

ANEST- Programa Educacional para Análise de Estruturas Reticuladas

Henriette Lebre La Rovere¹, Alizeu Francisco Schneider¹

Laboratório de Análise de Estruturas – Departamento de Engenharia Civil
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Campus Trindade, CTC
Caixa Postal 476 – Florianópolis, SC 88040-900 – Brasil

henriette@ecv.ufsc.br, alizeu@intercorp.com.br

Resumo. Neste artigo apresenta-se o programa ANEST, um programa educacional para análise estática de estruturas reticuladas, desenvolvido no Laboratório de Análise de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da UFSC, visando principalmente a utilização por alunos de graduação. ANEST resolve, pelo método dos deslocamentos, estruturas reticuladas planas e espaciais tais como pórticos, treliças e vigas, submetidas a carregamentos externos. Trata-se de um programa estruturado em módulos, na linguagem FORTRAN90, para uso em micro-computadores. A entrada de dados é feita através de janelas padrão Windows e os resultados podem ser visualizados graficamente, o que auxilia muito ao aprendizado dos alunos. Apresentam-se no artigo alguns exemplos de utilização do ANEST e quais as extensões e aperfeiçoamentos que ainda devem ser realizados.

Palavras-chave: estruturas reticuladas, análise estrutural, software educacional.

Abstract. In this work, an educational computer program named ANEST, developed at the Structural Analysis Laboratory in the Civil Engineering Department of Federal University of Santa Catarina, is presented. ANEST is based on the Direct Stiffness Method and allows for static analysis of framed structures, such as frames, trusses and beams, subjected to external loading. The program is composed of several subprograms, written in FORTRAN 90 language for use in microcomputers. All input data is entered via Windows and the results can be graphically visualized, which helps the students to understand the structure behavior. A few examples of structures analyzed by ANEST are also presented and future extensions to be implemented in the program are described at the end of the work.

Key words: framed structures, structural analysis, educational software.

1. Introdução

O avanço computacional das últimas décadas possibilitou o desenvolvimento de programas computacionais para análise estrutural de estruturas contínuas e reticuladas. Diversos programas comerciais como ANSYS, SAP, ABAQUS e NASTRAM, foram desenvolvidos inicialmente e, mais recentemente, programas pré e pós-processadores para geração automática de malhas e contorno de tensões vem sendo incorporados.

Existe no entanto uma carência de programas educacionais para análise estrutural. O aluno de graduação deve passar diretamente dos fundamentos teóricos para a utilização destes programas comerciais, na maioria das vezes sem conhecer sua estrutura interna. Apenas recentemente, graças à Internet, alguns programas educacionais estão surgindo na área de Estruturas. Pode-se citar como um dos poucos exemplos de programa educacional para análise estrutural no Brasil o programa FTOOL [Martha 2002], para estruturas reticuladas planas.

Visando suprir a carência citada acima, foi desenvolvido no Laboratório de Análise de Estruturas (LAE) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) o programa educacional ANEST para análise estática de estruturas reticuladas em micro-computadores. O programa baseia-se no Método dos Deslocamentos com formulação matricial e permite a análise de estruturas reticuladas planas (viga, treliça e pórtico) e espaciais (grelha, treliça e pórtico). ANEST foi baseado no programa CALSD [Seib, Lath and Kurk 1987], também educacional, desenvolvido na University of California, San Diego (UCSD) para utilização em micro-computadores, que tem uma estrutura similar à do programa SAP [Wilson 1996].

ANEST foi inicialmente desenvolvido na linguagem FORTRAN 77, sendo depois estendido para FORTRAN 90 [Elli, Phil and Lahe 1990] pelos autores e outros alunos de iniciação científica [Chim, Gonc, Pign, Schn e LaRo 1996-2002]. O programa é composto de subprogramas ou módulos que se identificam com a estrutura do programa, ou seja, traduzem as etapas da formulação matricial do Método dos Deslocamentos. Atualmente a entrada de dados da estrutura a ser analisada é feita através de janelas padrão *Windows*, utilizando-se as subrotinas QuickWin do compilador FORTRAN [MPS 1996], o que veio a facilitar a utilização do programa. Também foram desenvolvidos módulos pós-processadores para visualização gráfica dos resultados, utilizando-se as subrotinas gráficas do compilador FORTRAN [MPS 1996], o que auxilia muito ao entendimento do funcionamento das estruturas e ao aprendizado dos alunos.

ANEST está disponível para *download* no *site* do Departamento de Engenharia Civil da UFSC [ECV 2003] e vem sendo utilizado principalmente pelos alunos do curso de graduação em Engenharia Civil. O programa também tem servido de apoio aos professores de Engenharia Civil na preparação de material didático e por alunos de pós-graduação como base para outros programas de suas pesquisas.

A seguir apresenta-se uma breve revisão do Método dos Deslocamentos e uma descrição dos módulos que compõem o programa ANEST. Em seguida são mostrados alguns exemplos de utilização do programa e ao final do trabalho apresentam-se as considerações finais.

2. Método dos Deslocamentos

No Método dos Deslocamentos para estruturas reticuladas, o único sistema principal possível é obtido pela fixação de todos os nós da estrutura. Adotando-se este sistema principal “único” desaparece o problema da escolha de um sistema principal que existe no Método das Forças, por isso o Método dos Deslocamentos foi o escolhido para o desenvolvimento do programa ANEST.

