

## ELABORAÇÃO DE UM TUTORIAL DO SAP 2000 PARA O ESTUDO DE VIBRAÇÕES LIVRES EM PÓRTICOS ESPACIAIS

**Adriana Alencar Santos** – aasn.eng@uea.edu.br

**Rogério Coelho Lopes** – rlopes@uea.edu.br

Universidade do Estado do Amazonas – U.E.A., Departamento de Engenharia Mecânica  
Av. Darcy Vargas, nº 1200, Parque 10, 69065-020 – Manaus – AM.

**Arlindo Pires Lopes** – arlindo@unb.br

**Li Chong Lee Bacelar de Castro** – lichonglee@unb.br

Universidade de Brasília – UnB, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental  
Campus Universitário Darcy Ribeiro, 70910-900 – Brasília – DF.

**Resumo:** *Visando auxiliar a abordagem do extenso conteúdo da disciplina de Teoria das Estruturas, busca-se elaborar um tutorial para o estudo de vibrações livres em pórticos espaciais. O SAP 2000 é um programa comercial de análise estrutural e está disponível em várias instituições educacionais através de licenças. O objetivo principal deste trabalho é a elaboração do referido tutorial para ilustrar a aplicabilidade deste programa, auxiliando os estudantes na compreensão do conteúdo e na análise dos resultados obtidos. Desta forma é possível estimular os estudantes, fazendo com que os mesmos aprendam a utilizar o programa, e também tornar as aulas mais atraentes.*

**Palavras-chave:** *SAP 2000, Vibrações livres, Pórticos Espaciais, Teoria das estruturas.*

### 1 INTRODUÇÃO

O uso de computadores nos cursos de engenharia tem sido objeto de estudo por parte de educadores há mais de trinta e cinco anos (LICKLIDER, 1966). Nas atividades de engenharia, de um modo geral, os engenheiros são colocados diante de problemas técnicos, uns simples e outros mais complexos, tendo que resolvê-los de uma forma prudente e satisfatória. No que diz respeito ao projeto estrutural, o engenheiro deve garantir que a estrutura não venha a ter problemas que comprometam a segurança dos seus usuários. Na análise de uma estrutura, o sucesso desta tarefa não está apenas relacionado a formulações matemáticas, mas à capacidade do engenheiro para entender os fenômenos físicos que representam o problema a ser solucionado.

Para sistemas de geometria simples, com condições de carregamento e apoio muito “bem comportados”, encontram-se soluções analíticas para tais sistemas. Porém, grande número das estruturas de importância prática é muito complexo para ser analisado por técnicas clássicas. Para estruturas de forma arbitrária, a solução analítica freqüentemente torna-se impossível, e então o problema requer grandes e excessivas simplificações.

Os métodos analíticos clássicos permitem o cálculo da resposta exata das incógnitas da estrutura em todos os seus pontos. Estas soluções, no entanto, são somente conhecidas para alguns casos, que fogem das aplicações práticas encontradas no dia-a-dia.

Faz-se necessário utilizar procedimentos aproximados, que podem ser aplicados em caráter geral, independentemente da forma da estrutura e da condição de carregamento, desde que dentro da precisão aceitável do problema de engenharia. Este caminho alternativo aos procedimentos analíticos clássicos constitui a idéia central do Método dos Elementos Finitos (MEF). Nas últimas décadas o MEF tornou-se uma técnica eficiente, aplicável à análise de problemas relacionados com placas, cascas, barragens, estabilidade de taludes, fundações, escoamento de fluidos, dinâmica estrutural, entre outros. Sua eficiência e desenvolvimento devem-se a dois fatores: aplicações de métodos matriciais na mecânica estrutural e o uso de computadores. Maiores informações sobre o MEF podem ser encontradas em ZIENKIEWICZ (1977), BATHE (1982), ASSAN (1999) e FELIPPA (2000).

O programa comercial SAP 2000 v.10.0.1, baseado no MEF, foi escolhido para o desenvolvimento do presente trabalho por ser uma ferramenta muito difundida no campo da engenharia estrutural e, ainda, por encontrar-se disponível em várias instituições educacionais através de licenças. O objetivo deste trabalho é a elaboração de um tutorial “passo-a-passo” referente ao estudo de vibrações livres em pórticos planos. O estudo de vibrações pode ser encontrado em CLOUGH & PENZIEN (1993) e CHOPRA (2005).

## 2 TUTORIAL

### 2.1 Definição do modelo geométrico da estrutura

O SAP 2000 inicia com a seguinte tela, de acordo com a Figura 1.

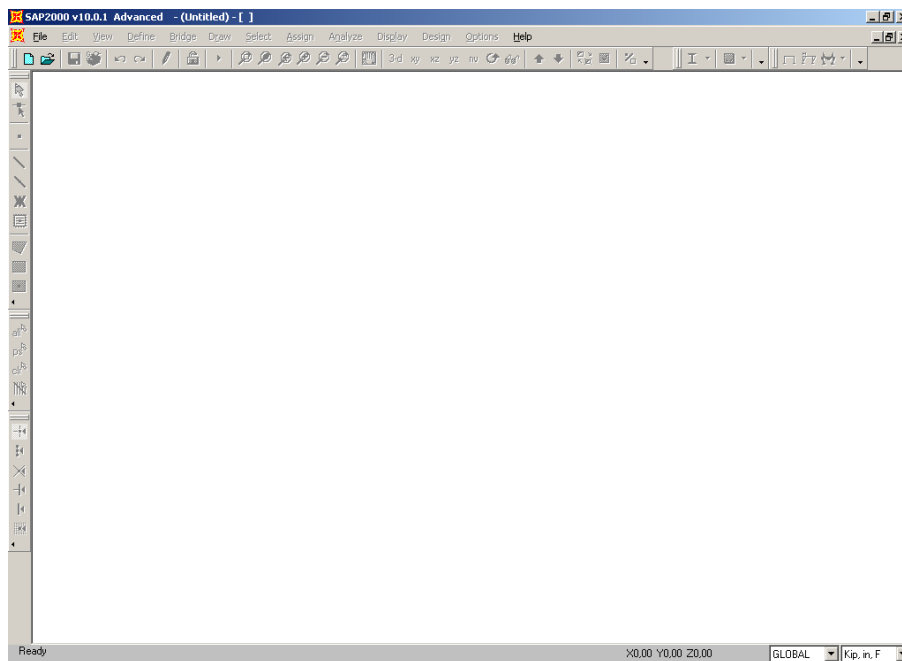


Figura 1 – Tela de apresentação do programa.

No canto inferior direito da Figura 1, selecione as unidades a serem utilizadas na análise (KN, m, C).

