



PUC
RIO

RICARDO HISSA PEIXOTO

*UM SISTEMA GRÁFICO-INTERATIVO PARA ANÁLISE
E DIMENSIONAMENTO DE PÓRTICOS PLANOS EM AÇO*

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Departamento de Engenharia Civil
PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO

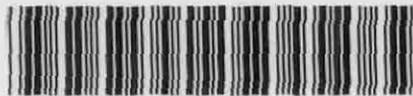
Rio de Janeiro, Março de 1999

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO

Rua Marquês de São Vicente, 225 - Gávea
CEP 22453-900 Rio de Janeiro RJ Brasil
<http://www.puc-rio.br>

N.Cham. 624 P379s TESE UC

Título Um sistema gráfico-interativo para análise e dimensionam



Ex.1 PUC-Rio -PUCB

00142383

RICARDO HISSA PEIXOTO

**UM SISTEMA GRÁFICO-INTERATIVO PARA ANÁLISE E
DIMENSIONAMENTO DE PÓRTICOS PLANOS EM AÇO**

Dissertação apresentada ao Departamento de Engenharia Civil
da PUC-Rio como parte dos requisitos para obtenção do título
de Mestre em Engenharia Civil: Estruturas

Orientador: Luiz Fernando C. R. Martha

Co-orientadores: Sebastião A. L. Andrade
Pedro C. G. da S. Vellasco

Departamento de Engenharia Civil
PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO

Rio de Janeiro, 05 de Março de 1999.

Dedico esta dissertação a minha avó e minha mãe.

AGRADECIMENTOS

À Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), pela possibilidade de desenvolvimento deste trabalho.

À Fundação Edson Queiroz – Universidade de Fortaleza (UNIFOR), pela formação acadêmica e pela confiança creditada no meu trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo recurso financeiro ao longo destes dois anos.

Aos orientadores Luiz Fernando C. R. Martha, Sebastião A. L. Andrade, Pedro C. G. da S. Vellasco, pela orientação segura e eficiente, pela paciência, pelos ensinamentos transmitidos e por todos os momentos de dedicação.

A todos professores e funcionários do Setor de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil e Ana Cristina Roxo pelo incentivo e apoio no decorrer deste trabalho.

Aos meus pais Lúcia e Paulo, meus irmãos Paulo, Rafaela e Raquel, que estão sempre presentes e incentivando a tudo aquilo que faço.

A minha noiva Ana Paula fonte de minha inspiração e motivação, pela paciência, e compreensão.

A todos meus familiares pelo apoio e confiança depositados na minha pessoa, em especial aos meus tios Francisco Nasser Hissa e José Nasser Hissa, pelo incentivo no decorrer deste trabalho.

A minha madrastra Artemilse, a minha futura sogra Lúcia e a madrinha Elianise pelas orações dedicadas a conclusão deste trabalho.

Aos meus amigos Antônio Carlos e Victor, e pela ajuda nos momentos mais difíceis desta trajetória.

Aos companheiros de moradia destes último ano Nelson, Elcio, Paulo, Marconi, Eudes, Júlio, Conrado, Vinícius, Bebeto, Edson e Mário pela amizade e salutar convívio de gratas recordações.

Aos vizinhos Ricardo Oliveira, Ricardo Maia, Teresa, Regina, Cleide, Suelaine, Stefane, Luciana e Margarete pelos momentos de descontração e pela amizade.

Aos colegas de curso, Elaine, Luciano Lima, Luciano Falcão, Cristina, Sidiclei, Áurea, Denise, Daniela, Marcelo e Ciro pelo apoio, incentivo e amizade, e a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para realização deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho descreve um sistema gráfico interativo, denominado FTOOL (*Frame Analysis Tool*), para o ensino e automatização das tarefas de projeto estrutural de pórticos planos. No trabalho foram incorporadas as tarefas de dimensionamento de estruturas de aço segundo a Norma Canadense de projetos de estruturas de aço de edificações - CAN/CSA-S16.1-94. A integração completa das fases de pré-processamento, análise estrutural, pós-processamento e dimensionamentos, através de uma interface amigável e eficiente, cria um ambiente onde os resultados de um passo da modelagem podem ser interpretados pelo estudante e usados como informação para determinar as modificações de modelagem no passo seguinte. Ao testar diferentes concepções estruturais, acredita-se que os estudantes podem vir a compreender melhor o comportamento estrutural e as fases de dimensionamento dos pórticos.

