

## FERRAMENTA DE AUXÍLIO AO APRENDIZADO DA MECÂNICA DAS ESTRUTURAS RETICULADAS

Azevedo, R. – [ra.df@terra.com.br](mailto:ra.df@terra.com.br)

Cerqueira e Souza, A. L. A. – [andré@unb.br](mailto:andré@unb.br)

Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil

Campus Universitários

70910-900 – Brasília – DF

*Resumo: Apresenta-se o programa Pórticos, uma ferramenta de auxílio ao aprendizado da mecânica das estruturas reticuladas. Trata-se de uma ferramenta educativa do tipo simulador que auxilia o estudante a entender os métodos de análise matricial de estruturas, ideal para utilização nas disciplinas de Teorias das Estruturas I e II. O programa trabalha com o Método das Forças (Método da Flexibilidade) e o Método da Rigidez Direta. O software permite a definição da estrutura reticulada, a partir de nós e elementos, bem como as suas características devidas ao material, seção da peça e condições de contorno. Podem ser definidos carregamentos concentrados, distribuídos e em função da diferença de temperatura e recalque de apoio. O Software apresenta graficamente a estrutura definida, bem como informações e vetores envolvidos no processo da análise matricial. Após a definição da estrutura, são apresentadas as matrizes envolvidas no processo, acompanhadas de comentários explicativos. No caso do Método das Forças, o software solicita ao estudante a definição dos hiperestáticos para que o cálculo possa ser completado. O software ainda possui outros recursos básicos como alteração das características da estrutura, salvamento, recuperação e exportação de dados. A interface gráfica amigável facilita o manuseio do programa, estimulando a sua utilização pelos estudantes.*

### CESSÃO DE DIREITOS

É concedida à organização do COBENGE (Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia) a permissão para publicação deste trabalho somente para propósitos acadêmicos e científicos.

### INTRODUÇÃO

#### Software Educativo

O uso da informática vem crescendo muito na área da educação. Atualmente, em diversas formas, todas as áreas do conhecimento são auxiliadas pela informática. Cada vez mais, escolas e faculdades, além de disponibilizarem mais computadores aos alunos e professores, também incentivam a sua utilização como ferramenta de auxílio ao aprendizado e ao ensino através de salas especiais equipadas com projetores digitais e utilização de programas específicos.

Os programas educativos têm a finalidade de auxiliar o aluno, através de diversos recursos, a aprender e compreender determinado assunto. Para tanto não somente o resultado final do problema é suficiente, é necessário, também, que seja mostrado, passo a passo, como

este resultado foi obtido.

### **Análise Matricial Das Estruturas**

A análise matricial é um processo que envolve procedimentos muitas vezes extensos e demorados para serem feitos manualmente. Este trabalho, composto da definição dos referenciais, das direções nodais e locais, da montagem das matrizes de equilíbrio e compatibilidade, e das operações matriciais, torna exaustiva a escrita. Somando-se a isto, a explanação teórica da análise matricial é complexa, que exige do aluno um raciocínio lógico e abstrato bem apurado.

Assim, um programa educativo dotado de recursos para a entrada e visualização dos dados, visualização dos referenciais e de todas as matrizes envolvidas no processo, contribui significativamente para o aprendizado. É notório que a apresentação de exemplos práticos de resolução de estruturas por análise matricial contribui para isto.

Na medida que o aluno tem a oportunidade de definir a estrutura e instantaneamente verificar as matrizes geradas, ele consegue compreender melhor o processo através da observação e reflexão.

Além disso, o aprendiz tem a oportunidade para realizar experiências, através de variações diversas em relação à estrutura original e seus carregamentos, com o intuito de comparar, observar, analisar e criticar os resultados, de forma fácil, rápida e segura.

## **SOFTWARE PÓRTICOS**

### **Operação**

O objetivo deste programa é, através de uma interface amigável e o fornecimento de dados intermediários, contribuir com o aluno no seu aprendizado dos métodos matriciais para a resolução de uma estrutura.

Os passos básicos para operação do programa são entrada de dados, processamento e a exibição dos resultados. A entrada de dados é constituída pela definição de todas as características da estrutura, tais como geometria, contorno e características dos materiais. O processamento é constituído pelos cálculos numéricos para determinação das matrizes envolvidas. Na exibição dos resultados, são mostrados os desenhos relativos à estrutura definida, as direções locais e nodais e as matrizes envolvidas na resolução da estrutura.

Importante salientar que este programa é de caráter educacional, sendo vedada a sua utilização para outros fins. Não é permitida a exploração do mesmo, ou parte dele, em operações comerciais ou com fins lucrativos. Quaisquer conseqüências advindas da utilização deste programa são de inteira responsabilidade de quem os utilizou. O autor e as pessoas envolvidas neste projeto se isentam de qualquer responsabilidade advinda da utilização do programa Pórticos.

### **Entrada de dados**

A tela principal do sistema está mostrada na figura 1. Ela está dividida nas seguintes partes: barra de título, barra de menu, barra de ferramentas, painel esquerdo, painel direito e barra de status.

A tela principal tem a função de fornecer acesso a todos os recursos do programa de modo eficaz e, também, de oferecer ao usuário o máximo de informações acerca da estrutura definida e os resultados da análise selecionada sem, entretanto, causar desconforto visual.

Informa o título do programa, o autor, o modo atual do programa e o nome do arquivo aberto no momento.

