

# Análise de projeto de torres metálicas treliçadas autoportantes, utilizando software de perfis tubulares de aço

TIAGO LUÍS DUARTE FORTI – fortiago@labmec.fec.unicamp.br  
 NADIA CAZARIM SILVA FORTI – nadiacazarim@yahoo.com.br  
 JOÃO ALBERTO VENEGAS REQUENA – requena@fec.unicamp.br

Apresentaremos neste artigo uma análise de projeto de torres metálicas treliçadas autoportantes, utilizando software de perfis tubulares de aço. As torres, em especial as de telecomunicações, serão abordadas com ênfase na análise das ações estática e dinâmica de vento que incidem nesta categoria estrutural e que requerem atenção cuidadosa dos calculistas. Para possibilitar essa análise foi desenvolvido um software de automação de projeto de torres treliçadas autoportantes. O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Mecânica Computacional — LabMeC — do Departamento de Estruturas da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo (FEC) da Unicamp. Trabalharam neste projeto os alunos de mestrado Tiago Forti e Nadia Cazarim da Silva Forti, sob orientação do Prof. Dr. João A. V. Requena e colaboração dos professores Dr. Francisco Menezes e Dr. Philippe Devloo. O trabalho foi fruto de parceria de pesquisa e desenvolvimento - P&D, entre a empresa V&M do Brasil e a FEC/UNICAMP, tendo como coordenadores o Engº Afonso Henrique M. de Araújo pela V&M e o Prof. Dr. João A. V. Requena pela UNICAMP. O objetivo do software é auxiliar e facilitar o desenvolvimento de projeto estrutural de torres utilizando-se as normas brasileiras para o cálculo das ações de vento estática e dinâmica e para o dimensionamento das barras. Assume-se que os cálculos de ações de vento, obtenção dos esforços e dimensionamento das barras envolvem esforço repetitivo e por isso devem ser automatizados, dando ao calculista maior tempo para reflexão geral do projeto. Para o desenvolvimento do programa foi utilizado o ambiente Delphi5 seguindo a filosofia de programação orientada a objetos.

## 2) Roteiro de cálculo

O projeto de uma torre via programa é dividido em seis etapas:

1. Geração da geometria automática da torre
2. Aplicação automática dos carregamentos
3. Obtenção dos esforços nas barras
4. Dimensionamento das barras
5. Cálculo do modo de vibração da torre
6. Dimensionamento final das barras da torre

A geração da geometria automática da torre é automatizada para alguns

modelos. O software automatiza a geometria de torres de seção transversal quadrada ou triangular equilátera. Além disso, a silhueta da torre é dividida em módulos, em que cada módulo tem a mesma dimensão vertical com exceção dos módulos do topo da torre que podem ter a metade dessa dimensão. Entre os módulos existe uma região denominada de diafragma (ou patamar) da torre. Em torres de seção quadrada, é necessário um travamento horizontal de modo a evitar a torção sobre o eixo vertical da torre.

Esse travamento é feito entre os módulos, os diafragmas da torre.

O software aceita apenas forças nodais nos diafragmas. Essa simplificação é imposta pela interface gráfica e não por suas rotinas de cálculo que permitem a aplicação de forças em qualquer nó ou barra. Nos diafragmas são normalmente colocados os patamares de descanso e de trabalho. Além disso, é a região em que os esforços de vento sobre as antenas encontrarão uma estrutura treliçada para suportá-los.

As torres triangulares não necessitam de travamentos visto que sua seção transversal já é travada e funciona como diafragma. De qualquer modo, a torre triangular segue, na interface gráfica, os mesmos procedimentos da seção quadrada.

Os carregamentos podem ser aplicados nos diafragmas. Alguns carregamentos são automatizados pelo programa: vento nas antenas, vento na estrutura da torre, vento em escadas e o peso próprio da estrutura. As ações de vento são aplicadas como forças nodais, sempre nos nós de diafragmas. O peso próprio é aplicado diretamente nas barras da estrutura como força gravitacional.

A obtenção dos esforços segue o princípio de análise matricial de estruturas através do método dos deslocamentos. A análise é em regime elástico linear. O esquema estático adotado no software é o de barras de pórtico tridimensional, em que os nós transmitem esforços axiais, cortantes, de momentos fletores e torção. As condições de apoio são apoios fixos nos nós da base da torre. Essa condição de apoio pode ser facilmente modificada via arquivo texto de entrada de dados.

O dimensionamento das peças segue a norma NBR8800/86. São previstos perfis circulares e quadrados. As barras são dimensionadas à flexão composta.

A quinta etapa é o cálculo do período fundamental de vibração da torre. O software dispõe de um módulo de análise modal. A implementação calcula o período fundamental da estrutura não amortecida e livre de forças externas. O período de vibração é informação importante da torre e pode ser utilizado para o cálculo das ações de vento dinamicamente.