Com as implementações realizadas no programa FTOOL, os estudantes de engenharia e os engenheiros civis executam um projeto estrutural com maior rapidez. Isso se deve ao fato de que diversas análises podem ser realizadas em um curto espaço de tempo para uma mesma estrutura, testando-se diferentes tipos de perfis metálicos. Com tal recurso, o usuário define uma estrutura mais econômica que pode atender com segurança as solicitações previstas em projeto. Podê-se também testar possíveis padronizações de elementos visando uma facilidade de fabricação e montagem.

Os critérios de dimensionamento implantados no programa permitem aos usuários não só a automatização das etapas, bem como explorar melhor as possibilidades de entendimento dos modos de ruína dos elementos estruturais e dos parâmetros controladores do dimensionamento da estrutura metálica. Estas etapas compreendem desde a determinação da classe até a cálculo dos estados limites últimos e de utilização dos perfis pertencentes à estrutura. Estas verificações são feitas através da visualização dos resultados realizados na estrutura como um todo ou através de consultas individuais, barra a barra. A memória de cálculo gerada pelo programa auxilia os alunos no entendimento de todas as etapas do processo de dimensionamento estrutural em aço.

ABSTRACT

This work describes an interactive graphic system, FTOOL (*Frame Analysis Tool*), for teaching and automation of frame structural design process. The system uses design recommendation presents in the Canadian Standard "Limits States of Steel Structures" - CAN/CSA-S16.1-94. The complete integration of pre-processing, structural analysis, post-processing, and design is achieved through a friendly and efficient user-interface. The results of a step by step modeling can be accessed by the students and used as information to determine the modeling modifications in the following step. When testing different structural conceptions, it is believed that the students can substantially improve the learning process of structural behaviour and design.

With the implementations accomplished in the FTOOL program, Civil Engineering students and designers can speed up the structural design process. Several solutions can be tested in a short space of time, leading to a more economic structure. The program also enables the use of standard elements, which makes the fabrication and construction phases easier.

The design requirements implemented in the program allow users not only the automation of the design stages, but also to explore the possibilities of understanding better the ultimate states limits that govern the behavior of the structural elements. The design process ranges from the section class determination to the assessment of ultimate limits states. These verifications are made through the results visualization of the global structure or through an individual quering of each structural member. A full description of the design process is generated by the program helping the students to understand all the stages of steel design.

LISTA DE FIGURAS.....	XI
LISTA DE TABELAS.....	XVI
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XIII
1.0 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 – Motivação e Objetivos.....	1
1.2 – Histórico e Trabalhos Correlatos.....	2
1.3 – Organização da Tese.....	3
2.0 - DIMENSIONAMENTO DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS.....	5
2.1 – Determinação da Classe.....	7
2.2 – Etapas.....	8
2.3 – Resistência da Seção à flexo-compressão.....	9
2.3.1 – Resistência à compressão.....	9
2.3.2 – Cálculo dos Momentos Resistentes (M_r).....	10
2.3.3 – Resistência a Tração.....	11
2.3.4 – Interação Flexão-Compressão.....	12
2.4 – Resistência da Seção à Flambagem no Plano.....	12
2.4.1 – Inclusão dos Momentos Fletores de Segunda Ordem.....	13
2.4.2 – Interação Flexão-Compressão no Plano.....	14
2.5 – Resistência da Seção à Flambagem Fora do Plano.....	15
2.5.1 – Resistência à Compressão da Seção.....	15
2.5.2 – Avaliação do coeficiente U_1	16

