

COMPARAÇÃO DE METODOLOGIAS PARA ANÁLISE ESTÁTICA DO EFEITO DO VENTO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Hermes Carvalho^a, Gílson Queiroz^a, Ramón M. Vale^a, Carlos A. Nascimento^b e Thadeu A. Furtado^b

^a*Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos 662, Campus Universitário, Pampulha, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. hermes2000@yahoo.com.br, gilson@dees.ufmg.br, ramon@demec.ufmg.br*

^b*Companhia Energética de Minas Gerais, Av. Barbacena 1200, Santo Agostinho, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. caxandre@cemig.com.br, thadeufurtado@uol.com.br*

Palavras Chaves: Linhas de transmissão, Força de vento, Análise de cabos, Modelagem tridimensional de linhas de transmissão.

Resumo. Este artigo apresenta comparações entre esforços solicitantes estáticos devidas à ação do vento em uma torre de transmissão, obtidos utilizando-se duas metodologias diferentes. A primeira metodologia segue as recomendações da norma brasileira NBR 5422, freqüentemente usada no dimensionamento de torres de transmissão no Brasil, com o modelo estrutural constituído apenas da torre. Neste modelo simplificado também foram avaliadas as forças devidas ao vento conforme as prescrições da norma NBR 6123. A segunda metodologia utilizada para a determinação dos esforços provenientes do vento consiste na aplicação direta de pressão sobre a torre e sobre os cabos, com base nas velocidades de vento de referência e com os cabos e isoladores integrando o sistema estrutural. Em ambas as metodologias foram aplicados todos os fatores de caracterização de topografia correspondentes à região na qual a torre em estudo se localiza. Para a obtenção dos esforços solicitantes provenientes dos carregamentos de vento foram construídos modelos tridimensionais através do método dos elementos finitos, contemplando análise não-linear geométrica dos cabos e de toda a estrutura. Os resultados mostraram que os esforços solicitantes devidos à atuação de forças de vento conforme a norma 6123 são superiores em 46% em relação aos obtidos com a norma 5422, principalmente devido às forças nos cabos e períodos de integração sugeridos por esta norma. O modelo completo, quando comparado ao modelo simplificado, apresentou esforços solicitantes superiores. Além disso, permitiu a avaliação de solicitações oriundas de disposições geométricas do sistema, incluindo carregamentos nos vãos assimétricos de cabos adjacentes. Tais fatos indicam a necessidade de revisão dos procedimentos atuais utilizados para cálculo das estruturas de torres de transmissão.

1 INTRODUÇÃO

As preocupações relativas aos carregamentos resultantes da ação dos ventos sobre componentes de linhas aéreas de transmissão vêm crescendo no Brasil nos últimos anos, como também em outros países, à medida que as ocorrências de quedas de estruturas resultam em riscos de maior importância num sistema de fornecimento de energia elétrica. Uma reportagem do jornal Estado de São Paulo noticiou que no dia 4 de novembro de 1997 ventos de até 36 m/s provocaram o colapso de 10 torres de transmissão da usina de Itaipu. Este caso representa somente um exemplo, pois desde o início das edificações de torres metálicas treliçadas, vários são os registros de colapso já registrados devidos aos ventos com alta intensidade. Isto sugere que na ausência de outro fenômeno, o carregamento do vento pode ser bastante severo a ponto de causar o colapso de torres de linhas aéreas.

Com esta motivação, este artigo científico tem como objetivo apresentar os resultados obtidos através de uma análise numérica de uma torre de transmissão de suspensão de 28 metros de altura, componente de uma linha aérea fase/fase com potência de 138 kV. Este estudo mostra um modelo tridimensional em elementos finitos considerando não-linearidades geométricas e cálculos iterativos de grandes deslocamentos, sendo o sistema estrutural composto de cabos, cadeias de isoladores e torre. Foi demonstrada a importância desta modelagem para a avaliação dos esforços nos principais elementos estruturais das torres sob ação do vento. O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Brasil - CNPq e do programa de P&D da Aneel/CEMIG (P&D-223: D223 – “Desenvolvimento e otimização de modelos de camada limite atmosférica para aplicação em projeto de linhas aéreas”).

2 DESCRIÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

O estudo em questão se concentra em uma torre treliçada em aço tipo suspensão em alinhamento reto, projetada em perfis cantoneira com padrões em polegadas, aço carbono ASTM-A36 e ligações parafusadas. Essa torre pertence a um sistema de transmissão de potência de 138 kV, composto por três condutores elétricos tipo Linnet 336.4 MCM (diâmetro de 18 mm) e um cabo pára-raios HS 5/16 in (diâmetro de 7,95 mm). Os vãos do trecho analisado são de 400 e 882 metros respectivamente, sendo as cadeias de isoladores compostas por discos com corpo isolante de vidro no formato de bielas de suspensão de 1,42 m de comprimento. A Figura 1 apresenta um esquema com as principais dimensões da estrutura da torre e da linha de transmissão analisada.