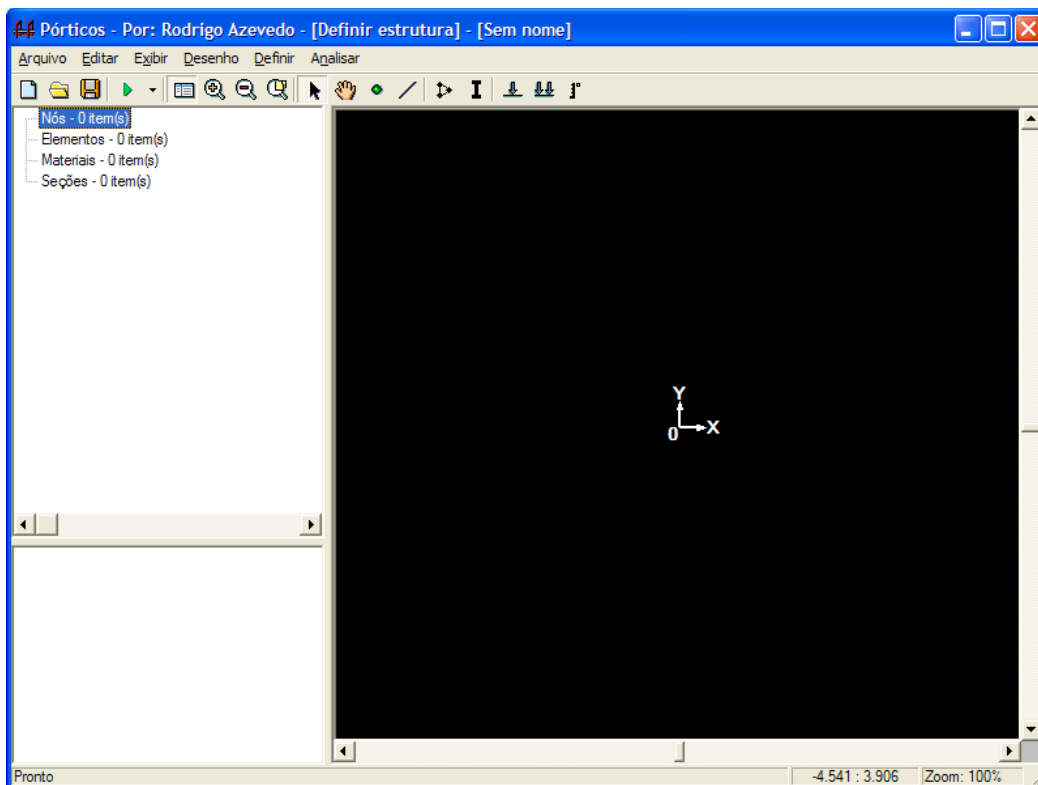


Figura 1 - Tela principal do programa Pórticos.

O programa pode estar em dois modos: modo “Definir estrutura” quando a estrutura está sendo definida e o modo “Análise” quando a análise selecionada está sendo executada.

Os menus foram organizados, segundo as funcionalidades oferecidas pelo programa e são descritos, sucintamente, a seguir:

- Menu Arquivo: Contém funções que executam ações relacionadas à recuperação e gravação dos dados da estrutura em disco e também para saída do programa;
- Menu Editar: Contém funções relacionadas à edição em geral;
- Menu Exibir: Contém funções relacionadas à visualização em geral;
- Menu Inserir: Contém funções para inserir itens na estrutura (disponível somente no modo “Definir estrutura”);
- Menu Definir: Contém funções para definição de itens em geral da estrutura;
- Menu Analisar: Contém funções para iniciar e interromper uma análise da estrutura.

A barra de ferramenta permite que determinados comandos sejam executados rapidamente, com apenas um clique do mouse. Procurou-se adicionar a esta barra os comandos mais utilizados.

A parte superior do painel esquerdo, quando em modo “Definir estrutura”, exibe os dados da estrutura em uma estrutura hierárquica, chamada Treeview. Quando em modo de análise, a Treeview exibe uma chamada para cada matriz e vetor associados à análise em execução. Na parte inferior, são mostradas informações adicionais sobre o item que está selecionado na estrutura logo acima da tela, quando no modo “Definir estrutura”.

O painel direito, proprietário de grande espaço da tela, é responsável pela exibição do desenho da estrutura, quando em modo “Definir estrutura”. Quando em modo de análise, exibe os valores de cada elemento da matriz ou vetor selecionado no painel esquerdo. A finalidade deste painel é exibir e obter informações do usuário, conforme o modo atual e o

item selecionado no painel esquerdo.

A barra de status provê informações adicionais acerca dos eventos do programa que estão ocorrendo durante a sua operação.

### Gerenciamento dos nós

As operações básicas para o gerenciamento dos nós são: listagem dos itens, inclusão, alteração, ordenação e exclusão. Todas essas funções podem ser executadas a partir das telas mostradas nas figuras 2, 3 e 4.

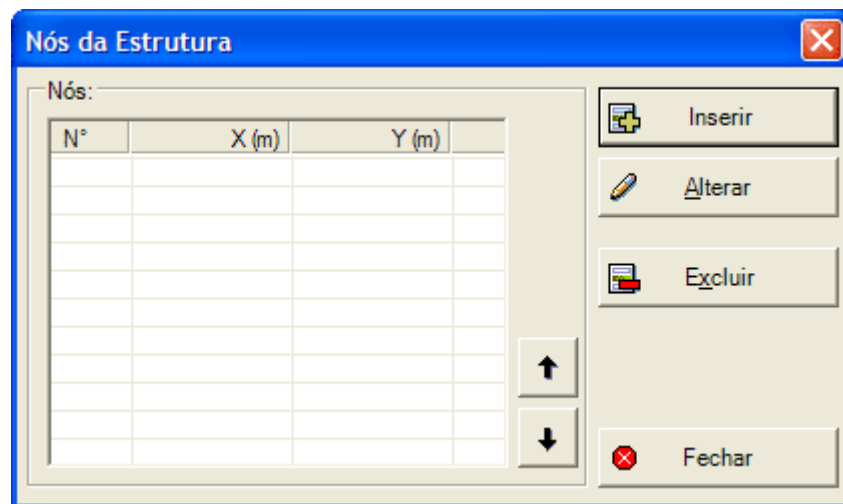


Figura 2 - Listagem dos nós da estrutura.

