

ANÁLISE ESTÁTICA EQUIVALENTE DE TORRES ESTAIADAS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

Andréia Posser Cargnin

Acadêmica do curso de Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Maria

email: andreiacargnin25@gmail.com

João Kaminski Júnior

Professor/Pesquisador do curso de Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Maria

email: jkj@ufsm.br

Resumo. *A transmissão de energia elétrica das usinas aos centros consumidores se dá por meio de cabos condutores, suspensos nas cadeias de isoladores, presas em estruturas conhecidas como torres de linhas de transmissão (LT) de energia. Em linhas extensas, as torres são usualmente treliçadas e construídas com perfis de aço, do tipo cantoneira. Este trabalho objetiva comparar a resposta estática de uma torre metálica treliçada estaiada de LT submetida as “cargas estáticas equivalentes” de ruptura de cabo condutor e cabo para-raios, usualmente utilizadas em projeto, com a resposta dinâmica desta estrutura para as mesmas hipóteses de carga. Como metodologia, a estrutura foi modelada para análise estática no programa ANSYS, usando dois modelos: um apenas com elementos de treliça espacial e outro com elementos de pórtico espacial nos montantes e treliça espacial nas barras diagonais. Como resultados, espera-se que os valores da análise dinâmica sejam próximos dos valores da análise estática com “cargas equivalentes”.*

Palavras-chave: *Ruptura de cabo. Análise dinâmica. Estruturas metálicas treliçadas.*

1. INTRODUÇÃO

Devido à necessidade de expansão das LT no Brasil, o emprego de torres metálicas treliçadas, tanto estaiadas quanto autoportantes, é cada vez maior na construção de novas LT, além de serem

amplamente utilizadas como torres de telecomunicação.

No entanto, por mais que a necessidade tenha exigido que os engenheiros ampliem seus conhecimentos na área, verifica-se que há muitos casos em que estas estruturas colapsam, geralmente devido a carregamentos dinâmicos, como por exemplo a ação do vento e a ruptura de um ou mais cabos. Não menos importante que a ação do vento, a ruptura de cabo neste tipo de estrutura merece atenção, pois pode causar a ruína sequencial de torres, causando o conhecido efeito cascata.

Assim, para considerar as ações de natureza dinâmica no projeto de torres metálicas treliçadas, faz-se uma análise estática da mesma utilizando “cargas estáticas equivalentes”, que exigem menor demanda de processamento. No entanto, segundo Miguel *et al.* (2005), o uso deste método não se justifica mais, devido aos significativos avanços da área computacional e a necessidade de estudo do comportamento das estruturas de LT submetidas a ações dinâmicas. Um método que tem sido bastante utilizado para a solução de problemas complexos é o método da integração direta das equações do movimento, de forma explícita, empregando diferenças finitas centrais.

Assim, questões como a validade da simplificação adotada para análise do comportamento da estrutura submetida a “carregamentos estáticos equivalentes” e a redistribuição dos esforços quando ocorre a ruptura de um cabo, devem ser analisados cuidadosamente.

1.1 Método de integração direta das equações do movimento:

Conforme Kaminski *et. al.* (2005), o método de integração direta das equações do movimento, de forma explícita, empregando diferenças finitas centrais não exige a montagem da matriz de rigidez global da estrutura, uma vez que a integração se dá em nível de elemento.

Considerando que as massas estejam concentradas nos nós, isto é, que a matriz de massa M da estrutura é diagonal, e sendo a matriz de amortecimento C proporcional à M , o sistema de equações pode ser desacoplado, dispensando assim, a montagem da matriz de rigidez global K da estrutura para resolver o problema. Desta forma, o vetor de coordenadas nodais da estrutura $\vec{q}(t_i)$, em um tempo discreto t_i , é determinado a partir de um conjunto de vetores de coordenadas nodais $\vec{q}(t_{i-k})$, em tempo discretos anteriores t_{i-k} com $k = 1, 2, 3, \dots, i$, segundo a Equação 1:

$$\left[\frac{1}{\Delta t^2} M + \frac{1}{2\Delta t} C \right] \vec{q}(t_i + \Delta t) = \vec{F}(t_i) - \left[K - \frac{2}{\Delta t^2} M \right] \vec{q}(t_i) - \left[\frac{1}{\Delta t^2} M - \frac{1}{2\Delta t} C \right] \vec{q}(t_i - \Delta t) \quad (1)$$

onde: Δt é o intervalo de tempo de integração.

