

Análise Matricial de Estruturas

Um Sistema Computacional Orientado ao Ensino e Projetos Práticos

Caíque Roder Corcioli

Orientador: Professor Doutor Marco Antônio Rahal Sacoman

Sumário

1. Introdução
2. Objetivo
3. Justificativa
4. Metodologia
5. Fundamentação Teórica
6. Sistema Computacional
7. Conclusão

1. Introdução

Engenharia Estrutural

- Projeto Estrutural
 - Projeto preliminar da estrutura.
- Cálculo Estrutural
 - Dimensionamento.
- Análise Estrutural
 - Esforços.
 - Deformações.

Histórico

- No passado
 - Ensino e aprendizado eram baseados em Métodos Aproximados.
- Métodos Exatos
 - Cálculos complexos e exaustivos.
- A partir década de 1950
 - Utilização do computador.

Métodos Aproximados x Métodos Exatos

- Métodos Aproximados
 - Tratam a estrutura como uma coleção de elementos que se interagem de acordo com as leis físicas.
- Métodos Exatos
 - Tratam a estrutura de forma global considerando todos seus elementos de uma só vez, de forma mais eficiente.

Exemplos: Método da Flexibilidade e Método da Rigidez.

Independente do método utilizado, o resultado da análise deve ser o mesmo.

2. Objetivos

Objetivos do Trabalho

Desenvolver um sistema computacional que:

- Utilize os métodos da Flexibilidade ou da Rigidez para Análise Estrutural, de forma matricial.
- Calcule os esforços e deslocamentos de seis diferentes tipos de estruturas reticuladas.
- Permita que docentes e alunos executem problemas práticos e verifiquem resultados obtidos de forma didática.

3. Justificativa

Justificativas do Trabalho

- Advento da computação: utilização de métodos exatos.
- Programas existentes no mercado:
 - Cálculo e dimensionamento da estrutura.
 - Não apresentam os dados de análise estrutural.
 - Raros os que destinam-se ao ensino.
 - Preços altamente elevados.
- Estruturas reticuladas: tratar problemas estruturais de forma exata.

4. Metodologia

Metodologia Utilizada

- Estudo dos métodos de Análise Matricial de Estruturas.
- Desenvolvimento de algoritmos para a solução destes problemas.
- Desenvolvimento do sistema computacional.
- Realização de testes.

Ferramentas Utilizadas

- Ambiente de desenvolvimento integrado Delphi.
- HTML Help Workshop para arquivos de ajuda.
- Componente QuickReport para o gerenciamento de relatórios.

5. Fundamentação Teórica

Análise Estrutural

- Determinação de forças internas, de ligações e deslocamentos de uma estrutura.
- Principal etapa de cálculo de um projeto estrutural.
- Análise do comportamento de uma estrutura através da construção de um modelo matemático idealizado com a imposição de carregamentos.

Análise Estrutural

- Uma estrutura é criada para servir um propósito definido.
- Objetivos de projetos estruturais:
 - Segurança.
 - Durabilidade.
 - Desempenho.
 - Conforto dos usuários.
 - Estética.

Análise Estrutural



Fonte: Engiobra (2013).

Análise Estrutural

- Deformações (deslocamentos e giros) e fissuras devem ser limitadas ao ponto de não serem notadas e não comprometerem a utilização.
- Satisfação dos critérios e requisitos de utilização: uma ampla Análise Estrutural.

Idealização Estrutural

- Formulação de um modelo matemático de elementos discretos equivalente à estrutura real contínua.
- Modelo é necessário para se obter um sistema (discreto) com um número finito de variáveis (graus de liberdade) para a realização de operações de álgebra matricial.

Nós

"Nós de uma estrutura reticulada são pontos de interseção dos membros, assim como os pontos de apoio e extremidades livres." (GERE; WEAVER, 1987).

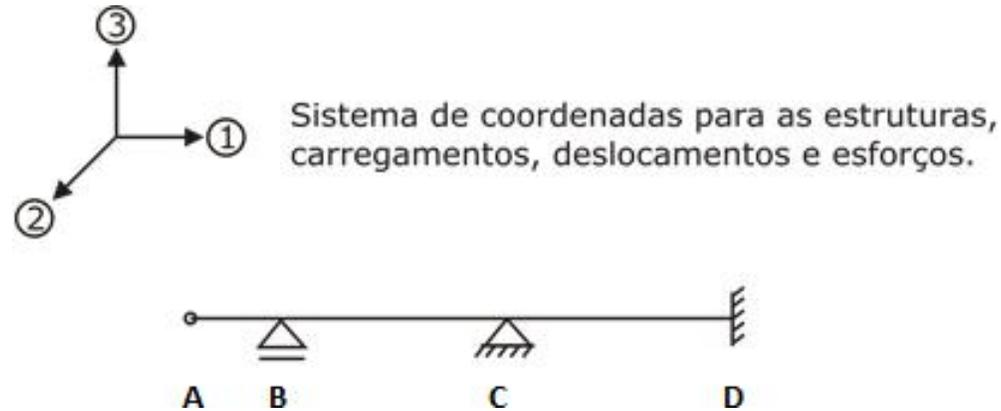
Tipos de nós:

- Nó livre e apoio.