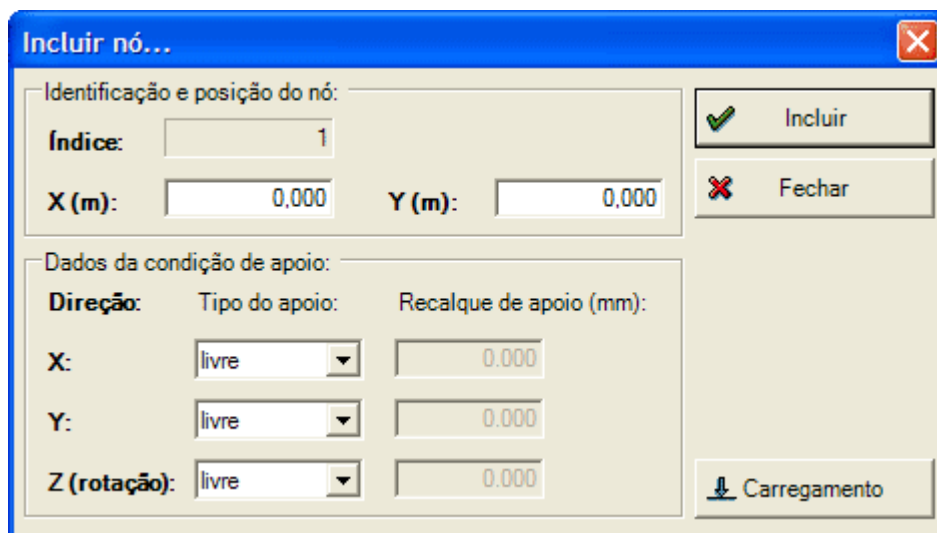


Figura 3 - Edição dos dados de um nó.

### Gerenciamento dos elementos

As operações básicas para o gerenciamento dos elementos são semelhantes aos do

nó: listagem dos itens, inclusão, alteração, ordenação e exclusão e podem ser feitos através das telas mostradas nas figuras 5, 6, 7 e 8.

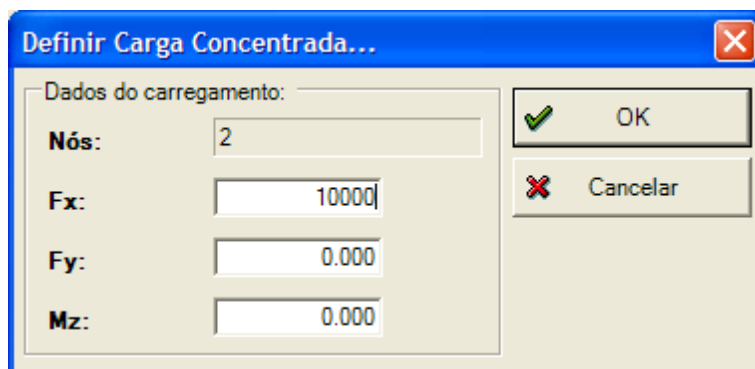


Figura 4 - Definição do carregamento de um nó.

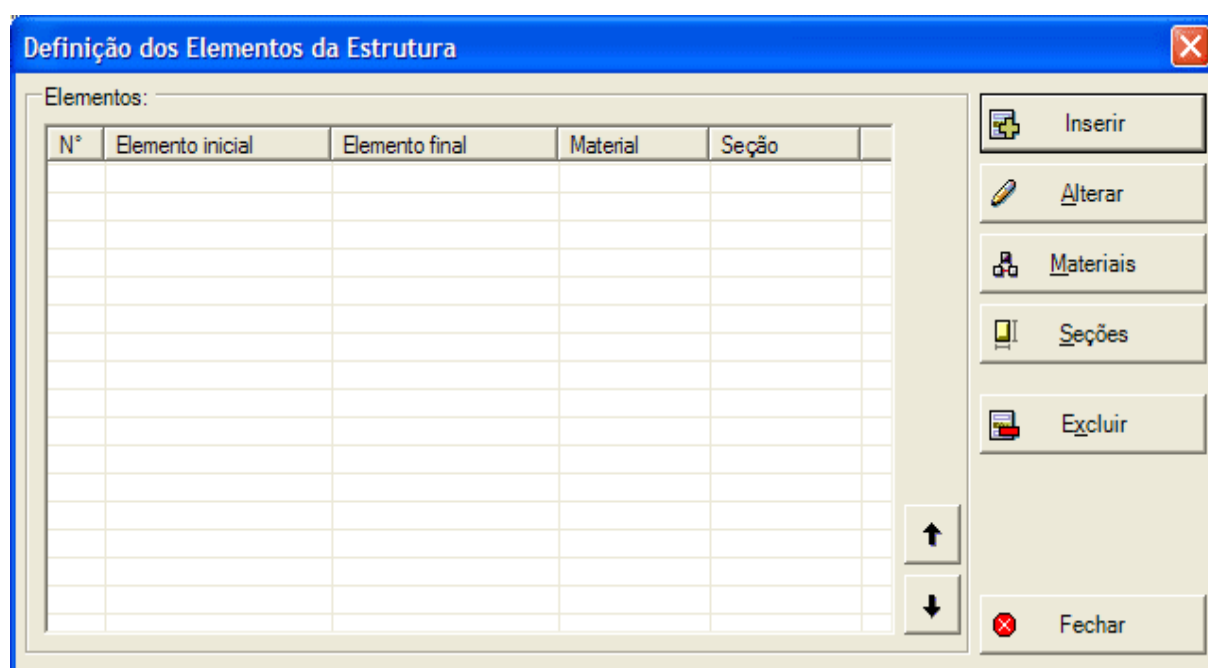


Figura 5 - Listagem dos elementos.