As estruturas são divididas em elementos (ou barras) em que as relações Ações × Deslocamentos são discretizadas nos nós da estrutura. As equações de equilíbrio da estrutura no sistema global de referência podem ser escritas então, sob a forma matricial [Gere e Weaver 1987]:

$$[S].\{D\} = \{A\} \quad (1)$$

onde $[S]$ \Rightarrow Matriz de Rigidez da estrutura não restringida;

$\{D\}$ \Rightarrow Vetor de Deslocamentos nodais da estrutura;

$\{A\}$ \Rightarrow Vetor de Ações nodais da estrutura.

A Matriz de Rigidez da estrutura não restringida $[S]$ é formada a partir da matriz de rigidez de cada elemento, no sistema global, somando-se os coeficientes correspondentes aos mesmos graus de liberdade:

$$[S] = \text{“}\Sigma\text{”}[S_G] \quad (2)$$

onde $[S_G] \Rightarrow$ Matriz de Rigidez do elemento no sistema global, sendo que a matriz de cada elemento no sistema global é obtida da seguinte forma:

$$[S_G] = [R]^T \cdot [S_L] \cdot [R] \quad (3)$$

onde $[R] \Rightarrow$ Matriz de Rotação do elemento, que depende de sua orientação;

$[R]^T \Rightarrow$ Matriz de Rotação transposta do elemento;

$[S_L] \Rightarrow$ Matriz de Rigidez do elemento no sistema local.

O vetor de ações $\{A\}$ é formado a partir do vetor de ações aplicadas diretamente nos nós, $\{A_{nó}\}$ e do vetor de ações nodais equivalente a ações aplicadas nos elementos (= - vetor de reações de engastamento perfeito):

$$\{A\} = \{A_{nó}\} - \{A_{ep}\}; \text{ sendo } \{A_{ep}\} = \text{“}\Sigma\text{”}\{A_g\} \text{ e } \{A_g\} = [R]^T \cdot \{A_l\}$$

onde $\{A_g\} \Rightarrow$ Vetor de reações de engastamento perfeito do elemento no sistema global;

$\{A_l\} \Rightarrow$ Vetor de reações de engastamento perfeito do elemento no sistema local;

$[R]^T \Rightarrow$ Matriz de rotação transposta do elemento.

No programa ANEST utiliza-se a técnica de armazenamento em perfil [Soriano e Lima 1997] para a matriz de rigidez da estrutura e alocação dinâmica de memória. Os nós da estrutura são reordenados internamente, através de um algoritmo frontal, para minimizar a largura de banda da matriz de rigidez. Após a montagem da matriz de rigidez e do vetor de ações da estrutura, reordena-se o sistema de equações (1), deixando as direções restringidas por apoios para o final:

$$\begin{bmatrix} S_{ll} & S_{lr} \\ S_{rl} & S_{rr} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} D_l \\ D_r \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} A_{nó,l} \\ A_{nó,r} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} A_{ep,l} \\ A_{ep,r} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

onde l corresponde às direções livres e r corresponde às direções restringidas pelos apoios.

Para apoios fixos, sem recalques, tem-se que $\{D_r\} = 0$ permitindo portanto reescrever o sistema de equações (4):

$$[S_{ll}] \{D_l\} = \{A_{nó,l}\} - \{A_{ep,l}\} \quad (5)$$

$$[S_{rl}] \{D_l\} = \{A_{nó,r}\} - \{A_{ep,r}\} \quad (6)$$

Resolvendo-se o sistema de equações (5) obtém-se o vetor deslocamento nodais $\{D_l\}$ obtendo-se o vetor de deslocamentos nodais da estrutura, $\{D\}$. Adota-se em ANEST o Método de Eliminação de Gauss para a resolução do sistema de equações com partição em blocos, o que permite a análise de grandes estruturas, com número ilimitado de graus de liberdade. No entanto a versão disponível para *download* [ECV 2003] é limitada a 1000 nós e 1000 elementos.

Inserindo-se o vetor de deslocamentos nodais $\{D_l\}$ em (6) obtém-se as reações de apoio, $\{R_e\}$:

$$\{R_e\} = \{A_{nó,r}\} = [S_{rl}] \cdot \{D_l\} + \{A_{ep,r}\} \quad (7)$$

A partir de $\{D_l\}$ obtém-se para cada elemento o vetor de deslocamentos nodais do elemento no sistema global, $\{u_g\}$ e os esforços no elemento no sistema local, $\{E_l\}$:

$$\{E_l\} = [S_l] \cdot \{u_l\} + \{A_l\} \quad (8)$$

sendo $\{u_l\} = [R] \cdot \{u_g\}$ o vetor de deslocamentos nodais do elemento no sistema local.

Quando existirem diversos casos de carregamento, $\{A\}$ passa a ser uma matriz de ações e $\{D\}$ uma matriz de deslocamentos nodais, em que cada coluna corresponde a um caso de carregamento.

3. Módulos do Programa ANEST

Cada módulo de ANEST gera um arquivo de saída formatado e diversos arquivos binários que possibilitam a comunicação interna entre os diversos módulos. O nome dos arquivos é formado pelo nome do arquivo de dados da estrutura, acrescido de uma extensão apropriada. A organização em módulos facilita a modificação e a implementação de novos tipos de elemento. No quadro abaixo descreve-se cada módulo e qual a extensão colocada no arquivo de saída correspondente. Os diversos módulos são interligados por bibliotecas (“*runtime libraries*”) que otimizam o processamento.

