

Engenharia Civil: Estrutura em Aço

Automação de projeto e análise de torres metálicas utilizando perfis tubulares

(Design automation software of steel towers using sections)

João Alberto Venegas Requena

Eng. Professor, Dr - FEC/Unicamp. E-mail: requena@fec.unicamp.br

Tiago Luís Duarte Forti

Eng. Doutorando - FEC/Unicamp. E-mail: fortiago@fec.unicamp.br

Nadia Cazarim da Silva Forti

Eng. Doutoranda - FEC/Unicamp. E-mail: nadiacazarim@yahoo.com.br

Afonso Henrique M. Araújo

Engenheiro Civil - V&M do Brasil. E-mail: afonso@vmtubes.com.br

Resumo

É apresentado, nesse trabalho, um programa de computador (AutoTorre 1.01) para automação do projeto de torres metálicas autoportantes, para telecomunicações, utilizando perfis tubulares. O objetivo do programa é auxiliar e facilitar o desenvolvimento e a análise do projeto estrutural de torres, utilizando 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. As funcionalidades do programa contemplam a automação da geometria e das ações de vento, o cálculo dos esforços, o dimensionamento das barras e o cálculo do período fundamental de vibração da estrutura (análise modal), além de uma interface gráfica amigável para o usuário. São comparados os resultados das ações de vento calculadas estática e dinamicamente, segundo a NBR6123, e os resultados da escolha do método estático ou dinâmico para o cálculo das ações de vento, resultando em uma estrutura segura e econômica.

Palavras-chave: Estruturas metálicas, automação de projetos, perfis tubulares.

Abstract

In the present work, introduced is a software (AutoTorre 1.01) to design steel telecommunication towers using hollow sections. The main purpose of the software is to help and assist the engineer in the process of analyzing and designing a steel tower. The software uses Brazilian specifications to compute wind loads and design beams. The calculation of wind loads, structure efforts and beam design is mechanical work that has now been automated and thus saves time for the engineer and allows for focus on other important aspects. Software routines allow the user to generate automatically the tower geometry, compute wind load and design the beams. Another functionality consists in a modal analysis to obtain the fundamental period of vibration. The software has a friendly graphical user interface. Wind load results according to two methods (static and dynamic methods) proposed by the NBR6123 are compared, to obtain a safe and economic structure.

Keywords: Steel structure, computer-aided design, hollow sections.

1. Introdução

O mercado de telecomunicação teve grande impulso nos últimos anos no Brasil. Com a expansão, demandou-se a construção de muitas torres para suporte de antenas em todo o território nacional. As torres de telecomunicações variam, principalmente, quanto à geometria e ao material utilizado. São bastante comuns as torres estaiadas quadradas ou triangulares, autoportantes quadradas ou triangulares e torres poste de concreto ou metálicas. As torres estaiadas são muito esbeltas e fixas por cabos de aço ao longo de sua extensão. São as torres mais econômicas e fáceis de montar, mas precisam de uma grande área para a fixação dos cabos. As autoportantes são compostas de uma parte reta superior destinada a fixar as antenas e uma parte piramidal, são moduladas e, assim como as estaiadas, treliçadas. Podem ser de seção transversal quadrada ou triangular. Os módulos medem, normalmente, por volta de 2,5 a 3 metros ou o dobro desses valores, por volta de 5 ou 6 metros, em função da altura total da torre. Os módulos variam seu desenho (em triângulo, losango) segundo a inclinação das diagonais. Outros desenhos são possíveis como em K, E ou "X".

Além da geometria, outra variável muito importante, no projeto de torres, é a ação de vento. Esta pode ser calculada, segundo a NBR6123, por dois métodos: estático e dinâmico. A análise dinâmica das ações de vento requer o período natural de vibração da torre.