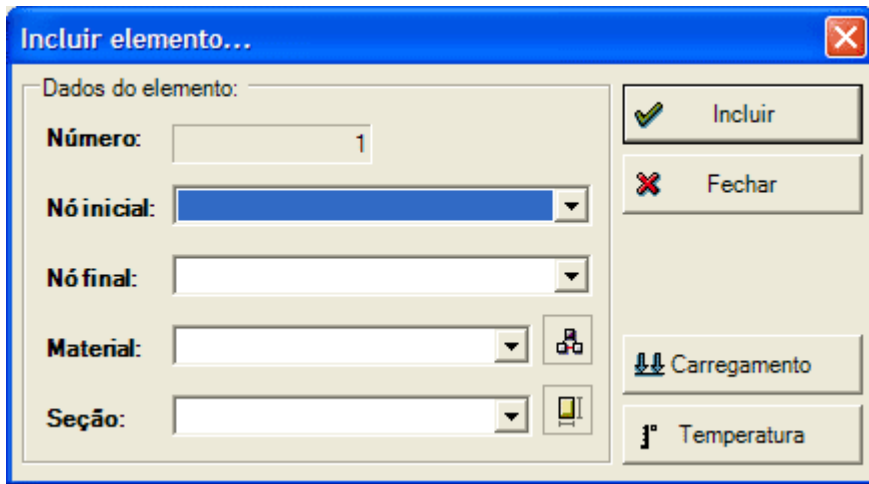


Figura 6 - Definição dos dados de um elemento.

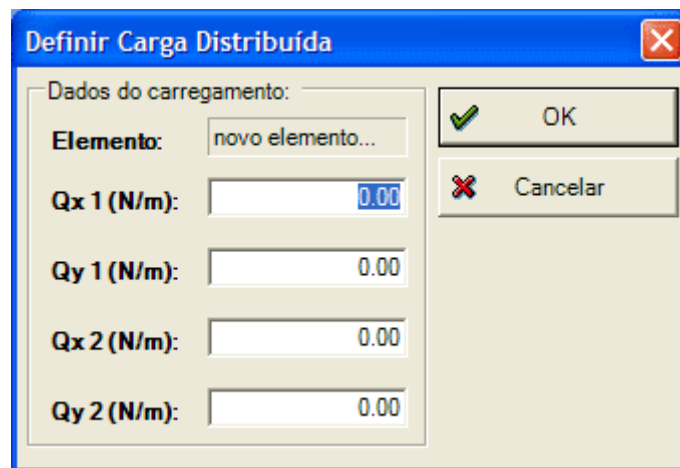


Figura 7 - Definição do carregamento distribuído de um elemento.

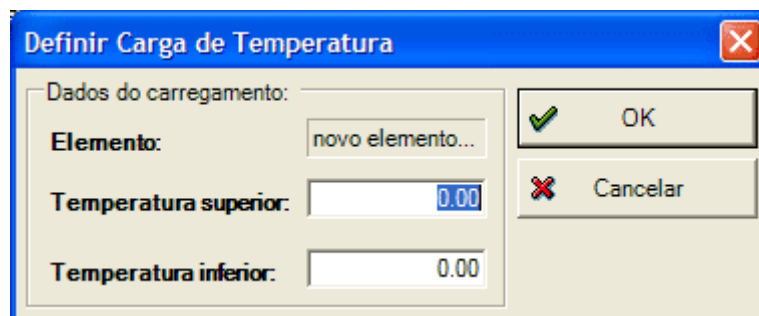


Figura 8 - Definição do carregamento de temperatura do elemento.

## Gerenciamento dos materiais e seções

O gerenciamento dos materiais e seções é semelhante ao gerenciamento dos nós e

elementos mostrados anteriormente. Tem-se, portanto, uma janela para a listagem dos itens, onde pode-se também, incluir, alterar ou excluir. A exclusão somente é permitida para os itens que não estiverem sendo utilizados. As figuras 10, 11, 12 e 13 mostram as telas envolvidas.

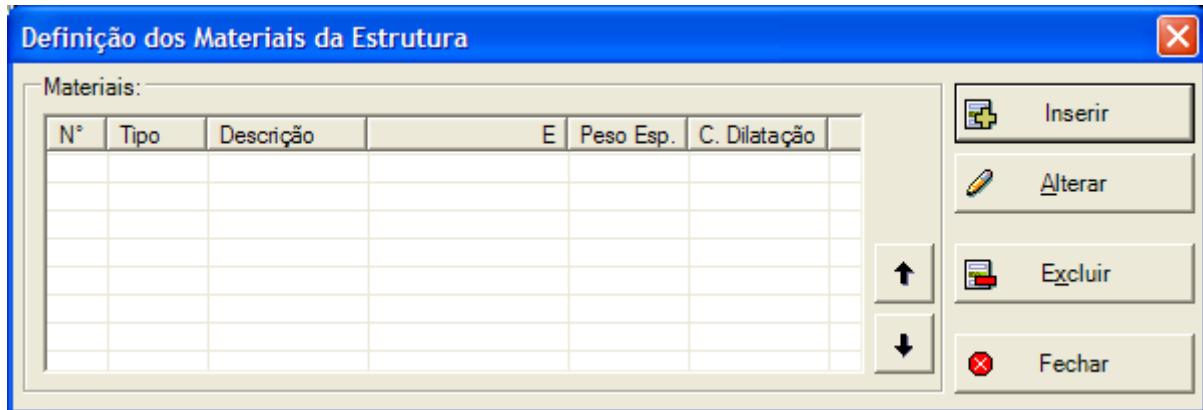


Figura 9 - Listagem dos materiais da estrutura.

