



## A IMPORTÂNCIA DA MODELAGEM DE ESTRUTURAS RETICULADAS TRIDIMENSIONAIS NO ENSINO DE ENGENHARIA

**José Guilherme Santos da Silva** - [jgss@uerj.br](mailto:jgss@uerj.br)

**Pedro Colmar G. da S. Vellasco** - [vellasco@uerj.br](mailto:vellasco@uerj.br)

**Marcel Isandro Ribeiro de Oliveira** - [marcel@labbas.eng.uerj.br](mailto:marcel@labbas.eng.uerj.br)

Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Faculdade de Engenharia, FEN

Rua São Francisco Xavier, N<sup>o</sup> 524, Maracanã

CEP: 20550-900, Rio de Janeiro, RJ

**Resumo.** Atualmente, no âmbito dos cursos de graduação em engenharia, as técnicas de modelagem computacional são muito pouco discutidas no que se refere a sua aplicação em estruturas tridimensionais reticuladas que possuam níveis de complexidade compatíveis com a prática de projeto. Os conceitos de mecânica estrutural são transmitidos aos alunos de engenharia quase sempre através de estruturas muito simplificadas, o que inibe o desenvolvimento de habilidades relacionadas a modelagens de sistemas mais complexos. Essas modelagens requerem algum conhecimento de lógica de programação e de manipulação de sistemas de coordenadas, o que se presume não representar uma grande dificuldade para alunos de engenharia. Infelizmente, não é o que ocorre, pois tem sido verificado, freqüentemente, que os alunos de graduação apresentam uma certa dificuldade no que tange à modelagem de problemas tridimensionais. O principal objetivo deste trabalho é, então, descrever algumas fases pertencentes à modelagem deste tipo de estrutura. Para tal, utilizaremos o modelo de uma torre de telecomunicações real, composta por perfis de aço do tipo cantoneira. Pretende-se, com o desenvolvimento deste trabalho, discutir e aplicar técnicas de modelagem computacional ao ensino de engenharia, tendo como base exemplos de estruturas tridimensionais existentes, mostrando aos alunos de graduação a possibilidade do emprego simples, racional e adequado dessas ferramentas computacionais.

**Palavras-chave:** Ensino de engenharia, Estruturas tridimensionais, Torres de aço, Método dos elementos finitos, Modelagem computacional.

## 1. INTRODUÇÃO

As técnicas de modelagem computacional são muito pouco discutidas nos cursos de graduação em engenharia, no que se refere a sua aplicação em estruturas tridimensionais reticuladas que possuam um nível de complexidade compatível com a prática corrente de projeto. Essas estruturas podem ser associadas, por exemplo, a torres metálicas de telecomunicações e de transmissão de energia.

Os conceitos de mecânica estrutural são transmitidos aos alunos de engenharia quase sempre através de estruturas excessivamente simplificadas o que, de forma geral, inibe o desenvolvimento de habilidades relacionadas a modelagens de sistemas mais complexos. Essas modelagens requerem, geralmente, um razoável conhecimento de lógica de programação computacional e de manipulação de sistemas de coordenadas, o que se presume não representar uma grande dificuldade para alunos de graduação em engenharia.

Infelizmente, não é o que ocorre na prática, pois tem sido verificado, de forma freqüente, que os alunos de graduação em engenharia apresentam uma dificuldade marcante no que tange a modelagem computacional de problemas tridimensionais. Isto porque existe um abismo enorme entre os conhecimentos adquiridos nas disciplinas do ciclo básico (Processamento de Dados, Álgebra Linear, Análise Vetorial, Cálculo e Física) e o que se faz necessário para o entendimento desse tipo de problema.

Praticamente, todas as fases da modelagem associadas à etapa de pré-processamento são realizadas com base em lógica computacional o que, sem sombra de dúvida, minimiza o tempo gasto no processo de modelagem. Apesar da grande complexidade das estruturas em jogo, relacionadas a torres de aço de telecomunicações e de transmissão de energia, as ferramentas computacionais hoje disponíveis, quando utilizadas de forma racional, são capazes de proporcionar uma grande economia de tempo, e, bem como, a eliminação de simplificações na análise, que nem sempre são adequadas para a representação dos modelos estruturais associados à prática corrente de projeto, SILVA (2001).

Assim sendo, o principal objetivo deste trabalho é o de discutir e aplicar técnicas de modelagem computacional ao ensino de engenharia, mostrando de forma bastante didática as principais fases associadas ao processo de modelagem de estruturas tridimensionais reticuladas. Para tal, será empregado o projeto referente a uma torre de aço de telecomunicações, NBR 5422 (1985), existente, com 100m de altura e composta por perfis de aço do tipo cantoneira. Resultados associados à resposta estática da torre em questão, em termos de deslocamentos e tensões, são discutidos e as diferenças quantitativas e qualitativas que podem ocorrer em determinados tipos de modelagens são apresentadas e comentadas.