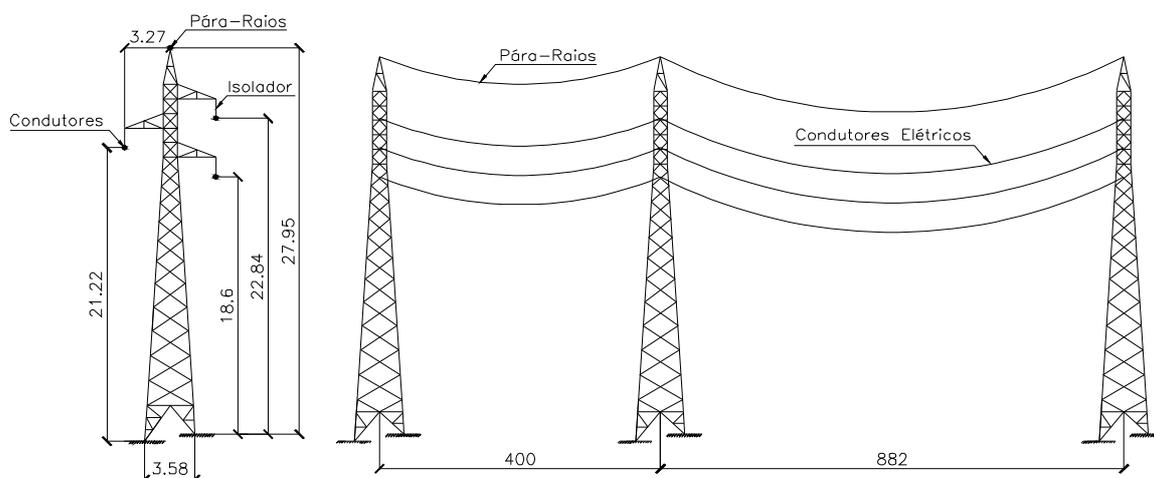


Figura 1. Figura esquemática da torre e da linha de transmissão em estudo [m].

Na simulação do comportamento de um sistema de transmissão sob ação do vento, os condutores e pára-raios devem ser incluídos no modelo tridimensional em elementos finitos, que deverá ser composto no mínimo pela torre analisada e pelos vãos dos cabos adjacentes.

O modelo numérico foi construído no software ANSYS v.11, utilizando elementos de pórtico e treliça tridimensionais. Esse modelo contém rotinas em linguagem APDLs (ANSYS Parametric Design Language) para construção dos sistemas estruturais e aplicação de condições de contorno e de carregamentos, de maneira a parametrizar e otimizar os tempos gastos na modelagem.

Na discretização da estrutura, as colunas da torre são modeladas com elementos de pórtico espacial (beam 4). Utilizam-se estes elementos para avaliar a grandeza dos momentos fletores. Os contraventamentos, cadeias de isoladores e cabos são modelados através de elementos de treliça espacial (link 8 e link 10 para cabos). Nos cabos é utilizado o keyoption 3 igual a 0, condicionando os esforços no elemento somente a tração. Em caso de compressão, os mesmos terão suas translações axiais liberadas e conseqüentemente perderão sua função estrutural no modelo.

Para garantir a estabilidade numérica do modelo, é necessário inserir valores iniciais de deslocamento e deformação axial para os cabos, devido às grandes amplitudes de deslocamentos. Os valores de deformação inicial são baseados nos valores EDS (Every-Day Stress) de pré-tensionamento, sugeridos pela NBR 5422. Uma vez aplicadas as deformações iniciais, a solução do modelo torna-se iterativa e não-linear. A Tabela 1 apresenta um resumo dos valores de deformação utilizados para cada cabo.

Tipo de Cabo	Módulo de Elasticidade (GPa)	Deformação Inicial
Linnet 336,4 MCM	55,6	$1,052 \times 10^{-3}$
HS 5/16 in	200	$1,370 \times 10^{-4}$

Tabela 1. Propriedades dos cabos e deformações iniciais.

Com a modelagem dos cabos, o modelo será utilizado quanto à aplicação das cargas advindas do vento de duas maneiras distintas:

No primeiro momento será realizada uma análise simplificada, onde as cargas horizontais serão aplicadas nas mísulas, no ponto de fixação das cadeias de isoladores. Este primeiro modelo, denominado modelo simplificado, segue as recomendações da norma de referência

NBR 6123 e contempla os efeitos decorrentes do desnível entre as torres adjacentes.

No segundo momento, as cargas serão aplicadas em forma de pressão de vento sobre os cabos no modelo denominado como completo. Uma vez que a solução do modelo é iterativa, a aplicação de pressão sobre os cabos ocorre de maneira incremental na estrutura, que teoricamente, já está deformada devido ao pré-tensionamento dos cabos e o peso próprio do conjunto.

Para que exista diferença substancial entre as análises, as cadeias de isoladores deverão ser modeladas como bielas de suspensão para representar o comportamento real do sistema formado por torres e cabos elétricos expostos a ação de forças de vento. Devido à presença de um elemento bi-rotulado entre a mísula e os cabos, ocorrerão grandes deslocamentos nas extremidades das cadeias de isoladores. Tal fato indica a necessidade de aplicar sobre o modelo uma formulação de grandes deslocamentos.

Para efeito de interação solo-estrutura, um modelo em elementos finitos foi analisado por Rodrigues (1999) e os resultados comprovaram que, para análises estáticas e dinâmicas de torres sob ação do vento não importa o tipo de fundação utilizada.

3 CÁLCULO DAS CARGAS DE VENTO ATUANTES NA ESTRUTURA

Com base nas recomendações da norma brasileira NBR 6123, foram obtidos os parâmetros estatísticos e aerodinâmicos necessários para a definição das forças de vento atuantes sobre os elementos do modelo.

A velocidade básica do vento (V_0), função da localização da estrutura, é multiplicada pelos parâmetros S_1 (fator topográfico), S_2 (fator de rugosidade do terreno) e S_3 (fator estatístico) para a determinação da velocidade característica do vento (V_k), conforme apresentado na Eq. (1).

$$V_k = V_0 S_1 S_2 S_3 \quad (1)$$

A pressão dinâmica (q) devida ao escoamento de vento sobre elementos estruturais da torre pode ser obtida através da Eq. (2).

$$q = 0.613V_k^2 \quad (2)$$

Sabendo-se que a estrutura em estudo pertence a um sistema de transmissão instalado na região de Belo Horizonte – Minas Gerais – Brasil, o mapa de isopletas da NBR 6123 recomenda a velocidade básica do vento igual a 32 m/s (média sobre 3s e período de retorno igual a 50 anos). O fator topográfico pode ser tomado igual a 1, que indica terreno no topo de taludes ou morros. O fator estatístico também pode ser tomado igual 1, valor este recomendado para os casos em que a ruína total ou parcial da estrutura possa afetar a segurança e a possibilidade de socorro. A determinação do fator de rugosidade do terreno pode ser obtida através da Eq. (3).

$$S_2 = b F_r \left(\frac{z}{10} \right)^p \quad (3)$$

Para a determinação do fator de rugosidade considera-se o terreno como Categoria IV (zona florestal) e Classe B (dimensão vertical superior a 20 metros). A partir dessas definições é possível determinar os valores dos parâmetros b e p (parâmetros para definição do fator de rugosidade do terreno) e Fr (número de Froude), iguais a 0,85, 0,125 e 0,98 respectivamente. Discretizando as faixas de altura determina-se o valor do fator S_2 , bem como a velocidade característica do vento conforme exposto na Tabela 2.