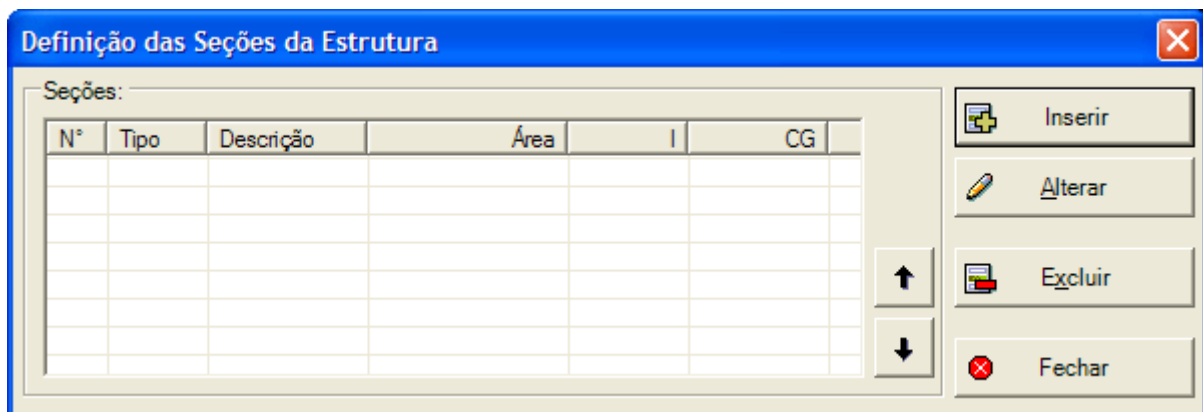


Figura 10 - Listagem das seções do elementos.



Figura 11 - Definição de um material.

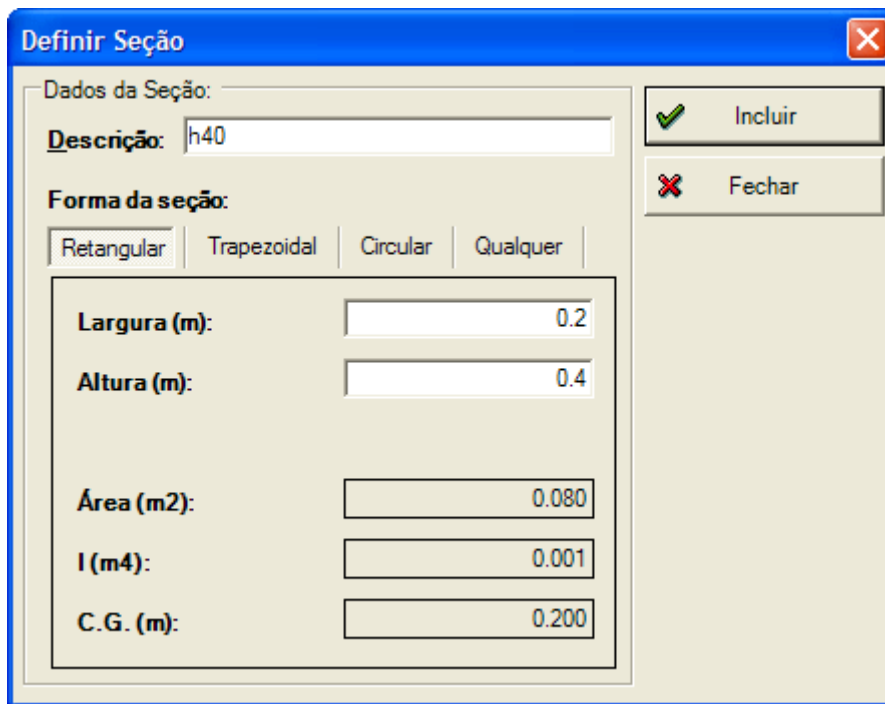


Figura 12 - Definição de uma seção.

### Analisar a estrutura

Após a definição da estrutura, ou seja, dos nós, elementos, materiais e seções, procede-se à análise da mesma. A operação de análise, já descrita na fundamentação teórica, irá determinar o conjunto de matrizes e vetores necessários para a análise da estrutura, tendo como resultado principal os valores das reações, deslocamentos nodais e esforços locais.

Para analisar a estrutura, acesse o menu Analisar. Em seguida, serão mostradas as opções de análise. Nesta versão, somente a análise pelo Método das Forças via Equilíbrio Nodal está disponível. Outra opção para iniciar a análise é o botão da barra de ferramenta Analisar. Quando clicado este botão exibe um menu flutuante com as opções de análise.

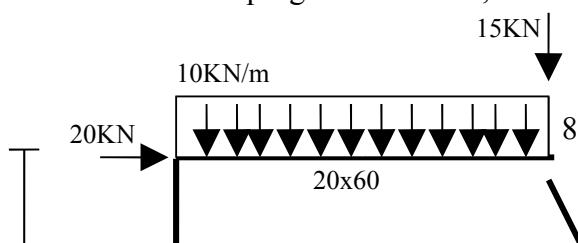
Após a seleção da análise, a alteração na estrutura será bloqueada e outras informações serão exibidas na tela. O painel esquerdo mostrará a relação inicial das matrizes e vetores relacionados à análise e o painel direito estará vazio. Também uma pequena janela irá mostrar o desenho da estrutura em miniatura.

No Método das Forças, a análise da estrutura depende da escolha dos hiperestáticos, como explicado na fundamentação teórica. Então, para a definição destes, deve-se clicar no item da Treeview "Definir hiperestáticos". No painel direito será mostrada uma lista das direções locais da estrutura. Clicando sobre estes, selecionam-se as direções hiperestáticas. Para finalizar o processo, clica-se no botão Definir.

A seguir o programa verificará se a quantidade de direções hiperestáticas está correta e se o sistema principal definido não é crítico. Em caso de irregularidade uma mensagem será exibida com informações sobre o problema ocorrido. Caso contrário, as demais matrizes e vetores relacionados ao processo serão mostrados na Treeview.