Clique no Menu **FILE** → **NEW MODEL** para visualizar os modelos estruturais de acordo com a Figura 2.

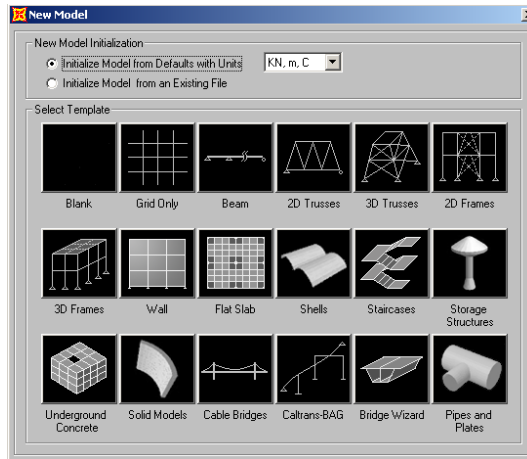


Figura 2 – Modelos estruturais do programa.

Clique em **3D FRAMES** para visualizar o pórtico espacial e definir os dados de entrada, de acordo com a Figura 3.

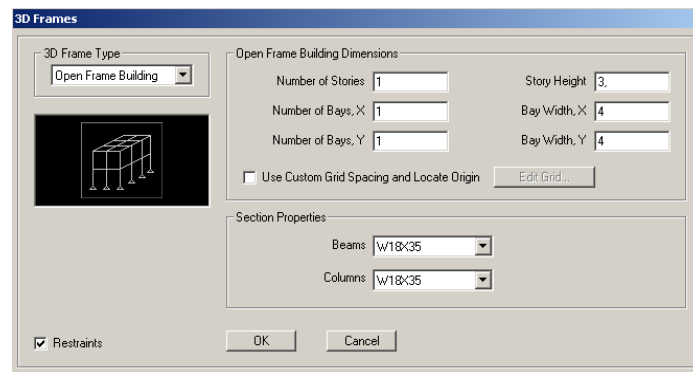


Figura 3 – Entrada de dados para o pórtico espacial.

Defina o número de pavimentos (Number of Stories), número de vãos (Number of Bays), altura do pavimento (Story Height) e largura do vão (Bay Width). Clique em **OK** e um esboço do modelo aparecerá na tela, conforme a Figura 4.

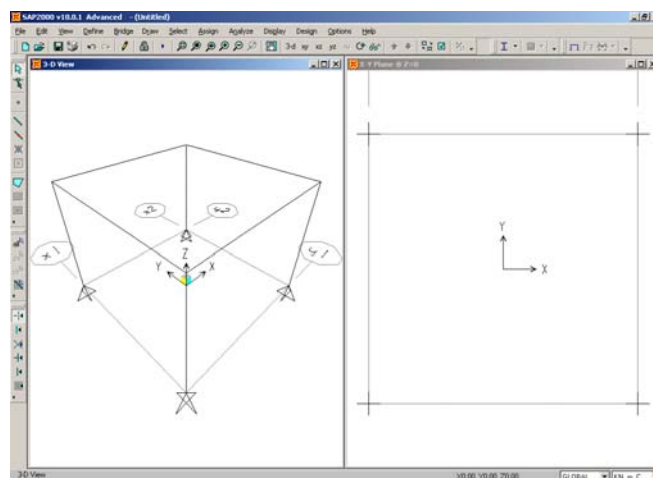


Figura 4 – Esboço do pórtico espacial.

Feche a janela do **X-Y PLANE** e trabalhe apenas no **3D VIEW**. Clique no Menu **VIEW** → **ZOOM OUT ONE STEP** até atingir a configuração da Figura 5.

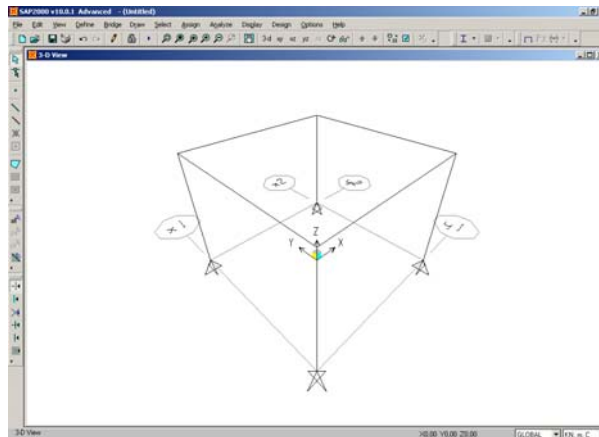


Figura 5 – Representação do pórtico espacial em uma única vista (3D).

Para mudar o tipo dos apoios, selecione os respectivos nós, clique no Menu **ASSIGN** → **JOINT** → **RESTRAINTS** para aparecer a configuração dos apoios conforme a Figura 6.

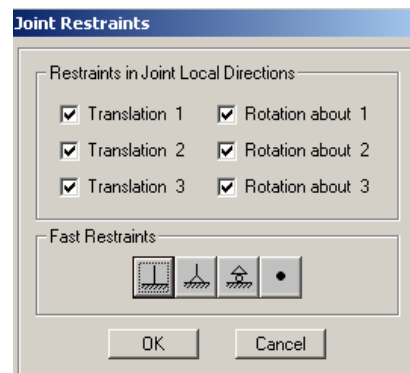


Figura 6 – Configuração dos apoios.

Escolha o tipo de apoio, por exemplo, do terceiro gênero (engastamento) e clique em **OK**. Observe que os apoios assumiram uma nova configuração, conforme a Figura 7.

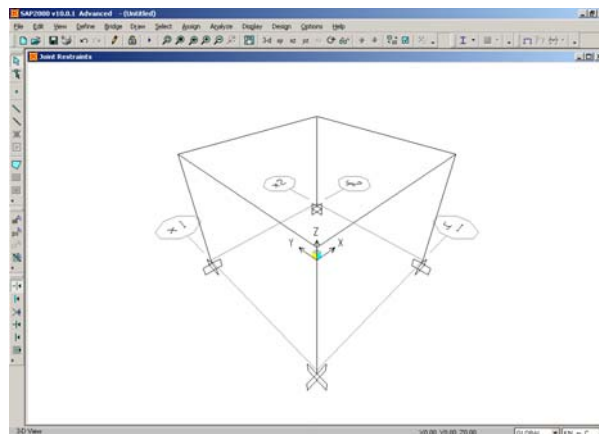


Figura 7 – Representação do pórtico espacial já com os apoios do terceiro gênero.

## 2.2 Definição dos materiais

Clique no Menu **DEFINE** → **MATERIALS** para acessar a Figura 8.