A última etapa consiste em redimensionar a estrutura sob efeito das ações de vento considerando o período de vibração fundamental calculado.

### 3) Descrição do programa

As torres de telecomunicações variam principalmente quanto à geometria e ao material utilizado. São bastante comuns as torres estaiadas, autoportantes e as torres poste. As torres autoportantes são compostas de uma parte reta superior e uma parte piramidal na base. São formadas por módulos treliçados. São objetos deste estudo as torres autoportantes de seção transversal quadrada e triangular equilátera. Os módulos que a compõem podem ser em triângulo ou losango. A figura 01 ilustra alguns exemplos de torres geradas pelo programa. A diferença entre torres com perfis tubulares e com perfis em cantoneiras é a quantidade de barras. Por terem melhor comportamento com respeito a estabilidade, os perfis tubulares dispensam, ou requerem menos, barras redundantes para diminuir o comprimento de flambagem das barras principais. Isso produz uma estrutura mais limpa, com menor área exposta ao vento e, por consequência, mais leve.

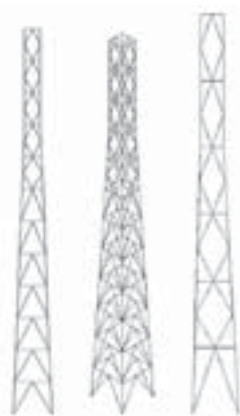


Figura 01 – Exemplos de geometria

As ações de vento são automatizadas pelo software. Dois métodos de cálculo são disponíveis: análise estática, conforme item 7.7 da NBR6123, e análise dinâmica simplificada, conforme item 9 da mesma norma. Além do cálculo das ações de vento na estru-

tura da torre, o software apresenta outras duas facilidades: o cálculo do vento na escada e demais acessórios e em antenas.

De fato, o vento na escada representa o vento aplicado a uma estrutura contínua ao longo da torre, em que sua área de obstrução de vento é dada em  $m^2/m$ . Assim, como uma escada tem área constante ao longo da altura da torre, aqui a força é imposta através dessa área distribuída ( $m^2/m$ ) e seu coeficiente de arrasto.

Para o vento em antenas deve-se fornecer a área de antena ( $m^2$ ) em cada nó dos diafragmas da torre e seu coeficiente de arrasto para cada ângulo de incidência de vento. Em torres quadradas deve-se fornecer a área e o coeficiente de arrasto de cada antena para ventos a  $0^\circ$  e  $45^\circ$ . Para torres triangulares deve-se fornecer os dados para ventos a  $0^\circ$ ,  $30^\circ$  e  $60^\circ$ . A força de arrasto nas antenas será dada pelo produto da pressão de vento pela área de antena e pelo seu coeficiente de arrasto ( $F = Q A C_a$ ), para cada ângulo de incidência de vento. As antenas podem ser posicionadas nos nós dos diafragmas.

Uma vez definidos os dados de entrada das ações de vento, o software calcula essas ações e aplica as forças nos nós da estrutura. A NBR6123, em sua tabela 15 (figura 02 deste artigo), define valores para aplicação das forças de arrasto nos nós conforme o ângulo de incidência do vento e a face da torre. Os valores dessa tabela são utilizados para aplicação do vento na estrutura, conforme orientação da norma. Para o vento na escada, optou-se por utilizar esses mesmos valores. Em torres quadradas e vento a  $0^\circ$  é necessário o cálculo do coeficiente de proteção  $\eta$ .

Utiliza-se  $\eta = 1.0$  para o vento na escada. Com  $\eta = 1.0$ , a força de arrasto é aplicada  $\frac{1}{4}$  em cada nó.

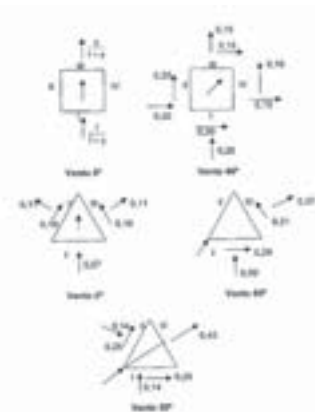


Figura 02 – Valores da tabela 15 da NBR6123

O software dispõe do cálculo automático dos fatores  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  e os de análise dinâmica. Um último dado diz respeito ao tipo de perfil das barras da torre: quadrado (cantos vivos ou levemente arredondados) ou circular. Para cada um dos casos existem tabelas separadas na norma NBR6123 para obtenção dos coeficientes de arrasto. Como o software permite a utilização de perfis circulares e quadrados na mesma torre, cabe ao projetista optar por quais tabelas deseja obter os coeficientes de arrasto. Para cada módulo da estrutura é calculado um coeficiente de arrasto.

