



DESENVOLVIMENTO DE PROGRAMAS PARA APOIO AO ENSINO E APRENDIZAGEM DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Gláucyo O. Santos – glaucyo@unb.br

Paul W. Partridge – paulp@unb.br

William T. M. Silva – taylor@unb.br

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas e Construção Civil

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – Universidade de Brasília

Campus Universitário Darcy Ribeiro – 70910-900 – Brasília – DF, Brasil

Resumo: *Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um programa para apoio ao ensino e aprendizagem do Método dos Elementos Finitos (MEF), voltado para a análise de treliças planas. O mesmo foi desenvolvido em ambiente Windows usando o compilador Delphi. Permite, por meio de interfaces gráficas, a geração automática da geometria, dos carregamentos, das condições de contorno, das propriedades mecânicas dos elementos, bem como a visualização dos resultados intermediários da análise, tais como: matrizes dos elementos não montadas, matriz global da estrutura, vetores de carga, etc. Visualizam-se, ainda, os resultados finais da análise: deslocamentos nodais, esforços nos elementos e reações de apoio. Descreve-se a forma de utilização do programa, detalhando-se o funcionamento das principais janelas e comandos. Em seguida, apresentam-se os aspectos básicos da entrada de dados. O processo de solução iterativo ou “Solução – Passo a Passo” enfatiza as potencialidades educacionais do programa, permitindo a participação efetiva do aluno no processo de resolução do método em estudo, interpretando os resultados obtidos interativamente, em um determinado passo, e utilizando esta informação como “feedback” para o seguinte. Um exemplo numérico é investigado para ilustrar a precisão e aplicabilidade do programa.*

Palavras-chaves: *Elementos finitos, Treliças, Software educativo, Ensino de engenharia.*

1. INTRODUÇÃO

Os computadores revolucionaram toda a ciência humana por capacitarem os pesquisadores a analisar dados de forma muito mais sistemática do que usando o próprio cérebro.

No ramo da engenharia, essa revolução se deu de forma muito acentuada, principalmente, devido ao surgimento e ao desenvolvimento, nas últimas décadas, de vários métodos de simulação numérica, dentre os quais pode-se destacar o Método dos Elementos Finitos (MEF) e o Método dos Elementos de Contorno (MEC).

Nas últimas duas décadas, a mencionada revolução vem impulsionando, também, os métodos e sistemas de ensino. Nesse novo contexto, segundo Dimenstein (2001), as inovações tecnológicas em todas as áreas do conhecimento humano exigem uma formação educacional mais adequada para acompanhar o dinamismo do conhecimento, da ciência e da prática profissional. Exige a criação de novos ambientes de aprendizagem contínua que

possam oferecer condições de acesso a conhecimentos essenciais aos saberes característicos de uma área de atuação profissional.

Nesse sentido, o presente trabalho apresenta a metodologia e a implementação de um programa educacional para o ensino e aprendizagem de análise matricial de estruturas via MEF voltada para a análise de treliças planas. Encontram-se em desenvolvimento um código para a equação de Laplace, e um outro para a análise de pórticos planos que não serão abordados neste trabalho por motivo de espaço.

A utilização do programa, sob a orientação do professor, visa a apoiar o aprendizado e a fixação de procedimentos na resolução de problemas simples de cunho didático. Mesmo em fase embrionária de desenvolvimento, busca atender as recomendações de Pravia e Kripka (1999), no sentido de possibilitar o acesso a resultados intermediários da análise, tais como: matrizes dos elementos não montadas, matriz global da estrutura, vetores de carga, etc; permitindo uma análise interativa na qual pode-se acompanhar e visualizar todas as etapas da resolução dos problemas.

O programa está sendo desenvolvido em ambiente Windows usando a linguagem Pascal Orientado a Objetos em Ambiente de Desenvolvimento Integrado Delphi.

O presente trabalho apresenta interfaces gráficas amigáveis para o programa TPEF.FOR (análise estática linear de treliças planas) desenvolvido, em Fortran, por Brebbia e Ferrante (1986). O mesmo é usado na disciplina Método dos Elementos Finitos 1 do Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil (PECC) da Universidade de Brasília.

O desenvolvimento dessas interfaces gráficas tem como objetivo apresentar os resultados parciais e finais de cada uma das etapas da programação em forma visual, utilizando janelas do Windows, nas quais é possível fornecer os dados via formulários ou lê-los a partir de arquivos de dados, assim possibilitando uma maior interatividade no processo de resolução dos problemas.

A figura 1 apresenta os principais procedimentos para a utilização do programa Peef_treliça.