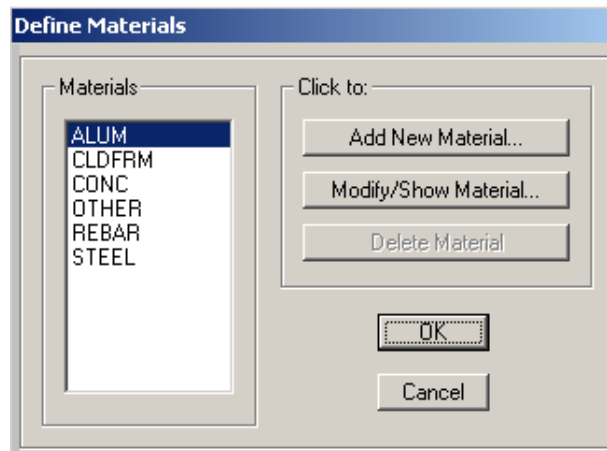


Figura 8 – Definição do tipo de material a ser utilizado.

Pode-se adicionar um novo material (diferente dos listados anteriormente), clicando em **ADD NEW MATERIAL** e seguir as orientações. Clique em **CANCEL**. Da mesma forma, pode-se conferir ou modificar as propriedades do material, clicando em **MODIFY/SHOW MATERIAL**, conforme a Figura 9. Clique em **CANCEL** → **OK**.

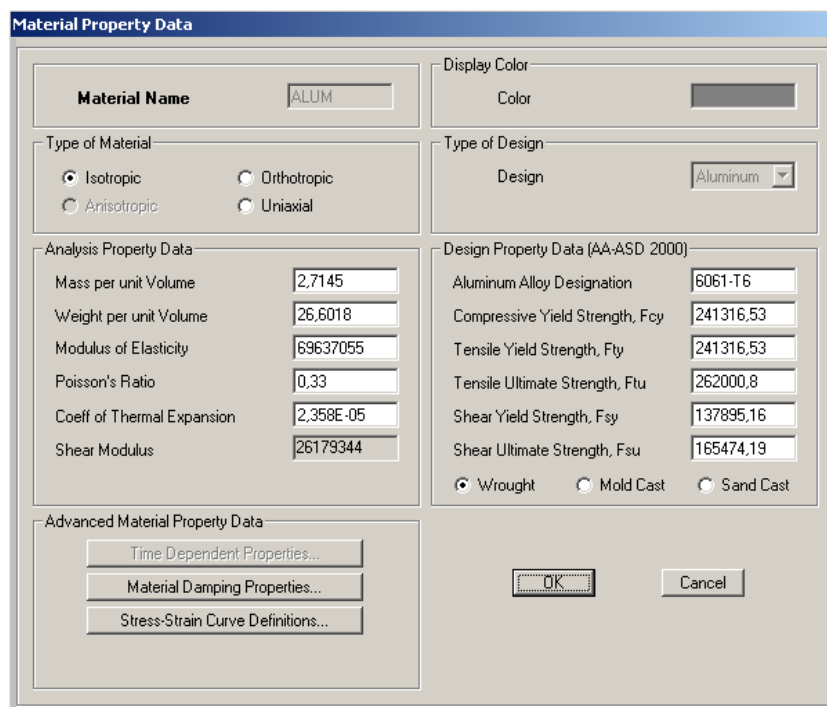


Figura 9 – Propriedades físicas dos materiais.

## 2.3 Definição das propriedades dos elementos

Selecione as vigas do Pórtico Espacial, clique no Menu **ASSIGN** → **FRAME/CABLE/TENDON** → **FRAME SECTIONS** para acessar a Figura 10.

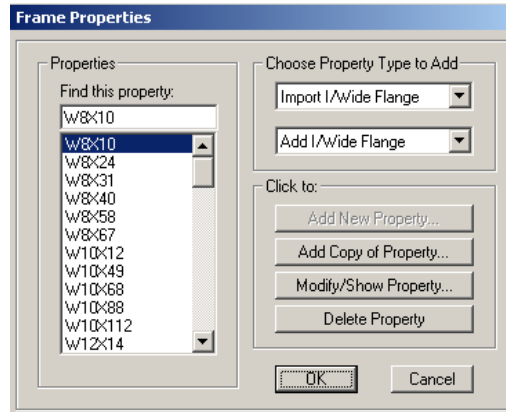


Figura 10 – Propriedades geométricas das seções transversais.

No item correspondente ao **CHOOSE PROPERTY TYPE TO ADD**, escolha a opção **ADD RECTANGULAR** e depois clique em **ADD NEW PROPERTY** para acessar a configuração da seção retangular, conforme a Figura 11.

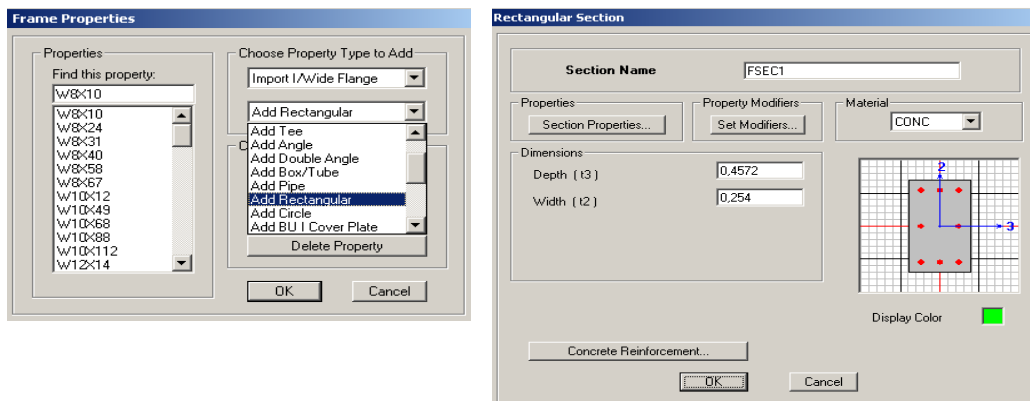


Figura 11 – Propriedades geométricas da seção retangular.

No **SECTION NAME** onde está escrito “FSEC1” escreva “VIGA”, escolha a opção de material **STEEL** (aço) e especifique a seção retangular de **0,20 m x 0,40 m**. Observe que as oito barras de aço da figura acima desaparecem, uma vez que o “Default” do SAP 2000 sugere que o material seja concreto armado (**CONC**). Clique em **OK** → **OK**, para visualizar a Figura 12.