Tabela 1. Descrição dos módulos do programa ANEST

Módulo	Descrição do programa	Extensão
ESTRU	Lê a definição da geometria e vinculação da estrutura e renumera internamente os seus nós, para otimizar a largura de banda da matriz de rigidez. Lê e gera as coordenadas dos nós, condições de contorno e restrições e numera as equações de equilíbrio da estrutura.	.EST
RET2D	Calcula a matriz de rigidez dos elementos e o vetor (ou matriz) de cargas nodais equivalentes a cargas atuantes nos elementos de estruturas reticuladas planas.	.R2D
RET3D	Calcula a matriz de rigidez dos elementos e o vetor (ou matriz) de cargas nodais equivalentes a cargas atuantes nos elementos de estruturas reticuladas espaciais.	.R3D
RESOL	Forma a matriz de rigidez e e o vetor (ou matriz) de cargas nodais da estrutura. Resolve o sistema de equações de equilíbrio, obtendo o vetor (ou matriz) de deslocamentos nodais da estrutura.	.RES
ESF2D	Calcula os esforços nos elementos de estruturas reticuladas planas.	.E2D
ESF3D	Calcula os esforços nos elementos de estruturas reticuladas espaciais.	.E3D
REAC	Calcula as reações vinculares para todos os apoios da estrutura e verifica o equilíbrio da estrutura.	.REA
VISUEST	Desenha as estruturas reticuladas planas indeformadas (viga, treliça plana, pórtico plano) e as cargas aplicadas na estrutura.	-
VISUDEF	Desenha as estruturas reticuladas planas e suas deformadas (viga, treliça plana, pórtico plano).	-
VISUESF	Desenha os esforços nas estruturas reticuladas planas (esforço axial, cortante e momento fletor) e as reações nos apoios.	-

4. Exemplos

Como ANEST é um programa educacional utilizado majoritariamente por graduandos em Engenharia Civil, sua concepção de entrada de dados foi feita visando minimizar as dificuldades que outros programas comerciais oferecem a usuários principiantes. Para analisar a estrutura informa-se inicialmente qual o tipo de estrutura e todos os dados que definem a sua geometria, suas vinculações e as propriedades dos elementos, tanto geométricas como as mecânicas dos materiais. Em seguida informa-se os dados de

carregamentos nos elementos, as incidências dos nós nos elementos e ao final os carregamentos aplicados nos nós. Toda a entrada de dados é feita através de janelas padrão *Windows*, utilizando-se unidades de força e de comprimento consistentes. A vantagem de ANEST é que é necessário informar apenas os dados referentes ao tipo de elemento, por exemplo, para uma treliça plana os vínculos podem restringir apenas movimentos de translação na horizontal e na vertical (as ligações entre barras são rotuladas automaticamente) e basta informar a área da seção transversal e o módulo de elasticidade do material nas propriedades dos elementos. O programa leva em conta o peso próprio da estrutura no caso de carregamento 1, quando informa-se o peso dos elementos por unidade de comprimento. A Figura 1 ilustra uma das janelas de entrada de dados de propriedades dos elementos para o elemento tipo pórtico plano.

O programa tem como arquivos de saída os resultados das análises, que podem ser visualizados em forma de texto (ver Tabela 1) ou através dos módulos gráficos VISUEST, VISUDEF e VISUESF para o caso apenas de estruturas planas. O módulo VISUEST apresenta ao usuário a estrutura que será analisada e os carregamentos a que está submetida, de acordo com as informações fornecidas previamente. O módulo VISUDEF desenha a estrutura indeformada juntamente com a sua deformada, possibilitando a visualização dos deslocamentos sofridos pelos eixos das barras. O módulo VISUESF possibilita que o usuário visualize os esforços internos na estrutura. Podem ser visualizados os esforços axiais, cortantes e de momento fletor, de acordo com o tipo de estrutura analisada. Para facilitar a visualização gráfica dos resultados, todos os módulos oferecem ao usuário a possibilidade de alterar a escala do desenho e as cores além de salvar como arquivo *bitmap* para ser utilizado em outras aplicações.

A seguir apresentam-se alguns exemplos dos resultados de saída de estruturas reticuladas planas analisadas pelo programa ANEST. Mostra-se inicialmente o exemplo de uma viga contínua nas Figuras 2 a 5, em seguida o exemplo de uma treliça plana nas Figuras 6 e 7 e por fim o exemplo de um pórtico plano nas Figuras 8 e 9.