Altura z [m]	Fator S_2	Velocidade característica do vento V_k [m/s]	Pressão dinâmica q [N/m ²]
0 a 5	0,76	26,89	443,18
5 a 10	0,83	29,32	527,03
10 a 15	0,88	30,85	583,26
15 a 20	0,91	31,98	626,75
20 a 30	0,96	33,64	693,61

Tabela 2. Fator S_2 , velocidade característica e pressão dinâmica para faixas distintas de altura.

Na primeira análise realizada, as resultantes horizontais devidas ao vento são aplicadas diretamente sobre a mísula. A resultante horizontal composta pela força de arrasto do vento perpendicular aos cabos pode ser determinada através da Eq. (4).

$$F_a = C_a q l d \quad (4)$$

Para o cálculo da força de arrasto foram considerados os vãos das cadeias adjacentes (1 igual a 400 e 882 metros), diâmetro dos cabos (d) igual a 0,0079 e 0,0183 metros e coeficiente de arrasto (C_a) igual a 1.1. Blessmann (1990) apresentou diversos estudos e comparações e Silva et al (2005) realizou experimentos que comprovaram a validade dos coeficientes de arrasto considerados.

Para a realização da segunda análise, a pressão apresentada na Tabela 2 foi aplicada diretamente sobre a projeção das áreas dos cabos.

4 RESULTADOS

Com a aplicação do carregamento devido ao peso próprio e a análise não linear com deslocamentos e deformações iniciais, podem-se observar as catenárias dos cabos com os respectivos esforços de tração. As Figuras 2 e 3 apresentam os deslocamentos verticais que compõe as catenárias, com os respectivos esforços de tração.

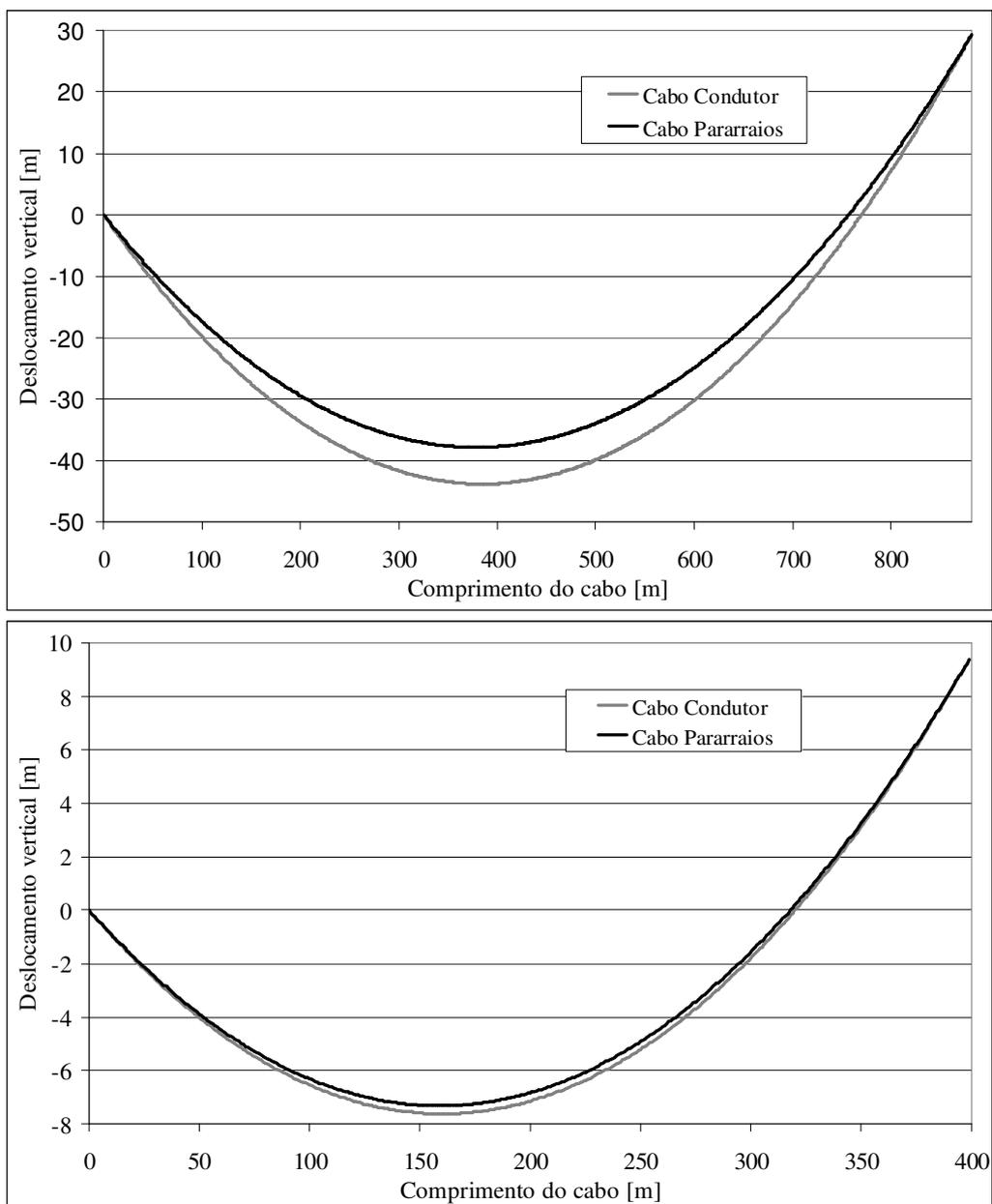


Figura 2. Deslocamentos verticais (dy) nos cabos com atuação do peso próprio [m].