Esse trabalho apresenta um programa de computador (AutoTorre 1.0) que automatiza o projeto de torres metálicas de telecomunicação. Uma análise comparativa do dimensionamento de uma torre utilizando os dois métodos de cálculo das ações de vento da NBR6123 é feita. Os métodos estão implementados no AutoTorre, o qual é utilizado para o estudo comparativo. O programa realiza a análise modal de forma a obter o período de vibração da torre para o cálculo das ações via o método dinâmico.

Propõe-se, nesse trabalho, a utilização de perfis tubulares, os quais apre-

sentam melhores características com respeito à estabilidade do que os tradicionais perfis-cantoneiras. Propõe-se, ainda, que o dimensionamento das barras seja feito em flexão composta, considerando-se as barras como elemento de pórtico espacial.

2. Automação de projeto

2.1 Geometria das torres

As torres treliçadas autoportantes são, comumente, divididas em dois trechos: uma base piramidal e o topo reto, onde são colocadas as antenas. Eventualmente a torre pode ser constituída apenas da parte reta. O programa trabalha com torres de seção transversal quadrada ou triangular.

2.2 Ações de vento

As ações de vento, em torres de telecomunicação, são calculadas segundo a NBR6123. Para torres treliçadas, as ações estáticas são calculadas através do item 7.7 e as ações dinâmicas, conforme o item 9 da NBR6123. Dois modelos de análise dinâmica são propostos pela norma: o modelo contínuo simplificado e o modelo discreto. O modelo dinâmico adotado no programa e nesse trabalho é o modelo contínuo simplificado. Admite-se que a velocidade média do vento mantém-se constante durante um intervalo de tempo de 10 minutos ou mais, produzindo nas edificações efeitos puramente estáticos, as ações médias. Entretanto as flutuações da velocidade do vento podem induzir a oscilações importantes em estruturas flexíveis, as ações flutuantes. Segundo a NBR6123, as ações flutuantes devem ser consideradas em estruturas com período fundamental de vibração superior a 1 segundo.

A NBR6123 propõe uma fórmula para obtenção do período fundamental. Essa fórmula é apresentada na Tabela 19 da NBR6123 e tem a seguinte expressão:

$$T(s) = 0,29\sqrt{H} - 0,4 \quad (1)$$

em que H é a altura total da torre em metros.

Como alternativa, o período fundamental pode ser obtido empregando-se métodos da teoria de vibrações de estrutura. Uma maneira de se calcular o período fundamental de vibração de uma estrutura é através da análise modal da estrutura não amortecida, a qual consiste na resolução de um problema de autovalores (Craig, 1981, Geradin, 1994). Para resolução do problema de autovalores foi implementado, no programa de automação, o método da potência (Geradin, 1994).

Observa-se que os valores encontrados com a fórmula proposta pela norma são bastante diferentes dos valores obtidos via análise modal. Encontrado o período fundamental, as ações de vento podem ser calculadas através dos métodos estático e dinâmico, a critério do projetista. As ações de vento são calculadas, automaticamente, através de rotinas implementadas no programa. São calculadas as ações para o vento na estrutura, nas antenas e na escada da torre.

Além das ações de vento automáticas, o programa permite a aplicação de forças nodais, na estrutura, e calcula, automaticamente, o seu peso próprio.

2.3 Dimensionamento

O dimensionamento das barras é feito pelo programa utilizando a NBR8800/86. Todas as barras são modeladas como elementos de pórtico espacial e dimensionadas à flexão composta.

Os perfis disponíveis são os perfis circulares e quadrados do catálogo da V&M do Brasil. No processo de dimensionamento, busca-se a configuração que produz o menor peso para a estrutura. O processo de dimensionamento consiste do cálculo das ações de vento e do peso próprio, obtenção dos esforços e dimensionamento das barras. Em seguida, com os novos perfis, recalculam-se as ações de vento e o peso próprio, obtêm-se os esforços e dimensionam-se as barras. Esse processo se repete até que nenhuma barra se modifique mais.