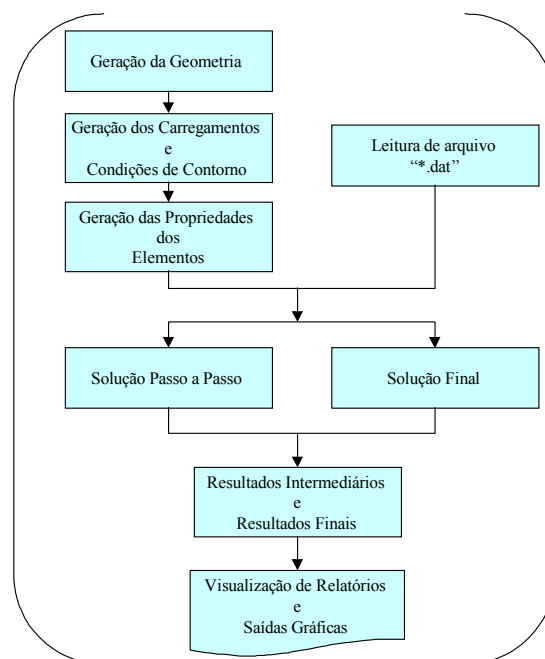


Figura 1 – Procedimentos Principais Programa Peef_treliça

2. PROGRAMA EDUCACIONAL – TRELIÇAS PLANAS

A figura 2 mostra a janela principal do programa referente à análise de treliças planas.

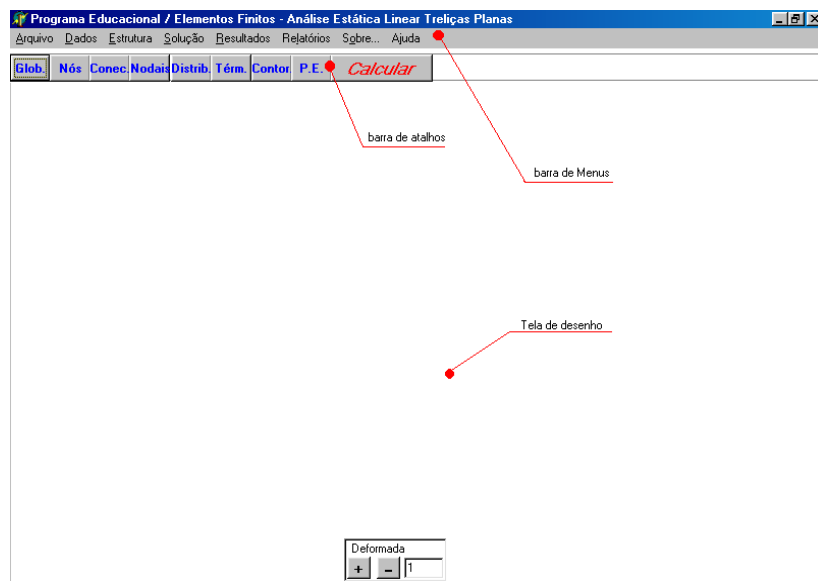


Figura 2 – Janela Principal do programa Peef_treliça

O fornecimento dos dados de entrada pode ser feito a partir da leitura de um arquivo de dados com extensão “.dat” acessando o comando Abrir do menu Arquivo, mostrado na figura 3, ou ainda, de forma interativa, na qual os dados são informados com o uso do teclado e do mouse, por intermédio dos comandos do menu Dados, mostrado na figura 4.

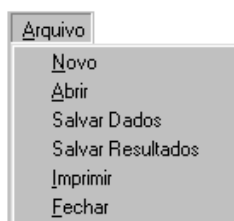


Figura 3 – Menu *Arquivo*

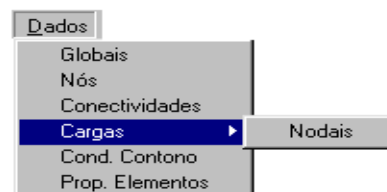


Figura 4 – Menu *Dados*

Como exemplo, a janela “Coordenadas dos Nós”, mostrada na figura 5, acessada por meio do comando Nós possibilita o fornecimento dos dados de entrada referentes às coordenadas nodais.

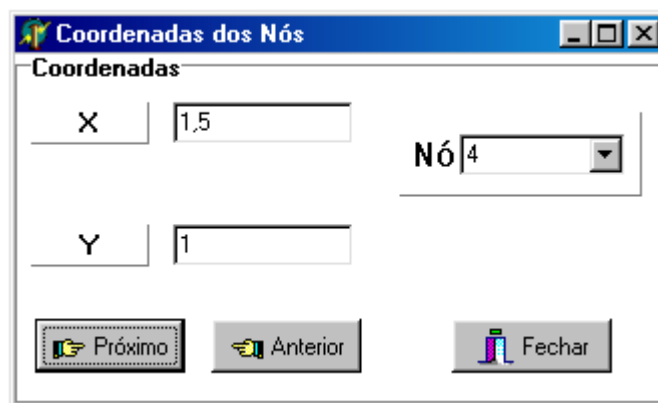


Figura 5 – Janela *Coordenadas dos Nós*

Acessando o comando Gera Desenho do menu Estrutura, após a informação de todos os dados de entrada, o programa possibilita a visualização do desenho da treliça, de forma a permitir a conferência dos dados fornecidos (figura 6). O comando Gera Deformada, do mesmo menu, retorna um diagrama da configuração da treliça deformada, sendo necessário ter calculado a estrutura previamente, como mostrado na figura 7.