### DEMONSTRAÇÃO DE ANÁLISE DE ESTRUTURA

Através do programa Pórticos, a estrutura mostrada na figura 13 será analisada:





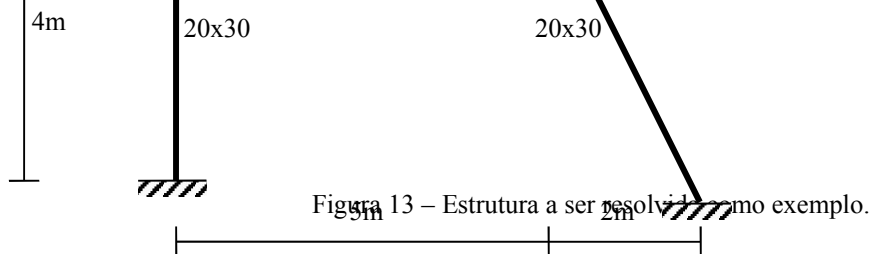


Figura 13 – Estrutura a ser resolvida como exemplo.

Considera-se que os elementos são em concreto,  $E = 25\text{GPa}$ , e possuem seções retangulares, com as dimensões mostradas na figura 13.

A partir das informações do enunciado do problema serão inseridos os dados apresentados nas tabelas 1 a 6.

Tabela 1 – Nós a serem inseridos.

Nó	Coordenadas		Tipo do apoio		
	X	Y	X	Y	Z
1	0,00	0,00	Rígido	Rígido	Rígido
2	0,00	4,00	Livre	Livre	Livre
3	5,00	4,00	Livre	Livre	Livre
4	7,00	0,00	Rígido	Rígido	Rígido

Tabela 2 – Materiais a serem inseridos.

Material	Descrição	E	Peso espec.	Coef. de dilatação
		MPa	$\text{N/m}^3$	$\text{m}^\circ$
1	Concreto	25000	25e5	1e-5

Tabela 3 – Seções a serem inseridas.

Seção	Descrição	Forma	Largura	Altura
			m	M
1	r30	Retangular	0,20	0,30
2	r60	Retangular	0,20	0,60

Tabela 4 – Elementos a serem inseridos.

Elemento	Nó inicial	Nó final	Material	Seção
1	1	2	Concreto	r30
2	2	3	Concreto	r60
3	3	4	Concreto	r30

Tabela 5 – Definir carregamento nodal do exemplo.

Nó	$F_x$	$F_y$	$M_z$
2	20000	0	0
3	0	-15000	0

Tabela 6 – Definir carregamento distribuído do exemplo.

Elemento	$Q_{x1}$	$Q_{y1}$	$Q_{x2}$	$Q_{y2}$
2	0	-10000	0	-10000

Após a definição das características físicas e geométricas, das condições de contorno e do carregamento externo, a tela do programa Pórticos exibe os referenciais da estrutura, conforme figura 14. Os referenciais nodal, das reações e local estão representados pelas setas em verde, vermelho e amarelo, respectivamente.

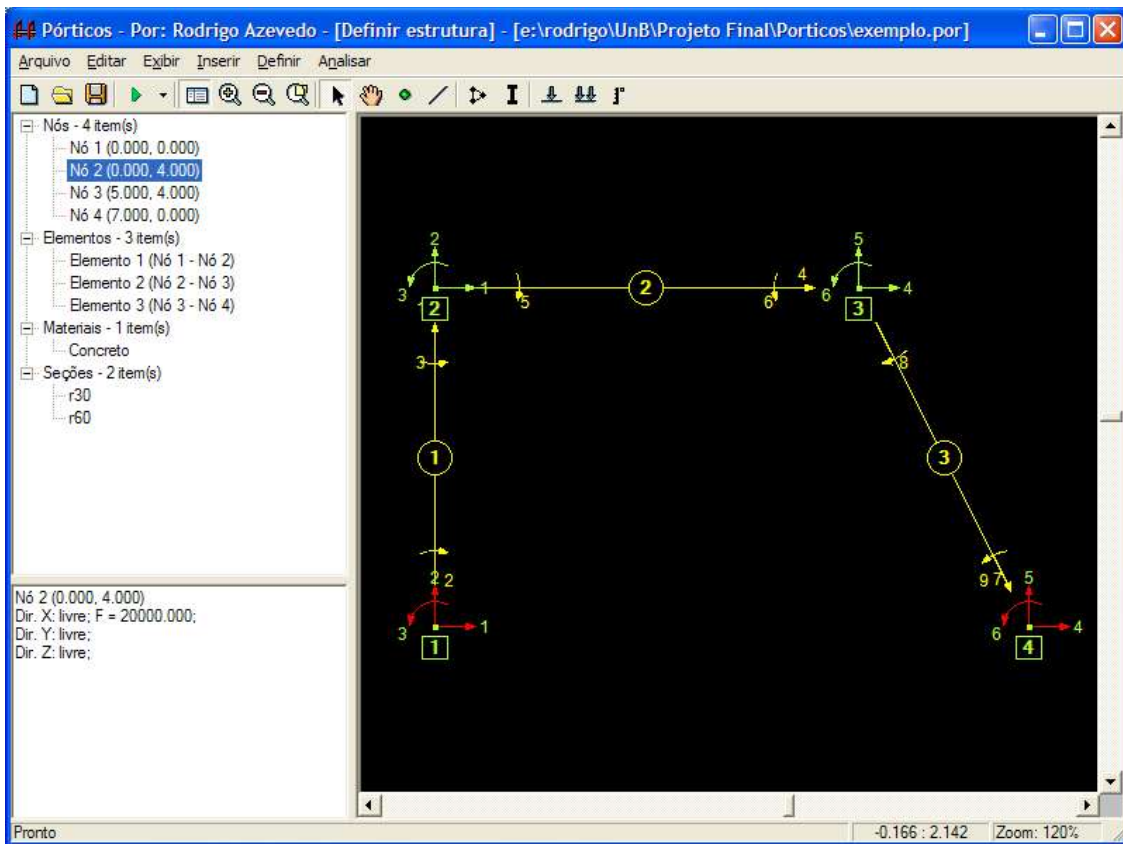


Figura 14 – Referenciais da análise do exemplo.