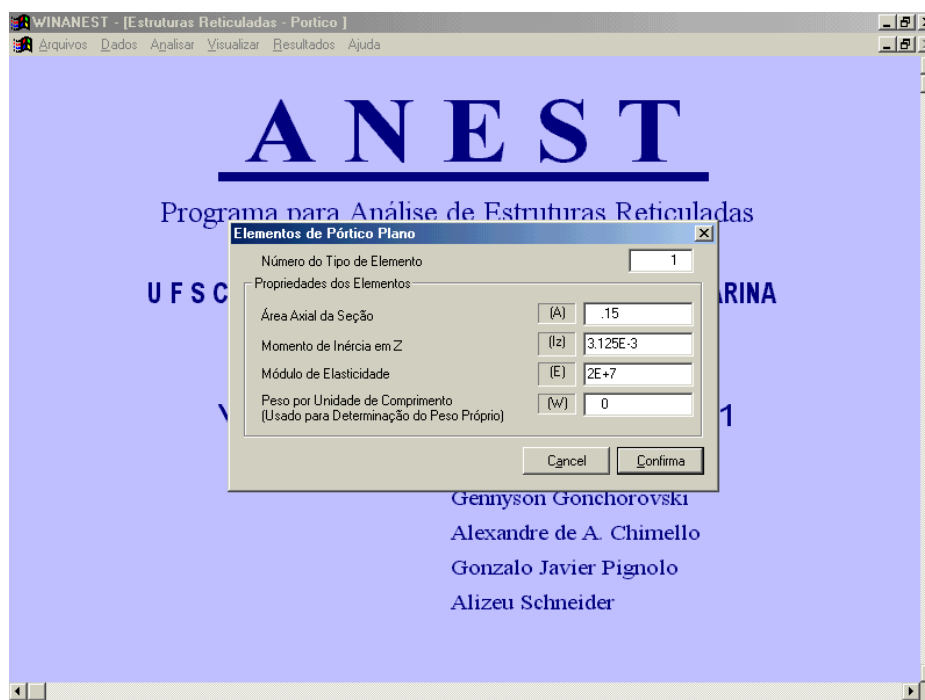


Figura 1. Janela em que são fornecidas as propriedades do elemento.

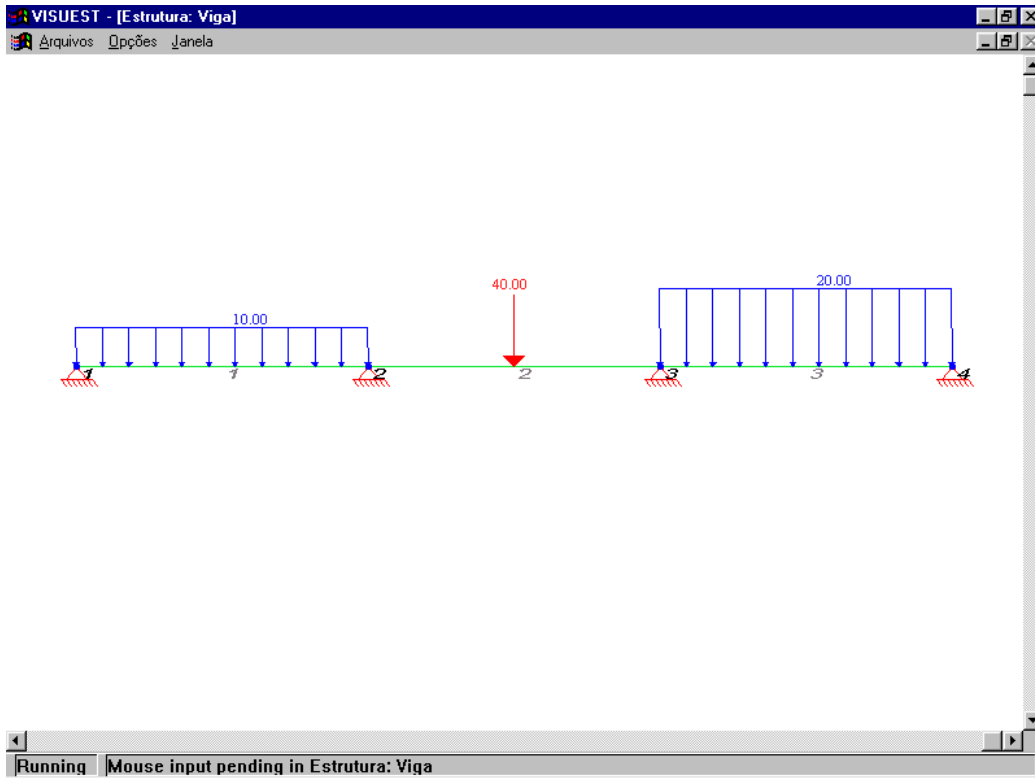


Figura 2. Visualização de estrutura tipo viga com carregamento aplicado.