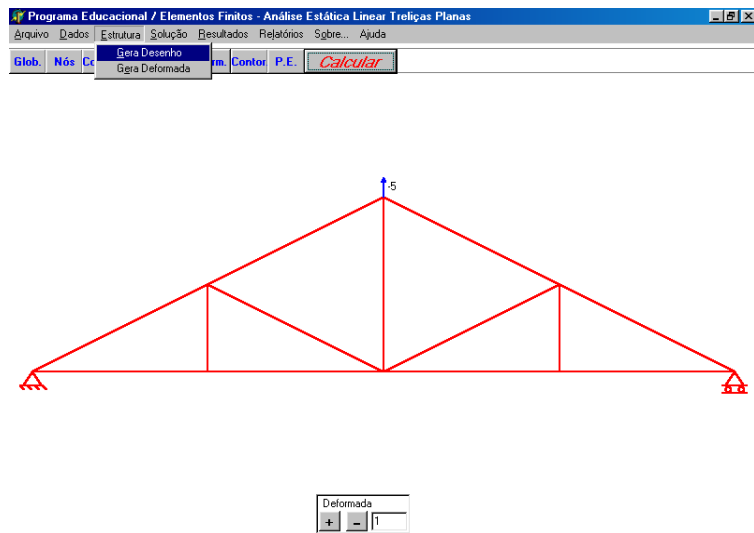


Figura 6 – Janela Principal – Comando: Gera Desenho

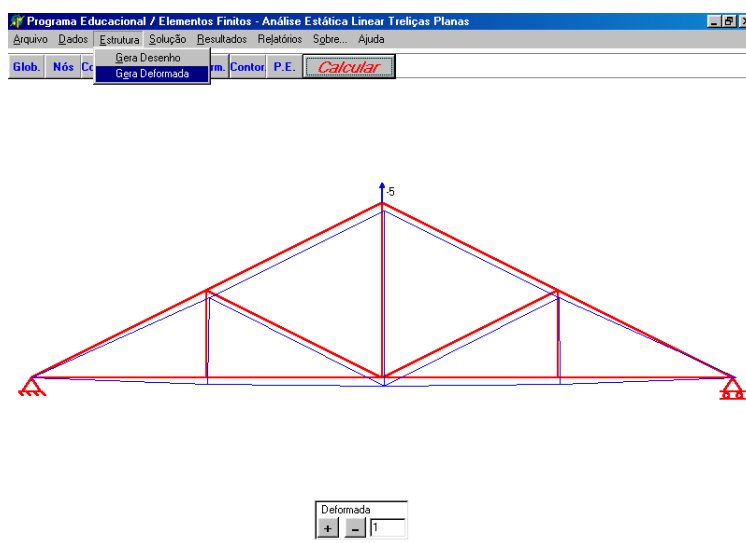


Figura 7 – Janela Principal – Comando: Gera Deformada

O programa oferece duas formas para a análise da treliça em estudo. Acessando o menu Solução da Janela Principal, mostrado na figura 8, pode-se escolher a solução “Passo a Passo” ou a solução “Final”.

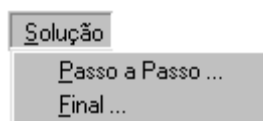


Figura 8 – Menu Solução

Na primeira alternativa o aluno tem acesso às janelas que mostram a seqüência de todos os passos necessários para a solução e visualização das etapas intermediárias. A solução “Passo a Passo” tem um caráter didático muito importante, já que descreve, de forma ordenada e clara, as operações que devem ser realizadas para se obter a solução seguindo os métodos matriciais de resolução de estruturas.

A seqüência de resolução é sub-dividida em sete passos que são sucintamente apresentados a seguir:

Passo 1: Numeração dos nós e graus de liberdade da treliça em estudo.

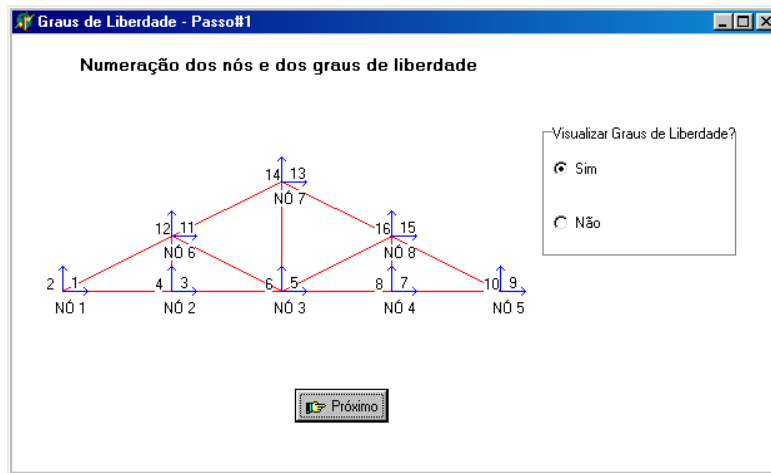


Figura 9– Janela *Graus de Liberdade – Passo 1*

Passo 2: Cálculo da matriz de rigidez do elemento.