3. Exemplo numérico - torre de 30 metros de altura

3.1 Dados do problema

Para a análise comparativa de projetos de torres, adota-se um problema-modelo.

a) Dados da geometria do modelo:

- Altura total H de 30 metros.
- Base inferior B de 4 metros.
- Módulos de 2,5 metros.
- Parte reta h da torre de 10 metros.
- Base superior b de 2 metros.
- Máximo ângulo de inclinação das diagonais de 70°.
- Seção transversal triangular equilátera.

b) Dados para cálculo das ações de vento:

- Velocidade básica do vento de 40 m/s.
- Fator topográfico S1 igual a 1.
- Fator S2 para categoria II.
- Fator de ocupação S3 igual a 1,1.

c) Dados de antenas e escada:

- 0,283 m² de antenas com coeficiente de arrasto de 1,6 a 2/3H = 20 metros de altura.
- 5,5 m² de antenas com coeficiente de arrasto de 1,2 no topo (30 metros) da torre.
- Escada com área de 0,30 m²/m e coeficiente de arrasto de 1,2.
- Massa das antenas estimada em 50kg a 20 metros de altura e 50kg no topo da torre.

d) Dados dos perfis:

- Aço VMB300Corr – Fy = 300MPa, E = 205000MPa, G = 79000MPa.
- Perfis circulares de catálogo da V&M do Brasil.
- Perfis podendo variar a cada 5 metros.
- Esbeltez máxima de 200.

e) Combinações:

- 1,4 (Peso próprio + vento na estrutura, na escada e nas antenas, com vento incidindo a 0°).
- 1,4 (Peso próprio + vento na estrutura, na escada e nas antenas, com vento incidindo a 30°).
- 1,4 (Peso próprio + vento na estrutura, na escada e nas antenas, com vento incidindo a 60°).

Lembrando que as ações de vento podem ser calculadas pelo método estático ou pelo método dinâmico.

3.2 Dimensionando com ações de vento via método estático

O primeiro dimensionamento utiliza o método estático para obtenção das ações de vento. Desse dimensionamento, obteve-se uma configuração de perfis para a torre com peso de 1765kg. A Tabela 1 mostra um dos relatórios de materiais do programa de automação.

Após o dimensionamento da torre, solicitou-se do programa o cálculo do período fundamental de vibração da torre. O valor obtido é de 0,31 segundos. De acordo com a NBR6123 não seria necessária a utilização da análise dinâmica para cálculo das ações de vento. A norma define que apenas estruturas flexíveis necessitam dessa análise e define por estruturas flexíveis aquelas cujo período de vibração é maior do que 1 segundo.

Calculando-se o período de vibração, através da equação proposta pela NBR6123, em sua Tabela 19, obtém-se

$$T(s) = 0,29\sqrt{H} - 0,4 = 0,29\sqrt{30} - 0,4 = 1,19s \quad (2)$$

Tabela 1 - Resumo de perfis para dimensionamento com análise estática de vento.

| Material VMB300 | | | | |
|---------------------|------------|-------------|--------------------|-----------------|
| SEÇÃO | NUM_BARRAS | L_TOTAL (m) | PESO_LINEAR (kg/m) | PESO_TOTAL (kg) |
| VMB33.4x3.4x2.50C | 12 | 21.75 | 2.50 | 54.38 |
| VMB26.7x2.9x1.69C | 60 | 72.25 | 1.69 | 120.41 |
| VMB42.2x3.6x3.39C | 12 | 32.31 | 3.39 | 109.53 |
| VMB48.3x3.7x4.05C | 54 | 151.37 | 4.05 | 613.07 |
| VMB60.3x3.6x5.01C | 12 | 37.97 | 5.01 | 190.23 |
| VMB60.3x4.8x6.54C | 6 | 15.00 | 6.54 | 98.10 |
| VMB88.9x4.4x9.11C | 12 | 30.05 | 9.11 | 273.76 |
| VMB101.6x4.0x9.54C | 6 | 15.02 | 9.54 | 143.34 |
| VMB114.3x4.0x10.80C | 6 | 15.02 | 10.80 | 162.27 |
| PESO_TOTAL (kg) | | | | 1765.08 |

valor que justificaria a análise dinâmica. Comparando-se os valores obtidos pela análise modal e pela fórmula da norma conclui-se que a fórmula proposta pela norma, é demasiadamente simplificada. Com o atual nível de acesso e de utilização de programas de computador, não mais se justifica o uso dessa fórmula. Deve-se, sempre, buscar o período de vibração na teoria de estruturas.