## 2. MODELAGEM DE ESTRUTURAS RETICULADAS

Este tipo de arranjo estrutural é largamente utilizado nas estruturas civis, principalmente naquelas compostas por perfis de aço, tendo como característica marcante seu baixo peso próprio.

Um aspecto relevante no que se refere à modelagem de estruturas reticuladas, diz respeito à consideração de que as ligações entre os membros de um dado sistema estrutural sejam rotuladas diz-se que o sistema é do tipo “treliçado”, como por exemplo no caso das torres de aço de telecomunicações. Esta denominação pressupõe que todos os elementos da estrutura sofram solicitações resultantes apenas de esforços axiais. Tal suposição, em determinados casos, deve ser considerada inadequada, pois em inúmeras situações encontramos torres de aço compostas por ligações projetadas para serem do tipo rotuladas, todavia transmitem uma parcela de momento fletor.

Assim sendo, os modelos estruturais que representam essas ligações devem ser convenientemente avaliados, com rigor, sendo posteriormente escolhido o tipo de modelo computacional representativo do sistema real.

Uma outra característica importante deste tipo de estrutura é que, geralmente, são compostas por painéis padronizados, seguindo uma certa regra de variação de sua geometria. Esta característica permite que a estrutura possa ser modelada mais facilmente, através da parametrização de alguns de seus elementos geométricos. Para que exista uma certa eficiência nesse processo é necessário que o programa de análise estrutural utilizado seja capaz de oferecer recursos tais como o armazenamento de variáveis escalares e vetoriais e comandos repetitivos e condicionais.

Evidentemente, um aluno de graduação familiarizado com esses conceitos terá todas as condições de desenvolver o seu potencial pleno, desde que exista uma interação efetiva entre o que se aprende nos cursos de graduação em engenharia nos ciclos básico e profissional. A partir dessa interação, absolutamente necessária, conceitos teóricos importantes estudados em disciplinas tais como Processamento de Dados, Álgebra Linear, Análise Vetorial, Cálculo e Física, serão mais bem compreendidos e empregados pelos alunos de graduação.

### **3. MODELOS ESTRUTURAIS PARA TORRES DE TELECOMUNICAÇÕES**

Os métodos tradicionais de análise estrutural utilizados no projeto das torres de aço de telecomunicações e transmissão de energia, tendem a assumir que os elementos sejam bi-rotulados, ou seja, são solicitados somente por esforços axiais. Esta premissa ocasiona uma perda generalizada de vínculos, o que faz com que o modelo estrutural apresente mecanismos de deformação incompatíveis com a sua função estrutural.

Uma solução bastante utilizada para combater estas perdas de vínculo é a inserção de barras fictícias ao modelo real. Estas barras, que possuem uma rigidez muito menor que as barras reais da estrutura, são adicionadas ao longo da altura da torre de forma a garantir a geração de um modelo estrutural sem a existência de mecanismos. Esta solução vem sendo bastante questionada, pois, além de aumentar excessivamente o trabalho referente à modelagem computacional, elimina completamente a possibilidade de avaliação de uma grandeza importante para a análise da resistência dos elementos, que é o momento fletor.

Investigações anteriores utilizam outras duas estratégias de modelagem, SILVA (2003). Uma delas se baseia na confecção do modelo computacional da torre de aço, através da utilização apenas de elementos finitos de viga, ou seja, todos os membros são solicitados, em maior ou menor grau, por esforços de flexão. Uma outra estratégia de modelagem visa a representação conveniente dos tipos de ligação existentes através da combinação dos elementos finitos de viga e de treliça, SILVA (2003).

Essas investigações apontaram para uma grande importância dos efeitos do tipo de modelagem na análise de resistência dos elementos de maior rigidez a flexão, SILVA (2003). As referidas estratégias de modelagem serão exemplificadas ao final do trabalho, de forma a mostrar a importância de se formar alunos de graduação em engenharia com o mínimo de maturidade para aplicar os conceitos teóricos absorvidos na graduação.