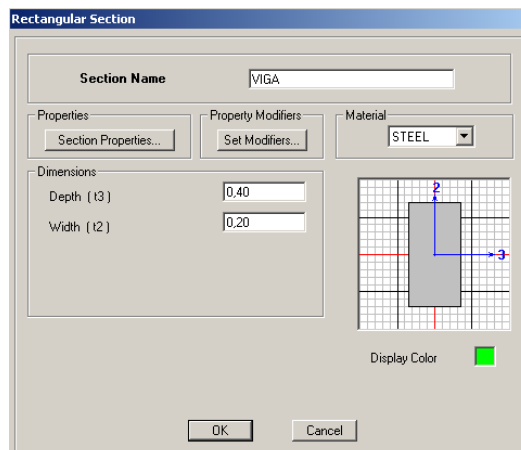


Figura 12 – Representação da seção transversal retangular da viga de aço.

Agora selecione os pilares do Pórtico Espacial, clique no Menu **ASSIGN** → **FRAME/CABLE/TENDON** → **FRAME SECTIONS** → **ADD RECTANGULAR** → **ADD NEW PROPERTY** e no **SECTION NAME** escreva “PILAR”, escolha a opção de material **STEEL** (aço) e especifique a seção retangular de **0,20 m x 0,20 m** e clique em **OK**. Observe que a janela do **FRAME PROPERTIES** aparecerá “VIGA” e “PILAR” na listagem, conforme a Figura 13. Clique em **OK**.

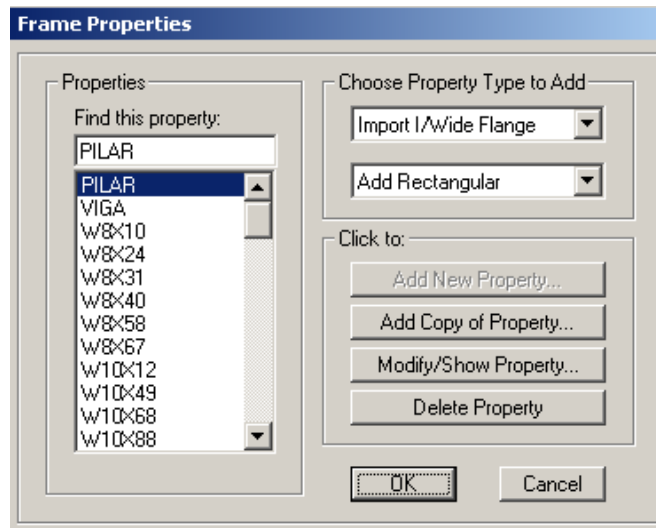


Figura 13 – Inclusão da “Viga” e do “Pilar” na listagem das propriedades das seções.

Após esses procedimentos o pórtico espacial terá a seguinte configuração. Observe que os elementos estão nomeados como **VIGA** ou **PILAR**, conforme a Figura 14.

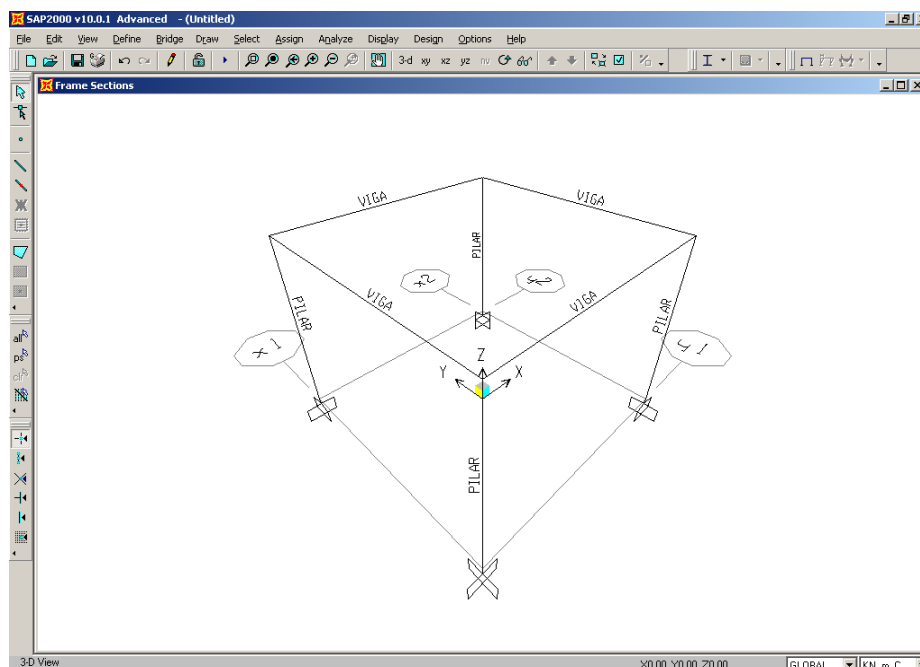


Figura 14 – Representação do pórtico espacial já com os elementos nomeados.

Clique no Menu **VIEW** → **SET DISPLAY OPTIONS** → **JOINTS** → **LABELS**, para opções de visualização, conforme a Figura 15. Clique em **OK**.

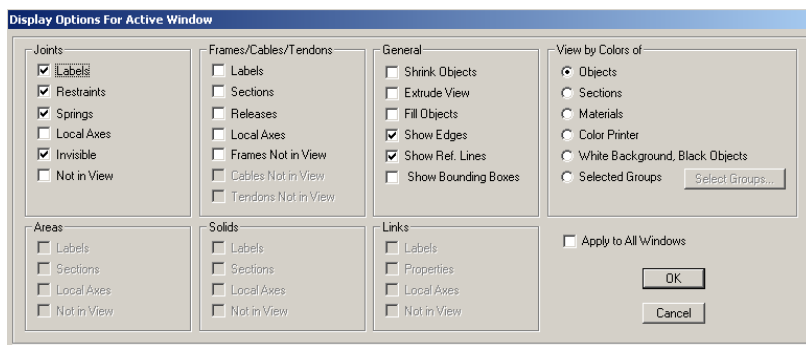


Figura 15 – Opções de visualização.

Observe na Figura 16 que ficou ativo a numeração dos nós do pórtico espacial.

