



Comportamento sísmico de torres metálicas de transmissão de energia através de análise pushover

Seismic behavior of steel power transmission towers through pushover analysis

Crystian Daniel de Souza Paz¹, Rúbia Mara Bosse²

RESUMO

O artigo aborda a análise do comportamento de uma torre metálica de transmissão de energia sujeita a cargas laterais, a fim de se estimar sua capacidade resistente à carregamentos sísmicos. O estudo utiliza o método dos elementos finitos (MEF) com o software Abaqus para estimar a capacidade resistente sísmica que a torre apresenta a partir de análises *pushover* realizadas nas duas direções principais de possível ação de terremotos. A análise revela que a direção mais vulnerável às forças sísmicas na estrutura é o eixo X. No modelo em elementos finitos foi considerada resposta não linear física para os elementos da torre, com comportamento elastoplástico perfeito. Assim, é possível observar quais as barras da estrutura que estão mais suscetíveis e apresentam comportamento plástico primeiro. Através de gráficos o comportamento da estrutura é ilustrado, desde a parte elástica linear até a plastificação das barras de aço da torre. As primeiras barras a sofrerem plastificação têm seus tempos e deslocamentos registrados. No final da análise *pushover*, a estrutura mostra deformações significativas. O estudo contribui para a compreensão e estimativa do comportamento das torres de transmissão de energia sob cargas sísmicas extremas, ajudando a determinar a fragilidade dessas estruturas.

PALAVRAS-CHAVE: Análise dinâmica; *Pushover*; Torre estaiada.

ABSTRACT

The article addresses the analysis of the behavior of a metal transmission tower subjected to lateral loads to estimate its resistance capacity to seismic loads. The study utilizes the Finite Element Method (FEM) with Abaqus software to estimate the seismic resistance capacity of the tower through pushover analyses conducted in the two main directions of potential earthquake action. The analysis reveals that the most vulnerable direction to seismic forces in the structure is the X-axis. In the finite element model, a physical nonlinear response is considered for the tower elements, involving perfect elastoplastic behavior. This allows for the identification of the bars in the structure that are more susceptible and exhibit plastic behavior first. The behavior of the structure is illustrated through graphs, covering from the linear elastic phase to the plasticization of the steel bars in the tower. The times and displacements at which the first bars undergo plasticization are recorded. At the end of the pushover analysis, the structure displays significant deformations. The study contributes to the understanding and estimation of the behavior of energy transmission towers under extreme seismic loads, aiding in determining the fragility of these structures.

KEYWORDS: Dynamic analysis; Pushover; Guyed tower.

INTRODUÇÃO

As torres metálicas de transmissão de energia desempenham um papel fundamental na infraestrutura de fornecimento de eletricidade, permitindo a distribuição segura e eficiente de energia ao conectar grandes distâncias, como áreas de consumo, subestações e usinas elétricas. Em relação ao sistema estrutural, Chaves (2004) distingue as torres em dois tipos quanto ao sistema estrutural: autoportantes e estaiadas. As torres

¹ Bolsista de Iniciação Científica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Guarapuava, Paraná, Brasil. E-mail: crystianpazprofissional@gmail.com. ID Lattes: 8592595297518137.

² Orientador. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Guarapuava, Paraná, Brasil. E-mail: rubiambosse@utfpr.edu.br. ID Lattes: 6675796148900998.



autoportantes são aquelas cujo equilíbrio é garantido por sua própria estrutura, sem a necessidade de uma subestrutura para contribuir com sua estabilidade. As torres estaiadas são aquelas que usam cabos tensionados ancorados no solo em suas extremidades, o que garante a estabilidade da estrutura.

A vibração abrupta causada pela liberação repentina de energia acumulada pela deformação da litosfera faz com que um terremoto se propague como ondas sísmicas. Devido à sua forma de ocorrência, os terremotos são considerados fenômenos estocásticos que possuem magnitude, duração e frequência incertos, sendo que a maioria tem origem tectônica (Sánchez, 1994).

Este trabalho propõe a modelagem de uma torre metálica estaiada de transmissão de energia no software de elementos finitos Abaqus, para realização de análises *pushover* nas duas direções de possível incidência de sismos na estrutura. A partir dos resultados deste trabalho é possível estimar a capacidade resistente da torre frente a solicitações sísmicas. São etapas do trabalho a obtenção das frequências naturais e modos de vibração da estrutura. Os resultados mostram quais os elementos mais suscetíveis à plastificação na estrutura, a direção mais crítica para ação de terremotos e o modo de falha predominante sob ações de cargas laterais.