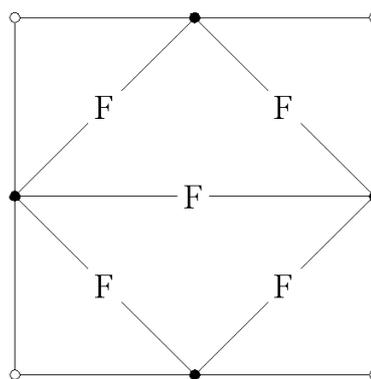
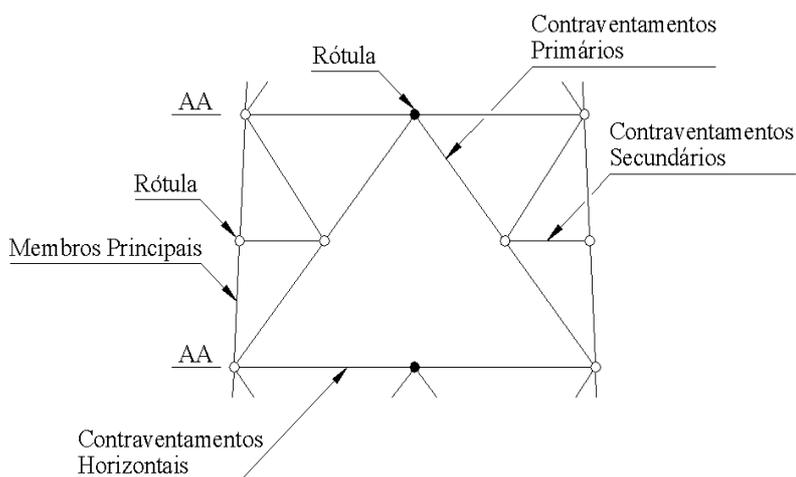
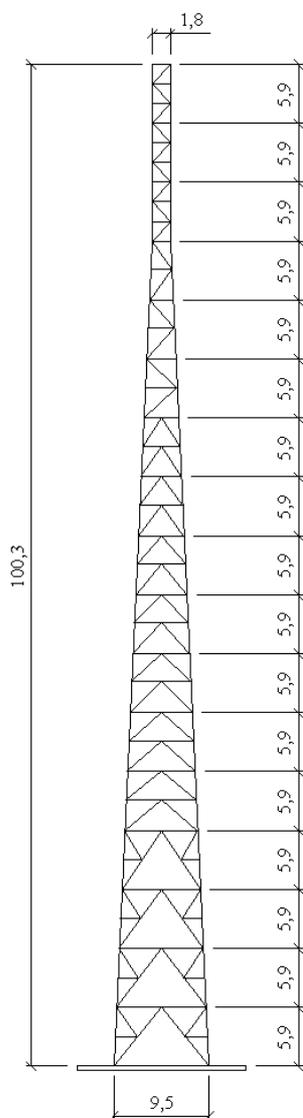
### **4. CONFECÇÃO DO MODELO DE ELEMENTOS FINITOS**

Com o objetivo de fornecer informações básicas, bastante simples, aos alunos de graduação, aplicadas ao ensino de engenharia, é desenvolvido um roteiro para a modelagem computacional, via Método dos Elementos Finitos (MEF), de uma torre de aço de telecomunicações, NBR 5422 (1985), existente, com 100m de altura e composta por perfis de aço do tipo cantoneira, como mostra a Figura 1, SILVA (2003). Na seqüência, a Figura 2

apresenta a inserção das barras fictícias ao modelo real, adicionadas ao longo da altura da torre, de forma a garantir a geração de um modelo estrutural sem a existência de mecanismos, SILVA (2003).

O referido roteiro visa, também, a minimização do esforço a ser empregado no pré-processamento da estrutura, proporcionando uma grande economia de tempo e evitando erros indesejáveis. As principais fases contidas neste processo de modelagem são as seguintes:

- a) Definição do tipo de elemento finito a ser utilizado;
- b) Inserção das propriedades do material;
- c) Definição das seções transversais utilizadas;
- d) Geração dos nós pertencentes à estrutura;
- e) Geração dos elementos e atribuição das seções transversais;
- f) Determinação das condições de apoio;
- g) Aplicação do carregamento sobre a estrutura.



**SEÇÃO AA**

Figura 1 - Geometria da torre (dimensões em m).

Figura 2 - Posicionamento das barras fictícias (F), ao longo da altura da torre de aço de telecomunicações.

#### 4.1 Tipo do elemento finito

O tipo de elemento finito a ser utilizado deve ser escolhido de forma a simular de maneira satisfatória o comportamento real da estrutura. A natureza do elemento finito é, certamente, um fator preponderante na resposta da estrutura, já que determina os tipos de esforços e deformações a serem considerados na análise. Como exposto anteriormente, a escolha não é restrita a apenas um tipo de elemento, sendo possível a utilização de uma combinação de vários elementos de natureza distinta.