2.5.3 – Cálculo da Resistência de Projeto à Flexão Fora do Plano	16
2.5.4 – Cálculo dos Momentos Resistentes (M_{rfp}).....	17
2.5.5 – Interações entre Flexão e Compressão Fora do Plano.....	18
2.6 – Interações Flexão-Tração.....	19
2.7 – Resistência da Seção à Força Cortante.....	20
2.7.1 – Cálculo da Resistência ao Esforço Cortante (V_r).....	20
2.7.2 – Cálculo da Tensão Última de Cisalhamento F_s	20
2.7.3 – Verificação do Esforço Cortante.....	22
2.8 – Determinação da Flecha e Deslocamento Lateral.....	22
3.0 - AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE PÓRTICOS DE AÇO A CARREGAMENTOS LATERAIS.....	23
3.1 – Análise Linear Elástica.....	23
3.2 - Método Simplificado $U1/U2$	24
3.3 – Análise P-Delta.....	26
4.0 - IMPLIMENTAÇÃO COMPUTACIONAL.....	28
4.1 – Estrutura de Dados para o Bloco de Atributos do Nó.....	28
4.2 – Estrutura de Dados para o Bloco de Atributos da Barra.....	30
4.3 – Estrutura de Dados para o Bloco de Atributos do Modelo.....	32
4.4 – Estrutura de Dados das Propriedades de Barra.....	33

4.5 – Estrutura de Dados das Propriedades do Material.....	35
4.6 – Bloco de Dados com Propriedades Geométricas de Perfil.....	37
4.7 – Bloco de Dados com Parâmetros de Verificação de Resistência.....	38
4.8 – Bloco de Dados com as Verificações Realizadas.....	40
5.0 - INTERFACE GRÁFICA.....	43
5.1 – Menu Principal.....	44
5.1.1 – Menu <i>File</i>	44
5.1.2 – Menu <i>Transform</i>	45
5.1.3 – Menu <i>Display</i>	45
5.1.4 – Menu de Controle.....	46
5.2 – Controle de Visualização e Coordenadas.....	46
5.2.1 – Menu de Visualização.....	47
5.2.2 – Menu de Controle de Coordenadas.....	47
5.3 – Fase do Pré-processamento.....	48
5.3.1 – Menu de Edição.....	48
5.3.2 – Menu de <i>Undo e Redo</i>	49
5.3.3 – Menu de Atributos do Modelo.....	49
5.3.3.1 – Submenu de Propriedades dos Materiais.....	50
5.3.3.2 – Submenu de Propriedades Geométricas das	
Seções Transversais.....	52
5.3.3.3 – Submenu de Condições de Apoio dos Nós.....	54
5.3.3.4 – Submenu com as Possibilidades de Articulação	
das Barras.....	55
5.3.4 – Menu de Carregamentos.....	56
5.3.4.1 – Submenu do Carregamento Nodal.....	56

5.3.4.2 – Submenu do Carregamento Uniforme.....	57
5.3.4.3 – Submenu do Carregamento Linear.....	57
5.4 – Fase do Pós-processamento.....	58
6.0 - EXEMPLO DE DIMENSIONAMENTO.....	67
6.1 – Dimensionamento Tradicional de um Pórtico Plano Indeslocável.....	67
6.2 – Exemplo do Dimensionamento de um Pórtico Plano usando o Método Simplificado U2.....	80
6.3 – Exemplo do Dimensionamento de um Pórtico Plano usando o Método de Análise P-Delta.....	99
7.0 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	112
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	116

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

Figura 2.1 - Algoritmo para verificação de um perfil metálico.....	6
Figura 2.2 - Etapas de cálculo em cada verificação.....	8

CAPÍTULO 3

Figura 3.1 - Fluxograma para execução do método P-Delata.....	27
---	----

CAPÍTULO 4

Figura 4.1 - Estrutura de dados do bloco de atributos do nó.....	29
Figura 4.2 - Estrutura de dados do bloco de atributos da barra.....	31
Figura 4.3 - Estrutura de dados para o bloco de atributos do modelo.....	33
Figura 4.4 - Bloco de propriedades da barra.....	34
Figura 4.5 - Bloco de propriedades do material.....	36
Figura 4.6 - Bloco de dados com propriedades geométricas de perfil.....	37
Figura 4.7 - Bloco de dados com parâmetros de cálculo.....	39
Figura 4.8 - Bloco de dados com as verificações realizadas.....	41

