

INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO NA ANÁLISE MODAL DE TORRES ESTAIADAS PELO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.

Eduardo Henrique Guimarães

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica,
CEP-38400-902-Uberlândia, MG, Brasil

[eduardo_hge@yahoo.com.br](mailto:hge@yahoo.com.br)

Sonia A. G. Oliveira

sgoulart@mecanica.ufu.br

Antonio Pedro Clapis

apclapis@mecanica.ufu.br

Resumo: Apresenta-se nesse trabalho uma avaliação da influência das condições de contorno na análise modal de torres de aço estaiadas, visando a comparação com os resultados das frequências naturais obtidos pela NBR6123/1988. Determinaram-se por meio de análise modal as frequências e modos naturais de vibração da estrutura, utilizando o método de elementos finitos. Pode-se observar que para as estruturas analisadas a equação da norma fornece um valor que difere dos encontrados através do programa Ansys. Constatou-se ainda que para este tipo de estrutura a alteração das condições de contorno afeta os modos naturais de vibração da estrutura e consequentemente o valor das solicitações advindas do vento utilizadas no dimensionamento das mesmas.

Palavras-chave: estruturas de aço estaiadas, análise estrutural, condições de contorno, análise modal, torres de transmissão.

1. INTRODUÇÃO

Torres estaiadas são estruturas muito leves e esbeltas que apresentam um comportamento estrutural complexo, são utilizadas na transmissão de ondas eletromagnéticas e também estão sendo empregadas como suporte para coletores de energia solar e estruturas off-shore.

Nos últimos anos ocorreram grandes avanços na área de telecomunicações, acompanhados por inúmeros investimentos no setor por parte dos governos ou mesmo da iniciativa privada, resultando em um aumento da utilização destes serviços e na ampliação de sua velocidade de expansão, diversidade e alcance, (MENIN, 2002).

As torres estaiadas quando sofrem deflexões excessivas ou vibram podem interferir na comunicação e no sistema de controle, resultando em falhas de serviço. De acordo com MAGDULA et.al. (apud PASQUETTI, 2003), desde 1959 até recentemente já foram relatados cerca de cem casos de colapso de torres estaiadas nos EUA, por este motivo é importante o conhecimento sobre sua estabilidade na presença de cargas estáticas e dinâmicas.

Este tipo de estrutura treliçada tem o vento como um de seus principais carregamentos, o qual é dinâmico por natureza. Seu efeito sobre a estrutura como um todo é fazê-la vibrar nas suas frequências naturais, induzindo assim solicitações dinâmicas. O movimento da torre é geralmente dominado pelo amortecimento estrutural, sendo também influenciado pelo amortecimento aerodinâmico, (LOREDO-SOUZA et.al.,2005).

O objetivo deste trabalho foi analisar a influência das condições de contorno na análise modal de torres estaiadas e fazer um comparativo entre os valores encontrados através do Método dos Elementos Finitos com o encontrado com a equação fornecida pela NBR6123/1988. Construiu-se um modelo tridimensional da estrutura com altura de 105 m (cento e cinco metros), para o qual foi realizada a análise modal utilizando o módulo de análise modal do programa Ansys. Verificou-se que existe uma divergência entre os valores encontrados pela equação da norma e os encontrados numericamente, observou-se também que as condições de contorno alteram os valores das frequências naturais e estas por sua vez alteram o valor da pressão dinâmica do vento.

2. TOPOLOGIA ESTRUTURAL

Torres estaiadas são estruturas metálicas de aço galvanizado composta de um mastro treliçado, suportado por estais, para instalação de antenas na frequência de SHF, UHF e VHF, (Sistema de documentação Telebrás, Anatel, www.anatel.gov.br).

O mastro central é constituído de módulos, conforme Figura 1, com comprimentos que, em geral, variam de cinco a seis metros. Os módulos, por sua vez, são subdivididos em seções compostas por barras (perfis estruturais) com ligações aparafusadas que, de acordo com o seu posicionamento e função são chamadas de: montantes, banzos superiores, banzos inferiores, diagonais e barras de travamento interno. Os perfis estruturais mais comumente utilizados são as cantoneiras simples com abas iguais de aço ASTM A36 (tensão de escoamento 250MPa).