#### 4.2 Propriedades do material

Considerando, inicialmente, os casos em que se deseja proceder apenas uma análise linear-elástica, os dados de entrada necessários para a caracterização do material utilizado na análise são bastante simples. As principais características a serem fornecidas pelo usuário são as seguintes:

- a) Módulo de elasticidade longitudinal -  $E$  (Pa ou  $N/m^2$ )
- b) Coeficiente de Poisson -  $\nu$  (adimensional)
- c) Massa específica -  $\rho$  ( $kg/m^3$ )

Evidentemente, deve-se ressaltar que a utilização do sistema internacional de unidades (SI), para a introdução destes dados é recomendada.

No caso da modelagem feita com base apenas nos elementos finitos de treliça, as propriedades do material são parâmetros de controle para a rigidez das barras fictícias. A estas barras é atribuído um módulo de elasticidade tal que defina sua constante de rigidez em cerca de 1% a 5% daquela correspondente a barra real de menor área de seção transversal. A densidade do material atribuída as barras fictícias é nula, evitando possíveis distorções nos valores finais associados à resposta estática e dinâmica do modelo.

#### 4.3 Seções transversais dos elementos

É fundamental que todas as propriedades das seções transversais dos elementos a serem utilizadas sejam definidas antes da geração do modelo de elementos finitos. Estas propriedades podem, então, ser consideradas de duas maneiras distintas:

- a) Através do fornecimento direto das propriedades geométricas da seção tais como área e inércia. Este tipo de entrada é utilizada quando o programa computacional não calcula automaticamente as propriedades de seções típicas ou quando a seção for do tipo genérica.
- b) Através de dados referentes a seções tipicamente utilizadas. Espessura e largura das abas de uma cantoneira com seção do tipo "L", por exemplo. Nesse caso o pré-processador do programa deve oferecer um recurso numérico para o cálculo automático das propriedades geométricas da seção.

#### 4.4 Determinação das coordenadas dos nós

Sem sombra de dúvida, esta é uma das fases mais trabalhosa e, também, cansativa no que tange ao processo de definição da geometria da estrutura, desde que o usuário se proponha a definir as coordenadas, "x", "y" e "z", de cada nó inserido no modelo, individualmente.

Um procedimento alternativo, mais eficiente, seria o de definir equações que expressem as coordenadas "x" e "y" do modelo, associadas a um plano horizontal, em função da coordenada "z", referente à altura da estrutura. De modo a exemplificar tal procedimento, no

que diz respeito à torre de aço em estudo, mostrada na Figura 1, verifica-se que esta apresenta dois módulos característicos:

- a) Tronco-piramidal até a altura de 82,6m;
- b) Prismática acima da altura de 82,6m.

O trecho tronco-piramidal se caracteriza por ter suas dimensões em um plano horizontal, referente à base da torre, variando de 9,5m até 1,8m. O trecho prismático possui dimensões de base de 1,8m ao longo de toda a sua extensão, como apresentado na Figura 1.

Considerando-se a base da torre de telecomunicações vista a partir de um plano horizontal, as coordenadas de seus nós podem ser determinadas a partir da definição de apenas dois vetores: o primeiro é associado à altura da torre,  $\mathbf{h}$ , e um segundo vetor,  $\mathbf{x}$ , referente à base do modelo (quadrada). Para tal, é apresentado a seguir um algoritmo, bastante simples, que possa gerar as coordenadas de todos os nós pertencentes à estrutura principal da torre, elaborado com base nos vetores mencionados,  $\mathbf{h}$  e  $\mathbf{x}$  e na geometria da torre em estudo, como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Algoritmo para geração das coordenadas dos nós da torre de telecomunicações.

Para  $i = 1$  até 38 ! *Série 1*

Se  $i < 29$  ! *Condição 1*

$$h(i) = -(5,9/2) + (5,9/2)*i$$

$$x(i) = 2,95 - [(2,95 - 0,9)/82,6]*h(i)$$

Caso contrário

$$h(i) = 82,6 + (5,9/3)*(i - 29)$$

$$x(i) = 0,9$$

Fim da condição 1

Crie o nó de nº ( $i$ ) nas coordenadas:  $x(i)$ ;  $x(i)$ ;  $h(i)$  ! *nós do 1º quadrante*

Crie o nó de nº ( $i + 38$ ) nas coordenadas:  $-x(i)$ ;  $x(i)$ ;  $h(i)$  ! *nós do 2º quadrante*

Crie o nó de nº ( $i + 2*38$ ) nas coordenadas:  $-x(i)$ ;  $-x(i)$ ;  $h(i)$  ! *nós do 3º quadrante*

Crie o nó de nº ( $i + 3*38$ ) nas coordenadas:  $x(i)$ ;  $-x(i)$ ;  $h(i)$  ! *nós do 4º quadrante*

Retornar para a execução da série 1

O algoritmo é capaz de gerar as coordenadas referentes a 152 nós a partir de apenas 13 linhas de comandos de programação básica, como é ilustrado na Tabela 1, o que, com absoluta certeza, é muito mais eficiente e racional do que inserir as coordenadas de cada nó de forma individual, com base apenas na utilização da interface gráfica, nem sempre amigável, do software utilizado. Além disso, as dimensões contidas nas equações que compõem o algoritmo podem ser escritas através de parâmetros, o que permite uma facilidade muito grande no que tange ao projeto ou modelagem de torres de geometria similar.