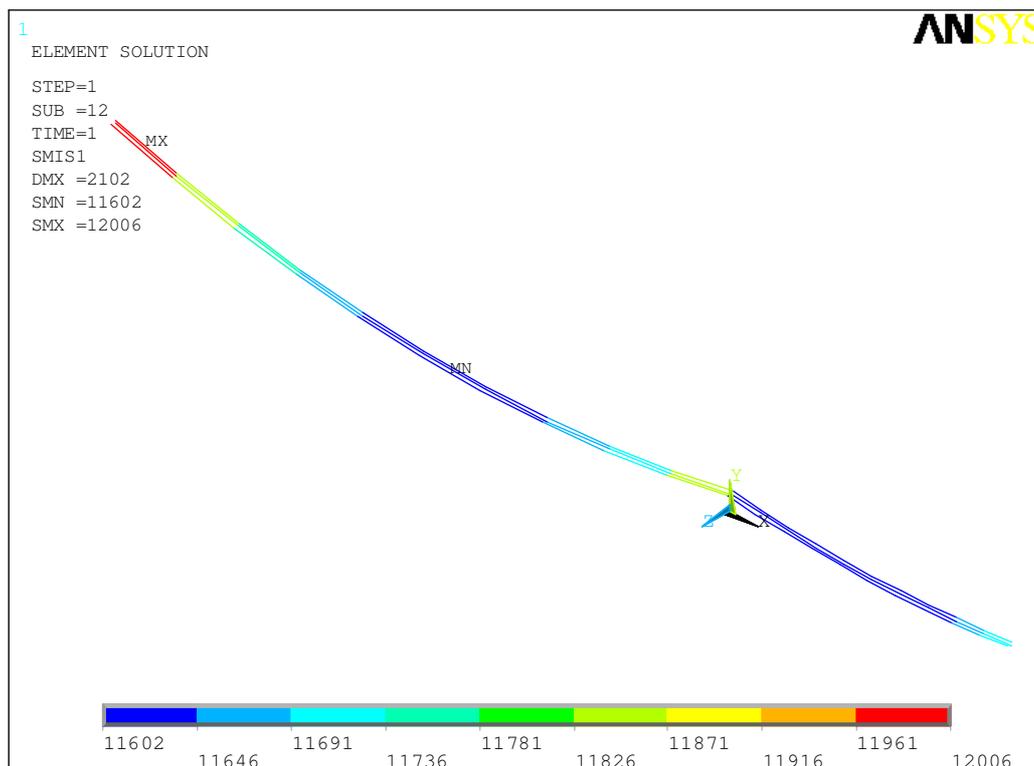


Figura 3. Esfuerzos normales nos cabos da linha de transmissão devido ao peso próprio [N].

As Figuras 4 e 5 apresentam os esforços normais obtidos nas duas simulações realizadas, tanto na aplicação das reações nas mísulas quanto na aplicação direta de pressão sobre os cabos, respectivamente. Analisando-se as figuras pode-se observar que as forças máximas calculadas através do modelo completo, com atuação do peso próprio, apresentaram-se próximas dos obtidos no modelo simplificado considerando o desnível entre torres, com diferenças da ordem de 3%.

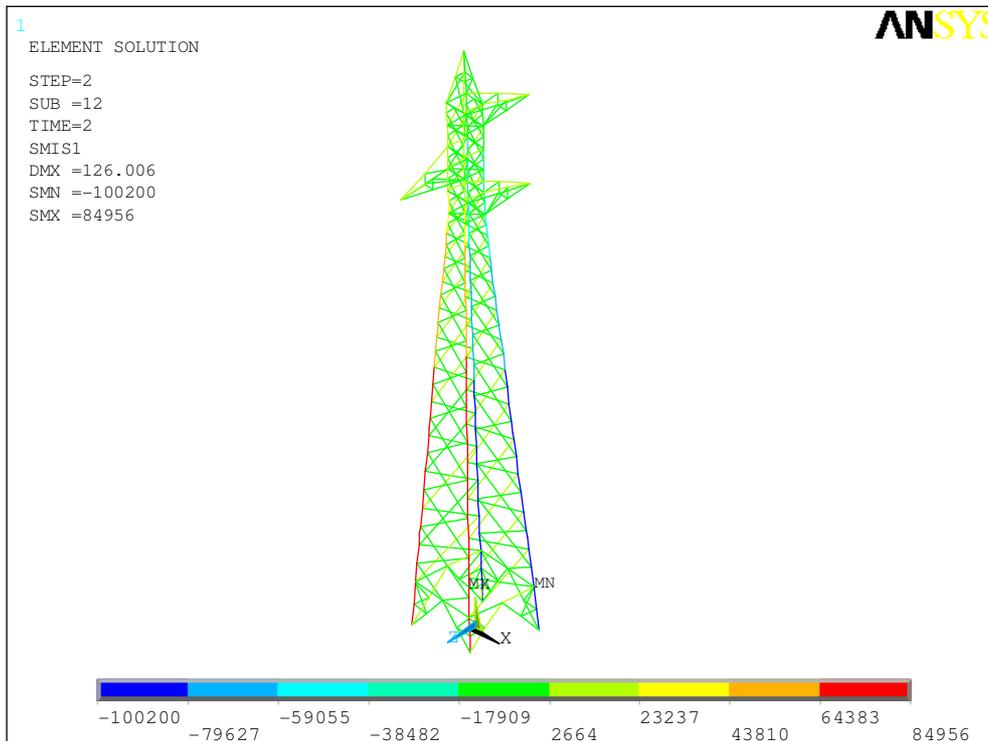


Figura 4. Esforços normais devido à aplicação das reações horizontais na mísula (modelo simplificado) [N].