Tipos de apoio:

- Móvel.
- Fixo.
- Engaste.

Nós



A: nó livre, permite deslocamento nas direções 1 e 3 e rotação no plano 1-3.

B: apoio móvel, permite deslocamento na direção 1 e rotação no plano 1-3.

C: apoio fixo, permite rotação no plano 1-3.

D: engaste, não permite deslocamentos e rotações.

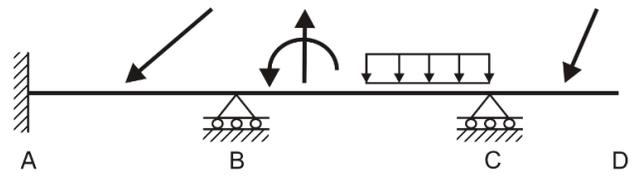
Estruturas Reticuladas

- Sistemas constituídos por elementos lineares ligados entre si por nós e ligados ao exterior através de apoios.
- Elemento linear é aquele em que o comprimento longitudinal supera em pelo menos três vezes a maior dimensão da seção transversal, sendo também denominado barra (NBR 6118, 14.4.1.1).

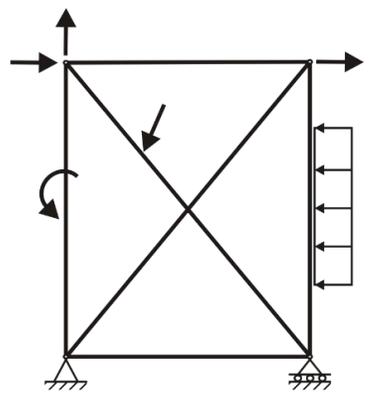
Estruturas Reticuladas

Estruturas reticuladas abordadas no trabalho:

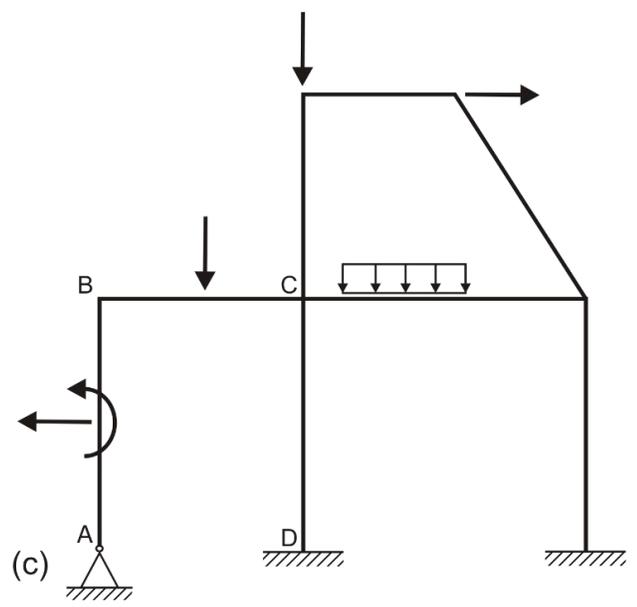
- a) Viga contínua.
- b) Treliça plana.
- c) Pórtico plano.
- d) Grelha.
- e) Treliça espacial.
- f) Pórtico espacial.



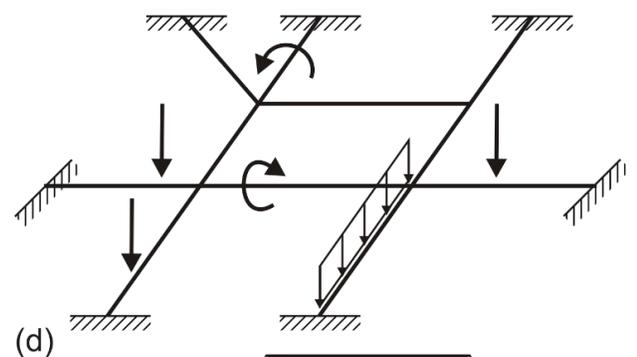
(a)



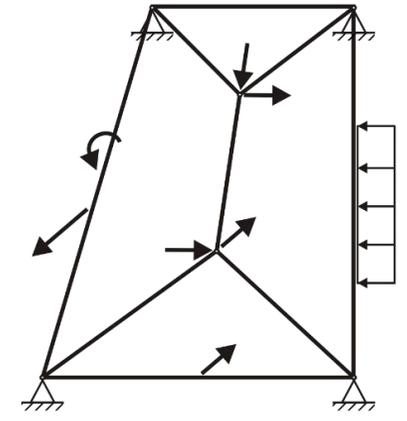
(b)