Logo, a expressão das diferenças finitas centrais para cálculo dos deslocamentos em um nó qualquer, nas direções x , y ou z , no tempo $t_i + \Delta t$ resulta em:

$$\vec{q}(t_i + \Delta t) = \frac{1}{1 + \frac{c_m \Delta t}{2}} \left[\frac{f(t_i) \Delta t^2}{m} + 2\vec{q}(t_i) - \left(1 - \frac{c_m \Delta t}{2} \right) \vec{q}(t_i - \Delta t) \right] \quad (2)$$

onde: q é a coordenada nodal (em m) na direção x , y ou z ;

$f(t_i)$ é a componente da força nodal resultante (em N) na direção correspondente no tempo t_i . É composta pelas forças

gravitacionais $f_g(t_i)$ (peso próprio e forças nodais externas) e pelas forças axiais $f_a(t_i)$ que surgem em razão das deformações axiais dos elementos de treliça;

$c_m = c/m$ é uma constante;

m é a massa nodal (em kg);

c é o coeficiente de amortecimento viscoso (em N s/m) proporcional à massa m .

1.2 Elementos da LT:

Cabos condutores e para-raios

Os cabos, sendo elementos formados pela união de fios de aço, oferecem resistência apenas a solicitações de tração, não possuindo, portanto rigidez à compressão.

Quando suspensos, os cabos apresentam a forma de uma catenária, sendo projetados na condição EDS (*Every Day Stress*), a qual para um condutor corresponde a aproximadamente 20% da sua carga de ruptura à tração UTS (*Ultimate Tension Stress*).

Segundo Kaminski *et al.* (2005), no caso de suportes com a mesma altura ($B = 0$ na Figura 1), essa catenária é simétrica em relação ao eixo central (centro do vão) onde se localiza o vértice, que é a maior flecha. Ainda, a flecha depende do comprimento do vão (L), da temperatura e da tração aplicada ao cabo quando este é fixado aos suportes. A Fig. 1 ilustra a situação de um cabo suspenso em dois pontos com alturas diferentes.

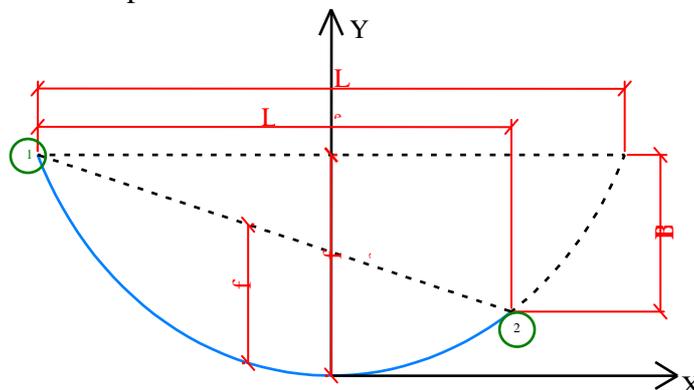


Figura 1: Cabo suspenso entre dois pontos (1 e 2) com alturas diferentes.

Barras das toress:

Segundo Kaminski (2007), as barras das torres metálicas de LT são usualmente galvanizadas, de seção cantoneira de abas iguais e conectadas através de parafusos. Para se ter conhecimento acerca da capacidade de carga de um barra deste tipo é necessário levar em consideração as tensões residuais e as imperfeições iniciais, as quais também são necessárias para a determinação da relação força x deslocamento axial da barra, tanto na tração quanto na compressão.