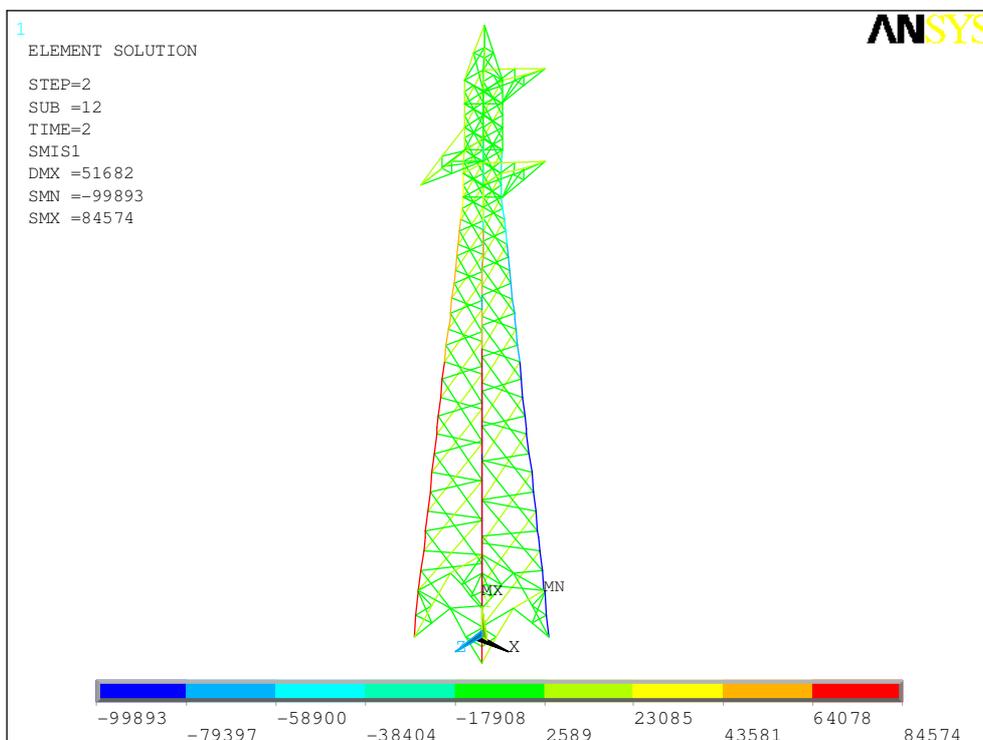


Figura 5. Esforços normais devido à aplicação direta de pressão de vento sobre os cabos (modelo completo) [N].

A Figura 6 apresenta os esforços de tração nos cabos da linha de transmissão devido à aplicação direta de pressão sobre estes, para uma velocidade básica de vento igual a 32 m/s.

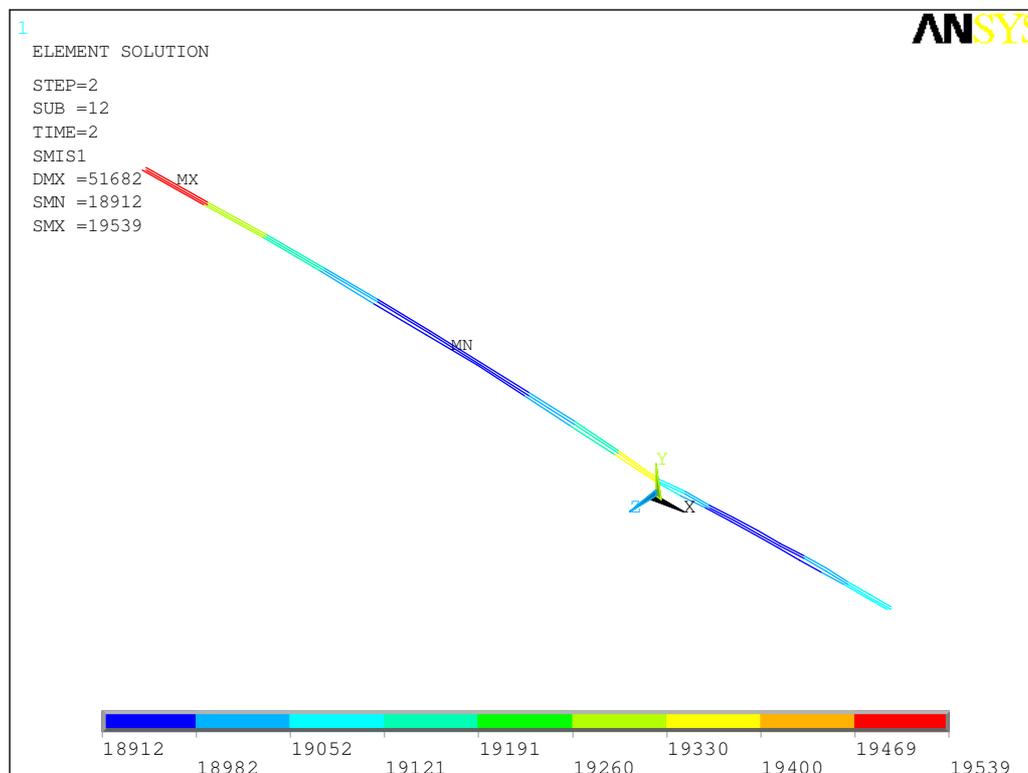


Figura 6. Esforços normais nos cabos devido à aplicação direta de pressão do vento [N].