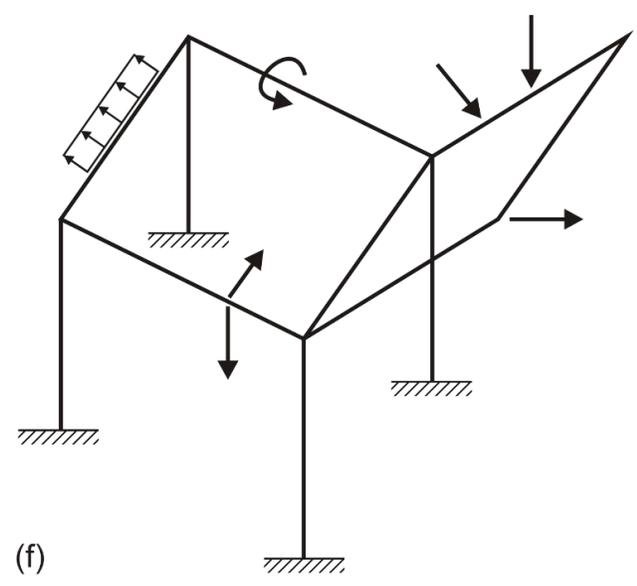
(c)



(d)



(e)



(f)

Grelha



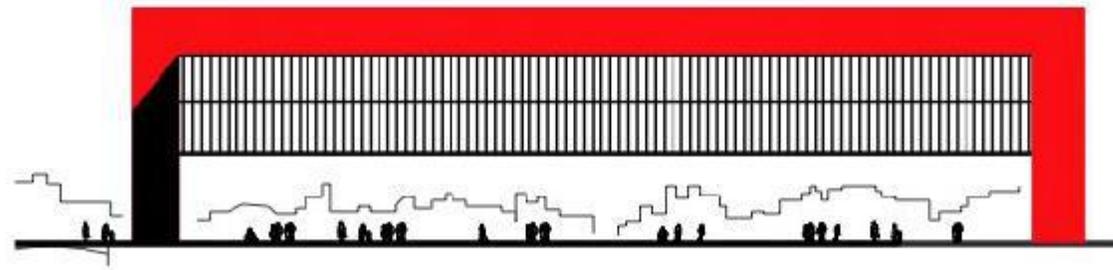
Fonte: Revista Técnica (2014).

Treliça Espacial



Fonte: Revista Finestra (2016).

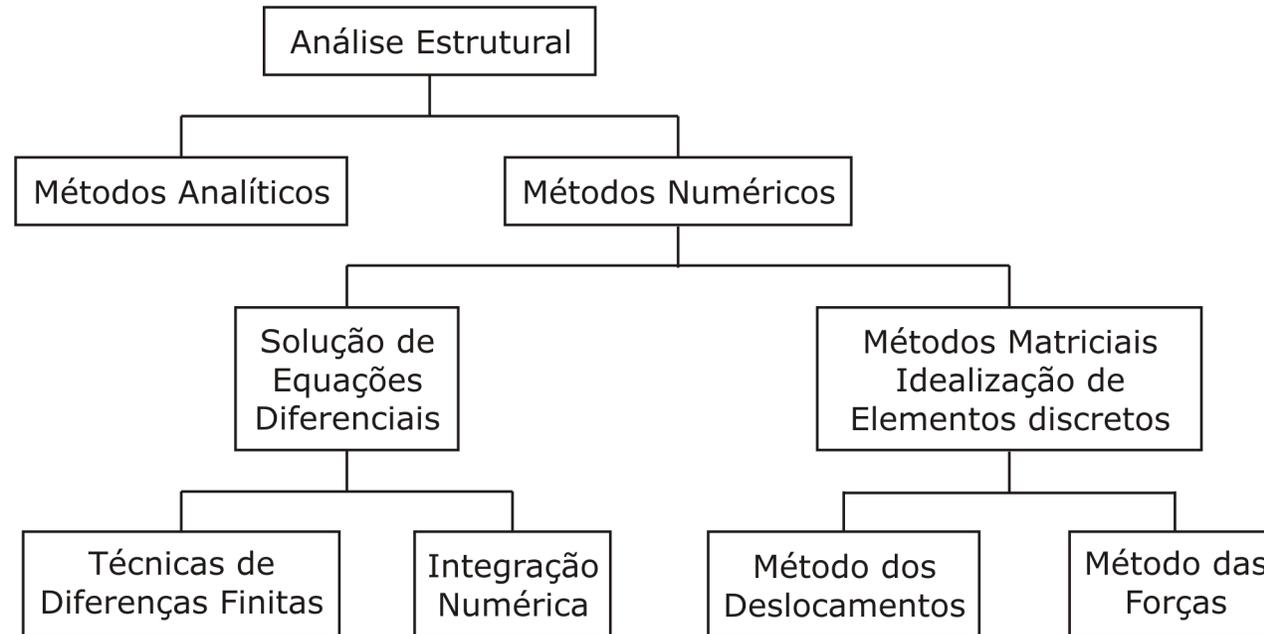
Pórtico Espacial



Vista frontal MASP

Fonte: Museu de Arte de São Paulo (2016).

Métodos de Análise Estrutural



Método da Flexibilidade

- Método das Forças.
- Calcula-se diretamente os esforços e indiretamente os deslocamentos.
- Utilizado para calcular qualquer estrutura estaticamente indeterminada.