Além dos nós referentes às extremidades dos elementos, definidos de acordo com a Tabela 1, deve-se definir, ainda, aqueles a serem utilizados na orientação do elemento finito no espaço. Diferentemente do elemento de treliça, que é definido apenas por 2 nós (“i” e “j”), o elemento de viga espacial necessita, adicionalmente, de um terceiro nó (“k”). Estes nós adicionais deverão ser posicionados de uma forma tal que, conhecidos os nós “i” e “j” de um elemento qualquer do modelo, este possa ser orientado de acordo com a sua posição real na estrutura.

O artifício empregado ao longo do desenvolvimento deste trabalho, para dar respaldo a geração do nó de referência, nó “k”, foi o de idealizar a construção de um cubo imaginário, onde se define no centro de cada face um nó de referência. Deste modo, são criados 6 nós de referência, posicionados de acordo com as coordenadas apresentadas na Tabela 2 e ilustradas na Figura 3. A definição do nó de referência “k” será mais bem ilustrada quando da leitura do próximo item, item 4.5, do presente trabalho.

Tabela 2 - Coordenadas dos nós de referência da estrutura.

Nº do nó	Coordenada x	Coordenada y	Coordenada z
1001	$+\infty$	0	50
1002	0	$+\infty$	50
1003	$-\infty$	0	50
1004	0	$-\infty$	50
1005	0	0	$-\infty$
1006	0	0	$+\infty$

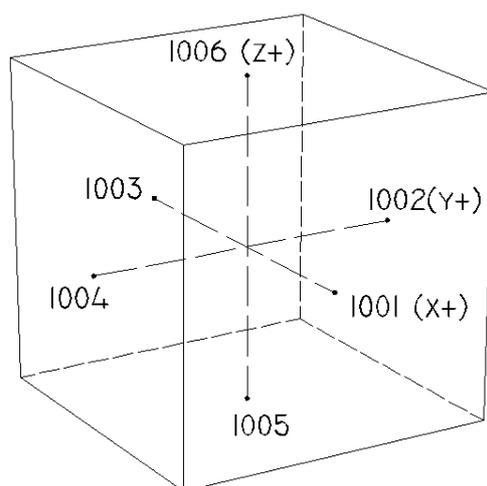


Figura 3 - Posicionamento dos nós de referência no espaço.

#### 4.5 Definição dos elementos do modelo estrutural

Esta etapa do processo da modelagem computacional deve ser iniciada, necessariamente, após a conclusão das etapas anteriores, pois para a definição dos elementos deve-se especificar, com exatidão, os seus nós extremos (“i” e “j”), nós de orientação (“k”), e, bem como, seus atributos (tipo do elemento finito, modelo do material e características da seção transversal).

Como mencionado anteriormente, faz-se necessário que se tenham dois nós para que seja possível gerar um elemento finito de treliça, e três nós para que seja definido um elemento finito de viga. Assim sendo, os elementos finitos do modelo estrutural devem ser agrupados, de forma que seja possível executar procedimentos repetitivos associados aos comandos de geração de elementos. Os elementos finitos, componentes da estrutura principal da torre de aço em estudo, associados as “pernas do modelo”, podem ser gerados, por exemplo, através do algoritmo mostrado na Tabela 3.

Com base no algoritmo apresentado na Tabela 3, pode-se observar que os elementos são agrupados em blocos onde estes possuam a mesma seção transversal, de modo a evitar erros na atribuição das características geométricas das seções transversais, bastante comuns na fase de pré-processamento. O algoritmo em questão utiliza uma estrutura repetitiva, baseada em uma linguagem de programação específica para tal, associada ao programa de elementos finitos ANSYS, ANSYS (1998).

A utilização deste algoritmo, com apenas 34 linhas de comandos de programação básica, Tabela 3, permite a geração automática de 148 elementos, o que viabiliza, sem sombra de dúvida, uma economia significativa no que tange ao tempo gasto na fase de pré-processamento dos modelos. Além disso, possíveis fontes de erro são praticamente eliminadas, já que o processo automático não requer interação repetitiva entre o usuário e a máquina.

Tabela 3 - Algoritmo para geração dos elementos finitos da estrutura principal da torre.