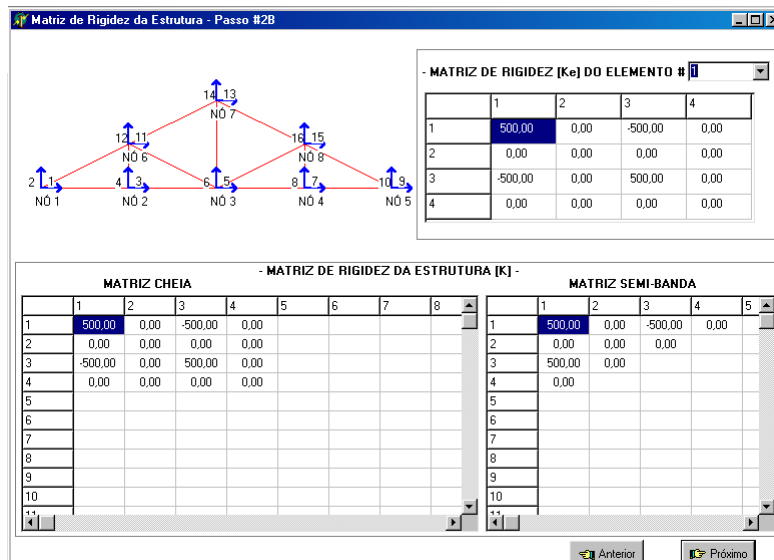


Figura 10– Janela *Matriz de Rigidez da Estrutura (não montada)– Passo 2B*

Na caixa de seleção “Matriz de Rigidez do Elemento”, localizada na parte superior da janela mostrada na figura 10, escolhe-se o elemento a ser calculado/montado. Os coeficientes da matriz de rigidez do elemento selecionado são calculados e montados, na matriz 4x4, posicionada na parte superior direita da janela. E simultaneamente, são montados nas suas correspondentes posições da matriz de rigidez global da estrutura nas formas cheia e semi-banda, mostradas na parte inferior da mesma figura. Esse processo se repete para todos os elementos, obtendo assim, a matriz de rigidez global da treliça nas formas cheia e semi-banda.

Para a orientação do aluno durante o processo de montagem das matrizes de rigidez, a treliça em estudo é mostrada na parte superior esquerda da janela, com a numeração dos graus de liberdade em destaque.

Passo 3: Vetor de cargas da estrutura.

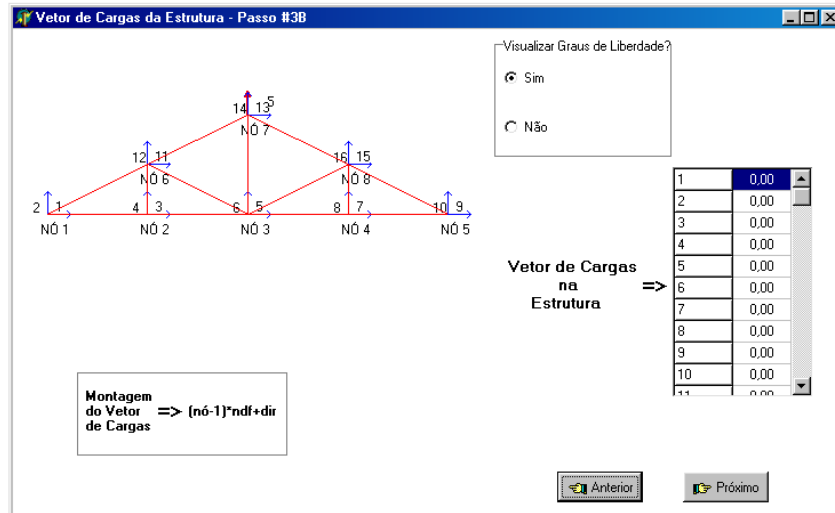


Figura 11 – Janela *Vetor de Cargas da Estrutura – Passo 3B*

Este passo aborda a montagem do vetor de cargas associado às cargas externas atuantes na treliça.

Passo 4: Condições de contorno.