Método da Flexibilidade

- A estrutura hiperestática é modificada por meio de cortes tornando-a isostática.
- Incógnitas são os esforços (ações redundantes) nos cortes.
- Número de incógnitas = Número de graus de liberdade.
- O sistema de equações que resolve o problema é chamado de equações de compatibilidade de deslocamentos (deformações).

Método da Flexibilidade

Algoritmo:

1. Enunciado do problema.
2. Seleção da estrutura livre.
3. Análise da estrutura livre sob o efeito de cargas.
4. Análise da estrutura livre para valores unitários das ações redundantes.
5. Determinação das ações redundantes.
6. Determinação de outros deslocamentos e ações.

Método da Rigidez

- Método dos Deslocamentos.
- Calcula-se diretamente os deslocamentos e indiretamente os esforços.
- Utilizado para calcular qualquer estrutura estaticamente indeterminada.

Método da Rigidez

- A estrutura hiperestática é modificada por meio de fixações tornando-a cinematicamente determinada (isostática).
- Incógnitas são os deslocamentos dos nós.
- Número de incógnitas = Número de graus de liberdade.
- O sistema de equações que resolve o problema é constituído por equações de equilíbrio de forças em torno destas fixações.

Método da Rigidez

Algoritmo:

1. Enunciado do problema.
2. Seleção da estrutura fixa.
3. Análise da estrutura fixa sob o efeito de cargas.
4. Análise da estrutura fixa para valores unitários dos deslocamentos.
5. Determinação dos deslocamentos.
6. Determinação de ações de extremo e reações.

Comparação entre os Métodos

- Semelhantes em sua formulação matemática.
- Ambos necessitam do princípio da superposição para obter-se as equações fundamentais.
- No Método da Flexibilidade a seleção de redundantes tem um efeito significativo na quantidade de trabalho de cálculo necessário. Possui uma infinidade de sistemas principais.

Comparação entre os Métodos

- No Método da Rigidez nunca existe dúvida sobre a seleção da estrutura fixa, pois só existe uma possibilidade. Possui um único sistema principal.
- Para a programação computacional, o Método da Rigidez é mais apropriado:
 - Determinação automática da estrutura fixa.
 - Todos efeitos estão localizados.

6. Sistema Computacional

Informações sobre o Sistema

Seleção do tipo de versão: aprendizado ou profissional.

Seleção do tipo de estrutura: viga contínua, treliça plana, pórtico plano, grelha, treliça espacial e pórtico espacial.

Seção mostrar esquema.

Informações sobre o Sistema

Entrada de dados (versão de aprendizado): viga contínua, treliça plana, pórtico plano, grelha, treliça espacial e pórtico espacial.

Entrada de dados (versão profissional): viga contínua.

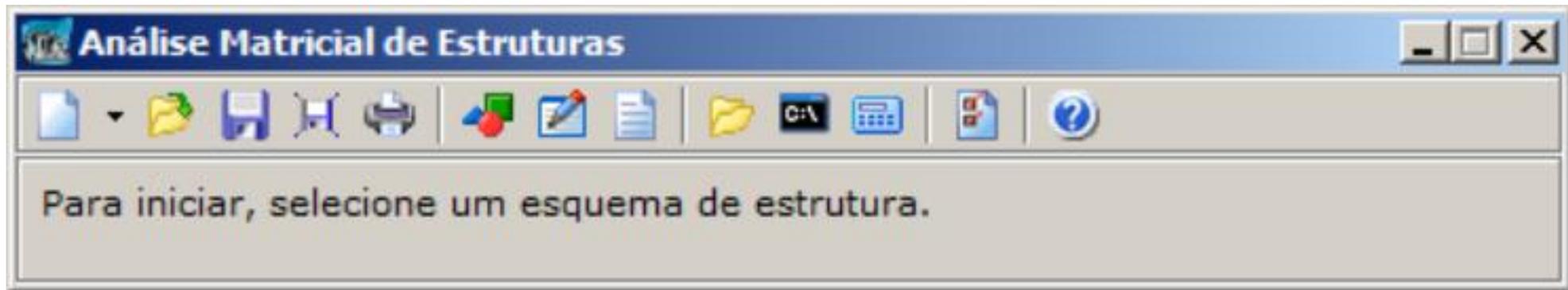
Seção solução: viga contínua (versão de aprendizado e profissional).