### Execução da análise

Para a execução da análise, seleciona-se o menu “Analisar” e o submenu “Analisar via Método das Forças por Equilíbrio Nodal...”. Selecionando qualquer matriz ou vetor na Treeview, a mesma será mostrada no painel direito, com todos os seus itens.

Entretanto, nota-se que a análise não está completa. O Método das Forças exige a definição dos hiperestáticos, ou seja, as direções locais que devem ser liberadas. O objetivo deste procedimento é transformar a estrutura original hiperestática em uma estrutura isostática, sendo esta denominada sistema principal.

Seleciona-se, portanto, os itens das direções locais 1, 2 e 3 que aparece quando o item da Treeview “Definir hiperestáticos” é selecionado. A seguir, a figura 16, mostra estes itens. Nota-se que, à medida que as direções locais são selecionadas a matriz  $C_0$  resultante é automaticamente mostrada. Após a seleção das direções, clica-se no botão Definir. Então o programa fará uma verificação se o sistema principal definido é válido, ou seja, se ele continua hiperestático ou se tornou hipostático ou uma forma crítica.

Caso o sistema principal definido seja válido a análise pode ser finalizada. Assim o restante dos vetores e matrizes serão inseridos na Treeview, podendo o aprendiz verificar o valor de cada um deles.

## Análise e interpretação dos resultados

Pode-se verificar para cada elemento a sua matriz de transformação **b**. Estas matrizes serão a base para a montagem da matriz **B** da estrutura.

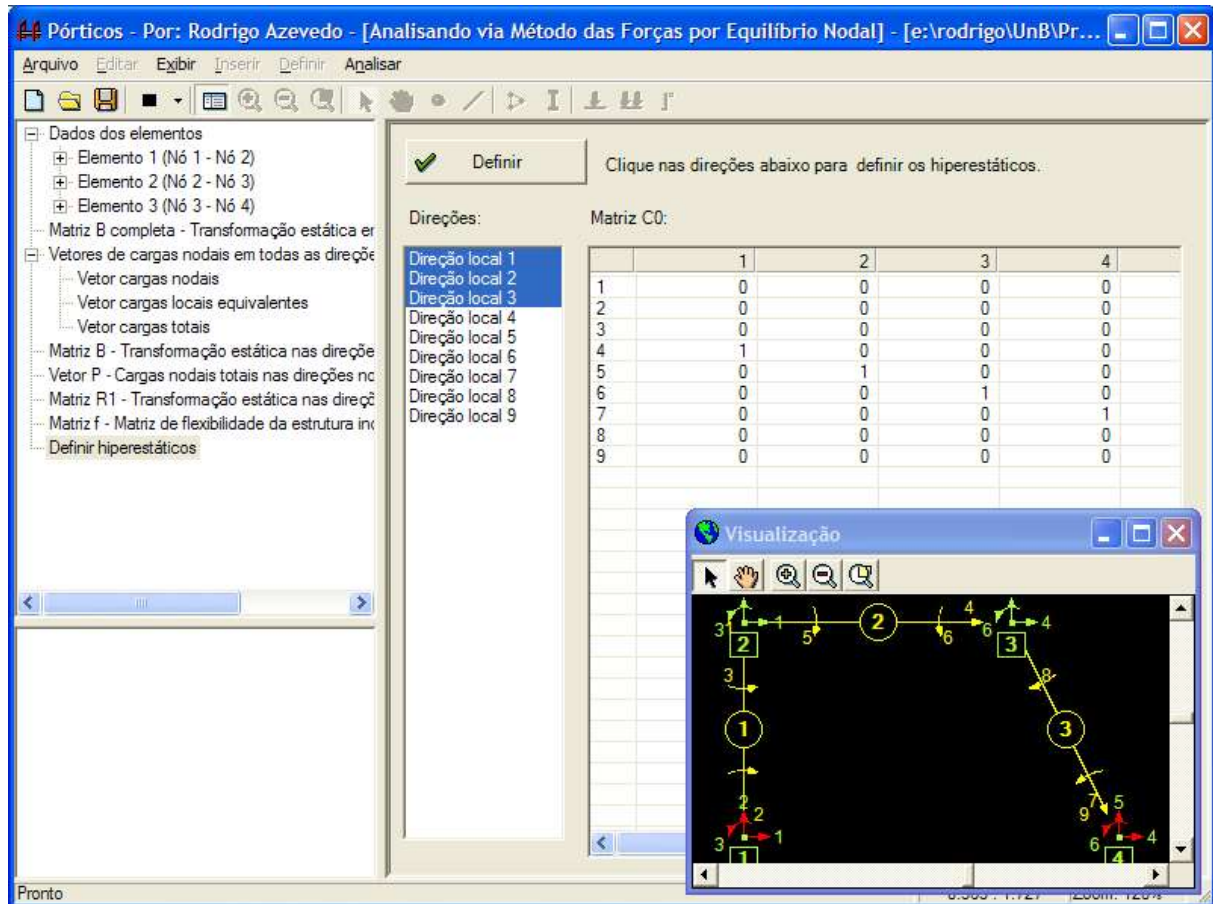


Figura 15 – Definição dos hiperestáticos do exemplo.

No vetor  $p$  do elemento 2, pode-se verificar 6 itens que representam os valores do carregamento nodal equivalente, do carregamento distribuído definido para este elemento. A partir dos vetores  $p$  de cada elemento e do vetor das cargas nodais, o vetor das cargas nodais totais será gerado.