São disponíveis dois tipos de análise. A análise linear da estrutura para obtenção dos esforços e a análise modal da estrutura para obtenção do modo fundamental de vibração.

O software gera o carregamento de peso próprio da estrutura, calcula os esforços para todas as combinações existentes e verifica todas as barras quando solicitadas aos esforços dessas combinações. Ao final, os resultados de deslocamentos nodais e esforços em todas as barras são mostrados em tabelas. A taxa de uso das barras é mostrada na coloração das barras (figura 03). Barras vermelhas e rosas não passaram na verificação.



Figura 03 – Verificação das barras

O método de resolução do problema modal é um método iterativo. Os campos número de iterações e erro da solução indicam o número de iterações e o erro máximo desejado. O primeiro critério encontrado finaliza o método iterativo. Ao final da resolução esses campos são preenchidos com o número de iterações realizadas e o erro alcançado (figura 04) e o campo período encontrado é preenchido.



Figura 04 – Solução do método iterativo

O dimensionamento final compreende algumas características extras ao processo de verificação da estrutura. Nele, a estrutura é verificada e caso alguma barra não suporte os esforços é substituída por um perfil, disponível para o grupo ao qual a barra pertence, que suporte as solicitações. Como a estrutura muda, o processo de verificação recomeça com a atualização do peso próprio e a construção da nova matriz de rigidez. Se alguma barra não passa na verificação dos esforços o processo recomeça. Esse processo se estende até a convergência do problema.

Outro algoritmo compreende ainda - além das etapas acima - a atualização das ações de vento. Como a ação do vento nas barras da torre é função da área efetiva das barras, a mudança nos perfis implica em mudança de área exposta ao vento e conseqüentemente em mudança do coeficiente de arrasto e da força de arrasto. O vento é atualizado, bem como o peso próprio e a matriz de rigidez, até a convergência do problema.

#### 4) Análise comparativa

Nesta seção será analisada uma torre submetida a ações de vento primeiramente calculadas via análise estática e em seguida via análise dinâmica. Os dados de projeto da torre são elencados a seguir:

- 60m de altura total, sendo 20m da parte reta superior
  - base inferior de 8m e base superior de 3m
  - módulos de 5m cada, perfazendo um total de 12 módulos
  - ângulo máximo de inclinação das diagonais de 60°
  - escada com coeficiente de arrasto ( $C_a$ ) de 1,2 e área exposta ( $A_e$ ) de 0,30 m<sup>2</sup>/m
  - antenas no topo da torre com  $A_e = 8$  m<sup>2</sup>,  $C_a = 1,2$  e peso total de 1kN
  - antenas a 2/3 da altura (40m) com  $A_e = 20,36$  m<sup>2</sup>,  $C_a = 1,4$  e peso total de 1kN
  - sobrecarga de 2 kN em cada patamar de carga permanente e 4,6kN no topo da torre de sobrecarga.
  - Combinações:
    - 1.4 (Peso própria + permanente + sobrecarga + peso de antenas + ações de vento a 0°)
    - 1.4 (Peso própria + permanente + sobrecarga + peso de antenas + ações de vento a 45°)
  - Perfis tubulares laminados sem costura circulares
- Dimensionando-se a torre utilizando a análise estática de ações de vento obtém-se 13232 kg (figura 05) de peso final.
- Uma vez que a torre está dimensionada, pode-se calcular seu período de

fundamental de vibração e redimensioná-la para os esforços dinâmicos de vento. O período encontrado pela análise modal do programa é de 0,42 s. Esse valor é bastante diferente do valor sugerido pela norma. Utilizando-se a fórmula da tabela 19 da NBR6123,  $T = 0,29 \sqrt{H}$  – 0,4 obtém-se 1,846 s.

Redimensionando a torre com as ações dinâmicas de vento, obtém-se o peso final de 14730 kg (figura 06). O período utilizado no cálculo das ações dinâmicas de vento foi 0,42 s o qual foi obtido pela análise modal.

A figura 07 mostra as diferentes pressões de vento calculadas via análise estática e dinâmica.

## 5) Conclusões

A análise de projeto de torres autoportantes permitiu identificar a importância da análise dinâmica das ações de vento. Observou-se que a análise estática, a qual é uma simplificação, conduz a resultados contrários à segurança da estrutura. Utilizando-se a análise dinâmica obteve-se 14,7 toneladas contra 13,2 toneladas utilizando-se a análise estática.