Informações sobre o Sistema

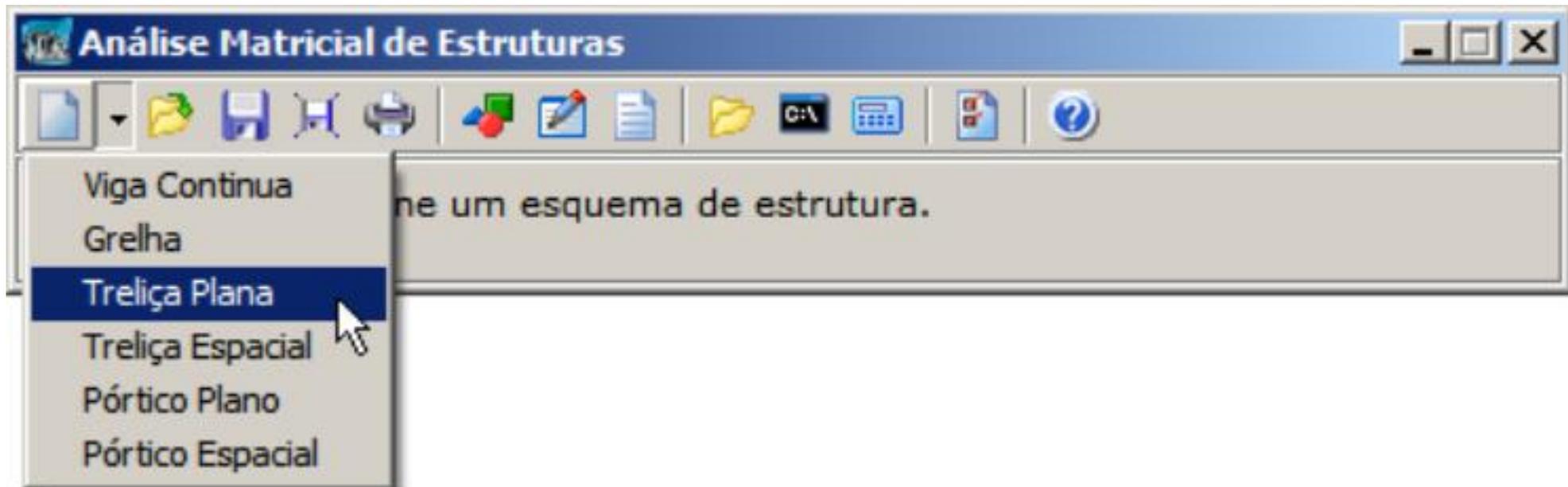
Seção ajuda.

Módulos auxiliares: calculadora, DOS, Explorer, entre outros.