Deve-se instalar um dispositivo especial próximo ao topo da estrutura conhecido por dispositivo antitorção, que através da utilização de cabos adicionais num mesmo nível e afastados dos montantes formam braços de alavancas adequados, absorvendo os esforços de torção.

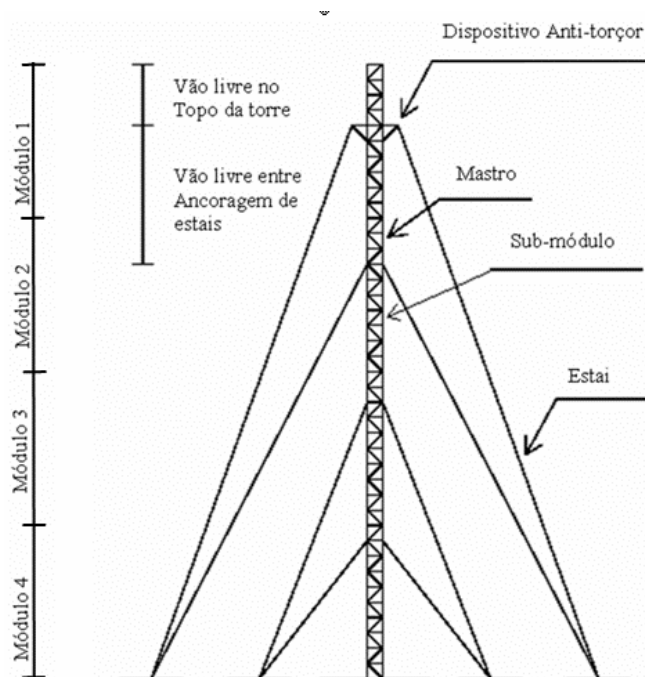


Figura 1: Topologia de uma torre estaiada

Entre o topo da estrutura e o dispositivo antitorção, existe uma região sem pontos de ancoragem de cabos, cujo comprimento varia de 50 cm a 300 cm. Este é o chamado vão livre no topo da estrutura, sendo destinado à colocação das antenas. Abaixo desta região, os cabos são ancorados ao longo do mastro da torre, sendo recomendado que o vão livre na vertical entre dois pontos de ancoragem sucessivos esteja entre 8 e 12 metros, (MENIN, 2002).

O procedimento Telebrás recomenda a utilização de cabos de aço de sete fios com alma de aço e protegidos contra corrosão com capa protetora de zinco. No entanto, este tipo de cabo não é mais fabricado, portanto, são utilizadas cordoalhas de 19 e/ou 37 fios. Os cabos devem ser do tipo HS (High Strength) ou EHS (Extra High Strength).

Os cabos de aço estão sujeitos a dois tipos de deformação longitudinal: a elástica e a estrutural. A deformação estrutural pode ser quase totalmente removida por um pré-tensionamento no cabo. Esta tensão deve ser maior que a tensão de serviço do cabo e menor que a tensão limite de proporcionalidade do mesmo. Cabos pré-esticados e cabos usados possuem módulo de elasticidade aproximadamente 20% maior que um cabo novo que não foi pré-esticado, (PASQUETTI, 2003).

3. CARACTERÍSTICAS DA TORRE MODELADA

Para a construção dos modelos em elementos finitos, foi utilizado o programa ANSYS. As torres estaiadas possuem 105 m de altura, com seção quadrada e ao longo de sua altura estão dispostos os estais, estas se diferem, uma da outra apenas pelas condições de contorno da base do mastro, onde uma possui uma base cúbica (Figura 2, c) gerando um engaste, e a outra possui uma base prismática (Figura 2, d) criando um sistema articulado. As características adotadas foram baseadas na torre de 90 m (noventa metros) de MENIN, 2002.

Os dados de projeto:

- 105 m de altura total;
- base de seção transversal constante e igual a $0,7 \times 0,7 \text{ m}^2$;
- módulos de 7 m perfazendo um total de 15 módulos;
- ângulo máximo de inclinação das diagonais de 45° ;
- perfis metálicos de abas iguais em formato de L;
- cordoalhas de sete fios, com inclinação do estai do topo do mastro de 60° , sendo os demais calculados a partir da projeção horizontal do estai a 60° , dividido em trechos iguais, quantos forem necessários.