Os itens vetor  $X$ , respectivamente, representam cada esforço aplicado nas direções locais hiperestáticas, de modo que os deslocamentos nessas direções sejam nulos.

O vetor  $D$ , mostra os deslocamentos ocorridos em cada direção do referencial nodal, segundo as direções indicadas pelas setas. No caso do vetor  $d$  são os valores dos deslocamentos ocorridos no referencial local. Para efeito de verificação pode-se comparar a direção nodal 2 que é exatamente igual ao deslocamento na direção local 1.

Finalizando a análise tem-se os valores das reações, através do vetor  $R$ . A figura 17 mostra os elementos do vetor  $R$  e a visualização em miniatura mostra as direções onde esses esforços atuam (setas em vermelho).

## CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou as informações relevantes sobre programa educativo, a

fundamentação teórica do Método das Forças da Análise Matricial de Estruturas e informações acerca do desenvolvimento e implementação do programa Pórticos.

O programa Pórticos permite aos alunos a definir de uma estrutura reticulada de forma simples e rápida, visualizar os referenciais envolvidos e acompanhar, passo a passo, a resolução desta estrutura via o Método das Forças por Equilíbrio Nodal.

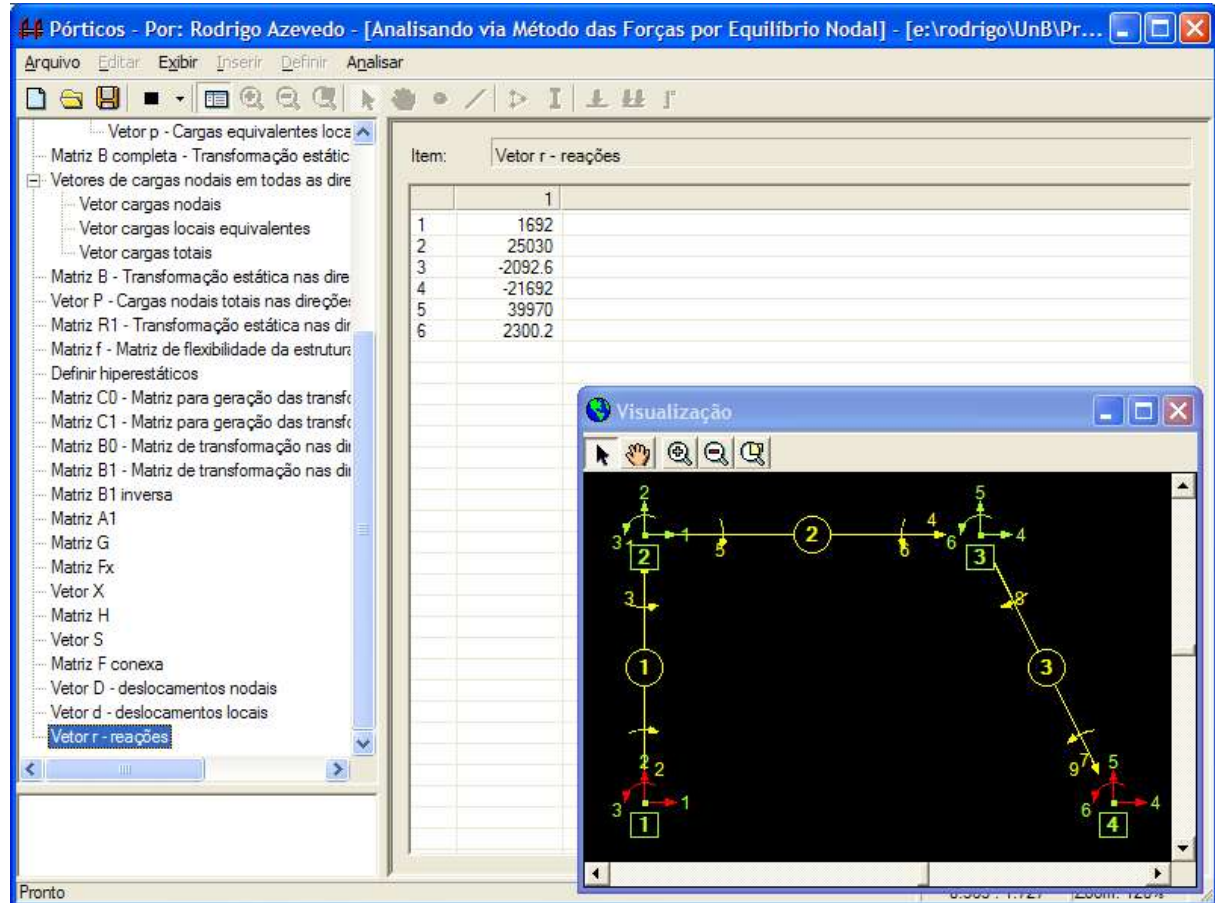


Figura 16 – Visualização do vetor R das reações.

Sob a avaliação dos alunos da disciplina de Teoria das Estruturas II da UnB, o programa se mostrou bastante útil no processo de aprendizagem do método de análise executado pelo programa.

## BIBLIOGRAFIA

- SANTOS, Gláucyo O. Desenvolvimento de Programas para Apoio ao Ensino do Método dos Elementos Finitos. Dissertação de mestrado. Universidade de Brasília – Faculdade de Tecnologia, Distrito Federal. 2003
- SÜSSEKIND, J. C. Curso de Análise Estrutural - Volume II. 10ª Edição. Editora Globo, 1993.
- GERE, James M. e WEAVER, William Jr. Análise de Estrutura Reticuladas. Editora Guanabara Dois, Rio de Janeiro. 1981.
- PRZEMIENIECKI, J. S. Theory of Matrix Structural Analysis. McGraw-Hill Book Company.

New York. 1968.