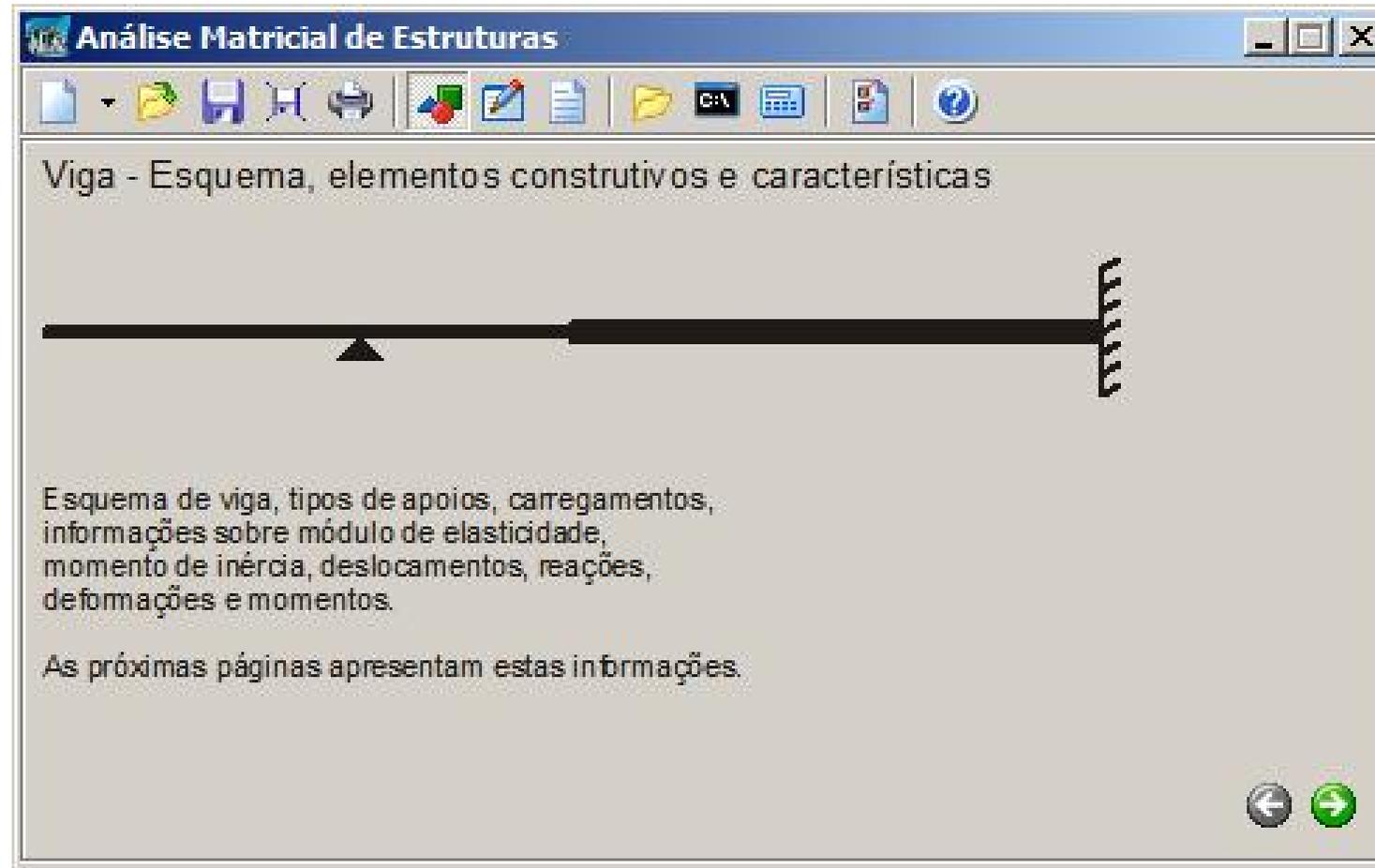
Fôrma Principal



Seleção do Tipo de Estrutura Reticulada



Mostrar Esquema



Entrada de Dados 1 - Aprendizado

Análise Matricial de Estruturas

Viga Continua

Dados da estrutura

M NR NRJ E NJ N

3 5 3 10000,0 4 3

Designação, comprimento e momento de inércia dos membros / Restrições dos nós

Membro	L	IZ
1	100,0	1000,0
2	100,0	2000,0
3	200,0	2000,0

Nó	Restrição Y	Restrição Z
1	1	1
3	1	0
4	1	1

Entrada de Dados 1 - Profissional

Análise Matricial de Estruturas

Viga Continua

Dados da estrutura

M: E: NR: NRJ: NJ: N:

Comprimento, base, altura e momento de inércia dos membros / Restrições dos nós

Membro	L	b	h	Restrição Y	Restrição Z
1	50,0	12,0	10,0	1	1
2	50,0	12,0	10,0	0	0
3	50,0	12,0	12,6	0	0
4	50,0	12,0	12,6	0	0

Entrada de Dados 2 - Aprendizado

The screenshot shows the 'Análise Matricial de Estruturas' software window. The title bar reads 'Análise Matricial de Estruturas'. Below the title bar is a toolbar with various icons. The main window content is divided into sections:

- Viga Continua**: The model name.
- Dados da carga**: A section for load data with input fields for 'NLJ' (value 2) and 'NLM' (value 3), and navigation buttons.
- Ações aplicadas nos nós / Ações nos extremos dos membros restringidos devido as cargas**: A section containing two tables.

Table 1: Ações aplicadas nos nós

Nó	Ação Y	Ação Z
2	-10,0	1000,0
3	-10,0	0,0

Table 2: Ações nos extremos dos membros restringidos devido as cargas

Membro	AML1	AML2	AML3	AML4
1	10,0	250,0	10,0	-250,0
2	10,0	250,0	10,0	-250,0
3	10,0	333,333	10,0	-333,333

Entrada de Dados 2 - Profissional

Análise Matricial de Estruturas

Viga Continua

Dados da carga

NLJ NLM

4 1 ◀ ▶

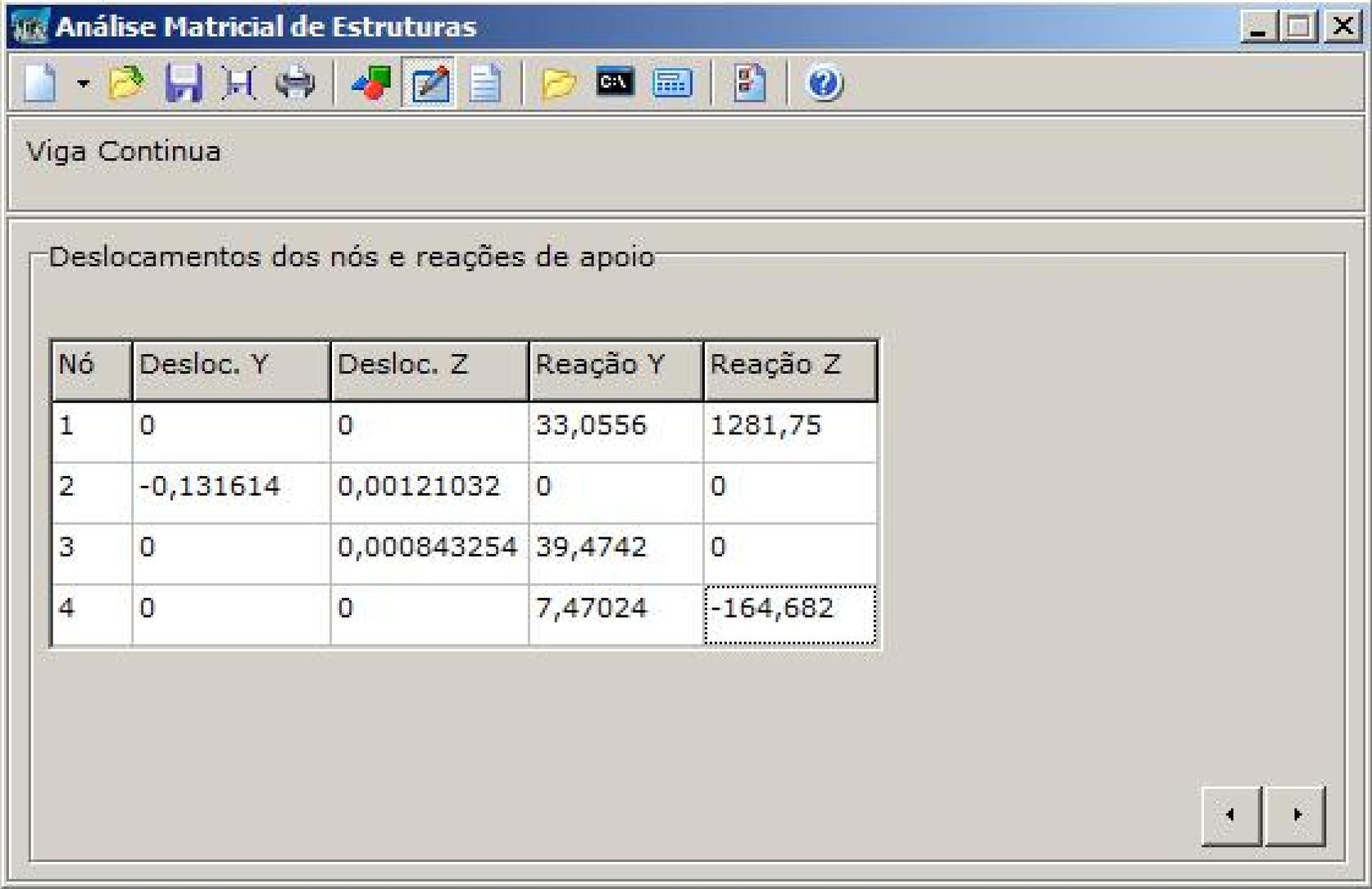
Ações aplicadas nos nós / Ações aplicadas nos membros