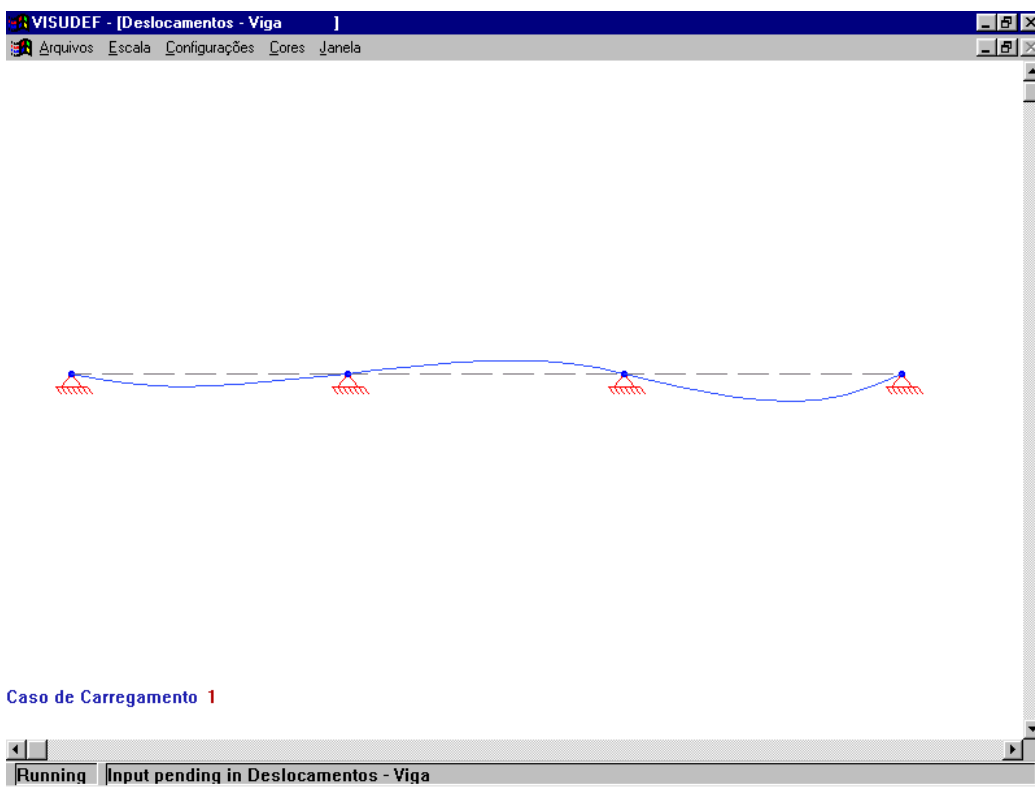


Figura 3. Visualização de estrutura tipo viga deformada e indeformada.

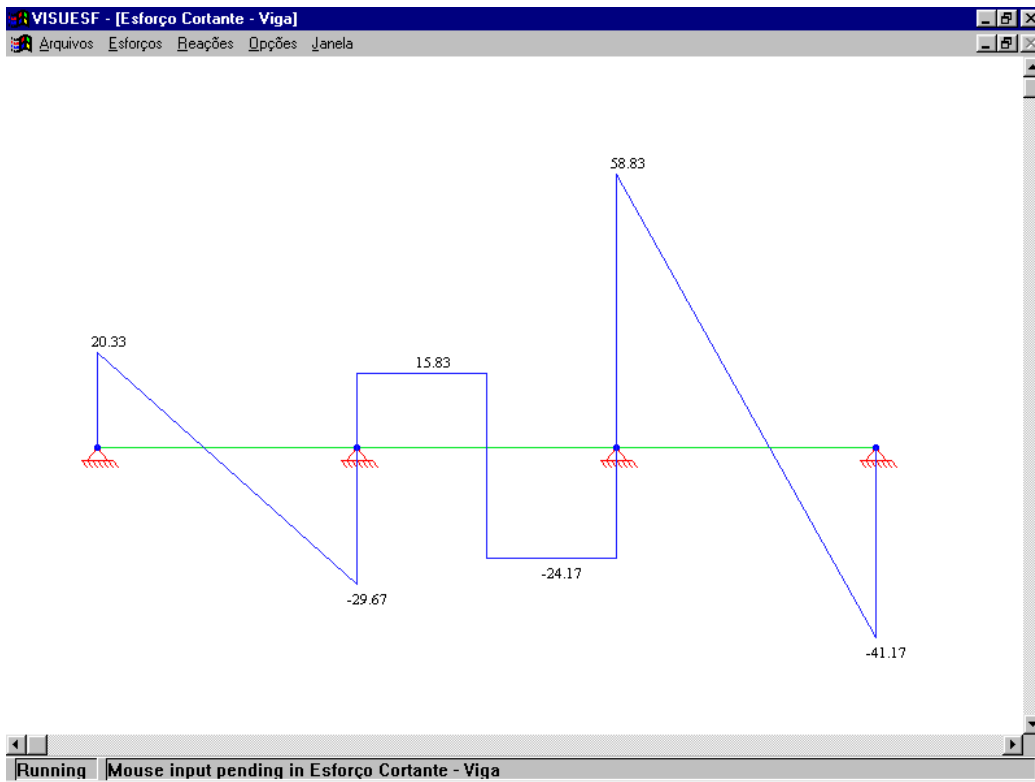


Figura 4. Visualização do diagrama de esforço cortante em estrutura tipo viga.