3.1. Efeitos Dinâmicos Segundo a NBR6123/1988

A NBR 6123 admite que a velocidade média do vento se mantém constante em um intervalo de tempo de 10 minutos, produzindo efeitos puramente estáticos, designados como resposta média. As flutuações da velocidade podem induzir em estruturas flexíveis, ou seja, edificações com período fundamental T_1 (Eq.1 e Eq.2) superior a um segundo, que normalmente são estruturas altas e esbeltas, oscilações importantes na direção da velocidade média do vento, designadas como resposta flutuante.

Edificações com tais períodos, em particular aquelas fracamente amortecidas, podem vir a apresentar resposta flutuante importantes na direção do vento médio. Portanto, a resposta dinâmica total será dada pela superposição das respostas flutuante e média.

Para tal análise foi adotado o modelo contínuo simplificado descrito na NBR 6123, onde é considerada na resposta dinâmica unicamente a contribuição do modo fundamental. Segundo a norma, a retenção apenas do primeiro modo na solução, conduz a erros inferiores a 10%. A equação 1 permite o cálculo do período de estruturas de aço soldada.

$$T_1 = 0,29\sqrt{h} - 0,4 \quad (1)$$

$$T_1 = 1/f_1 \quad (2)$$

Onde:

h é a altura total da edificação;

f_1 é a frequência fundamental.

Alternativamente as frequências fundamentais podem ser obtidas utilizando-se métodos da teoria de vibrações de estruturas, e a pressão dinâmica variando com a altura da torre.

3.2. Análise modal.

O problema da identificação das frequências de vibração de um determinado sistema é resolvido com base na análise do movimento em regime livre e sem amortecimento. Nestas condições as equações de equilíbrio dinâmico tomam uma forma mais simplificada.

Logo a determinação de frequências e modos de vibração resulta num problema tradicional de determinação de autovalores e autovetores, em que os autovalores representam as frequências e os autovetores os modos de vibração. Assim, cada frequência corresponde a um modo de vibração.

No presente estudo os autovalores e autovetores foram determinados através do Método dos Elementos Finitos (MEF) utilizando o programa Ansys.

4. MODELAGEM PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Foram modeladas duas torres de aço estaiadas, ambas possuem as mesmas propriedades físicas e geometria, diferindo apenas na base do mastro (Figura 2, (c) e Figura 2 (d)), na modelagem em elementos finitos, foram utilizados os mesmos elementos em ambos os casos.

4.1. Mastro da torre

Na discretização do domínio mastro foi utilizado o elemento BEAM188, que é apropriado para análise de estruturas esbeltas. Este elemento é baseado na teoria da viga de Timoshenko, é um elemento de viga 3D linear ou quadrático, possui 6 ou 7 graus de liberdade em cada nó. Estes incluem translações e rotações nas direções x, y e z.

Este elemento é utilizado para aplicações com grandes rotações, deformações e problemas que levam em conta a não-linearidade. Inclui termos de rigidez que permite a análise de flexibilidade lateral e problemas de instabilidade à torção. Pode ser usado com seção transversal pré-definida e ainda negligencia algumas constantes reais, tais como: momento de inércia e área.

4.2. Estais da torre

O elemento LINK 10 foi utilizado na discretização do domínio estais ou cabos. Este elemento possui a característica de uma matriz de rigidez bi-linear, resultando em tração ou compressão uniaxial do elemento. Estas características são importantes na modelagem de estruturas do tipo cabo. Neste caso, cada estai ou cabo foi modelado com um único elemento, que possui três graus de liberdade em cada nó, sendo estas translações nodais nas direções x, y e z.. Este elemento pode ser utilizado tanto em análise estática quanto dinâmica (com efeitos de inércia ou amortecimento) onde a capacidade de folga do elemento é desejada, mas a linha elástica do elemento não é primordial.

4.3. Condições de contorno

Como condições de contorno foram utilizadas somente restrições de deslocamentos em todos os pontos dos apoios na fundação tanto dos estais, quanto do mastro da torre, como mostrado na Figura 2.