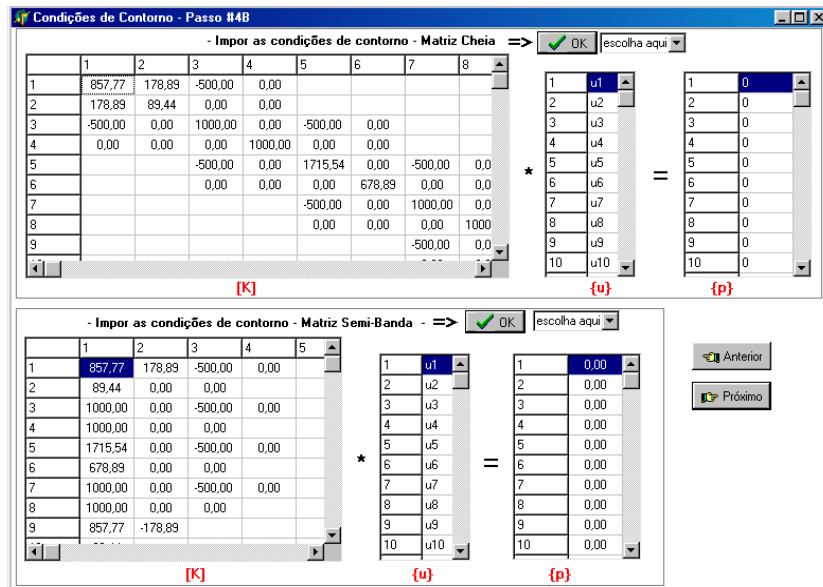


Figura 12 – Janela *Condições de Contorno – Passo 4B*

Obtida a matriz de rigidez da estrutura e o vetor de cargas, o próximo passo consiste em modificar a matriz de rigidez introduzindo as condições de contorno, tanto para a matriz na forma cheia como para a armazenada em semi-banda.

A parte superior da janela, mostrada na figura 12, refere-se à imposição das condições de contorno na matriz de rigidez da estrutura na forma cheia, e a parte inferior, refere-se à imposição das condições de contorno na matriz de rigidez da estrutura na forma semi-banda.

Pode-se modificar a matriz cheia impondo as condições de contorno, ou seja, eliminando as linhas e as colunas referentes aos deslocamentos prescritos, uma a uma, utilizando a caixa de seleção localizada na parte superior da janela, ou impor todas simultaneamente usando o botão “OK”.

Para a matriz na forma semi-banda, procede-se de modo similar ao da matriz cheia, pode-se impor as condições de contorno eliminando as linhas e as anti-diagonais referentes aos deslocamentos prescritos, uma a uma, utilizando a caixa de seleção localizada na parte inferior da janela, ou impor todas simultaneamente usando o botão “OK”. Aqui, considera-se condições de contorno iguais a zero. Para completar o processo coloca-se 1 (um) na diagonal principal.

Passo 5: Solução do sistema de equações.

Neste passo se resolve o sistema de equações lineares $k.u = p$, que resulta após a imposição das condições de contorno, utilizando eliminação de Gauss, para obter os deslocamentos. Considerações sobre os métodos de resolução são encontradas em Brebbia e Ferrante (1986).

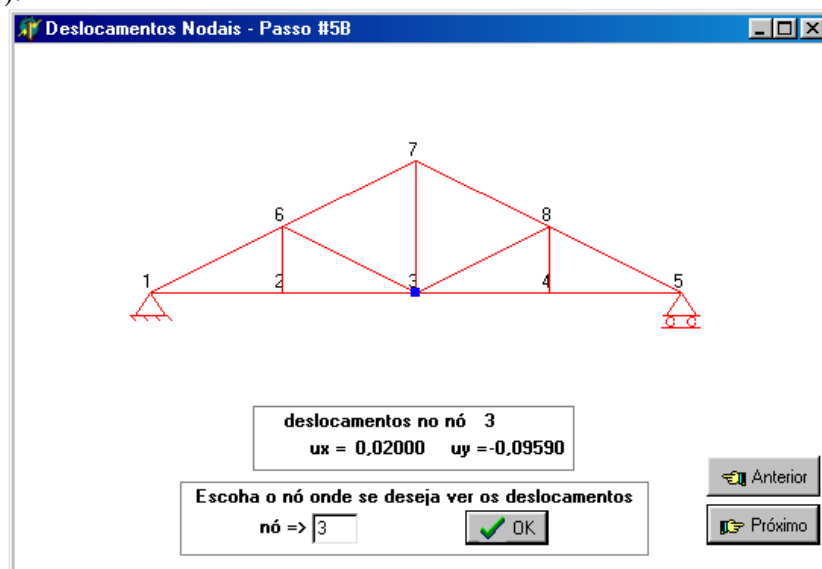


Figura 13 – Janela *Deslocamento Nodais – Passo 5B*

Uma vez resolvido o sistema de equações os deslocamentos nodais podem ser visualizados por meio da janela “Deslocamentos Nodais – Passo 5B”, mostrada na figura 13.