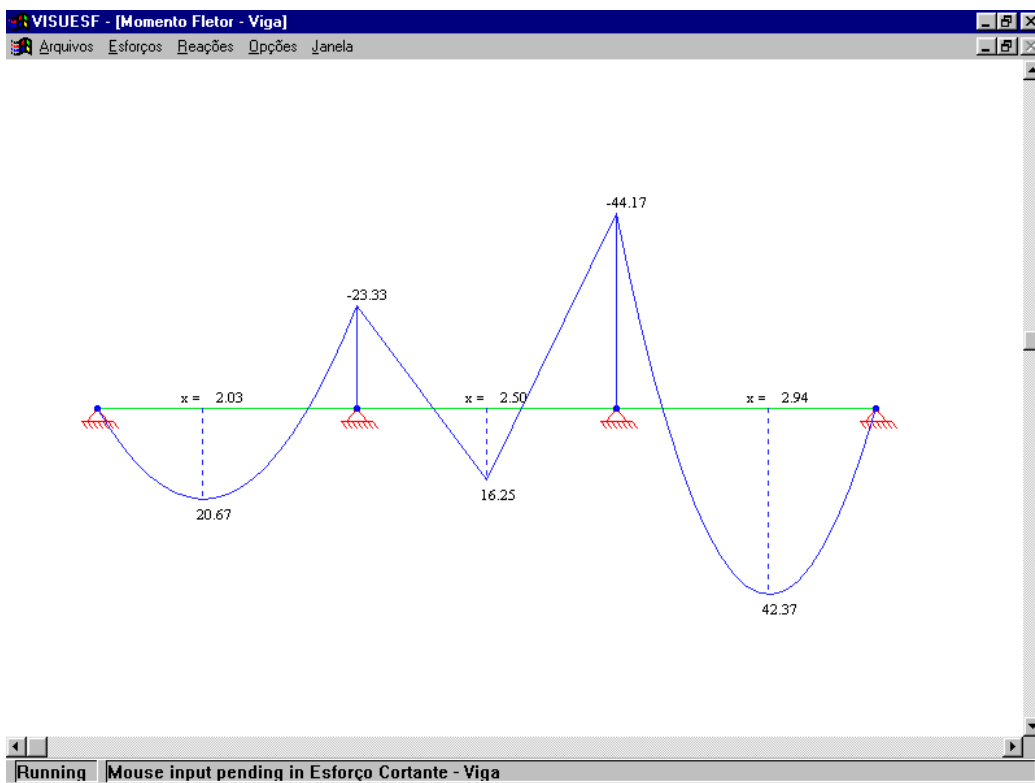


Figura 5. Visualização do diagrama de momento fleter em estrutura tipo viga.

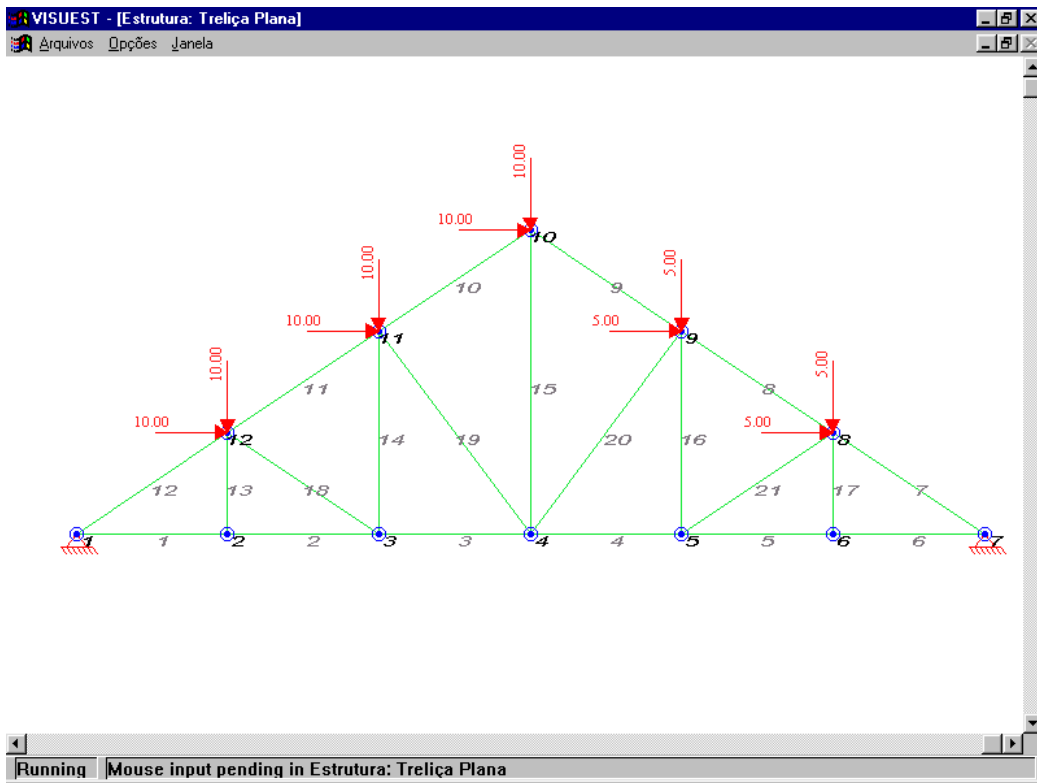


Figura 6. Visualização de estrutura tipo treliça plana com cargas aplicadas.