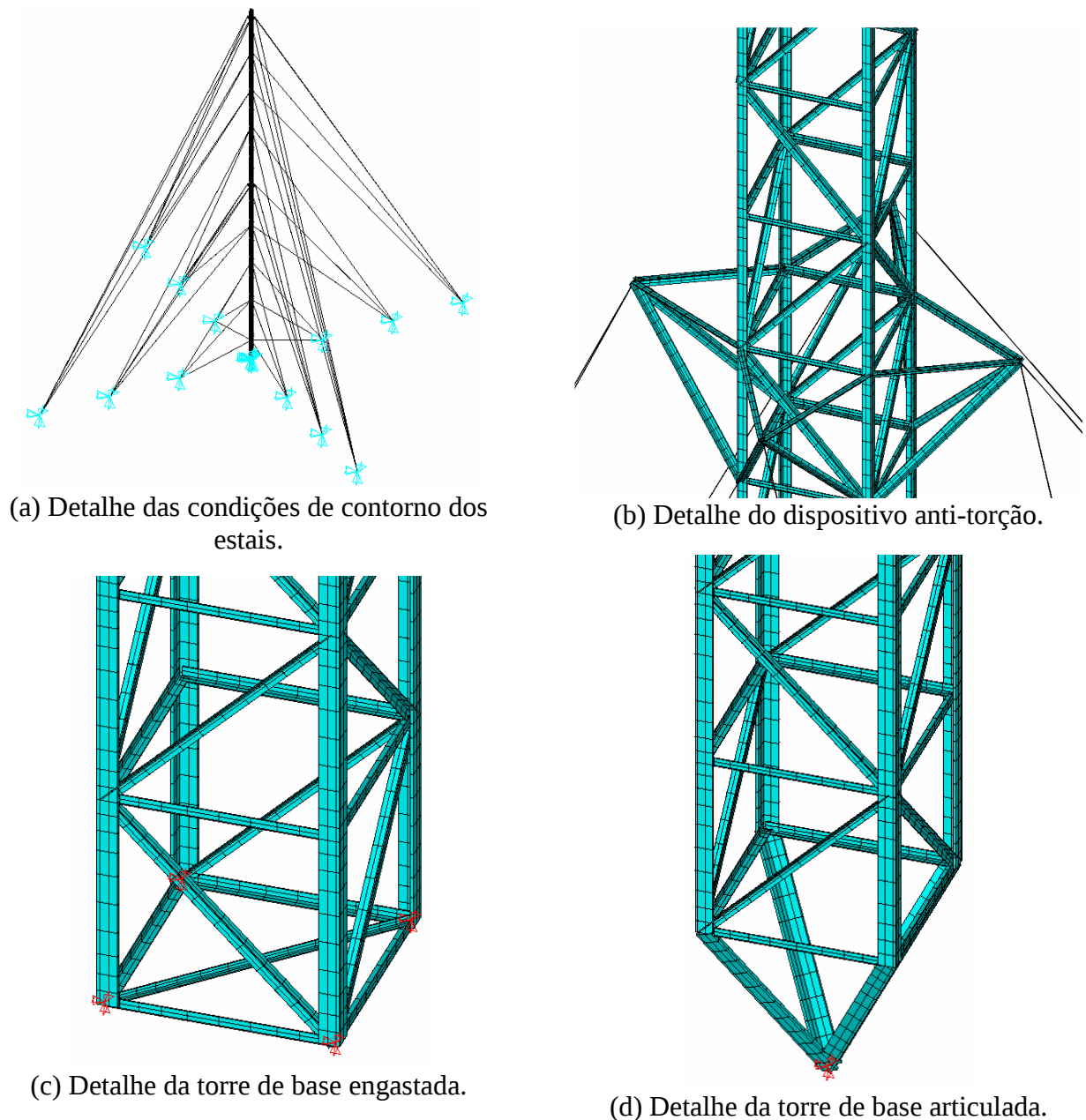


Figura 2: Condições de contorno das torres modeladas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Serão apresentadas as frequências naturais obtidas com o auxílio da equação da norma e do programa Ansys, para duas torres de aço estaidas de base articulada e engastada, e seus respectivos modos de vibrar. As imagens dos resultados estão em escala de ampliação para uma melhor visualização das tensões e deslocamentos da estrutura, no entanto, os valores apresentados estão em escala real.

5.1. Análise Dinâmica pela NBR6123/1988

A NBR6123/1988 dispõe de equações aproximadas para o cálculo direto da frequência fundamental, ou seja, da primeira frequência natural do sistema. Como se pode observar na equação (1) ela só depende da altura da torre, portanto em ambos os casos, de base engastada ou rotulada, a frequência fundamental será a mesma.

