adotada pelas normas NBR 6122 (2022) e NBR 8681 (2019), ou seja, são valores majorados do tipo apresentado na Equação 2, onde γ_f é o coeficiente de ponderação das ações, não sendo fornecidos em valores característicos (S_k).

$$S_d = \gamma_f \cdot S_k \quad (2)$$

Além disso, para atender ao critério de coordenação de falha, conforme ONS (2022), as solicitações, já em valores de cálculo, transmitidas pela estrutura às fundações devem ser majoradas pelo fator 1,10, no mínimo. Desta forma, as fundações são dimensionadas considerando solicitações (S_{df}) do tipo apresentado na Equação 3.

$$S_{df} = 1,10 \cdot \gamma_f \cdot S_k \quad (3)$$

Neste contexto, para que a verificação teórica do deslocamento ou do desempenho em campo (prova de carga) das fundações seja realizada como preconizado pela NBR 6122 (2022), o presente artigo apresenta uma metodologia para estimativa do valor da solicitação em termos de valores característicos (S_k) a partir do valor de cálculo usualmente apresentado nas memórias de cálculo das estruturas (S_d) ou da carga de projeto da fundação (S_{df}). Além disso, são apresentados valores dos deslocamentos admissíveis por fundações de torres de linhas de transmissão, que podem ser utilizados como critério de aceitação das fundações.

2 SOLICITAÇÃO CARACTERÍSTICA NAS FUNDAÇÕES

2.1 Natureza das solicitações

As solicitações nas fundações de torres de linhas de transmissão de energia têm a mesma natureza das ações atuantes nas estruturas. Desta forma, para avaliação da solicitação característica (S_k) nas fundações,

deve-se analisar, inicialmente, as cargas que atuam na estrutura. De maneira geral, a ação do vento é a que governa o dimensionamento da estrutura e, conseqüentemente, das fundações.

2.2 Avaliação da solicitação característica

Conforme NBR 8681 (2019), se o cálculo do esforço atuante for feito em regime elástico linear (ou pseudoelástico), o coeficiente de ponderação das ações pode ser aplicado tanto à ação característica quanto diretamente ao esforço característico. Ainda, de acordo com a NBR 8681 (2019), para definição do valor característico de ações que apresentem variabilidade no tempo considera-se um período convencional de referência de 50 anos.

Nos projetos de estruturas de transmissão a ação do vento é introduzida por meio da consideração da pressão dinâmica do vento (q) afetada por coeficientes aerodinâmicos, área de atuação e densidade do ar (ρ). A pressão dinâmica do vento (q_T) para uma dada velocidade de vento definida para um período de retorno T (V_T) é calculada conforme Equação 4.

$$q_T = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_T^2 \quad (4)$$

Assim, na falta de memória de cálculo de estruturas que apresentem envoltória de cargas nas fundações com período de retorno de 50 anos, pode-se estimar que o coeficiente de ponderação (γ_{fe}) que majora a ação do vento com período de retorno de 50 anos para um período de retorno T distinto é dado pela Equação 5. O valor de S_k para verificação de performance por fundação de estrutura de transmissão pode então ser obtido a partir da Equação 6, onde S_d , V_T e V_{50} são obtidos diretamente das memórias de cálculo de estruturas. Quando se desejar obter a solicitação característica S_k quando o valor da solicitação já esteja afetado pelo fator de coordenação de falha, deve-se utilizar a Equação 7.

$$\gamma_{fe} = q_T / q_{50} = V_T^2 / V_{50}^2 \quad (5)$$

$$S_k = S_d / \gamma_{fe} \quad (6)$$

$$S_k = S_{df} / 1,10 \cdot \gamma_{fe} \quad (7)$$

2.3 Estudo de caso

Para validação da metodologia de avaliação de S_k a partir de S_d para verificação de deslocamento de fundação considera-se a torre autoportante tipo N5SSP projetada para implantação nas LT 525 kV Joinville Sul – Itajaí II e LT 525 kV Itajaí II – Biguaçu. A silhueta da estrutura é apresentada na Figura 1. A memória de cálculo da estrutura foi inicialmente emitida da forma padrão, ou seja, apresentando a tabela de cargas últimas (ou de cálculo) nas fundações (ENGETOWER, 2020). Posteriormente, foi elaborada pela projetista uma nova memória considerando vento com período de retorno de 50 anos, ou seja, em termos de valores característicos (ENGETOWER, 2024). As velocidades de vento consideradas foram de 30,56 m/s e 34,72 m/s para períodos de retorno de 50 e 250 anos, respectivamente. O valor de γ_{fe} obtido pela metodologia (Equação 5) proposta foi calculado igual a 1,29.