Segundo as prescrições da norma NBR 5422, os esforços normais de tração nos cabos para a condição de vento máximo não deverão exceder 50% do valor da máxima tração resistente. A Tabela 3 apresenta os valores obtidos da análise numérica e os valores permitidos.

Tipo de Cabo	Limite de Ruptura [N]	Tração máxima prescrita NBR 5422 [N]	Tração máxima do modelo [N]
Linnet	62715	31357	19539
HS 5/16 in	35610	17805	9404

Tabela 3. Comparação entre os esforços normais de tração nos cabos.

Observa-se que, mesmo aplicando as cargas mais elevadas de vento (NBR 6123), os valores de tração permitidos por norma são superiores aos determinados através do modelo numérico (60,5% para os condutores e 89,3% para os pararraios). Há outros efeitos a considerar além do vento, por exemplo, a temperatura. Contudo, utilizando-se esta metodologia numérica, os cabos poderão ser otimizados em relação às suas solicitações mecânicas devidas ao vento.

Através dos deslocamentos das extremidades das cadeias de isoladores também é possível calcular o valor do ângulo de balanço dos isoladores. O modelo numérico completo (torre e cabos) indicou um ângulo de 62°, enquanto que no cálculo analítico conforme a NBR 5422 o valor encontrado foi de 52°. Em ambas as verificações foram utilizadas as mesmas velocidades básicas (32 m/s).

5 COMENTÁRIOS SOBRE OUTRAS SITUAÇÕES

A fim de avaliar a influência de cada variável (disposição geométrica, carregamento e não-linearidades) sobre os resultados, outros modelos numéricos foram elaborados.

5.1 Avaliação dos efeitos de 2ª ordem no modelo simplificado

Utilizando o mesmo modelo numérico simplificado descrito anteriormente avalia-se somente o efeito da análise não-linear sobre a estrutura da torre separada. As cargas foram calculadas supondo a linha de transmissão nivelada e ambos os vãos adjacentes iguais a 882 metros. Com estas condições geométricas isolam-se as influências devidas aos desníveis entre torres. As Figuras 7 e 8 apresentam os esforços normais na torre contemplando as análises de 1ª e 2ª ordem, respectivamente.

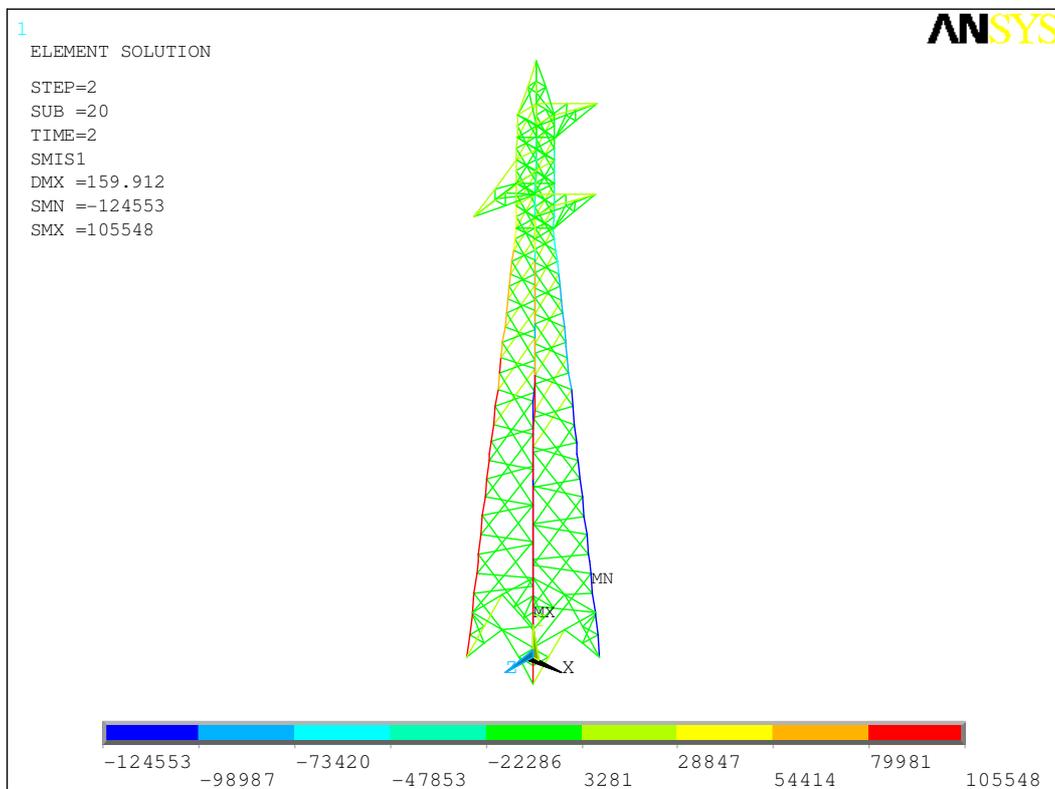


Figura 7. Forças normais no modelo simplificado com peso próprio e vento – Análise 1ª ordem [N].