<pre>*do, j, 0, 3   secnum, 1   *do, i, 1, 8     e, i+38*j, i+38*j+1, 1001+j   *enddo   secnum, 2   *do, i, 9, 14     e, i+38*j, i+38*j+1, 1001+j   *enddo   secnum, 3   *do, i, 15, 20     e, i+38*j, i+38*j+1, 1001+j   *enddo   secnum, 4   *do, i, 21, 22     e, i+38*j, i+38*j+1, 1001+j   *enddo</pre>	<pre>secnum, 5   *do, i, 23, 28     e, i+38*j, i+38*j+1, 1001+j   *enddo   secnum, 6   *do, i, 29, 31     e, i+38*j, i+38*j+1, 1001+j   *enddo   secnum, 7   *do, i, 32, 34     e, i+38*j, i+38*j+1, 1001+j   *enddo   secnum, 8   *do, i, 35, 37     e, i+38*j, i+38*j+1, 1001+j   *enddo *enddo</pre>
--	---

De acordo como mencionado no item anterior deste trabalho, item 4.4, um parâmetro de extrema relevância para uma boa definição dos elementos finitos de viga no espaço, diz respeito ao nó de referência, nó “k”. O fornecimento apenas dos nós “i” e “j” não são suficientes para posicionar o elemento de viga no espaço, pois os referidos nós definem apenas o eixo “x”, local do elemento. O eixo “x”, local, passa pelos nós “i” e “j” do elemento com o sentido positivo “i”-“j”, como mostra a Figura 4.

Deste modo, os eixos “y” e “z”, locais, dos elementos de viga poderiam assumir qualquer direção, mas, evidentemente, sempre ortogonais entre si. Quando o nó “k” é fornecido ao programa, pelo usuário, deve-se fazer com que o eixo “z”, local do elemento, seja paralelo ao único plano gerado pelos nós “i”, “j” e “k”. Desta forma, tem-se uma definição precisa do elemento de viga tridimensional. A Figura 4 ilustra um exemplo do emprego do nó “k” na orientação dos elementos de viga no espaço.

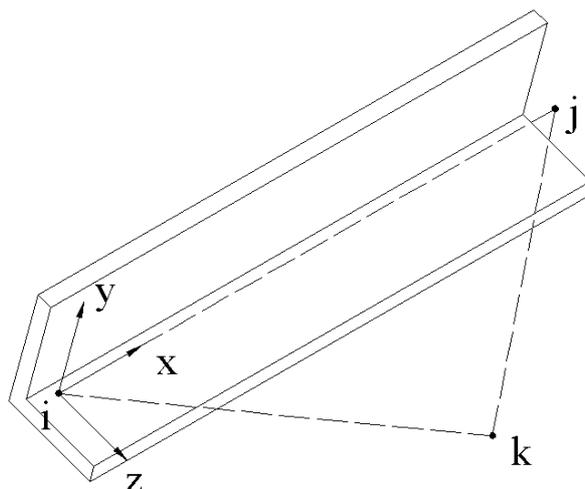


Figura 4 - Orientação dos elementos finitos tridimensionais com base no emprego do nó “k”.

#### 4.6 Determinação das condições de apoio do modelo

Tradicionalmente, as ligações correspondentes aos elementos estruturais da base de uma torre de aço de telecomunicações ou de transmissão de energia são consideradas rotuladas. Dessa forma, as condições de apoio da estrutura são perfeitamente definidas pela restrição dos deslocamentos translacionais associados as três direções globais, “X”, “Y” e “Z”. Tal restrição sobre os deslocamentos é feita nos nós da base da torre.

#### 4.7 Aplicação do carregamento sobre a estrutura

No que tange a aplicação do carregamento sobre a estrutura da torre, este processo, bastante simples, é feito a partir de 3 casos de carga isolados:

- a) Cargas gravitacionais;
- b) Cargas devidas ao vento, incidente na direção perpendicular a base da estrutura;
- c) Cargas devidas ao vento, incidente na direção diagonal à base da torre.

O carregamento gravitacional é resultante, basicamente, do peso próprio da estrutura, sendo definido através da densidade do material e pela geometria dos elementos. Com respeito ao carregamento proveniente do vento, este deve ser determinado através da norma brasileira NBR 6123, NBR 6123 (1988). As pressões do vento são substituídas por esforços aplicados diretamente sobre os nós da estrutura, ao longo de sua altura. Além das pressões resultantes do arrasto, provocado pela própria estrutura, temos os esforços provenientes das pressões nas antenas, cabos e escadas fixadas à estrutura da torre.

