

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

**Estudo numérico do comportamento estrutural de torres metálicas
treliçadas com a consideração dos efeitos da não-linearidade
geométrica na determinação dos esforços**

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Ribeiro Paccola

Estudante: Moisés Marques Fiscarelli

moisesfiscarelli@usp.br

Objetivos

Este trabalho buscou a aplicação da formulação do Método dos Elementos Finitos Posicional – MEFP considerando uma análise não linear geométrica visando obter os esforços solicitantes das barras de torres metálicas treliçadas de linhas de transmissão de energia. O MEFP considera as posições nodais como sendo as incógnitas do problema, diferentemente da formulação clássica, que adota os deslocamentos. Para verificação das funcionalidades da formulação, foi elaborado um sistema estrutural com duas torres com os cabos condutores e para-raios, considerando hipóteses como rompimento de cabo, ação estática e dinâmica do vento para obtenção dos esforços em cada barra da torre treliçada.

Métodos e Procedimentos

A implementação e validação do MEFP foi possível a partir de Coda (2018), em que é apresentado todos os desenvolvimentos necessários. Para a geração do sistema estrutural, teve-se acesso ao arquivo DWG que continha uma das torres utilizadas em Nagel (2019), e as propriedades dos cabos foram retiradas de Oliveira (2006). O cálculo da força estática devido ao vento, teve como base a norma NBR 6123 (2023),

enquanto que a força no domínio do tempo foi obtida por meio da geração de um sinal aleatório utilizando série de Fourier a partir dos resultados do espectro do modelo de Davenport, fazendo adaptações convenientes. Para simular os cabos foi utilizado um método alternativo, apresentado em Silva (2020). Os elementos de treliça são adaptados para simular atuadores posicionais, associando ainda o uso de um modelo dinâmico modificado que elimina as forças inerciais, melhorando o condicionamento da matriz Hessiana. A análise aqui utilizada seguiu uma rotina pré-estabelecida. Inicialmente as duas torres são submetidas isoladamente aos carregamentos dinâmicos, e a partir das coordenadas dos pontos onde ocorre a conexão entre cabo e torre, os cabos são discretizados inicialmente como cabos retos. Em seguida, se faz uso do modelo dinâmico modificado para aplicação das cargas em 20 pseudo-passos de tempo, considerando um Δt de 0,1 segundo. Por último, em 10 passos, quando necessário, o cabo é alongado para atingir o comprimento calculado pelo modelo estático.

Os resultados dos esforços serão obtidos por meio do código implementado, e a visualização será feita por meio do software AcadView, desenvolvido no Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos, por Paccola e Coda (2018).

Resultados

A análise estática revelou que em relação à atuação do vento nas direções longitudinal e transversal à linha de transmissão, os esforços gerados são próximos, sendo a principal diferença os maiores deslocamentos que o vento transversal gera na torre. Além disso, a situação de rompimento de cabo mais desestabilizadora está associada ao rompimento dos cabos das extremidades, já que o rompimento do cabo condutor central pouco mobiliza as barras da estrutura da torre. Ademais, a situação que gera o maior desequilíbrio é a combinação do vento longitudinal com o rompimento de todos os cabos, Figura 1, já que é nessa direção que ocorre o rompimento dos cabos, amplificando então, o desequilíbrio na direção longitudinal.

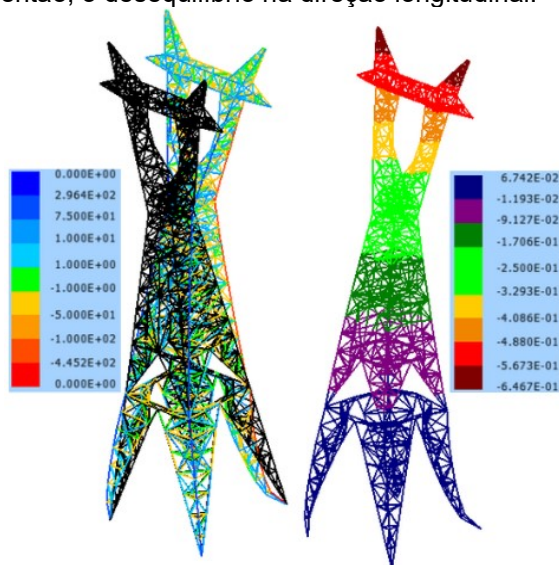


Figura 1: Esforços normais (kN), à esquerda, deslocamentos (m), à direita, considerando um fator de amplificação de 10 na representação da configuração deslocada.

A análise dinâmica avaliou a ação do vento transversal e longitudinal, que por sua vez é dividido em 2 casos. Os resultados da análise dinâmica em termos de esforços axiais e deslocamentos para as duas situações de vento agindo na direção longitudinal são bem próximos. A análise do vento na direção transversal revela esforços e deslocamentos

mais brandos. Uma última observação é o fato de que os maiores valores de compressão e tração, ocorrem nas barras próximas às bases que são consideradas engastadas.

Conclusões

Este trabalho, teve como objetivo fazer um estudo numérico com aplicação em torres de linhas de transmissão de energia considerando os efeitos da não-linearidade geométrica, com a implementação da formulação do MEFP, levando em consideração a análise estática e dinâmica. Nota-se de posse dos resultados obtidos, observando os grandes deslocamentos que as torres são submetidas, principalmente quando da ocorrência de vento na direção longitudinal, a importância de considerar a não linearidade geométrica para obtenção dos esforços em estruturas desse tipo. Ademais, destaca-se que existem alguns pontos que podem ser melhor analisados em trabalhos futuros, como uma outra rotina para buscar uma melhor interação entre a estrutura da torre e os cabos, além da simulação dinâmica do rompimento dos cabos.

Referências

- CODA, H.B. **O Método dos Elementos Finitos Posicional Sólidos e Estruturas - Não Linearidade Geométrica e Dinâmica**. São Carlos, SP: EESC-USP, 2018.
- NAGEL, G. **Otimização dimensional, geométrica e topológica de torres de linhas de transmissão do tipo delta**. 2019. - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.
- OLIVEIRA, M. I. R., **Análise estrutural de torres de transmissão de energia submetidas aos efeitos dinâmicos induzidos pelo vento**. 2006. Tese (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade do estado do rio de janeiro, 2006.
- PACCOLA, R. R., CODA, H. B.; **Software para pós-processamento em elementos finitos 2D e 3D**. Versão 3.0. 2018. Disponível em: https://set.eesc.usp.br/software/acadview/download_v3.php. Acesso em: 04 mar. 2024.