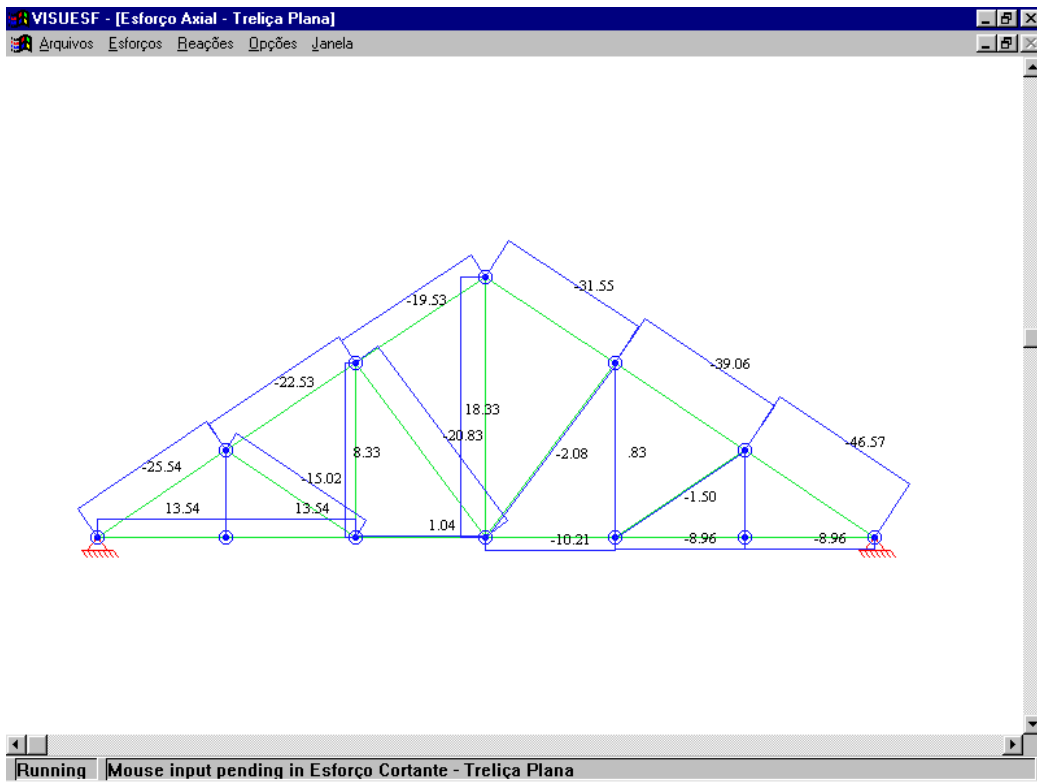


Figura 7. Visualização do diagrama de esforço axial em estrutura tipo treliça plana.

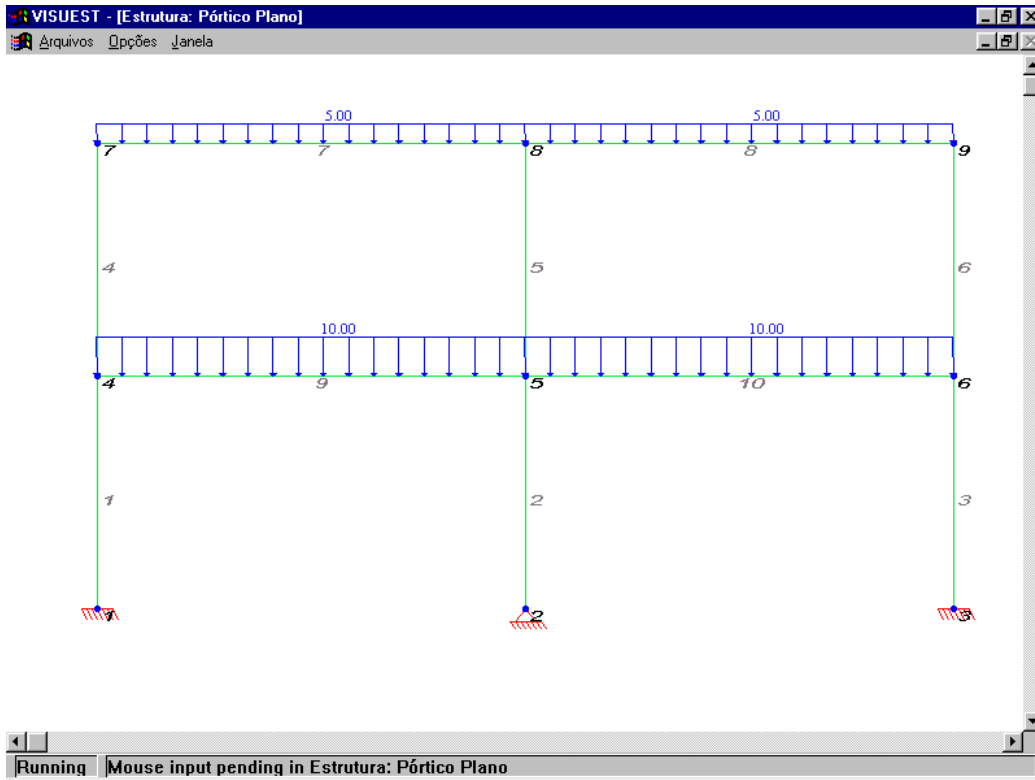


Figura 8. Visualização de estrutura tipo pórtico plano com carregamento aplicado.