3.3 Dimensionando com ações de vento via método dinâmico

Na seção anterior, a torre-modelo foi dimensionada, utilizando-se o método estático de cálculo das ações de vento. Após o dimensionamento, calculou-se o período de vibração fundamental, obtendo-se o valor de 0,31 segundos. Utilizando-se esse valor para o período de vibração, pode-se recalculá-la a estrutura através do método dinâmico para cálculo das ações de vento. Como resultado tem-se uma estrutura de 2017 kg, mais pesada do que a obtida através do método estático. A Tabela 2 mostra o resumo de materiais do programa.

Calculando-se o período fundamental de vibração para a última torre dimensionada, obtém-se o valor de 0,30 segundos, o qual é muito próximo do primeiro valor de 0,31 segundos. Se a diferença fosse grande, justificaria o redimensionamento da estrutura mais uma vez, utilizando-se o novo período como entrada para o cálculo das ações de vento.

3.4 Comparação dos resultados

Os resultados das seções 3.2 e 3.3 indicam que o cálculo das ações de vento via método estático conduz a torres mais leves do que se utilizando o método dinâmico. Considerando-se que o método estático é uma simplificação do método dinâmico, julga-se que a utilização do método estático conduz a resultados contrários a segurança. E isso ocorre mesmo para uma estrutura pouco

Tabela 2 - Resumo de perfis para dimensionamento com análise dinâmica de vento.

| Material VMB300 | | | | |
|---------------------|------------|-------------|--------------------|-----------------|
| SEÇÃO | NUM_BARRAS | L_TOTAL (m) | PESO_LINEAR (kg/m) | PESO_TOTAL (kg) |
| VMB33.4x3.4x2.50C | 12 | 21.75 | 2.50 | 54,38 |
| VMB26.7x2.9x1.69C | 48 | 52.50 | 1.69 | 88.72 |
| VMB26.7x3.9x2.20C | 12 | 18.75 | 2.20 | 41.25 |
| VMB48.3x3.7x4.05C | 48 | 136.37 | 4.05 | 552.32 |
| VMB60.3x3.6x5.01C | 30 | 85.28 | 5.01 | 427.25 |
| VMB73.0x5.2x8.63C | 6 | 15.00 | 8.63 | 129.45 |
| VMB101.6x4.0x9.54C | 6 | 15.02 | 9.54 | 143.34 |
| VMB114.3x4.0x10.80C | 6 | 15.02 | 10.80 | 162.27 |
| VMB114.3x4.8x12.90C | 6 | 15.02 | 12.90 | 193.82 |
| VMB114.3x5.6x14.90C | 6 | 15.02 | 14.90 | 223.87 |
| PESO_TOTAL (kg) | | | | 2016.67 |

flexível (0,3 segundos de período de vibração).

Os métodos estáticos e dinâmicos diferenciam-se no cálculo da pressão de vento na estrutura. A Figura 1 compara os valores obtidos para os dois métodos. Observa-se que a área sobre as duas curvas (Estático e Dinâmico_Total) são muito próximas. Isso significa que a força horizontal aplicada pelo vento, na estrutura, tem o mesmo valor independente do método utilizado. Entretanto o centro de gravidade das duas curvas é bem diferente, fazendo com que o método dinâmico aplique um momento de tombamento na estrutura maior que o método estático.

Deve-se, também, atentar que as antenas estão posicionadas no alto da torre. A pressão de vento no topo da torre, por exemplo, vale 1384 N/m² para o método estático e 2224 N/m² para o método dinâmico. Essa diferença de cerca de 60% certamente, contribui para que os esforços na torre sejam maiores, quando utilizado o método dinâmico das ações de vento.