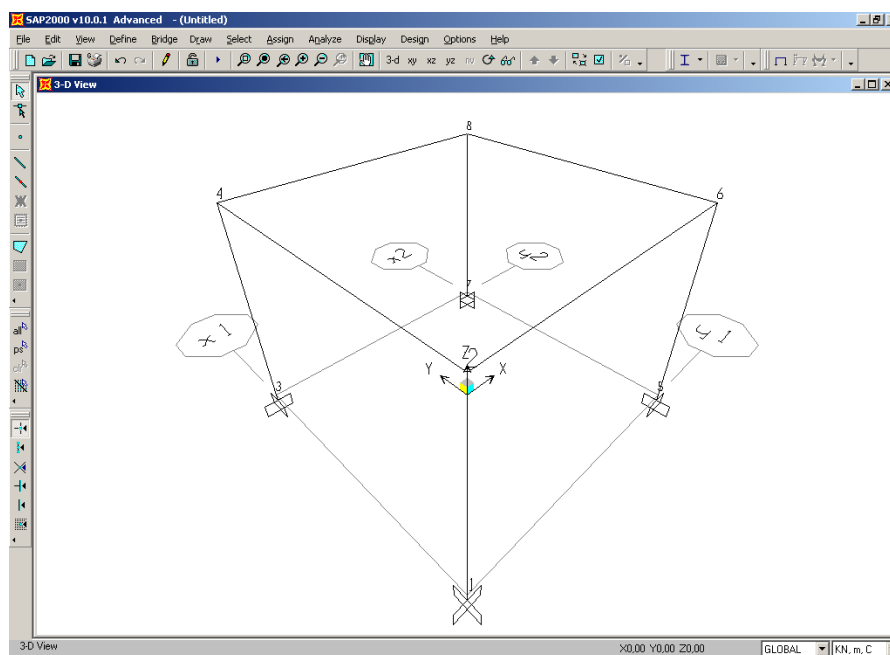


Figura 16 – Numeração dos nós do pórtico espacial.

Clique no Menu **DRAW** → **DRAW POLY AREA** → clique nos nós **4, 2, 6 e 8**. Tecele **ESC**. Observe que foi criado um elemento retangular do tipo **SHELL** na parte de cima da estrutura. Os elementos das vigas e pilares são do tipo **FRAME**. Selecione o elemento **SHELL**, clique no Menu **ASSIGN** → **AREA** → **SECTIONS**, para acessar a Figura 17.

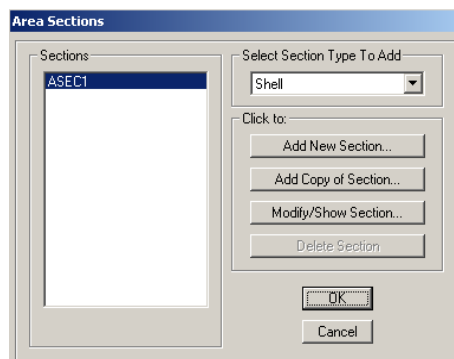


Figura 17 – Propriedades de seção transversal para o elemento do tipo SHELL.



Clique em **MODIFY/SHOW SECTION** para acessar a configuração do elemento **SHELL**. No **SECTION NAME** onde está escrito “**ASEC1**” escreva “**LAJE**”, escolha a opção de material **STEEL** (aço) e especifique em **THICKNESS** a espessura de **0,1 m** tanto em **MEMBRANE** quanto em **BENDING**, conforme a Figura 18.

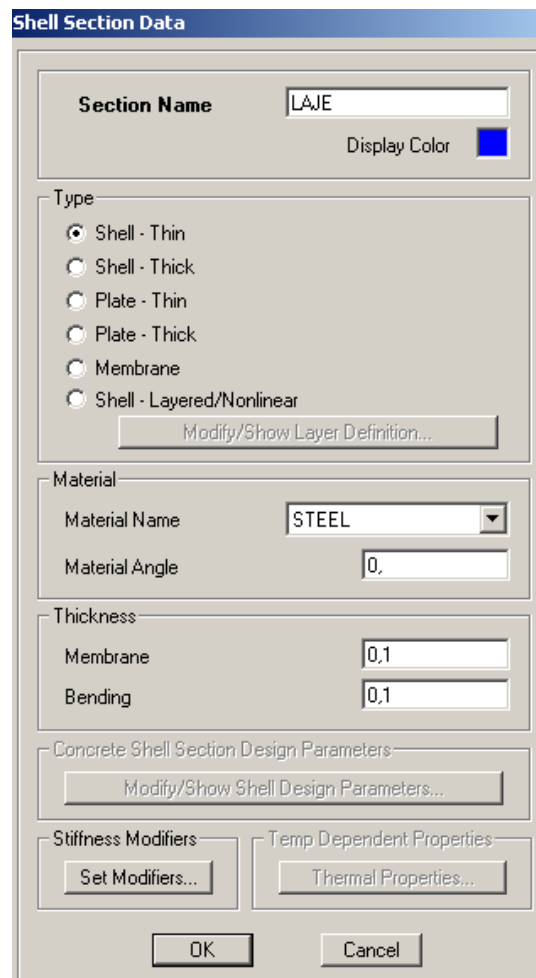


Figura 18 – Propriedades físicas e geométricas para o elemento do tipo SHELL.

Clique em **OK** → **OK**.

Selecione a Laje do Pórtico Espacial, clique no Menu **EDIT** → **DIVIDE AREAS** → **DIVIDE AREA INTO THIS NUMBER OS OBJECTS** → **digite 4 e 4** → **OK**, conforme a Figura 19.

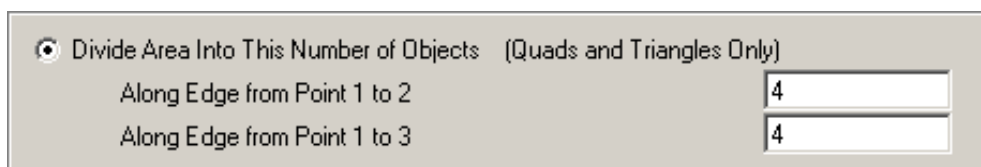


Figura 19 – Divisão de uma área em quantidade finita de elementos.

Clique no Menu **OPTIONS** → **WINDOWS** → **TWO TILED VERTICALLY**. Observe que no **X-Y PLANE @ Z=3**, a laje original é dividida em 16 elementos finitos, conforme a Figura 20.