Através da equação (1) determinou como sendo de 2,5716 segundos o período fundamental do sistema, e por conseguinte de 0,3889 Hz a frequência fundamental.

5.2. Análise Dinâmica pelo Método dos Elementos Finitos

A determinação de frequências e modos de vibração resulta num problema tradicional de determinação de autovalores e autovetores, em que os autovalores representam as frequências e os autovetores os modos de vibração. Assim, cada frequência corresponde a um modo de vibração.

No presente estudo os autovalores e autovetores foram determinados através do Método dos Elementos Finitos (MEF) utilizando o software ANSYS, para ambas as torres (de base engastada e base rotulada). Devido a simetria geométrica da torre, duas frequências consecutivas são aproximadamente iguais, por este motivo algumas frequências não foram apresentadas, Figura 3 e Figura 4.

O conhecimento das frequências naturais (f) é fundamental para o desenvolvimento do projeto estrutural, pois excitações similares à frequência natural de estruturas podem levar a casos extremos indesejados de ressonância ou fadiga.

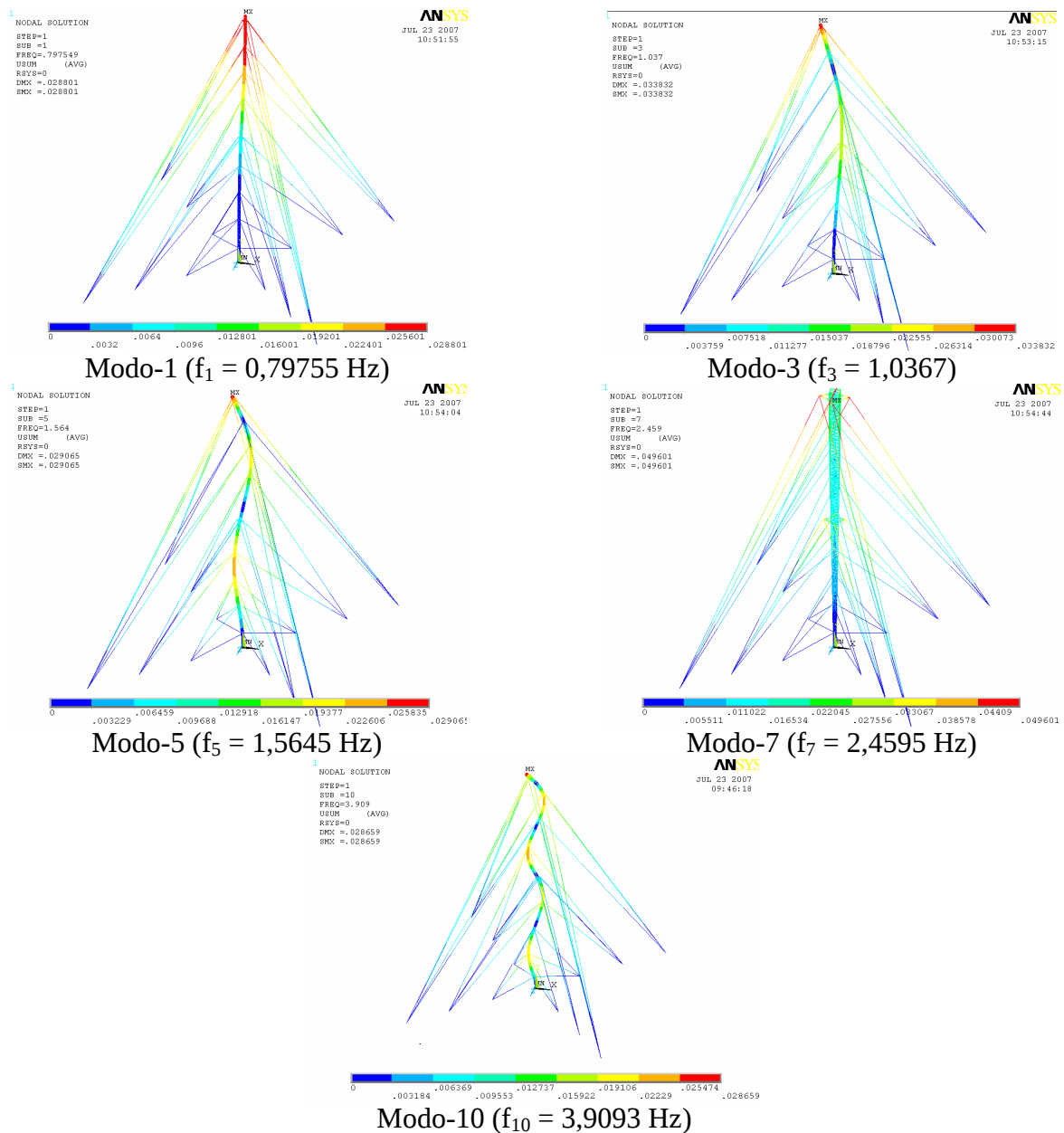


Figura 3: Modos de vibração da torre, base engastada

Ao analisar as Figura 3 e Figura 4, fica claro que os modos de vibração estão associados aos deslocamentos horizontais, que ocorrem ora predominantemente na direção X e ora predominantemente na direção Z.