Alguns programas de análise estrutural disponíveis no mercado, oferecem a possibilidade de se trabalhar com vários casos de carga dentro de um mesmo modelo. Deste modo, é possível a combinação conveniente entre os mesmos. No caso das torres de telecomunicações, de forma geral, duas hipóteses são assumidas:

- a) Cargas gravitacionais + Cargas de vento atuantes na direção perpendicular;
- b) Cargas gravitacionais + Cargas de vento atuantes na direção diagonal.

O usuário pode fornecer os carregamentos nodais, forças nos nós, a partir de vetores mono-indexados e, conseqüentemente, todo o processo associado à inclusão do carregamento na análise pode ser resumida em um único arquivo de entrada.

## 5. EXEMPLO DE APLICAÇÃO

De forma a aplicar as técnicas de modelagem computacional ao ensino de engenharia, após uma explicação bastante didática acerca das principais etapas associadas ao processo de modelagem de estruturas tridimensionais reticuladas, considera-se, agora, um exemplo associado ao projeto de uma torre de aço de telecomunicações, NBR 5422 (1985), com 100m de altura e composta por perfis de aço do tipo cantoneira, como mostrado nas Figuras 1 e 2.

São apresentados a seguir, os resultados referentes à resposta estática da torre metálica em estudo, correspondente aos deslocamentos translacionais horizontais e tensões, com base no processo de modelagem desenvolvidos neste estudo, Tabelas 4 e 5. As cargas atuantes na estrutura são o peso próprio da mesma e as cargas de vento, NBR 2123 (1988), correspondentes às direções perpendicular e diagonal a base da torre.

Tabela 4 - Deslocamentos máximos obtidos para três estratégias de modelagem distintas.

Estratégias de modelagem: I - Modelagem com base em elementos de treliça II - Modelagem com base em elementos de viga III - Modelagem mista utilizando elementos de viga e de treliça		
Modelagem	Vento Perpendicular	Vento Diagonal
	$u_{\text{máx.}}$ (mm)	$u_{\text{máx.}}$ (mm)
I	941	<b>1129</b>
II	928	1114
III	940	<b>1129</b>
Diferença (I e III)	-	-
Diferença (II e III)	1,29%	1,35%

Tabela 5 - Tensões máximas atuantes nas barras da estrutura.

Estratégias de modelagem: I - Modelagem com base em elementos de treliça II - Modelagem com base em elementos de viga III - Modelagem mista utilizando elementos de viga e de treliça		
Modelagem	Vento Perpendicular	Vento Diagonal
	$\sigma_{\text{máx.}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{máx.}}$ (MPa)
I	135,5 (Compressão)	221,3 (Compressão)
II	198,9 (Compressão)	<b>324,8</b> <b>(Compressão)</b>
III	186,4 (Compressão)	305 (Compressão)
Diferença (I e III)	37,6%	37,8%
Diferença (II e III)	6,3%	6,1%

A observação dos resultados apresentados, associados às tensões e deslocamentos máximos presentes na análise, Tabelas 4 e 5, com referência a modelagem da torre de aço de telecomunicações, permitem concluir que:

No que diz respeito aos valores máximos dos deslocamentos translacionais horizontais, estes, de forma geral, não são modificados pelo tipo de modelagem, independentemente do tipo de elemento finito utilizado, de acordo com a Tabela 4.

No que tange aos valores máximos de tensões observa-se uma diferença significativa, da ordem de 40%, existente entre as modelagens I e III, o que, sem sombra de dúvida, pode influenciar na análise de resistência das peças da estrutura, como mostra a Tabela 5.

Pode-se verificar que, conceitos bastante simples de modelagem computacional, os quais deveriam estar associados, correntemente, ao ensino de engenharia, permitem obter conclusões relevantes acerca do comportamento de sistemas estruturais importantes como, por exemplo, as torres de aço. Na seqüência do texto, a Figura 5 apresenta a variação das tensões ao longo da altura da torre analisada.