A Tabela 1 apresenta as cargas na fundação (sistema retangular) para os períodos de retorno de 50 e 250 anos e a relação entre elas, bem como a hipótese de carga e a análise de γ_{fe} . A hipótese crítica para ambos os períodos de retorno correspondeu a que considera o vento máximo atuando a 60° do eixo da linha. Verifica-se que o menor valor de γ_{fe} obtido foi 1,27, que correspondeu a relação entre as cargas de compressão. Para o caso apresentado, a diferença entre o valor mínimo de γ_{fe} calculado através da metodologia apresentada no presente trabalho com o real, obtido da análise estrutural, é de 1,6%, apenas. Desta maneira, a avaliação de S_k conforme metodologia apresentada no presente trabalho demonstra-se adequada para verificação de desempenho de fundações.

Tabela 1. Carregamentos nas fundações para períodos de retorno de 50 e 250 anos.

Hipótese	Transv. (kN)		γ_{fe} Transver.	Vertical (kN)		γ_{fe} Vertical	Longit. (kN)		γ_{fe} Longitud.
	50	250		50	250		50	250	
<i>T</i>									
Compressão Máx.	162	209	1,29	919	1.167	1,27	103	133	1,29
Tração Máx.	131	179	1,36	705	960	1,36	83	113	1,36

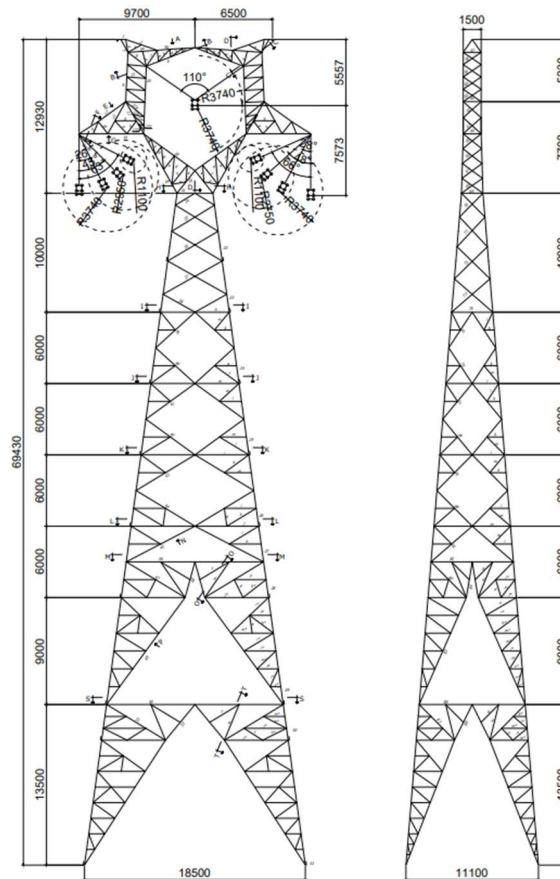


Figura 1. Silhueta da torre N5SSP (Marte Engenharia, 2019)

3 DESLOCAMENTOS ADMISSÍVEIS PARA FUNDAÇÕES DE TORRES

De maneira geral, todas as fundações se deslocam quando submetidas a algum carregamento. Assim, o projetista deve conceber projetos em que os deslocamentos das fundações quando em carga não prejudiquem a funcionalidade nem cause danos à estrutura nela apoiada. No caso de torres de linhas de transmissão, o deslocamento elástico da fundação não tem qualquer influência na operacionalidade da linha. A magnitude do deslocamento admitido para a estrutura varia, principalmente, de acordo com a rigidez das ligações dos elementos estruturais, por exemplo, um galpão em estrutura metálica, evidentemente, pode suportar maiores recalques (absolutos, diferenciais ou distorções) sem que qualquer dano seja percebido do que um edifício de concreto armado com fechamentos em alvenaria. Embora a NBR 6122 (2022) indique que deve ser feita a verificação dos deslocamentos da fundação, não são indicados os valores limite. Desta maneira, uma vez avaliado o deslocamento da fundação para uma determinada carga, necessita-se saber se a estrutura suporta tal deslocamento sem sofrer danos, para isso, recorre-se à literatura técnica disponível. Os valores encontrados na

literatura são apresentados de duas maneiras distintas: ou diretamente em termos de deslocamento (recalques absolutos ou diferencial) ou em termos de distorção angular.