Digitando o número do nó para o qual se deseja conhecer os deslocamentos, na caixa de edição “nó” localizada na parte inferior da janela, e ao clicar no botão “OK”, o nó escolhido aparece em destaque no desenho da treliça e visualizam-se os valores dos deslocamentos u_x e u_y para o mesmo. Este procedimento pode ser repetido para todos os nós, aleatoriamente.

Passo 6: Esforços nos elementos.

Como os deslocamentos nodais da estrutura já são conhecidos, o programa calcula, neste passo, os esforços nos elementos.

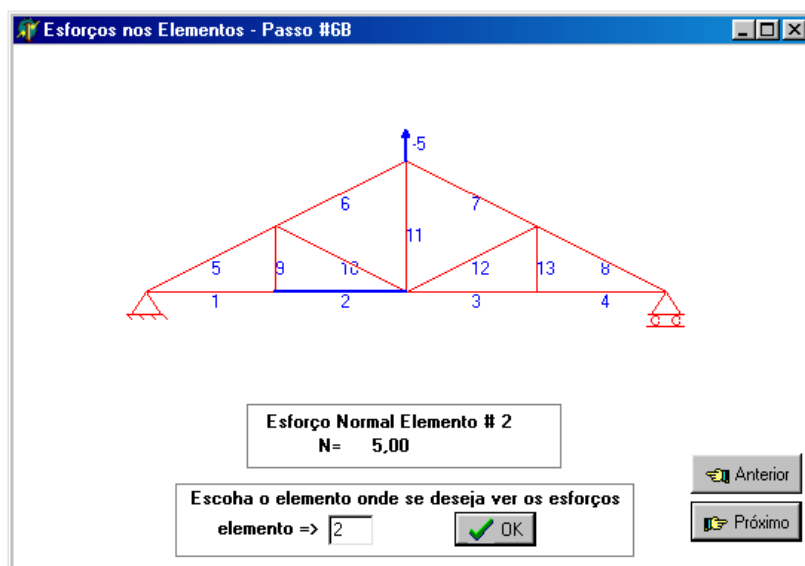


Figura 14 – Janela *Esforços nos Elementos – Passo 6B*

Na janela “Esforços nos Elementos – Passo 6B”, mostrada na figura 14, pode-se escolher o elemento para o qual se deseja conhecer o esforço, de modo semelhante ao feito na janela Deslocamentos Nodais. Na figura 14 visualiza-se, por exemplo, o esforço atuante no elemento 2, sendo o mesmo destacado em cor azul por ser esforço de tração. No caso de compressão, o elemento será destacado em cor roxa.

Passo 7: Reações de apoio.

Este passo permite conhecer os valores das reações de apoio, nos nós com restrição, e as cargas nodais aplicadas nos nós sem restrição.

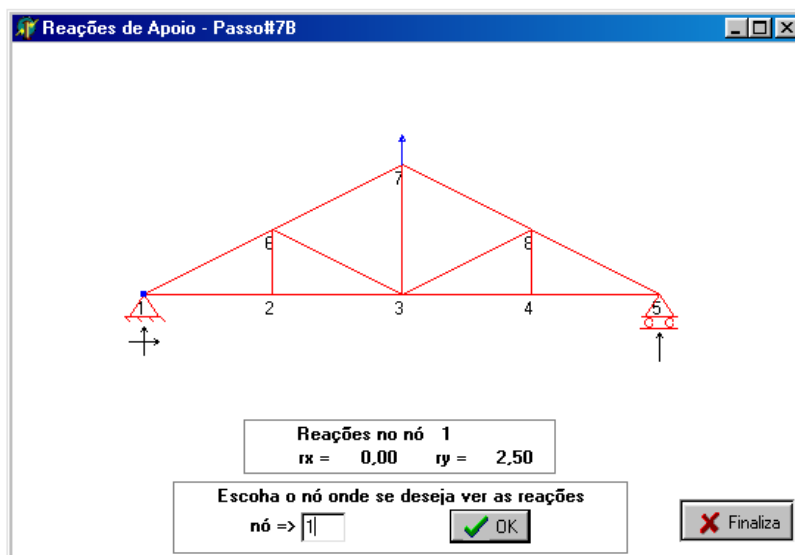


Figura 15 – Janela *Reações de Apoio – Passo 7B*

Na janela “Reações de Apoio – Passo 7B”, mostrada na figura 15, pode-se escolher o nó para o qual se deseja conhecer as reações de apoio ou as cargas aplicadas, de modo semelhante ao feito no passo anterior. Na figura 15, por exemplo, o nó 2 aparece em destaque e visualiza-se os valores de suas reações de apoio.

Na opção solução “Final”, o programa executa o cálculo da treliça e possibilita acesso às janelas com os resultados e relatórios finais, sem mostrar as janelas dos passos intermediários.