4. Exemplo numérico - torre de 60 metros de altura

4.1 Dados do problema

Nesse segundo exemplo numérico, são utilizados os mesmos dados de projeto do exemplo anterior (seção 3), com exceção dos dados da geometria da torre e do posicionamento das antenas. Este segundo exemplo trata de uma torre de 60 metros de altura. Os dados de vento, escadas, perfis e combinações das ações são os mesmos do exemplo anterior (seção 3). Os dados geométricos da torre são elencados a seguir.

a) Dados da geometria

- Altura total H de 60 metros.
- Base inferior B de 7 metros.
- Módulos de 5 metros.
- Parte reta h da torre de 20 metros.
- Base superior b de 3 metros.
- Máximo ângulo de inclinação das diagonais de 65°.
- Seção transversal triangular equilátera.

b) Posicionamento das antenas

- 0,283 m² de antenas com coeficiente de arrasto de 1,6 a 2/3H = 40 metros de altura.
- 5,5 m² de antenas com coeficiente de arrasto de 1,2 no topo (60 metros) da torre.

4.2 Dimensionando com ações de vento via método estático

O dimensionamento da torre, utilizando-se o método estático das ações de vento, conduz a uma estrutura de 6505 kg. O período fundamental de vibração dessa estrutura obtido via análise modal é de 0,56 segundos. De acordo com a NBR6123, essa estrutura não seria flexível, pois seu período é menor que 1 segundo. Calculando-se o período através da equação da NBR6123:

$$T(s) = 0,29\sqrt{H} - 0,4 = 0,29\sqrt{60} - 0,4 = 1,85s \quad (2)$$

Comparando-se os valores obtidos pela análise modal e pela fórmula da norma, conclui-se, mais uma vez, que a fórmula proposta pela norma é, demasiadamente, simplificada.

4.3 Dimensionando com ações de vento via método dinâmico

Utilizando-se o período de vibração encontrado na seção 4.2, pode-se calcular as ações de vento através do método dinâmico. O período encontrado foi de 0,56 segundos. Dimensionando-se a torre com ações dinâmicas de vento, obtém-se uma estrutura de 7929 kg, mais pesada do que a obtida utilizando ações estáticas de vento. Calculando-se o período fundamental de vibração para a última torre dimensionada obtém-se o valor de 0,52 segundos.

4.4 Comparação dos resultados

Os resultados das seções 4.2 e 4.3 indicam que o cálculo das ações de vento via método estático conduz a torres mais leves do que se utilizando o método dinâmico, sendo o método estático contrário à segurança da estrutura. A Tabela 2 apresenta os resultados de cálculo da pressão do vento para os dois métodos utilizados. As conclusões aqui obtidas são consistentes com as da seção 3.4.

O programa exporta os perfis encontrados para um arquivo tipo dxf, o qual pode ser visualizado no AutoCad (Figura 3). Essa função visa a facilitar o projeto de fabricação da torre.

5. Conclusões

Nesse trabalho, foi apresentado um programa de computador para automação do projeto de torres treliçadas de telecomunicações utilizando perfis tubulares. O programa AutoTorre, desenvolvido na FEC/Unicamp, automatiza o cálculo das ações de vento, bem como do período de vibração e do dimensionamento das barras da estrutura. O programa é gratuito para uso acadêmico e profissional e pode ser obtido em www.fec.unicamp.br/~requena.

Comparando-se o dimensionamento de duas torres (30 e 60 metros de altura), observou-se que o cálculo sugerido pela NBR6123, para o período de vibração, é demasiado aproximado e não deve ser utilizado. Com a facilidade de acesso a programas de computador que realizam o cálculo do período de vibração não se justifica o uso de tal artifício de cálculo. Notou-se, ainda, a necessidade da análise dinâmica das ações de vento. O cálculo estático, que é uma simplificação, conduz a resultados contrários à segurança da estrutura.