Em geral, os recalques uniformes dos apoios, por maiores que sejam, não causam danos estruturais, sendo as distorções angulares mais críticas (CINTRA, AOKI e ALBIERO, 2011). Quando os valores destes deslocamentos ultrapassam certos limites, podem surgir esforços para os quais a estrutura não deve ter sido dimensionada (VELLOSO e LOPES, 2010). Para simplificar a análise, em obras correntes, é prática limitar o recalque absoluto das fundações de forma que o recalque diferencial (ou distorção) permaneça dentro de limites aceitáveis (CINTRA, AOKI e ALBIERO, 2011). De fato, segundo Velloso e Lopes (2010), há uma correspondência entre recalques e distorções.

Shu et al. (2012) modelaram por meio de método dos elementos finitos uma torre autoportante com tensão de operação de 500 kV (circuito simples, altura nominal de 54,0 m, vão básico de 600 m, abertura de pernas de 9,40 m na longitudinal e de 13,66 m na transversal) onde foram simuladas várias condições de carregamento (ação do vento e possibilidade de presença de gelo) combinadas com deslocamentos das fundações. Eles concluíram que distorções de até 0,5%, ou $L/200$, onde L é a distância entre as pernas da torre, não causam danos à estrutura.

No caso de fundações de linhas de transmissão a norma IEC 60826 (2017) e Cigré (2001) indicam valores de deslocamentos suportados sem danos às estruturas. São apresentados os deslocamentos admissíveis por fundações submetidas à tração (em estais e pés de torre autoportante) e à compressão (mastros de torres estaiadas e pés de torres autoportantes). São admitidos deslocamentos que causem até 1° de rotação da estrutura, desde que a distorção seja de até $L/300$ com máximo de 20 mm. Neste caso, o recalque diferencial ou distorção angular devem ser avaliados para cada pé de torre em relação ao plano formado pelos outros três pés. Cigré (2002) apresenta os valores de deslocamentos para cargas últimas adotados como critério de aceitação em projeto de linha de transmissão em 500 kV executado nos USA, sendo eles de 50 mm para fundações de torres autoportantes de suspensão e de 100 mm para ancoragem de estais.

De acordo com Skempton e MacDonald (1956) *apud* Velloso e Lopes (2010), são admitidos pelas estruturas recalques de fundações isoladas apoiadas em areia de até 40 mm para uma distorção de $L/500$. Quando apoiadas em argila o limite passa a ser 65 mm. Chaves (2004) cita que foram realizados ensaios em torres onde foram induzidos deslocamentos nos pontos de ligação da torre com a fundação e não foram verificados esforços secundários relevantes nas torres metálicas treliçadas para recalques de 40 mm.

Conforme se apresentou, encontram-se na literatura valores distintos de distorções admissíveis e deslocamentos admissíveis para estruturas de torres de linhas de transmissão. Os valores de recalques variam entre 40 e 65 mm, sendo que para ancoragem de estais pode chegar a 100 mm, e os de distorção entre $L/200$ e $L/500$. Assim, frente a variação dos valores apresentados, valores entre 40 e 50 mm, para deslocamentos em tração ou em compressão, parecem atender a maioria dos casos e podem ser adotados como valores de referência para o controle da performance das fundações de torres de linhas de transmissão.

Além disso, é recomendável que o valor do deslocamento admissível considere a parcela de deslocamento devido à deformação elástica do elemento estrutural de fundação, pois, como se sabe, o deslocamento da fundação medido em provas de carga é composto por duas parcelas, uma correspondente à deformação do solo (essencialmente plástica) e outra correspondente à deformação do elemento estrutural (essencialmente elástica). Esta consideração é especialmente importante quando trata-se de fundações profundas. Em alguns casos, somente a deformação elástica do elemento estrutural de fundação pode já atingir valores da ordem do deslocamento total admissível, não restando margem para qualquer deslocamento devido ao solo, que, evidentemente, irá ocorrer.

Entretanto, deve ser observado que o valor do deslocamento adotado para a verificação de desempenho de fundações não deve caracterizar a ruptura geotécnica de um elemento isolado de fundação. Por exemplo, não tem significado geotécnico estabelecer para uma haste ancorada em rocha um deslocamento admissível de 50 mm, pois, embora a torre admita o deslocamento de 50 mm, a fundação ancorada em rocha atinge o pico de resistência quando experimenta um deslocamento bastante inferior.