Após a treliça ter sido calculada o menu Resultados possibilita acesso às janelas Deslocamentos Nodais – Solução Final, Esforços nos Elementos – Solução Final e Reações de Apoio – Solução Final, similares às janelas já apresentadas no processo de solução Passo a Passo.

O menu Relatórios permite o acesso à janela Relatórios, mostrada na figura 16, que é composta pelas pastas Entrada de Dados e Resultados. A figura 16 mostra, como exemplo, a pasta Resultados que fornece relatório com os dados de entrada e os resultados da análise da treliça calculada. O comando Salvar Resultados do Menu Arquivo, grava os dados deste relatório em disco no formato “*.out” ou “*.txt”.

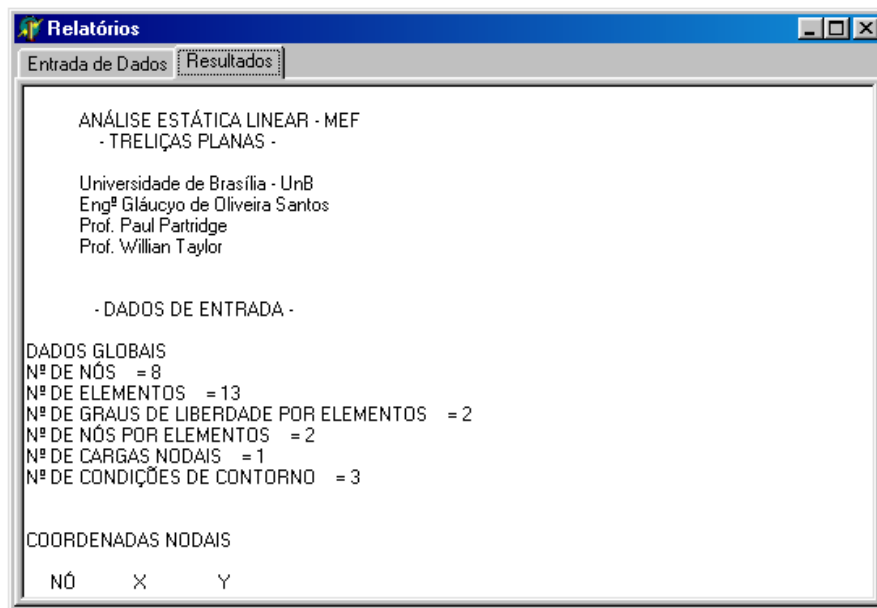


Figura 16 – Janela *Relatórios* – Opção: *Resultados*

3. EXEMPLOS E VALIDAÇÃO DE RESULTADOS

Com o propósito de verificar a confiabilidade dos resultados finais e intermediários obtidos na análise. As tabelas 1 e 2 apresentam os comparativos dos resultados finais (deslocamentos e esforços nos elementos) obtidos na análise da treliça mostrada na figura 19, retirada da referência Weaver e Gere (1990).

Deslocamentos:

Tabela 1 – Comparativo dos Deslocamentos

Nó	Desloc. Peef_treliça		Desloc. Publicação	
	X	Y	X	Y
1	0,10001	0,04147	0,10001	0,041465
2	0,10611	-0,0402	0,10611	-0,040201
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0

Tabela 2 – Comparativo dos Esforços

Elemento	Esforço Peef treliça	Esforço Publicação
1	6,099	6,099
2	0,000	0,000
3	41,465	41,465
4	-40,201	-40,201
5	-26,832	-26,832
6	31,502	31,502

Observa-se que os resultados obtidos na análise usando o programa desenvolvido neste trabalho são idênticos aos apresentados na publicação de referência.