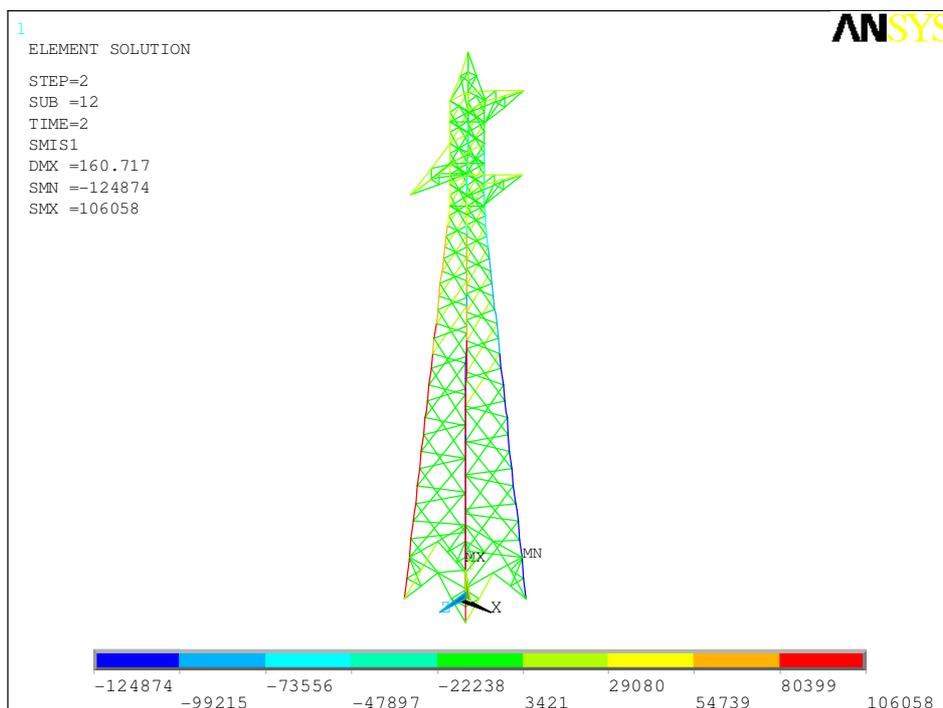


Figura 8. Forças normais no modelo simplificado com peso próprio e vento – Análise 2ª ordem [N].

Os deslocamentos laterais (z) ocasionados pela atuação das forças de vento encontram-se expostos na Figura 9.

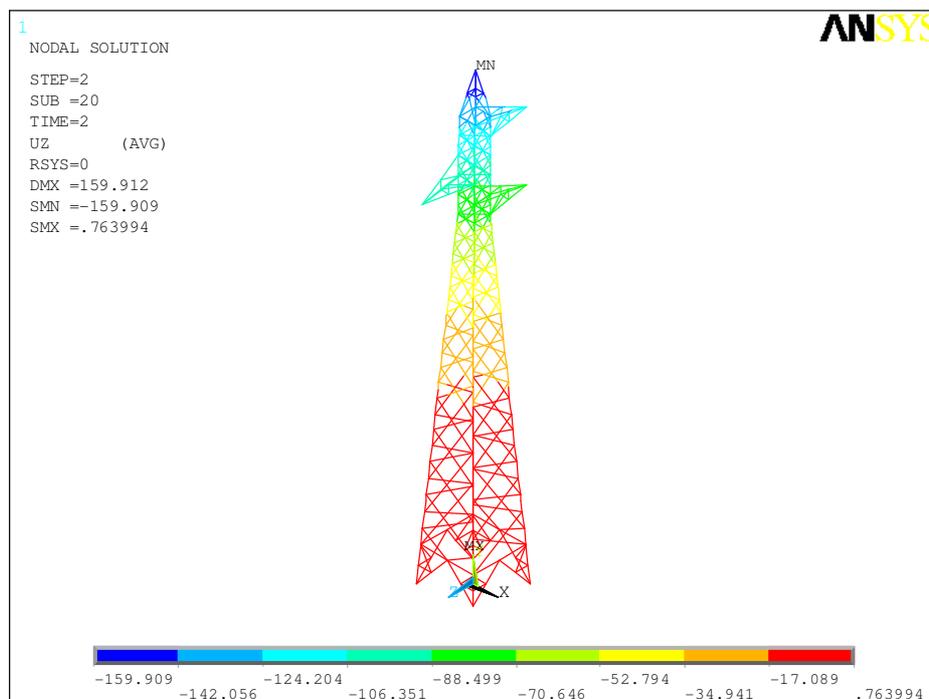


Figura 9. Deslocamentos laterais (z) com a atuação do peso próprio e vento – Análise 2ª ordem [mm].

Pode-se observar que as análises em 1ª e 2ª ordem apresentaram resultados semelhantes. Tal fato ocorre devido à característica de baixa deslocabilidade da torre, evidenciada nos campos de deslocamentos resultantes nas análises de 1ª e 2ª ordem.

5.2 Avaliação das cargas longitudinais devido à diferença de tração entre cabos

No modelo original avaliado no item 4 a resultante longitudinal foi pequena, devido à pequena diferença entre as cargas transversais de vento aplicadas nos cabos ocasionada pelos diferentes tempos de integração utilizados. Porém, existem situações em que esta diferença pode ser maior, como no caso do cálculo das cargas de vento conforme a NBR 6123 sem a utilização do ANEXO A desta norma. O uso deste anexo foi inserido em uma das revisões desta norma e proporciona a utilização de cargas de vento menores. No caso em análise, os cabos do sistema estrutural poderiam ser classificados como classe C, ou seja, estruturas com dimensões acima de 50 metros.

Outra situação possível de carregamento é a consideração da atuação do vento em somente um dos vãos dos cabos, sendo o outro vão pouco afetado. Esta consideração é razoável, uma vez que os comprimentos envolvidos nos sistemas de transmissão são geralmente elevados. A Figura 10 apresenta as forças normais na estrutura da torre para a consideração do peso próprio e das cargas de vento (NBR 6123) atuantes somente em um dos vãos da linha de transmissão.