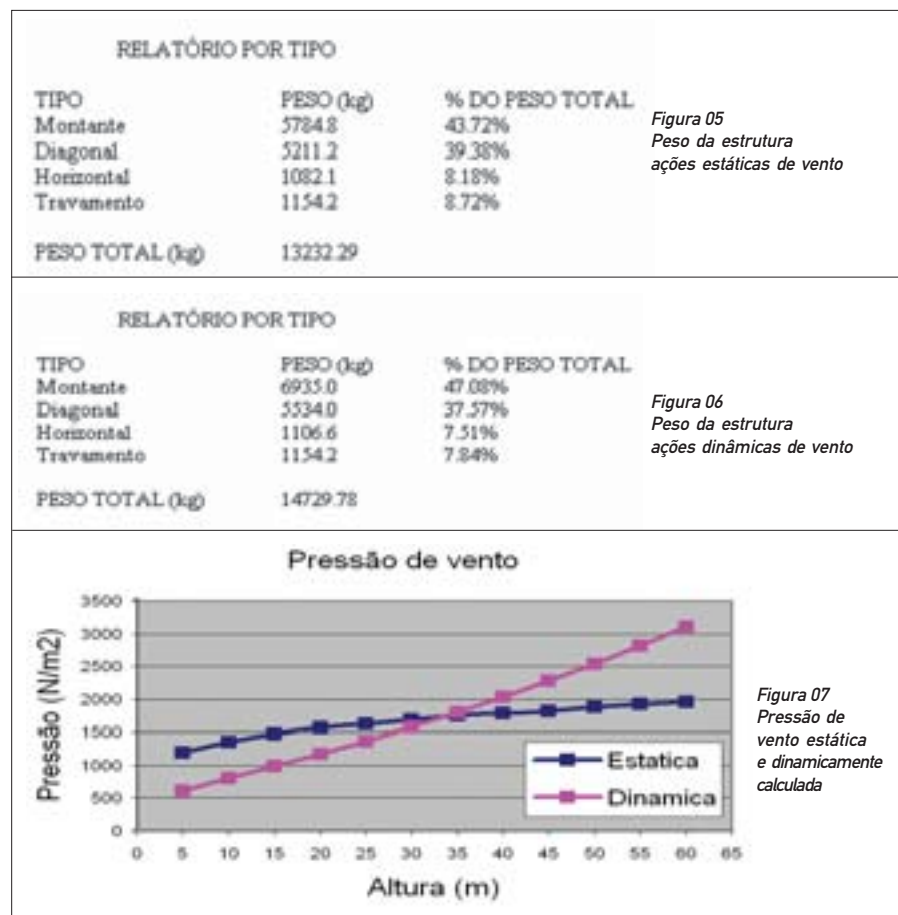
Conclui-se também que o período fundamental de vibração da torre deve ser calculado via análise modal. A fórmula proposta pela norma (tabela 19 da NBR6123) é insatisfatória.

O software desenvolvido tem como principal objetivo auxiliar estudantes e engenheiros calculistas no projeto de torres metálicas treliçadas autoportantes com perfis tubulares. A escolha de perfis tubulares conduz a uma estrutura mais limpa que as usuais torres em cantoneiras, aproveitando-se do melhor comportamento dos perfis tubulares com respeito à estabilidade. As torres em perfis tubulares dispensam ou requerem menos as barras redundantes cuja função é a de diminuir o comprimento de flambagem das barras principais, usuais em torres em cantoneiras. Isso faz com que as torres em perfis tubulares possuam menor área exposta ao vento minimizando sua ação, além de constituir menor número de barras a serem fabricadas, transportadas e montadas, reduzindo o peso total de aço na torre.

O programa, em sua atual fase de desenvolvimento, está disponível “free” no site [www.fec.unicamp.br/~requena](http://www.fec.unicamp.br/~requena)

## 6) Agradecimentos

Agradecemos ao LabMeC e à Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp pela estrutura acadêmica e tecnológica e oportunidade de desenvolver este trabalho. Agradecemos à V&M do Brasil pela parceria e pelo apoio financeiro.



## BIBLIOGRAFIA

- 1) J. BLESSMANN, “Introdução ao Estudo das Ações Dinâmicas do Vento”, Editora da Universidade-UFRGS, Porto Alegre, 1998
- 2) M. GÉRADIN, D. RIXEN. Mechanical Vibrations: Theory and Application to Structural Dynamics. Ed. Wiley, Bélgica, 1994.
- 3) TIAGO FORTI, RENATO BRANCO, J. A. V. REQUENA. Automação da geometria das ações estáticas e dinâmicas devidas ao vento em torres metálicas autoportantes. Revista Construção Metálica, ano 12, no. 57. nov/dez 2002 e no. 58 jan 2003.
- 4) FERNANDA O. D. AMADIO NASCIMENTO. Análise de estruturas metálicas de torres treliçadas autoportantes para telecomunicações. Dissertação de Mestrado, orientador João A. V. Requena, Unicamp. Campinas, fevereiro de 2002.