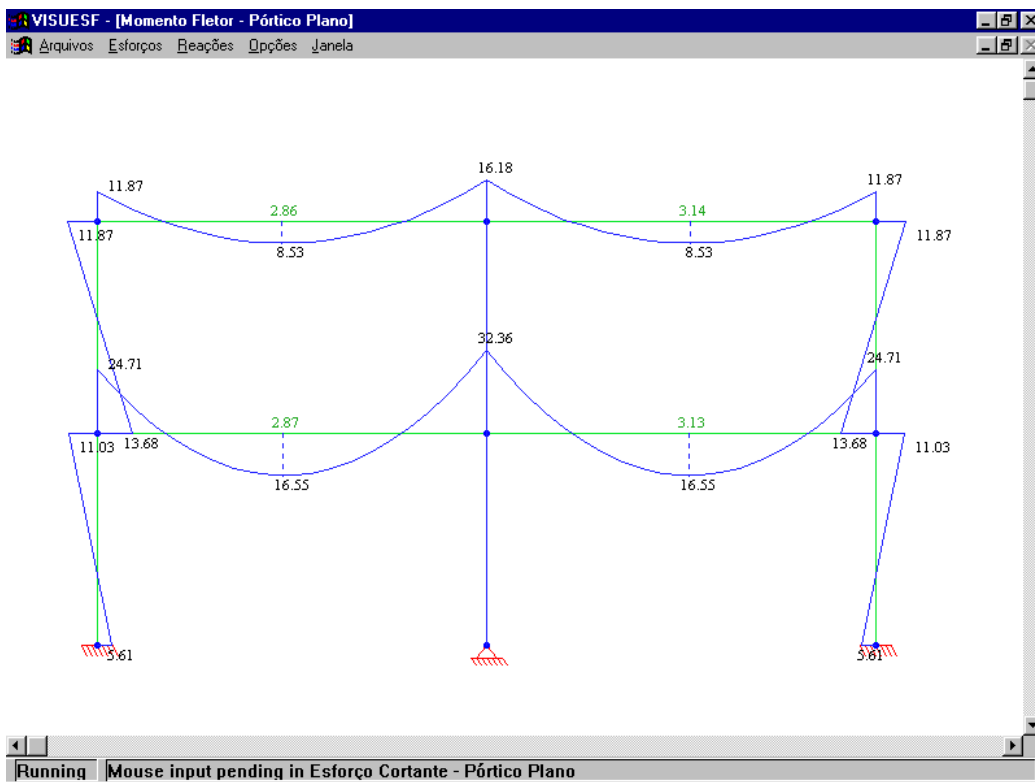


Figura 9. Visualização do diagrama de momento fletor em estrutura tipo pórtico plano.

O programa ANEST permite que uma estrutura seja analisada com diversos casos de carregamento (por exemplo: peso próprio, vento, sobrecarga acidental) e que sejam feitas combinações entre estes casos. O programa VISUESF também calcula em cada elemento o momento fletor máximo e a posição onde este ocorre, indicando no desenho, conforme pode ser observado nas Figuras 5 e 9.

5. Considerações Finais

O programa ANEST é uma ferramenta computacional desenvolvida para utilização por alunos de graduação em Engenharia Civil, que proporciona um melhor entendimento dos conteúdos das disciplinas de Análise Estrutural ministrados em sala de aula. A sua concepção em módulos simula as etapas da formulação matricial do método dos deslocamentos para a resolução de estruturas planas e espaciais. Isto torna o programa didático, sendo esta uma característica inexistente nos programas comerciais.

O programa ANEST vem sendo desenvolvido pelos autores e por outros alunos de iniciação científica, fazendo com que estes aprofundem seus conhecimentos na área de Estruturas e tenham contato com linguagens de programação, o que é um diferencial entre os alunos do curso de graduação da UFSC. O programa também vem sendo utilizado por diversos alunos de pós-graduação da área de Estruturas, como base para novos programas desenvolvidos em suas dissertações de mestrado e teses de doutorado.

Pretende-se dar continuidade ao desenvolvimento de ANEST, para possibilitar a análise de estruturas submetidas a variação de temperatura e deslocamentos prescritos (recalques de apoio) e também a inclusão de rótulas nas ligações entre elementos de vigas e pórticos. Além disto deve-se estender os módulos de visualização gráfica para estruturas espaciais. Posteriormente o programa pode ser estendido também para a análise de estruturas laminares e para a análise dinâmica de estruturas.

6. Referências

- Chimello, A. A.; Gonchorovski, G.; Pignolo, G.; Schneider, A. e LaRovere, H.L. (1996-2002) “ANEST – Desenvolvimento de programas computacionais para Análise Estrutural”, Relatórios de Projeto PIBIC/UFSC, Florianópolis, S.C..
- Ellis, T.M.R.; Philips, I.R. and Lahey, T.M. (1990) “FORTRAN 90 – Programing”, Ed. Addison-Wesley, England.
- ECV (2003), Endereço da página na Internet: <http://www.ecv.ufsc.br/secdepto>, Plano de Ensino, ECV5220, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.
- Gere, J. M. e Weaver, W. (1987) “Análise de Estruturas Reticuladas”, Editora Guanabara S.A.
- Martha, L.F. (2002) “FTOOL - Um Programa Gráfico-Interativo para Ensino de Comportamento de Estruturas”, Versão Educacional 2.11 para Windows, Tecgraf, PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ.
- Microsoft Power Station (1996) “Compilador FORTRAN 90”, Professional Edition, Versão 4.0.
- Seible, F.; Latham, C.T. and Kurkchubasche, A. (1987) “CALSD – Instructional Computer Programs for Structural Engineering – User Information Manual”, A.M.E.S. Department, University of California, San Diego, USA.
- Soriano, H.L. e Lima, S.S. (1997) “Análise de Estruturas em Computadores: Estruturas Reticuladas, Vol. I, 2ª ed., Cadernos Didáticos UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- Wilson, E.L. (1996) “SAP2000 PLUS - Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures”, Version 6.11, Computers & Structures, Inc., Berkeley, California, U.S.A.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer o apoio do CNPq, através do fornecimento de bolsas de iniciação científica do programa PIBIC/UFSC.