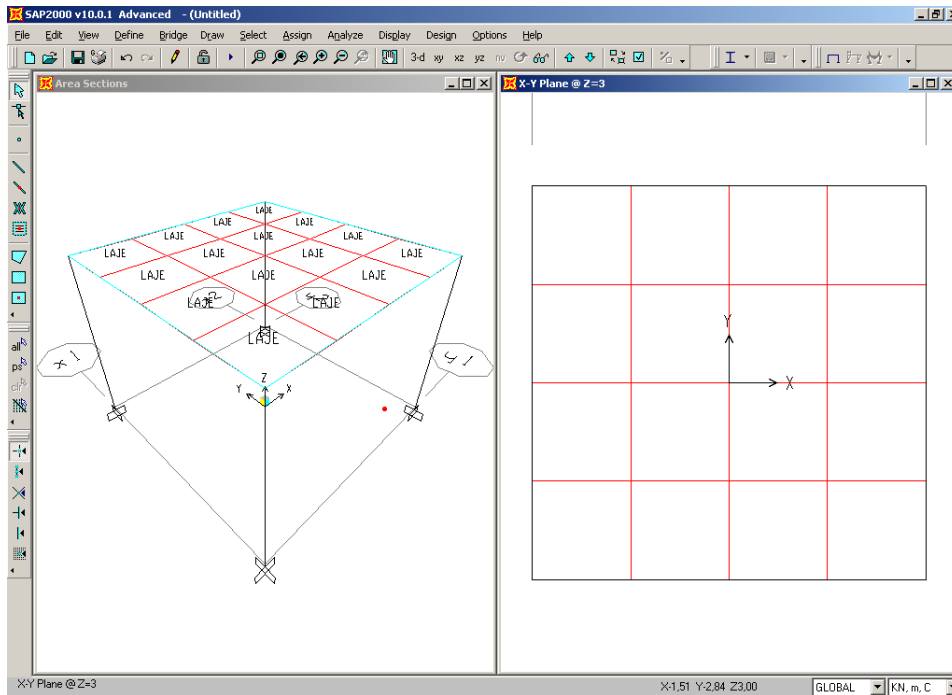


Figura 20 – Laje original dividida em 16 elementos finitos.

Feche a janela do **3D VIEW** e trabalhe apenas no **X-Y PLANE @ Z=3**.

Clique no Menu **VIEW** → **SET DISPLAY OPTIONS** → **JOINTS** → **LABELS** → **OK**. Selecione os nós que contornam a estrutura, ou seja, os nós 2, 27, 28, 29, 6, 26, 21, 16, 8, 15, 13, 11, 4, 9, 17 e 22 (totalizando 16 nós). Selecione também as quatro vigas correspondentes a esses nós, conforme a Figura 21. No canto inferior esquerdo deverá aparecer a seguinte mensagem: **16 POINTS, 4 FRAMES SELECTED**.

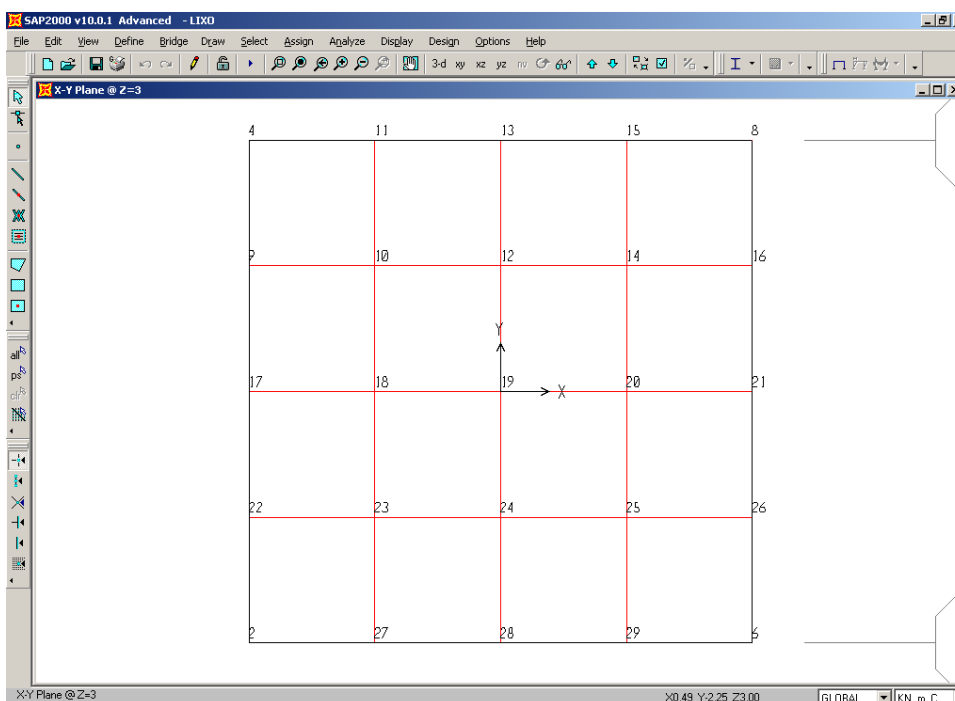


Figura 21 – Representação da laje do pórtico espacial no plano X-Y.

Clique no Menu **EDIT** → **MERGE JOINTS** → **OK**, para que haja a união dos nós das vigas e da laje. Clique no Menu **OPTIONS** → **WINDOWS** → **TWO TILED VERTICALLY** → feche a janela do **X-Y PLANE** e trabalhe apenas do **3D VIEW**.

## 2.4 Visualização dos elementos estruturais

Clique no Menu **VIEW** → **SET DISPLAY OPTIONS** → **GENERAL** → **EXTRUDE VIEW** → **OK**, para visualizar os elementos com suas seções transversais preenchidas. Utilize as ferramentas do Menu **VIEW** para visualizar os elementos nas suas mais diversas formas ou os ícones da barra de ferramentas da Figura 22.



Figura 22 – Barra de ferramentas de visualização.

Clique no Menu **VIEW** → **SET DISPLAY OPTIONS** → **GENERAL** → desmarque a opção **EXTRUDE VIEW** → **OK**.

## 2.5 Definição do carregamento

Caso queira-se retirar o peso próprio da estrutura, procede-se da seguinte forma: Tecele **CTRL+A** (para seleccionar todos os nós e elementos), clique no Menu **DEFINE** → **LOAD CASES** → **SELF WEIGHT MULTIPLIER** → **DIGITE 0 (zero)** → **MODIFY LOAD** → **OK**. Tecele **ESC**. Uma vez que a análise em questão é do tipo **VIBRAÇÕES LIVRES**, não existe carregamento em função do tempo.

## 2.6 Análise da estrutura

A partir desse momento a estrutura está pronta para ser analisada. Para tanto é necessário salvar o arquivo. Clique no Menu **FILE** → **SAVE** → **NOMEIE O ARQUIVO** → **SALVAR**. Recomenda-se que o procedimento de salvar o arquivo seja feito o quanto antes, para evitar perda de dados na modelagem da estrutura. Clique no Menu **DEFINE** → **ANALYSIS CASES** → **MODAL** → **MODIFY/SHOW CASE**, para aparecer a Figura 23.