CAPÍTULO 5

Figura 5.1 - Tela do programa com um quadro como exemplo.....	43
Figura 5.2 - Menu <i>File</i>	44
Figura 5.3 - Menu <i>Transform</i>	45

Figura 5.4 - Menu <i>Display</i>	46
Figura 5.5 - Menu de Controle.....	46
Figura 5.6 - Menu de Visualização.....	47
Figura 5.7 - Menu de Controle de Coordenadas.....	47
Figura 5.8 - Menu de Edição.....	49
Figura 5.9 - Menu de <i>Undo e Redo</i>	49
Figura 5.10 - Menu de Atributos do Modelo.....	50
Figura 5.11 - Submenu de propriedades dos materiais.....	51
Figura 5.12 - Submenu para um novo material.....	51
Figura 5.13 - Submenu das propriedades geométricas das seções transversais das barras.....	52
Figura 5.14 - Submenu para uma nova propriedade.....	53
Figura 5.15 - Diálogo para a escolha da seção de um perfil metálico.....	54
Figura 5.16 - Submenu de condições de apoio dos nós.....	55
Figura 5.17 - Submenu com as possibilidades de articulação das barras.....	55
Figura 5.18 - Menu de Carregamentos.....	56
Figura 5.19 - Submenu para a definição dos carregamentos nodais.....	56
Figura 5.20 - Submenu de carregamento uniforme.....	57
Figura 5.21 - Submenu de carregamento linear.....	58
Figura 5.22 - Menu da fase de pós-processamento.....	59
Figura 5.23 - Menu de ampliação dos diagramas de esforços e da deformada.....	60
Figura 5.24 - Tela de pós-processamento com diagrama de forças normais [kN].....	60
Figura 5.25 - Tela de pós-processamento com diagrama de forças cortantes [kN].....	61
Figura 5.26 - Tela de pós-processamento com diagrama de momentos fletores [kN.m].....	62

Figura 5.27 - Tela de pós-processamento com a configuração deformada do modelo.....	63
Figura 5.28 - Tela de pós-processamento com diagrama das verificações.....	64
Figura 5.29 - Submenu das verificações das barras do modelo.....	65

CAPÍTULO 6

Figura 6.1 - Pórtico com seus carregamentos ponderados (1º exemplo).....	68
Figura 6.2 - Diagrama de forças cortantes (primeira análise do 1º exemplo) [kN].....	69
Figura 6.3 - Diagrama do momentos fletores (primeira análise do 1º exemplo) [kN.m].	70
Figura 6.4 - Fator de resistência axial da seção (primeira análise do 1º exemplo).....	71
Figura 6.5 - Fator de resistência da seção à flambagem no plano (primeira análise do 1º exemplo).....	71
Figura 6.6 - Fator de resistência da seção à flambagem fora do plano (primeira análise do 1º exemplo).....	72
Figura 6.7 - Fator de resistência da seção ao esforço cortante (primeira análise do 1º exemplo).....	72
Figura 6.8 - Diagrama de forças cortantes (segunda análise do 1º exemplo) [kN].....	73
Figura 6.9 - Diagrama do momentos fletores (segunda análise do 1º exemplo) [kN.m]..	73
Figura 6.10 - Fator de resistência axial da seção (segunda análise do 1º exemplo).....	74
Figura 6.11 - Fator de resistência da seção à flambagem no plano (segunda análise do 1º exemplo).....	75
Figura 6.12 - Fator de resistência da seção à flambagem fora do plano (segunda análise do 1º exemplo).....	75