Nó	Ação Y	Ação Z
2	-20,0	0,0
3	-10,0	1000,0
4	-20,0	0,0
5	-10,0	0,0

Membro	Carga a Esquerda	Carga a Direita
5	0,1	0,1

◀ ▶

Apresentação de Resultados 1



The screenshot shows a software window titled "Análise Matricial de Estruturas" (Matrix Analysis of Structures). The window contains a toolbar with various icons for file operations and a main area displaying the results for a "Viga Continua" (Continuous Beam). The results are presented in a table titled "Deslocamentos dos nós e reações de apoio" (Nodal Displacements and Support Reactions). The table has five columns: "Nó" (Node), "Desloc. Y" (Displacement Y), "Desloc. Z" (Displacement Z), "Reação Y" (Reaction Y), and "Reação Z" (Reaction Z). The data is as follows:

Nó	Desloc. Y	Desloc. Z	Reação Y	Reação Z
1	0	0	33,0556	1281,75
2	-0,131614	0,00121032	0	0
3	0	0,000843254	39,4742	0
4	0	0	7,47024	-164,682

Navigation arrows are visible at the bottom right of the table area.

Apresentação de Resultados 2



The screenshot shows a software window titled "Análise Matricial de Estruturas". Below the title bar is a menu bar with various icons. The main area of the window is titled "Viga Continua" and contains a section labeled "Ações de extremos dos membros". This section displays a table with the following data:

Membro	AM1	AM2	AM3	AM4
1	33,055557	1281,7461	-13,055557	1023,8096
2	3,0555567	-23,809571	16,944443	-670,63476
3	12,529763	670,63476	7,4702368	-164,68212

At the bottom right of the table area, there are two navigation buttons: a left arrow and a right arrow.

Solução - Relatório

Previsão da Impressão

Miniatura Resultado da busca

Membro, Comprimento, Momento de Inércia e Ações nos Extremos

Membro	L	IZ	AML1	AML2	AML3	AML4
1	100	1000	10	250	10	-250
2	100	2000	10	250	10	-250
3	200	2000	10	333,333	10	-333,333

Nó, Restrições e Ações

Nó	Restrição Y	Restrição Z	Ação Y	Ação Z
1	1	1	0	0
2	0	0	-10	1000
3	1	0	-10	0
4	1	1	0	0

Nó, Deslocamentos e Reações

Nó	Desloc. Y	Desloc. Z	Reação Y	Reação Z
1	0	0	33,0556	1281,75
2	-0,131614	0,00121032	0	0
3	0	0,000843254	39,4742	0
4	0	0	7,47024	-164,682

Membro e Ações nos Membros

Membro	AM1	AM2	AM3	AM4
1	33,055557	1281,7461	-13,055557	1023,8096
2	3,0555567	-23,809571	16,944443	-670,63476
3	12,529763	670,63476	7,4702368	-164,68212

0% Página 1 de 1

Solução - Relatório Ampliado

Previsão da Impressão

Miniatura Resultado da busca

Membro, Comprimento, Momento de Inércia e Ações nos Extremos

Membro	L	IZ	AML1	AML2	AML3	AML4
1	100	1000	10	250	10	-250
2	100	2000	10	250	10	-250
3	200	2000	10	333,333	10	-333,333