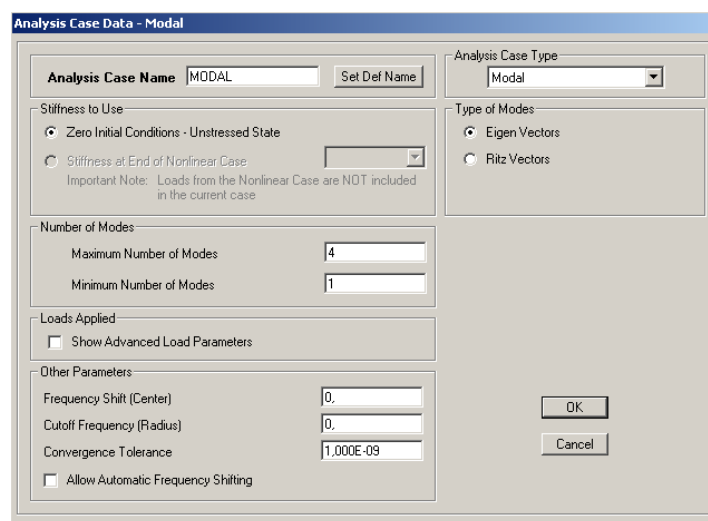


Figura 23 – Tipos de análise.

Na opção **NUMBER OF MODES**, defina o número de modos de vibração como sendo igual a **4**. Clique em **OK** → **OK**. Observe que o tipo de análise escolhido foi a Modal.

Clique no Menu **ANALYZE** → **SET ANALYSIS OPTIONS** → **SPACE FRAME** → **OK**. Clique no Menu **ANALYZE** → **RUN ANALYSIS** → **TYPE: LINEAR STATIC (DO NOT RUN)** → **TYPE: MODAL (RUN)** → **RUN NOW**, conforme a Figura 24. Isto fará com que apenas a análise modal seja executada.

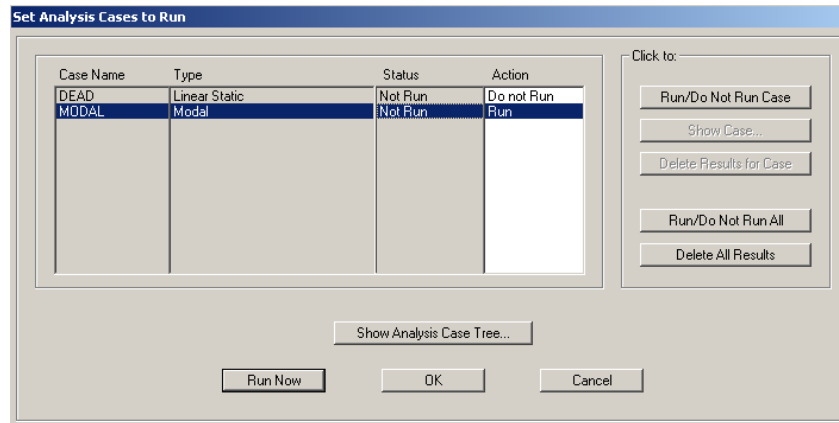


Figura 24 – Execução da análise de vibrações livres.

Agora o programa executará a análise de vibrações livres da estrutura, calculando as frequências naturais e seus respectivos modos de vibração, e após alguns segundos aparecerá a seguinte mensagem, conforme a Figura 25. Clique em **OK**.



Figura 25 – Mensagem de que a análise foi completa.

## 2.7 Resultados

No canto inferior direito clique em **START ANIMATION**. Observe que a estrutura entrará em movimento de acordo com 1º modo de vibração, conforme a Figura 26. Para parar clique em **STOP ANIMATION**.

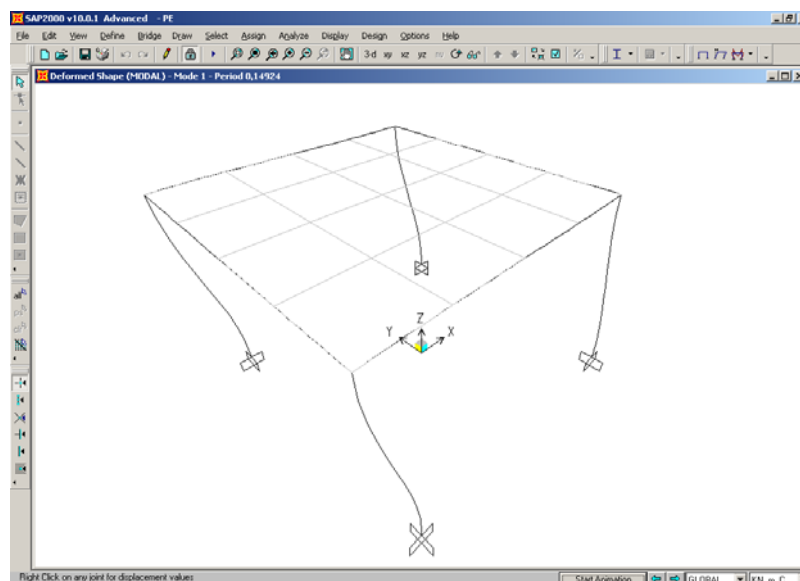



Figura 26 – Representação do 1º modo de vibração.

Observe ainda que aparece, no canto superior esquerdo do 1º modo de vibração, o período igual a 0,14924 que é o inverso da frequência. Para visualizar os demais modos de vibração, Figuras 27 a 29, clique em , situado no canto inferior direito.

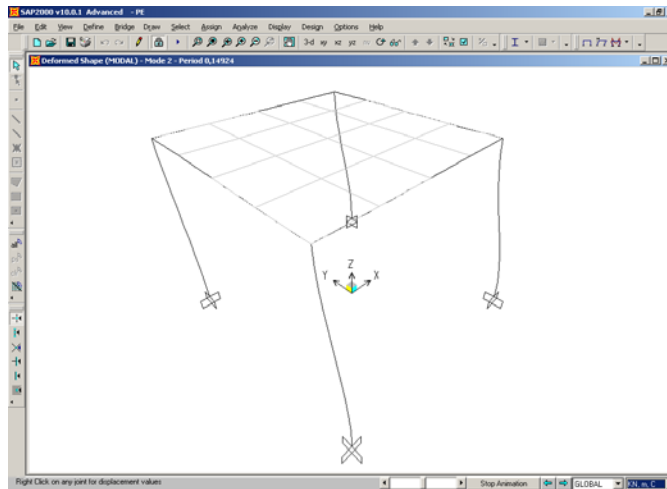


Figura 27 – Representação do 2º modo de vibração.