Ademais, deve-se notar que os valores de referência são relativos à fundação, que pode ser composta por grupo de estacas. Desta maneira, deve ser levado em conta a resultante dos deslocamentos das estacas no computo do deslocamento da fundação. Por exemplo, considerando um bloco com 5 estacas helicoidais para a torre N5SSP e a hipótese de compressão máxima apresentada na Tabela 1, o cálculo do estaqueamento retornou cargas de compressão nas estacas variando de 204 até 324 kN, sendo a carga média de 272 kN. Logo, se considerarmos 50 mm como deslocamento admissível da fundação (ou seja, do grupo de estacas), a estaca

mais carregada pode deslocar-se mais que 50 mm e ainda assim a fundação atender ao deslocamento admissível estabelecido. Assim, adotar os valores sugeridos neste trabalho como critério de aceitação de estaca, sendo a carga de ensaio correspondente à da estaca mais carregada do estaqueamento pode ser uma prática segura, porém, antieconômica.

4 CONCLUSÃO

De maneira geral todas as fundações se deslocam quando submetidas a carregamentos. Os deslocamentos das fundações devem ser tais que não causem danos à estrutura nela apoiada nem caracterizem a ruptura geotécnica da fundação. A norma NBR 6122 (2022) preconiza que os deslocamentos das fundações devem ser verificados para cargas características, entretanto, normalmente, as memórias de cálculo de estruturas de transmissão não apresentam as cargas nas fundações em valores característicos. Neste trabalho foi apresentada uma maneira alternativa de se avaliar os carregamentos em valores característicos para verificação de desempenho de fundações. A magnitude do deslocamento quando em carga tende a ser inversamente proporcional ao custo de execução de fundações do mesmo tipo. Assim, no cenário atual, a competitividade do mercado demanda busca constante por redução de custos de implantação e o estabelecimento adequado de critérios de aceitação para as fundações é parte integrante deste processo.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Neenergia, Projeto PD-07284-0002/2020 do programa de P&D ANEEL.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2019). NBR 8681. *Ações e segurança nas estruturas: Procedimento*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022). NBR 6122. *Projeto e execução de fundações*. Rio de Janeiro.
- CHAVES, R.A. (2004). *Fundações de Torres de Linhas de Transmissão e de Telecomunicações*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia da UFMG, 214 p.
- CIGRE (2001). *Technical Brochure 178: Probabilistic design of overhead transmission lines*. Paris.
- CIGRE (2002). *Technical Brochure 206: The design of transmission line support foundations – an overview*. Paris.
- CINTRA, J.C.A.; AOKI, N.; ALBIERO, J.H. (2011). *Fundações diretas: projeto geotécnico*. Oficina de Textos. São Paulo.
- ENGETOWER (2020). *Torre tipo N5SSP: Memória de cálculo estrutural – LT 525 kV Areia - Joinville Sul*. Belo Horizonte, 43 p.
- ENGETOWER (2024). *Torre tipo N5SSP: Cargas sobre fundação em carregamento nominal – LT 525 kV Areia - Joinville Sul – Itajaí – Biguaçu*. Belo Horizonte, 32 p.
- Institute of Electrical and Electronic Engineers, Inc. (2001). *IEEE 691: Guide for Transmission Structure Foundation Design and Testing*. New York, 193 p.
- International Electrotechnical Commission (2017). *IEC 60826: Overhead transmission lines – Design criteria*. Geneva, 84 p.
- MARTE ENGENHARIA (2019). *Torre tipo N5SSP: Silhueta LT 525 kV Areia - Joinville Sul – Itajaí – Biguaçu - Projeto executivo*. Rio de Janeiro.
- Operador Nacional do Sistema Elétrico (2022). *Procedimentos de Rede: Submódulo 2.7 – Requisitos mínimos para linhas de transmissão*. Rio de Janeiro, 18 p.

- SHU, Q.; YAUN G.; GUO, G.; ZHANG, Y. (2012). Limits to foundation displacement of an extra high voltage transmission tower in a mining subsidence área. *International Journal of Mining Science and Technology*. v. 22. p. 13-18.
- SKEMPTON, A. W.; MACDONALD, D. H. (1956). Allowable settlement of buildings. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*. London, v. 5. p. 727-784.
- VELLOSO, D.A.; LOPES, F.R. (2010). *Fundações: critérios de projeto, investigação do subsolo, fundações superficiais, fundações profundas*. Oficina de Textos, São Paulo.