Figura 6.13 - Fator de resistência da seção ao esforço cortante (primeira análise do 1º exemplo).....	75
Figura 6.14 - Diagrama de forças cortantes (análise final do 1º exemplo) [kN].....	76
Figura 6.15 - Diagrama do momentos fletores (segunda análise do 1º exemplo) [kN.m]..	76
Figura 6.16 - Configuração da deformada do pórtico (segunda análise do 1º exemplo) [fator de amplificação igual a 132.7].....	77
Figura 6.17 - Fator de resistência axial da seção (análise final do 1º exemplo).....	78
Figura 6.18 - Fator de resistência da seção à flambagem no plano (análise final do 1º exemplo).....	78
Figura 6.19 - Fator de resistência da seção à flambagem fora do plano (análise final do 1º exemplo).....	78
Figura 6.20 - Fator de resistência da seção ao esforço cortante (análise final do 1º exemplo).....	79
Figura 6.21 - Primeiro pórtico deslocável analisado.....	80
Figura 6.22 - Pórtico para cálculo dos esforços internos devidos a forças gravitacionais..	83
Figura 6.23 - Diagrama de forças cortantes (cargas gravitacionais) [kN].....	83
Figura 6.24 - Diagrama do momentos fletores (cargas gravitacionais) [kN.m].....	84
Figura 6.25 - Pórtico para cálculo do coeficiente U_2	85
Figura 6.26 - Diagrama de forças cortantes (cargas laterais) [kN].....	86
Figura 6.27 - Diagrama do momentos fletores (cargas laterais) [kN.m].....	86
Figura 6.28 - Configuração da deformada do pórtico (cargas laterais) [fator de amplificação igual a 66.2].....	87
Figura 6.29 - Diagrama de forças cortantes (cargas finais do 2º exemplo) [kN].....	90
Figura 6.30 - Diagrama do momentos fletores (cargas finais do 2º exemplo) [kN.m].....	90

Figura 6.31 - Diagrama de forças cortantes para as novas seções (2º exemplo) [kN].....	93
Figura 6.32 - Diagrama do momentos fletores para as novas seções (2º exemplo) [kN.m].....	94
Figura 6.33 - Configuração da deformada do pórtico para as novas seções (2º exemplo) [fator de amplificação igual a 80.1].....	94
Figura 6.34 - Fator de resistência axial da seção (2º exemplo).....	96
Figura 6.35 - Fator de resistência da seção à flambagem no plano (2º exemplo).....	97
Figura 6.36 - Fator de resistência da seção à flambagem fora do plano (2º exemplo).....	97
Figura 6.37 - Fator de resistência da seção ao esforço cortante (2º exemplo).....	97
Figura 6.38 - Segundo pórtico deslocável analisado.....	99
Figura 6.39 - Variação da carga lateral através do processo P-Delta.....	102
Figura 6.40 - Diagrama de forças cortantes (cargas finais do 3º exemplo) [kN].....	103
Figura 6.41 - Diagrama do momentos fletores (cargas finais do 3º exemplo) [kN.m].....	103
Figura 6.42 - Diagrama de forças cortantes para as novas seções (3º exemplo) [kN].....	106
Figura 6.43 - Diagrama do momentos fletores para as novas seções (3º exemplo) [kN.m].....	106
Figura 6.44 - Configuração da deformada do pórtico para as novas seções (3º exemplo) [fator de amplificação igual a 65.4].....	107
Figura 6.45 - Fator de resistência axial da seção (3º exemplo).....	109
Figura 6.46 - Fator de resistência da seção à flambagem no plano (3º exemplo).....	109
Figura 6.47 - Fator de resistência da seção à flambagem fora do plano (3º exemplo).....	109
Figura 6.48 - Fator de resistência da seção ao esforço cortante (3º exemplo).....	110

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

Tabela 2.1 - Relações para a determinação da classe de um perfil metálico.....	7
--	---