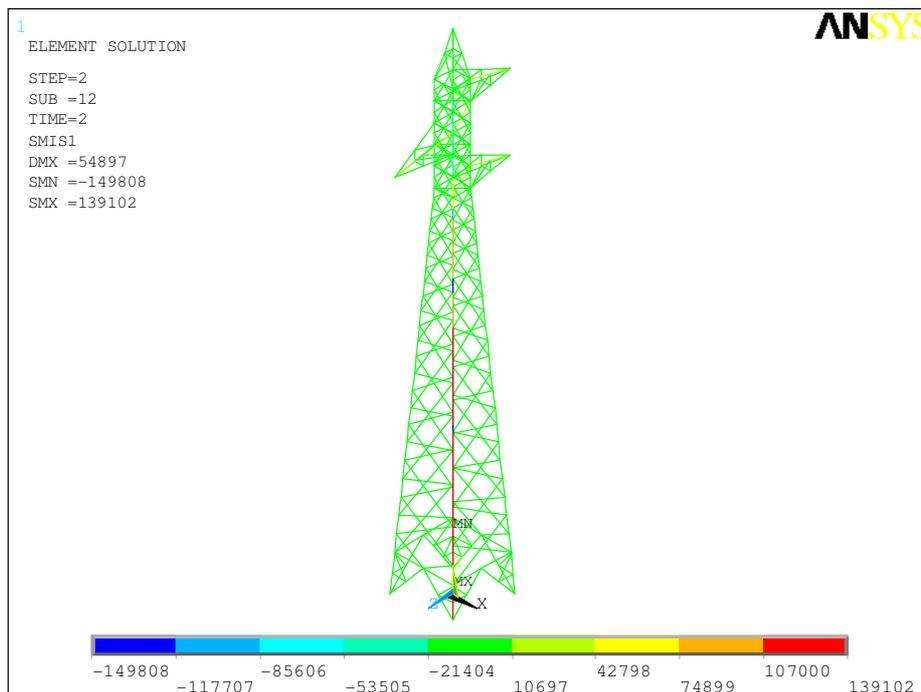


Figura 10. Forças normais na torre do modelo completo com atuação do vento em somente 1 vão dos cabos [N].

A Tabela 4 apresenta a comparação entre as reações nas bases da torre do modelo simplificado e do modelo completo com a mesma consideração de carregamento, ou seja, torres niveladas, vãos de 882 metros simétricos e vento atuando em somente um dos vãos da linha de transmissão.

Direções	Modelo completo			Modelo simplificado		
	X	Y	Z	X	Y	Z
Base 1 [N]	9208	-141490	12646	0	-63526	6512
Base 2 [N]	236	15837	4296	0	84249	7394
Base 3 [N]	12411	155750	10782	0	82677	7413
Base 4 [N]	162	11677	24	0	-61611	6421
Resultante [N]	22017	41774	27748	0	41789	27741

Tabela 4. Reações das bases da torre do modelo completo e simplificado considerando as cargas de vento somente em um dos vãos da linha.

O somatório das resultantes na direção Y e Z apresentaram o mesmo valor para ambos os modelos, porém, a carga de arrancamento da fundação (-141490 N) superou em 120% o valor da carga de arrancamento do modelo simplificado (-63526 N). Esta diferença é justificada pelo aparecimento de uma reação na direção longitudinal de valor elevado, ocasionada pelo desequilíbrio entre os vãos dos cabos do sistema estrutural.

5.3 Interação dos efeitos de 2ª ordem com o desnivelamento entre torres

Com a atuação das cargas de vento nos cabos do sistema estrutural ocorre a movimentação do centro de gravidade das catenárias. No caso da torre central do sistema se localizar abaixo das adjacentes, o centro de gravidade se desloca no sentido das torres adjacentes, causando uma diminuição das resultantes verticais nas bases desta torre e conseqüentemente um aumento nas adjacentes. Em uma simulação de 1ª ordem tal efeito não poderia ser captado, uma vez que a consideração das cargas verticais dos cabos na posição deformada do sistema não é considerada na análise.

Na simulação exposta no item 4 que apresenta o modelo completo com desnível entre torres adjacentes e vãos diferentes pode-se observar uma redução de 4% na somatória das reações verticais da torre. Essa redução comprova a existência da interação entre os efeitos de 2ª ordem e o desnivelamento entre torres no sistema estrutural.

6 CONCLUSÕES

Foram comparados dois modelos utilizados para análises de estruturas de torres de transmissão, um simplificado (contendo somente a torre) e outro completo (torre, cabos e cadeias de isoladores).

Basicamente pode-se observar que o sistema estrutural está sujeito a atuação de efeitos de 2ª ordem, oriundos basicamente de carregamentos assimétricos e das disposições geométricas entre torres. Estes efeitos podem influenciar pouco nas linhas com vãos pequenos mas a tendência é que sua influência seja pronunciada com a utilização de maiores vãos de cabos e intensidades de vento.

O modelo simplificado tem sua utilização limitada, uma vez que não é capaz de captar todos os efeitos de 2ª ordem mencionados, evidenciados claramente no modelo completo do sistema estrutural. Assim, recomenda-se aos projetistas e calculistas a utilização do modelo completo para qualquer configuração de carregamento ou disposição geométrica, contemplando assim os efeitos de 2ª ordem, sendo eles representativos ou não.

7 REFERÊNCIAS

- ABNT, NBR 5422, Projeto Mecânico de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil, 1985.
- ABNT, NBR 6123, Forças devidas ao Vento em Edificações, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil, 1988.
- Bathe, K. J. , “Finite Element Procedures”, 1996, Prentice-Hall Inc, New Jersey.
- Blessmann J, Aerodinâmica das Construções, 2ª edição, Ed. Sagra, Porto Alegre – RS, Brasil, 1990.
- Carvalho H., Metodologias para análise estática do efeito do vento em linhas de transmissão, Dissertação do Mestrado, DEMEC/UFMG, Belo Horizonte, Brasil, 2010.
- Happoldt H., “Centrales Y Redes Eléctricas”, 1971, Springer-Verlag, Barcelona, Espanã.
- Rodrigues RS, Colapso de Torres TEE sob Ação do Vento, Tese de Doutorado, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 1999.
- Simiu, E. e Scanlan, R.H. “Wind Effects on Structures. Na Introduction to Wind Engineering, 2o ed., John Wiley and Sons, New York, N.Y., 1986.