OBJETIVO

O principal objetivo deste estudo foi analisar a resposta estrutural de uma torre metálica estaiada de transmissão de energia sujeita à análise de *pushover* para estimativa da capacidade resistente da estrutura sob carregamentos laterais significativos como os de terremotos. Entre os objetivos específicos estão a realização da modelagem em elementos finitos da torre metálica, realização da análise modal na estrutura para obtenção das frequências naturais e modos de vibração e determinação das barras que estão mais suscetíveis ao aparecimento de deformações plásticas.

DESCRIÇÃO DO ESTUDO

MODELO DA TORRE

Utilizando uma estrutura adaptada do modelo utilizado por Gani e Légeron (2010) de acordo com a Figura 1, a torre estaiada foi modelada com elementos de *beam* e todos os nós foram rotulados. A torre é composta por um mastro com altura total de 52,18 metros, formado por barras maciças com diâmetro de 3 centímetros. Ela é sustentada por quatro cabos, cada um com diâmetro de 14,3 milímetros, pré-tensionados a 120 MPa. A torre foi dividida em uma malha de 4520 elementos, e os cabos foram subdivididos em 20 elementos cada.

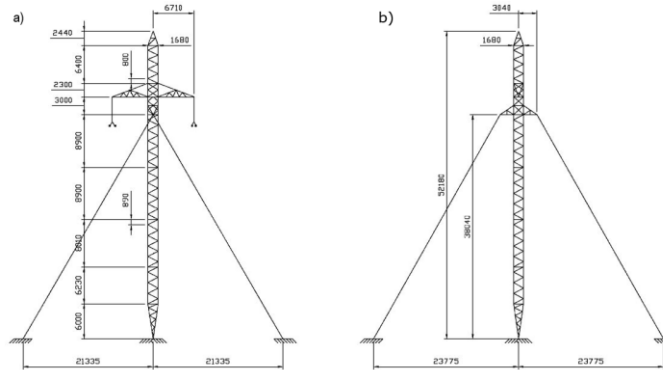
As propriedades físicas dos materiais utilizados para construir o modelo, como o, estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades físicas dos materiais

Propriedades físicas	Torre	Cabo
E (GPa)	200	186
ν	0,3	0,3
γ (kg/m ³)	7500	7500

Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 1 – Modelo da torre: a) Vista transversal; b) Vista longitudinal. Todas as dimensões em milímetros

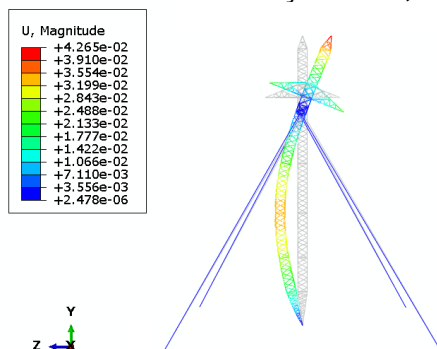


Fonte: Gani e Légeron (2010).

FREQUÊNCIAS NATURAIS

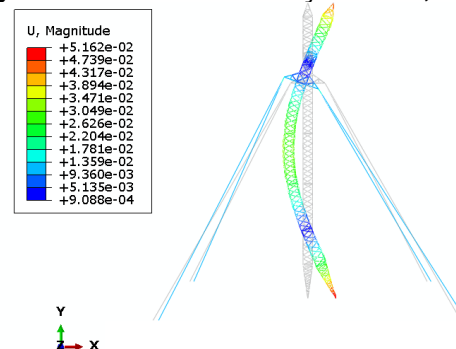
As frequências naturais da torre e os modos de vibração foram obtidos por meio de uma análise de vibração livre no Abaqus. As Figuras 2 e 3 apresentam graficamente os primeiros dois modos de vibração das frequências naturais mostradas na Tabela 2.

Figura 2. 1° modo de vibração $f_1 = 2,0186$ Hz.



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 3. 2° modo de vibração $f_2 = 3,145$ Hz.



Fonte: Autoria própria (2023).

ANÁLISE PUSHOVER

De acordo com a FEMA 356, o Procedimento Não Linear Estático, frequentemente chamado de análise *pushover*, utiliza técnicas não lineares simplificadas para estimar deformações sísmicas estruturais. A análise é realizada ao submeter a estrutura a cargas gravitacionais e a uma carga lateral monotônica de padrão crescente, representando a configuração das cargas laterais atuando na estrutura. Devido ao aumento das cargas laterais, os elementos começam a entrar em escoamento sequencialmente, resultando em uma redução de rigidez a cada etapa. Esse fato leva a análise a também ser conhecida como análise de escoamento sequencial (ASCE, 1996).