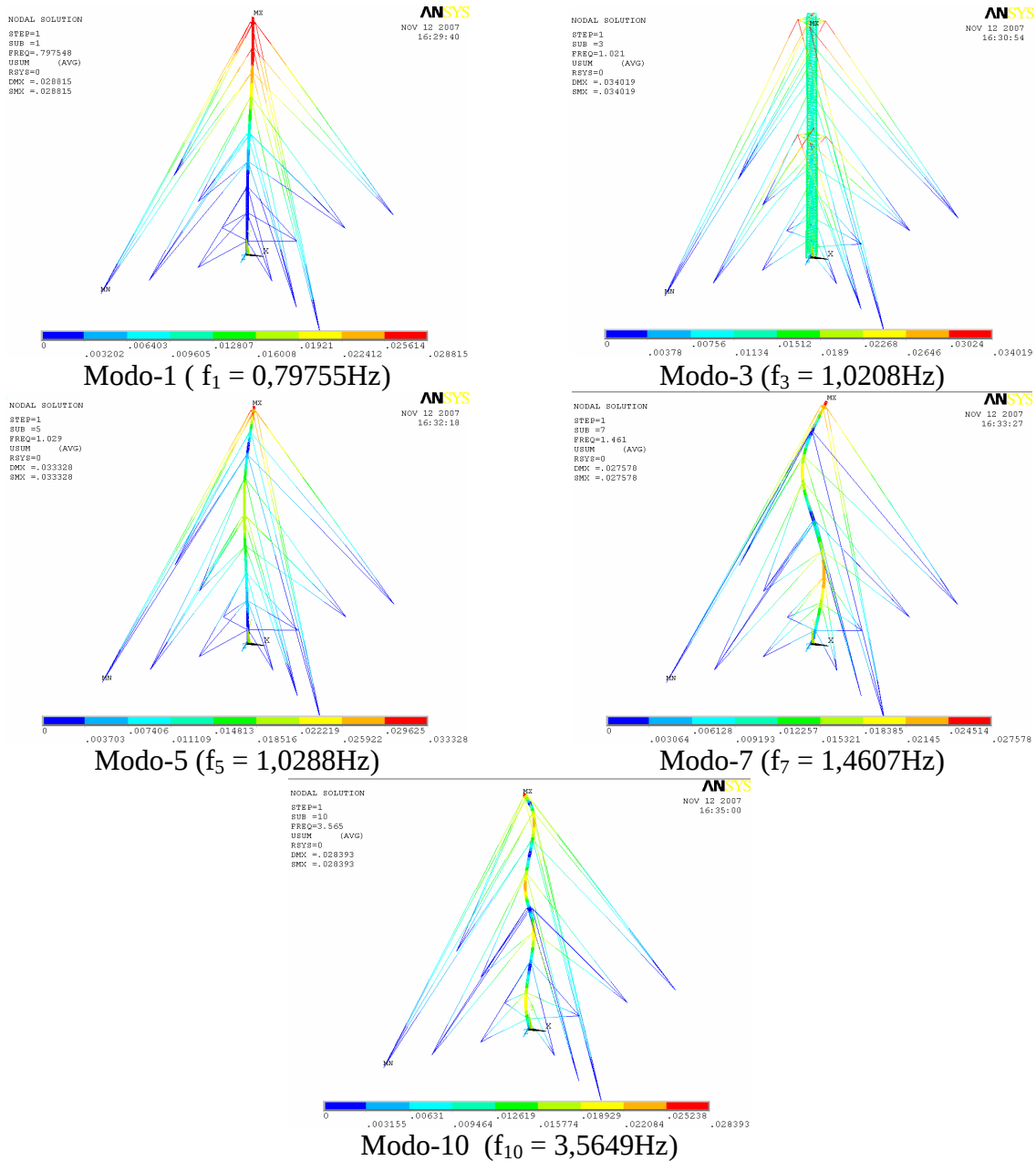


Figura 4: Modos de vibração da torre, base rotulada

6. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

A Figura 5 apresenta um comparativo entre as frequências fundamentais obtidas com o auxílio da NBR6123/1988 e através do programa ANSYS para torres de aço estaiadas.

Comparação para os resultados obtidos pela NBR e através do programa ANSYS

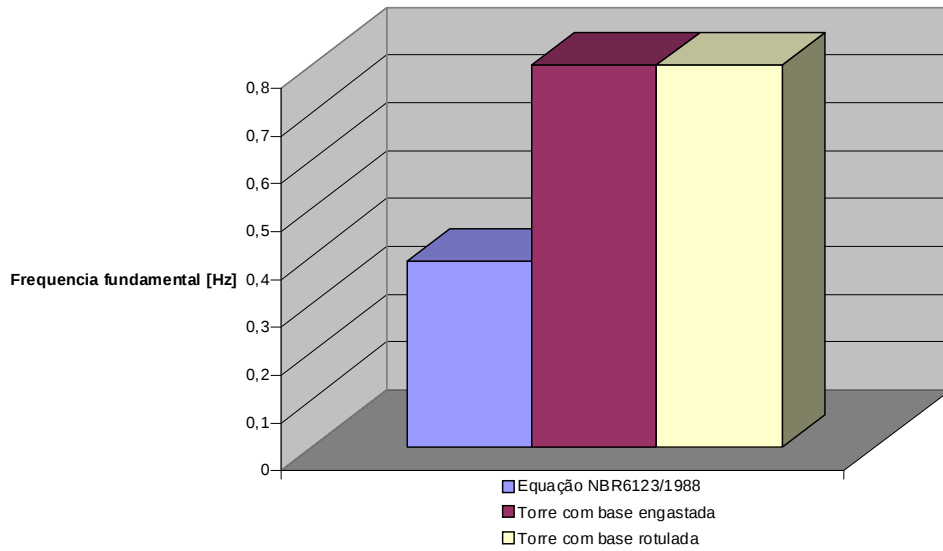


Figura 5: Comparação dos valores das frequências fundamentais, obtidos por diferentes métodos.

Embora a frequência fundamental tenha se mantido constante para torre estaiada com base engastada ou base rotulada como era previsto pela equação(1), houve uma grande discrepância entre os valores obtidos pela Norma e os obtidos pelo programa ANSYS.

Quando se compara algumas das frequências naturais da torre estaiada com base engastada com a de base rotulada, Figura 6, pode se observar que existe uma diferença significativa nos valores das frequências encontradas com estes dois modelos a partir do terceiro modo de vibração.