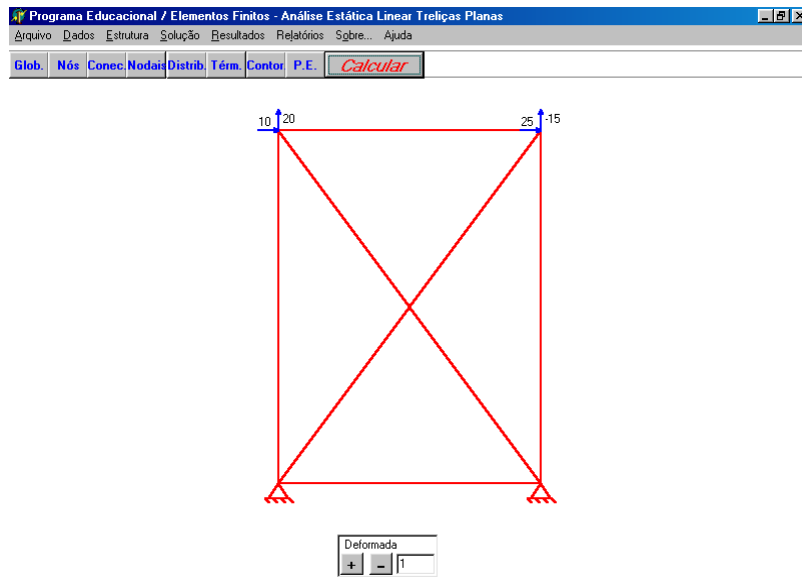


Figura 19 – Visualização da treliça em estudo: Exemplo

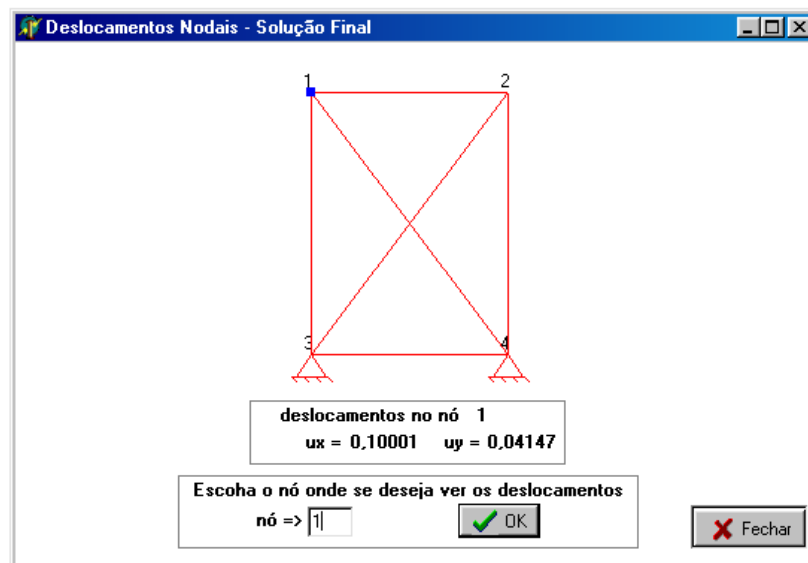


Figura 20 – Deslocamentos do nó 1: Exemplo

A título de ilustração a figura 20 mostra a saída do resultado do deslocamento do nó 1.



4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O programa aqui apresentado foi idealizado com o propósito principal de ser uma ferramenta computacional educacional para apoio ao ensino e aprendizagem de métodos matriciais via MEF sob orientação direta do professor. Para tanto, continuam em andamento no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas e Construção Civil da Universidade de Brasília as implementações de recursos gráficos e contextuais, como: desenvolvimento de “ajuda contextual” contendo tópicos teóricos relacionados às etapas de resolução dos problemas; melhores recursos de visualização de imagens usando “zoom”; possibilidade de análise de pórticos planos. No prosseguimento deste trabalho será realizado uma avaliação ergo-pedagógica do software, no sentido de verificar as suas potencialidades didáticas.

Maiores informações e detalhes sobre o desenvolvimento do presente trabalho são encontrados em Santos (2003).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BREBBIA,C.A.; FERRANTE,A.J. Computational Methods for the Solutions of Engineering Problems. Third Edition . London: Pentech Press,1986.

DIMENSTEIN,G. Aprendiz do Futuro: Cidadania Hoje e Amanhã. 9ª edição. São Paulo: Editora Ática,2001.

PRAVIA,Z.M.C.; Kripka,M. Proposta Metodológica para o Uso e Desenvolvimento de Ferramentas Computacionais no Ensino de Estruturas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENSINO DE ENGENHARIA, 27, 1999, Natal. **Cobenge 1999 (Anais)**.

SANTOS, G.O. **Desenvolvimento de Programas para Apoio ao Ensino do Método dos Elementos Finitos**. 2003. 115f.. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, Brasília – DF.

BIBLIOGRAFIA

WEAVER Jr,W.; GERE,J.M. Matrix Analysis of Framed Structures, 3rd edition. New York,1990.

SOFTWARE DEVELOPMENT TO SUPPORT THE TEACHING OF THE FINITE ELEMENT METHOD

Abstract: *Here an interactive graphic software is presented which has been developed as an academic tool for teaching the structural behaviour of a plane truss through the Finite Element Method. The software was developed using the Delphi compiler in the Windows operating system and it is based on a friendly and simple graphic user interface in which the student has full control over the model being analysed. The software covers all phases of the truss analysis process: model manipulation and attribute assignment (geometry generation,*



nodal forces, support conditions, elastic and cross-section parameters of the elements), numerical analysis (local and global structural matrices, load vectors), and result visualization (axial forces, displacement and support reactions values, and deformed configuration of the structure). The use of the software is described through the use of the main menus, buttons, and windows. In addition, the basic aspects of its data representation scheme are presented. The interactive solution process or “Step-by-Step Solution” allows the students to take part in the solution interpreting the results of the previous step interactively and using this information as feedback for the next step. This integration plays a key role in the learning process. A numerical example is investigated to illustrate the applicability and accuracy of the software.

Key-words: *Finite element, Plane truss, Educational software.*