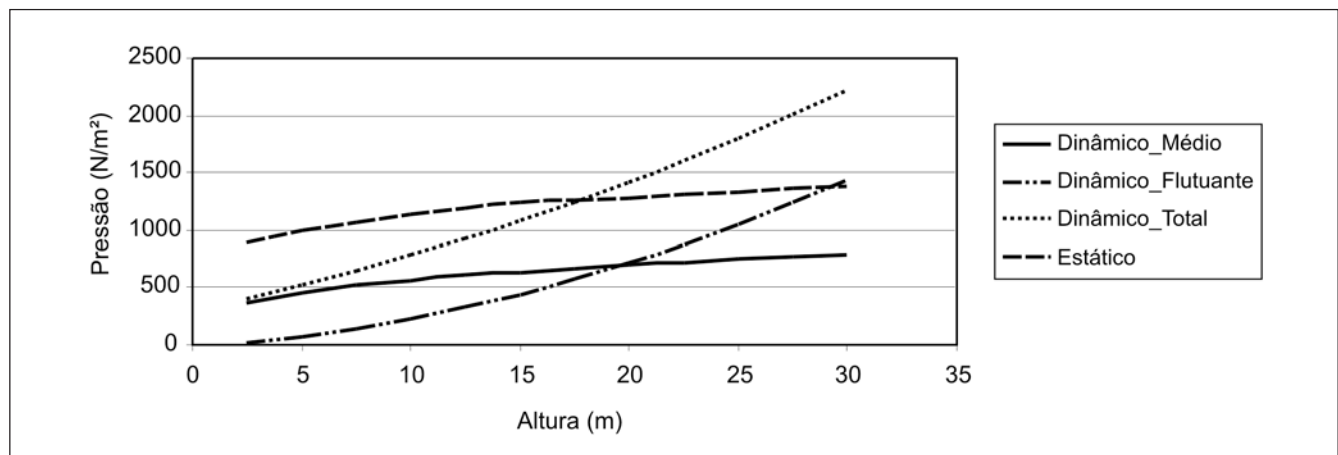


Figura 1 - Comparação da pressão do vento para métodos estático e dinâmico.

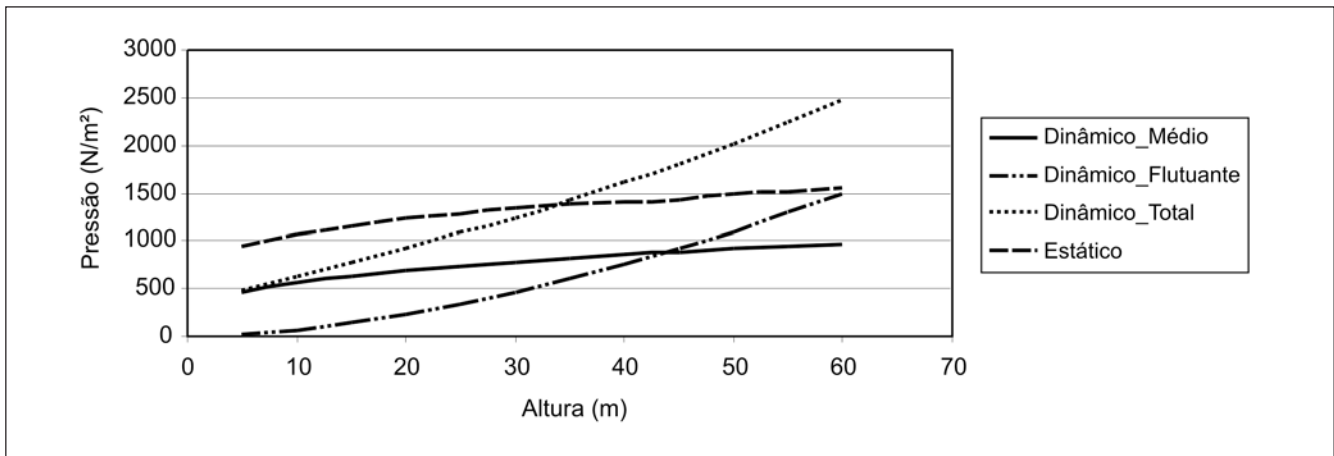


Figura 2 - Comparação da pressão do vento para métodos estático e dinâmico.