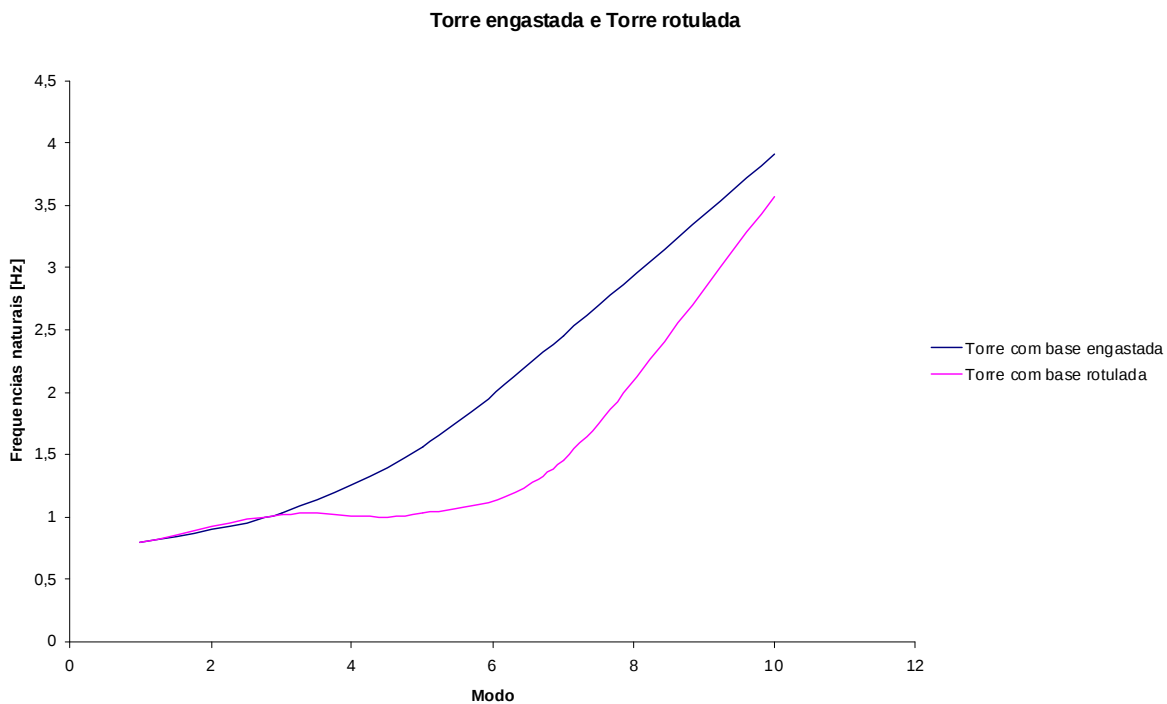


Figura 6: Comparação dos dez primeiros modos de vibração da torre estaiada com base engastada com a de base rotulada.

7. CONCLUSÃO

Observou-se que o valor da frequência natural determinada pela equação apresentada na norma difere do encontrado pelo programa ANSYS em 48,76%, o que sugere que a equação apresentada pela NBR6123/1988 não é robusta o suficiente para atender a uma gama tão grande de estruturas, sendo então necessária a utilização de métodos numéricos para a determinação de tais frequências.

Analisando a Figura 6 pode se concluir que a partir do terceiro modo de vibração as frequências naturais dos dois modelos (torre com base engastada e torre com base articulada) começam a apresentar valores distintos, o que sugere que a condição de contorno influencia os modos naturais de vibração do sistema, e estes por sua vez influenciam o valor da pressão dinâmica gerada pelo vento em tais estruturas, portanto os modos naturais de vibração são de extrema importância para o dimensionamento de estruturas muito esbeltas.

8. REFERÊNCIAS

- Loredo-Souza, A.M. and Davenport A. G. and Paluch M. J., 2005, "Determinação da resposta de torres de transmissão treliçadas à ação do vento", Construção Metálica, UPF, Brasil.
- Menin, R. C. G., 2002, "Análise Estática e Dinâmica de Torres Metálicas Estaiadas", Dissertação de Mestrado, UNB, Brasil.
- NBR 6123/1988- "Forças devidas ao vento em edificações", ABNT, Brasil.
- Pasquetti, E., 2003, "Estabilidade Estática e Dinâmica de Torres Estaiadas", Dissertação de Mestrado, PUC –RJ, Brasil.
- Sistema de documentação Telebrás, Anatel, www.anatel.gov.br

THE INFLUENCE OF BOUNDARY CONDITIONS IN MODAL ANALYSIS OF GUYED STEEL STRUCTURES USING FINITE ELEMENT METHOD

Eduardo Henrique Guimarães

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica,
CEP-38400-902-Uberlândia, MG, Brasil
eduardo_hge@yahoo.com.br

Sonia A. G. Oliveira

sgoulart@mecanica.ufu.br

Antonio Pedro Clapis

apclapis@mecanica.ufu.br

Abstract: *The purpose this work is to describe the influence of the boundary conditions in the modal analysis of guyed steel structures, and compare these results with the natural frequency calculation given by the Brazilian standard NBR6123/1988. It can be observed that, the results given by the standard, for the analyzed structure, differs from the values obtained with a more accurate approach using FEM. It can also be noted that for this kind of structure the changes in boundary conditions affect the natural modes of vibration, causing variation in the wind loads used in the design of the structures.*

Keywords: guyed steel structures, structural analysis, boundary conditions, modal analysis, transmission towers.