Nó, Restrições e Ações

Nó	Restrição Y	Restrição Z	Ação Y	Ação Z
1	1	1	0	0
2	0	0	-10	1000
3	1	0	-10	0
4	1	1	0	0

Nó, Deslocamentos e Reações

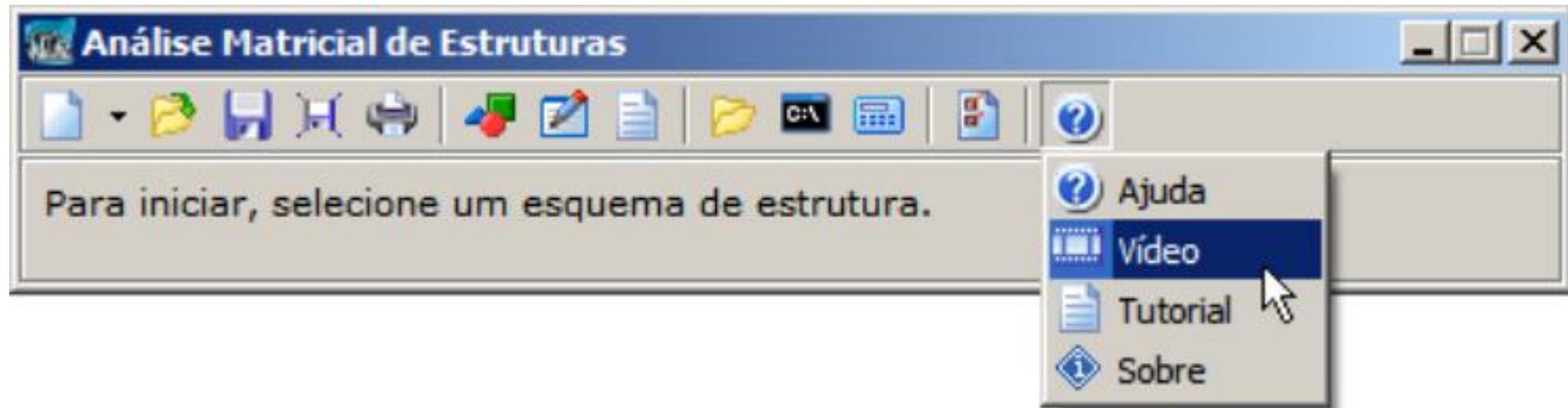
Nó	Desloc. Y	Desloc. Z	Reação Y	Reação Z
1	0	0	33,0556	1281,75
2	-0,131614	0,00121032	0	0
3	0	0,000843254	39,4742	0
4	0	0	7,47024	-164,682

Membro e Ações nos Membros

Membro	AM1	AM2	AM3	AM4
1	33,055557	1281,7461	-13,055557	1023,8096
2	3,0555567	-23,809571	16,944443	-670,63476
3	12,529763	670,63476	7,4702368	-164,68212

0% Página 1 de 1

Ajuda



7. Conclusão

Conclusão do Trabalho

- Resultados numéricos corretos e verificados com exemplos de livros de análise estrutural.
- Criação de um sistema computacional que pode ser utilizado no ensino e aprendizado de Análise Estrutural.
- Proporcionou o estudo de novas áreas e ferramentas contribuindo para a formação do autor.

Trabalhos Futuros

- Inclusão de nova entrada de dados, relacionada a projetos práticos, para os demais tipos de estruturas.
- Inclusão de relatórios para os demais tipos de estruturas.
- Novos perfis de viga.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6.118**: Projeto de estruturas de concreto: procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

GERE, J. M.; WEAVER, W. Jr. **Análise de Estruturas Reticuladas**. Tradução: Carlos M. P. Ferreira Pinto. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1987. 443p.

MUSEU DE ARTE DE SÃO PAULO. **Sobre o MASP**. Disponível em: <<http://masp.art.br>>. Acesso em: 20 dez. 2016.

NAKAMURA, J. **Estabilidade dimensional e resistência mecânica determinaram a madeira laminada colada na reforma da Biblioteca Paulo Freire, em Itaipu**. São Paulo: Revista Técnica, Editora Pini. v.208, 2014.

PORTO, S. **Treliças metálicas e amplos painéis de vidro na fachada**. São Paulo: Revista Finestra, Editora Arco. v. 97, 2016.

Referências

ENGIOBRA. **Resistência à Flexão de uma Viga de Concreto Armado**. Disponível em: < <http://engiobra.com> >. Acesso em: 2 fev. 2016.

SACOMAN, M. A. R. **Otimização de Projetos**. Energia na Agricultura (UNESP. Botucatu. Impresso), Botucatu-SP, v. 13, n.3, p. 66-76, 1998.

SACOMAN, M. A. R. **Otimização de Projetos utilizando GRG, Solver e Excel**. In: XL Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia - Cobenge, 2012, Belém. XL COBENGE. Belém: 2012. v. 1.V.

SACOMAN, M. A. R. **Análise Matricial de Estruturas**. Relatório Técnico, Bauru: Unesp, 2012. 14p.

SORIANO, H. L. **Análise de Estruturas: Formulação Matricial e Implementação Computacional**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2005. 346p.

FIM