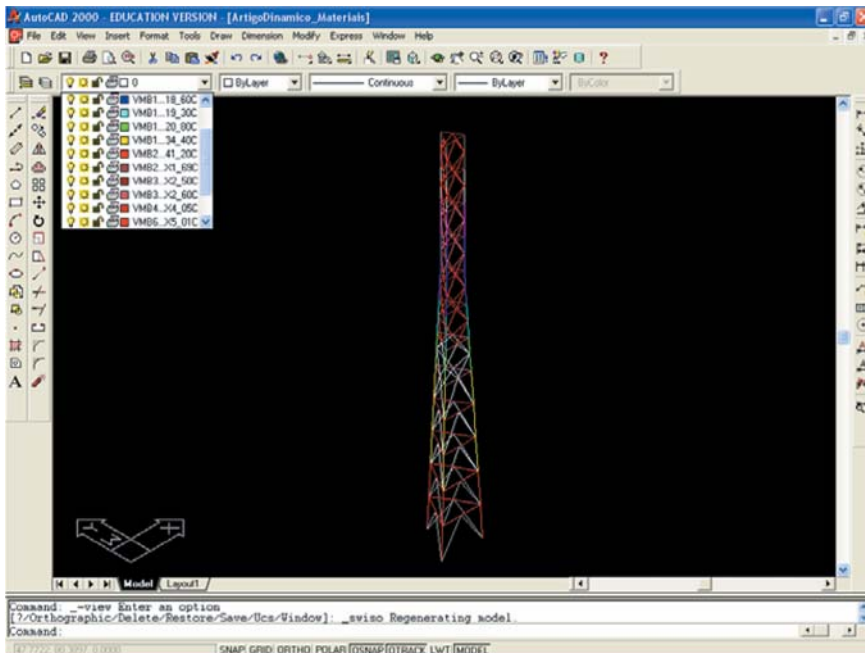


Figura 3 - Arquivo dxf com os perfis obtidos no dimensionamento visualizado no AutoCad. O nome das "layers" indica o perfil da barra.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem à V&M do Brasil, pela parceria e suporte financeiro no desenvolvimento do trabalho, e à FEC/Unicamp, pelo suporte técnico.

7. Referências bibliográficas

- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT - *NB599(NBR6123)/87 - Forças devidas ao vento em edificações*, Rio de Janeiro: ABNT.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT - *NBR8800/86 Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios*, Rio de Janeiro: ABNT.
- BLESSMANN, J. *Introdução ao estudo das ações dinâmicas do vento*. Porto Alegre: Editora da Universidade - UFRGS. 98
- CRAIG Jr, R. R. *Structural dynamics - an introduction to computer methods*. John Wiley & Sons, 1981.
- GÉRADIN, M., RIXEN, D. *Mechanical vibrations - theory and application to structural dynamics*. Paris: Ed Wiley, 1994.
- NASCIMENTO, F. O. D. A. *Análise de estruturas metálicas de torres treliçadas autoportantes para telecomunicações*. Campinas: Unicamp. (Dissertação de Mestrado).
- REQUENA, J. A. V., FORTI, T. L. D. *Forças devidas ao vento em torres metálicas treliçadas autoportantes*. Campinas: Apostila FEC-UNICAMP, 2002.
- WEAVER Jr, W., GERE, A. M. *Análise de estruturas reticuladas*. Rio de Janeiro: Ed. Guanabara Dois, 1981.

Artigo recebido em 02/10/2006 e aprovado em 29/11/2006.

REM - Revista Escola de Minas
71 anos divulgando CIÊNCIA.



www.rem.com.br