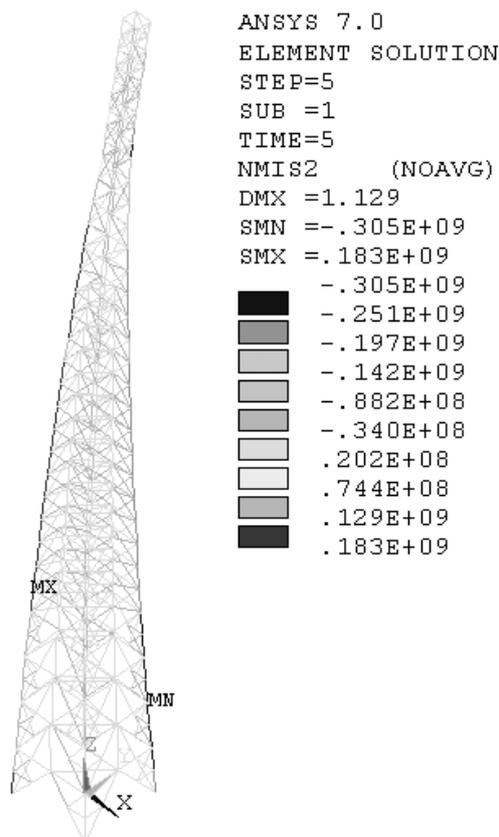


Figura 5 - Tensões atuantes ao longo da altura da torre. Modelagem do tipo III.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O emprego de técnicas de modelagem computacional tem sido muito pouco discutido nos cursos de graduação em engenharia, no que se refere a sua aplicação em estruturas tridimensionais reticuladas, principalmente, com referência aquelas correntes na prática de projeto.

Além disso, os conceitos de mecânica estrutural são transmitidos aos alunos de engenharia quase sempre através de estruturas excessivamente simplificadas o que, de forma geral, inibe o desenvolvimento de habilidades relacionadas a modelagens de sistemas mais complexos. Essas modelagens requerem, geralmente, um conhecimento básico acerca de lógica de programação computacional e de manipulação de sistemas de coordenadas.



Deste modo, o objetivo principal do presente trabalho de pesquisa é o de contribuir no que tange ao ensino de engenharia, a partir do emprego de técnicas básicas de modelagem computacional para a modelagem de sistemas reticulados tridimensionais. Procede-se a uma exposição acerca das principais etapas que devem ser seguidas no processo de modelagem de uma estrutura reticulada tridimensional, explicando em detalhes os aspectos mais relevantes.

Assim sendo, é selecionado o modelo estrutural de uma torre de aço de telecomunicações existente, com 100m de altura. Com base na modelagem da torre, ficou evidenciado que todas as etapas associadas ao pré-processamento do modelo podem ser realizadas de forma muito mais rápida e eficiente, a partir de conceitos simples de lógica computacional o que, sem sombra de dúvida, minimiza o tempo gasto no processo de modelagem.

Foi mostrado de forma bastante didática que, apesar da complexidade das estruturas tridimensionais em jogo, no caso relacionadas a torres de aço de telecomunicações e de transmissão de energia, as ferramentas computacionais disponíveis, atualmente, quando utilizadas de forma racional, são capazes de proporcionar uma grande economia de tempo no que tange ao processo de modelagem. Essas ferramentas computacionais devem ser utilizadas pelos alunos de graduação em engenharia, necessariamente, de forma a que estes desenvolvam o seu potencial sobre os modelos reais, associados à prática de projeto.

No que tange aos valores máximos de tensões encontrados ao longo da análise, foi observada uma diferença significativa de 40% entre as modelagens desenvolvidas o que, sem sombra de dúvida, deve influenciar na análise de resistência das peças da torres. Finalmente, foi evidenciado que conceitos bastante simples de modelagem computacional, os quais deveriam estar associados ao ensino de engenharia, permitem obter conclusões relevantes acerca do comportamento de sistemas estruturais como, por exemplo, as torres de aço.

### ***Agradecimentos***

Os autores deste trabalho de pesquisa agradecem a Direção da Faculdade de Engenharia, FEN/UERJ, e ao Laboratório de Computação do Ciclo Básico, LabBas/FEN/UERJ.

### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ANSYS, **Swanson Analysis Systems**, Inc., P.O. Box 65, Johnson Road, Houston, PA, 15342-0065, Version 5.5, Basic analysis procedures, Second Edition, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT, **Forças Devidas ao Vento em Edificações**, NBR 6123, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT; **Projeto de Linhas Aéreas e Transmissão de Energia Elétrica**, NBR 5422, 1985.

SILVA, J.G.S. da; SOEIRO, F.J. da C.P.; VELLASCO, P.C.G. da S.; GUIMARÃES, L.P.; VELOZO, L.T., **Uma Experiência Acadêmica nos Cursos de Graduação sa Faculdade se Engenharia sa Uerj a Partir da Utilização do Programa Ansys**. In: XXIX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENSINO DE ENGENHARIA, COBENGE 2001, Porto Alegre, Anais publicados em CD-ROM, 2001.

SILVA, J.G.S. da; VELLASCO, P.C.G. da S.; ANDRADE, S.A.L. de; OLIVEIRA, M.I.R. de, **The Influence of Structural Steel Design Models on the Behaviour of Slender Transmission and Telecommunication Towers**. In: THE NINTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON CIVIL AND STRUCTURAL ENGINEERING COMPUTING, CC 2003, Egmond aan Zee, Holanda, Trabalho Aceito para publicação, 2003.