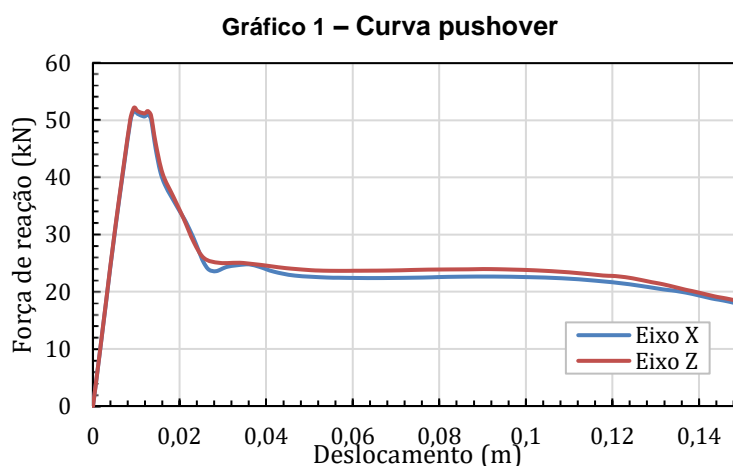
A análise *pushover* tem como objetivo avaliar o desempenho esperado da torre. Ela estima as demandas de força e deformações causadas por terremotos por meio de uma análise estática inelástica e, em seguida, compara esses resultados com as capacidades

disponíveis da estrutura. A análise fornece uma demonstração aproximada da distribuição interna de forças que surge quando a estrutura é submetida a forças inerciais além da faixa elástica, que já não podem mais ser resistidas (KRAWINKLER; SENEVIRATNA, 1998).

Para determinar a direção mais vulnerável a eventos sísmicos para a estrutura, foi realizada uma análise *pushover* nas direções “x” e “z” indicadas, utilizando um sistema de coordenadas dextrogiro, com o eixo x orientado na direção dos cabos da torre. Para executar a análise, um deslocamento uniforme crescente foi aplicado a todos os nós de cada face em consideração, excluindo o nó da base que está fixado ao solo.

RESULTADOS

O Gráfico 1 mostra a resposta de deslocamento do topo da estrutura no eixo X versus a soma das forças de reações dos nós da base da torre em ambas as direções.



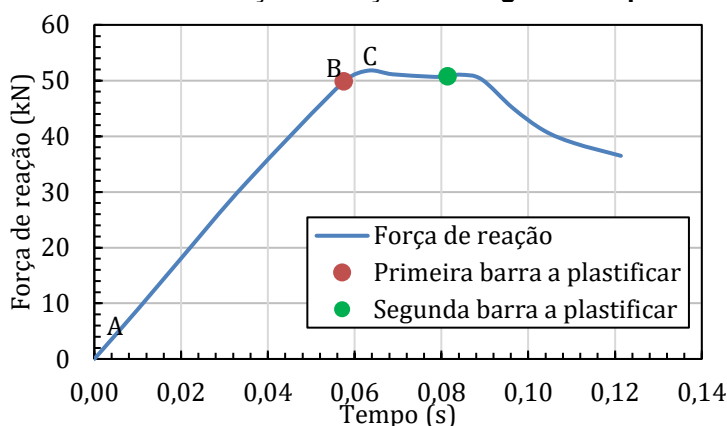
Fonte: Autoria própria (2023).

A partir do gráfico 1, pode-se identificar a força lateral máxima resistida pela estrutura em cada direção de carregamento. Com força aplicada na direção do eixo X a força máxima resistida foi de 51,8 kN, e no eixo Z 52,21 kN. Nota-se que devido à simetria da torre, as forças de pico, são muito próximas, sendo a direção X menos resistente à demanda sísmica.

O deslocamento para a análise *pushover* foi aplicado em um segundo, e o Gráfico 2 mostra os instantes iniciais no eixo X, quando os elementos começaram a plastificar. O segmento entre "A" e "B" é a parte elástica linear do comportamento força x deslocamento. "B" marca o ponto de escoamento do primeiro elemento da torre, e o segmento entre "B" e "C" reflete a deformação devido ao escoamento dessas barras. "C" representa a capacidade final da estrutura. As Figuras 4 e 5 mostram as duas primeiras barras que plastificaram na análise *pushover*.