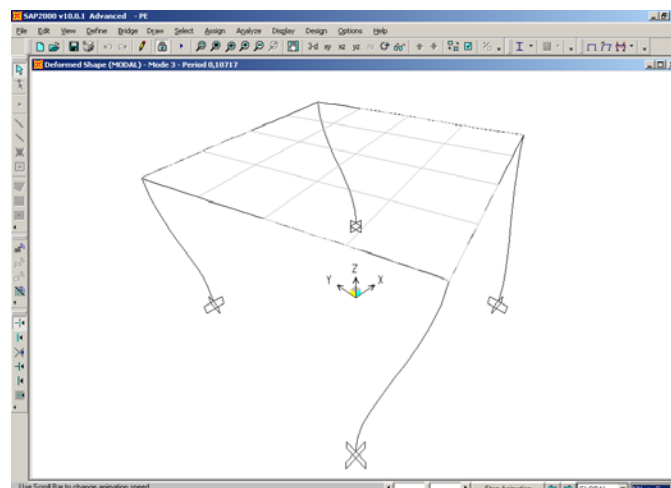


Figura 28 – Representação do 3º modo de vibração.

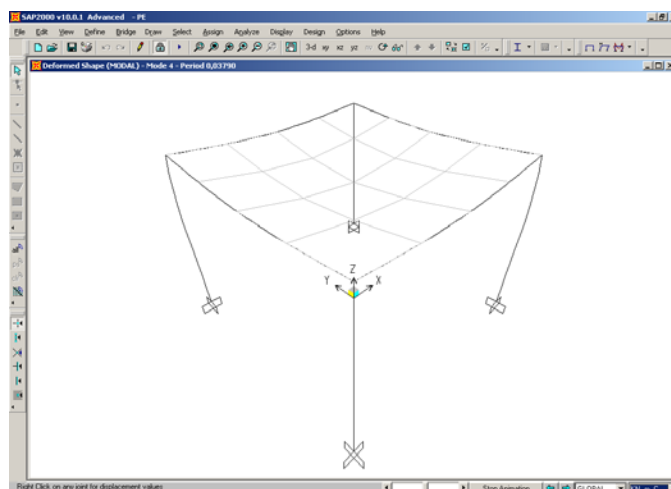


Figura 29 – Representação do 4º modo de vibração.

Clique no Menu **FILE** → **PRINT TABLES** → **ANALYSIS RESULTS** → **OUTPUT TYPE: TXT FILE** → **OPTIONS: PRINT TO FILE (apenas)** → **OK**, para gravar o arquivo para posterior análise.

## 2.8 Alteração dos dados da estrutura

Para alterar qualquer parâmetro na estrutura, o modelo original deverá ser destravado na barra de ferramentas (**clique no cadeado** → **OK**), conforme a Figura 30. Isto fará com que todos os resultados da análise sejam apagados. Faça quaisquer mudanças que sejam necessárias e execute o modelo novamente.

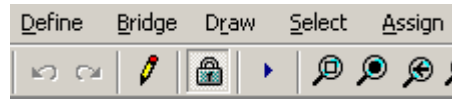


Figura 30 – Cadeado a ser destravado para uma outra análise.

## 3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através do emprego do MEF e utilizando um programa comercial de análise estrutural, neste caso o SAP 2000 versão 10.0.1, disponível tanto na Universidade do Estado do Amazonas – U.E.A. quanto na Universidade de Brasília – UnB, é possível demonstrar aos estudantes de engenharia como solucionar problemas complexos de engenharia empregando os modernos recursos computacionais. Entretanto, é de bom alvitre, na fase de introdução destes recursos aos estudantes, resolver exemplos clássicos, onde se conheça a solução analítica. Isto possibilita enfatizar tanto os fenômenos físicos envolvidos quanto o uso das ferramentas do programa.

É de domínio público que a utilização incorreta de qualquer programa computacional pode trazer conseqüências funestas ao desenvolvimento de um determinado projeto de engenharia. Por esse motivo deve-se tomar muito cuidado na hora de descrever aos estudantes as diferentes etapas que levam à construção de um modelo numérico computacional e, também, mostrar que existe uma enorme diferença entre “um piloto de programa” – aquele que é apenas um usuário do programa e que é incapaz de interpretar os resultados obtidos – e um engenheiro, que além de possuir uma formação intelectual sólida, conhece muito bem o programa, sabendo inclusive suas vantagens e desvantagens.

Atualmente os estudantes dos cursos de Teoria das Estruturas, da U.E.A e UnB, utilizam diversas ferramentas computacionais para realizarem os cálculos. As vantagens de se utilizar estas ferramentas em relação aos procedimentos manuais, incluem a redução de erros matemáticos, execução rápida de cálculos repetitivos e a exploração de configurações alternativas. A utilização de tutoriais têm se mostrado uma excelente ferramenta de auxílio no ensino de vibrações livres em pórticos planos, reduzindo o tempo gasto pelos estudantes na resolução dos exercícios, além de contribuir para uma melhor formação profissional e um melhor desempenho perante as exigências do mercado de trabalho.

## 4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSAN, A. E. **Método dos Elementos Finitos – Primeiros Passos**. Campinas: Ed. UNICAMP, 1999.

BATHE, K. J. **Finite Element Procedures in Engineering Analysis**. New Jersey: Prentice Hall, 1982.

CHOPRA, A. K. **Dynamics of Structures – Theory and Applications to Earthquake Engineering**. New Jersey: Prentice Hall, 1995.

CLOUGH, R. W. & PENZIEN, J. **Dynamics of Structures**. New York: Mc Graw-Hill, 1993.

FELIPPA, C. A. **Introduction to The Finite Element Method – Lecture Notes**. Boulder: University of Colorado, 2000.

LICKLIDER, J. C. R. The Impact of Computers on Education in Engineering Design. In: **PROCEEDINGS OF THE CONFERENCE ON THE IMPACT OF COMPUTERS IN ENGINEERING DESIGN**, Washington, D.C., USA, 1966.

ZIENKIEWICZ, O. C. **The Finite Element Method**. London: Mc Graw-Hill, 1977.

## **TUTORIAL ELABORATION OF SAP 2000 IN THE STUDY OF FREE VIBRATION IN SPATIAL FRAMES**

***Abstract:** To assist the extensive content of the subject Theory of the Structures, the elaboration of a tutorial in the study of free vibration in spatial frames is used. SAP 2000 is a known computer tool and it is available in many universities through licenses. The main objective of this work is the elaboration of the mentioned tutorial to illustrate the applicability of this program, assisting the students in the understanding of the content and the analysis of the obtained results. In this matter it is possible to stimulate students and make the lessons more attractive.*

***Key-words:** SAP 2000, Free vibration, Spatial frames, Theory of Structures.*