2. METODOLOGIA

Inicialmente será feita modelagem de uma torre metálica treliçada de LT estaiada para análise estática no programa ANSYS, versão 14, por meio de dois modelos:

2.1 Modelo 1:

Neste modelo, serão utilizados elementos de pórtico espacial nas barras de montantes e elementos de treliça espacial nas barras diagonais. Nos estais serão utilizados elementos de treliça, protendidos e capazes de suportar apenas os esforços de tração.

2.2 Modelo 2:

Este modelo será composto apenas por elementos de treliça espacial, em todas as barras da torre, sendo necessária a inclusão de barras fictícias, também de treliça espacial, para eliminar as hipostaticidades internas que devem surgir.

Nos estais serão utilizados elementos de treliça, protendidos e capazes de suportar apenas a esforços de tração.

Findada a modelagem, será aplicada aos estais uma protensão correspondente a 20% de sua carga de ruptura, a fim de garantir a ancoragem dos mesmos. A protensão aplicada nos cabos será obtida por iterações, aplicando deformações nos mesmos e analisando se os esforços que surgem correspondem a 20% da carga mínima de

ruptura e que o mastro central permaneça na vertical.

Estes dois modelos serão submetidos a cargas estáticas equivalentes de ruptura de cabo utilizadas em projeto, com o objetivo de avaliar a resposta estática.

Serão avaliados os esforços que surgem nas barras da torre de ambos os modelos, devido à ruptura de cabos para-raios e cabos condutores, estabelecendo-se um comparativo entre os dois casos.

A análise dinâmica com simulação da ruptura de um cabo condutor será realizada através da adaptação de um programa desenvolvido em FORTRAN, o qual utiliza o método da integração direta das equações do movimento, de forma explícita, empregando diferenças finitas centrais. A resposta, em termos de esforços axiais nas barras será comparada com a resposta estática usual de projeto.

3. RESULTADOS:

Espera-se que os resultados na análise dinâmica sejam próximos dos resultados da análise estática com as “cargas estáticas equivalentes” e que a hipótese de carga de ruptura de cabo condutor gere esforços nas barras da torre maiores que os esforços com a hipótese de carga de ruptura de cabo para-raios, uma vez que o cabo condutor é mais pesado, embora esteja em uma posição mais baixa na torre.

Agradecimentos

4. REFERÊNCIAS

KAMINSKI Jr, J; MIGUEL, L. F. F; MENEZES, R. C. R. Aspectos Relevantes na Análise Dinâmica de Torres de LT submetidas à Ruptura de Cabos. Décimo Oitavo Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (XVIII SNPTEE), Curitiba, Brasil, 2005.

KAMINKI Jr, J. Incerteza de Modelo na Análise de Torres Metálicas Treliçadas de

Linhas de Transmissão. Tese de Doutorado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul), 2007.

MENEZES, R. C. R.; KAMINSKI Jr, J; MIGUEL, L. F. F.; MIGUEL, L. F. F.; ALVA, G. M. S. Análise Dinâmica de Ruptura de Cabos num Ramos de LT. Décimo Segundo Encontro Regional Ibero-americano do CIGRÉ (XII ERIAC), Foz do Iguaçu, Brasil, 2007.

MIGUEL, L. F. F; MENEZES, R. C. R.; KAMINSKI Jr., J. Sobre a Resposta de Estrutura de LTs submetidas a Cargas Dinâmicas. Undécimo Encuentro Regional Ibero-americano Del CIGRÉ (XI ERIAC), Hernandarias, Paraguay, 2005.

MILANI, A. S. Análise de Torres Metálicas Treliças de Linhas de Transmissão considerando a Interação Solo-Estrutura. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria), 2012.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Até a presente data de envio deste trabalho, ainda não se tinha resultados, uma vez que a pesquisa foi iniciada recentemente. Entretanto, até a data de envio da versão final corrigida, os resultados estarão obtidos.