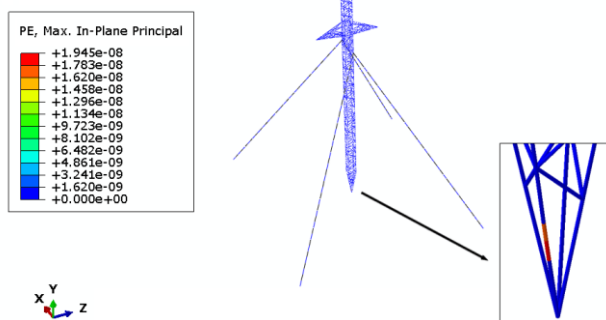
Na primeira barra, a plastificação ocorre em um instante de tempo de 57,5 milissegundos, correspondendo a um deslocamento de 8,63 milímetros. A segunda barra sofre plastificação em 81,4 milissegundos, com um deslocamento de 12,21 milímetros. No final da análise *pushover*, a forma deformada da estrutura corresponde à apresentada na Figura 6, sendo que a escala da figura está ampliada três vezes para permitir uma visualização mais clara das deformações.

Gráfico 2 – Força de reação ao longo do tempo.



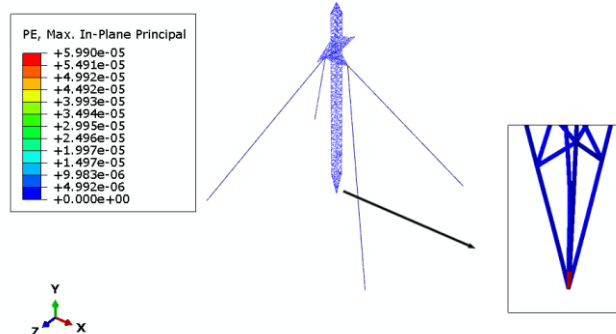
Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 4. Primeira barra a plastificar.



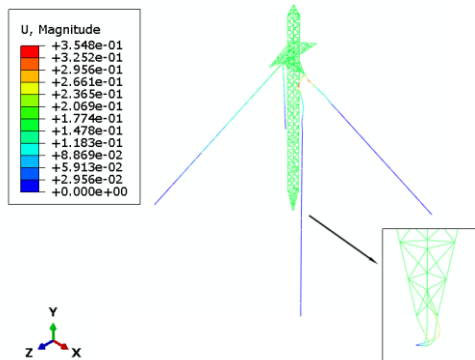
Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 5. Segunda barra a plastificar.



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 6. Forma deformada da estrutura no fim da análise pushover.



Fonte: Autoria própria (2023).

CONCLUSÕES

Os resultados indicaram deformações e plastificação em certas partes da estrutura, demonstrando a importância de projetar torres resistentes a eventos sísmicos extremos. Nota-se que pelo padrão de plastificação observado nos elementos da base da torre, esta apresentaria modo de falha localizado em casos de carregamentos sísmicos. Este tipo de modo de falha é indesejado uma vez que poucos elementos sofrem plastificação e assim a



falha localizada de elementos pode acarretar na falha global da estrutura. Com este tipo de estudo pode-se chegar à conclusão de quais elementos ou partes da torre precisariam de reforço estrutural para que dessa forma a capacidade resistente da torre como um todo, possa ser melhorada.

Este estudo contribui para uma compreensão mais profunda do comportamento das torres de transmissão de energia e ajuda na determinação de sua fragilidade diante de terremotos. Isso, por sua vez, pode levar a melhorias na segurança das estruturas e na confiabilidade do fornecimento de energia elétrica. O estudo pode ser complementado com realização de análises incrementais dinâmicas, em que a estrutura é de fato submetida a carregamentos de terremotos escalados progressivamente para que gerem níveis crescentes de danificação estrutural.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a Rúbia Mara Bosse por sua orientação, a UTFPR pelo apoio financeiro que proporcionou o desenvolvimento do projeto, ao professor Gustavo de Miranda Saleme Gidrão e ao João Lucas Salvador de Araújo com a parte de modelagem.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesse.

REFERÊNCIAS

APPLIED TECHNOLOGY COUNCIL (ATC-40). **Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings**. Redwood City, California, 1996.

CHAVES, R. A. **Fundações de torres de linhas de transmissão e de telecomunicação**. 30 abr. 2004. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/FACO-6AYNJF>. Acesso em: 09 de set. 2023.

FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY (FEMA). **Guidelines for the seismic rehabilitation of buildings (FEMA 356)**. Washington, D.C, U.S.A. 518 p. 2000.

GANI, F.; LÉGERON, F. **Dynamic Response of Transmission Lines Guyed Towers under Wind Loading**. Canadian Journal of Civil Engineering, vol. 37, no. 3, mar. 2010, pp. 450-465.

KRAWINKLER, H.; SENEVIRATNA, G. D. P. K. **Pros and cons of a pushover analysis of seismic performance evaluation**. Engineering Structures, v. 20, n. 4-6, p. 452-464, abr. 1998.

SÁNCHEZ, F. V. **Los terremotos y sus causas**. Instituto Andaluz de Geofísica y Prevención de Desastres Sísmicos, 24 p., 1994.