CAPÍTULO 5

Tabela 5.1 - Interações realizadas na estruturas.....	66
---	----

CAPÍTULO 6

Tabela 6.1 - Cargas com suas respectivas combinações (1º exemplo).....	68
Tabela 6.2 - Esforços internos e deslocamentos máximos presentes nas barras do modelo após a primeira análise (1º exemplo).....	70
Tabela 6.3 - Tabela com as novas propriedades das barras.....	73
Tabela 6.4 - Esforços internos e deslocamentos máximos presentes nas barras do modelo após a segunda análise (1º exemplo).....	74
Tabela 6.5 - Esforços internos e deslocamentos máximos presentes nas barras do modelo após a final análise (1º exemplo).....	77
Tabela 6.6 - Cargas com suas respectivas combinações (2º exemplo).....	81
Tabela 6.7 - Carregamentos ponderados do pórtico (2º exemplo).....	81
Tabela 6.8 - Perfis utilizados no pórtico (2º exemplo).....	82
Tabela 6.9 - Esforços internos e deslocamentos máximos presentes nas barras do modelo após a das cargas gravitacionais.....	84
Tabela 6.10 - Esforços internos e deslocamentos máximos presentes nas barras do modelo quando sujeitas as cargas gravitacionais.....	87
Tabela 6.11 - Cálculo do coeficiente U_1	89
Tabela 6.12 - Carregamentos ponderados final do pórtico.....	89
Tabela 6.13 - Esforços internos e deslocamentos máximos presentes nas barras do modelo com a combinação final de cargas (2º exemplo).....	91
Tabela 6.14 - Novos perfis utilizados no pórticos (2º exemplo).....	92

Tabela 6.15 - Esforços internos e deslocamentos máximos presentes nas barras do modelo após a nova análise da estrutura (2º exemplo).....	95
Tabela 6.16 - Resultados do dimensionamento realizado no pórtico (2º exemplo).....	98
Tabela 6.17 - Perfis utilizados no pórticos (3º exemplo).....	99
Tabela 6.18 - P-Delta – Cargas laterais (primeira interação).....	100
Tabela 6.19 - P-Delta – Cargas laterais (segunda interação).....	101
Tabela 6.20 - P-Delta – Cargas laterais (terceira interação).....	101
Tabela 6.21 - P-Delta – Cargas laterais (quarta interação).....	101
Tabela 6.22 - P-Delta – Cargas laterais (quinta interação).....	102
Tabela 6.23 - Esforços internos e deslocamentos máximos presentes nas barras do modelo após a análise do pórtico (3º exemplo).....	103
Tabela 6.24 - Novos perfis utilizados no pórticos (3º exemplo).....	105
Tabela 6.25 - Esforços internos e deslocamentos máximos presentes nas barras do modelo após a nova análise da estrutura (3º exemplo).....	107
Tabela 6.26 - Resultados do dimensionamento realizado no pórtico (3º exemplo).....	110

LISTA DE SÍMBOLOS

*desver	Ponteiro para lista de verificação de projeto
*dprop	Ponteiro para as propriedades do material
*force	Ponteiro para as forças do nó
*line	Ponteiro para carga concentrada
*next	Ponteiro para o próximo bloco
*prop	Ponteiro para as propriedades da barra
*unif	Ponteiro para carga uniforme
a	Espessura do filete de solda
A	Área da seção transversal
A_w	Área do cortante
b	Dimensão da mesa
C_e	Carga de Eüler
C_f	Esforço de compressão do perfil
C_r	Resistência à compressão fatorada
d	Dimensão da alma do perfil
D	Carga permanente
E	Módulo de elasticidade longitudinal
edmax	Máximos esforços ou deslocamentos com suas posições ao longo da barra
edval	Esforços ao longo da barra para desenho dos diagramas
effi	Esforços do nó inicial
effj	Esforços do nó final
fl	Flecha da barra

F_s	Tensão última de cisalhamento
F_u	Tensão última do aço
F_y	Tensão de escoamento do aço
G	Módulo de elasticidade transversal
h	Altura entre as mesas e a alma do perfil
H	Altura do pavimento;
H'	Carga horizontal fictícia;
id	Número do elemento
I_t	Momento polar de inércia
I_w	Constante de empenamento
I_x	Momento de inércia do eixo "x"
I_y	Momento de inércia do eixo "y"
K	Coefficiente de flambagem efetivo
k_v	Coefficiente de empenamento por cisalhamento
L	Comprimento da barra
L_a	Carga acidental
$label$	Nome da propriedade
$lvis$	"Flag" para visibilidade do carregamento linear
$maxm$	Momentos locais máximos
$M_{\Pi 1}$	Momento no primeiro nó
$M_{\Pi 2}$	Momento do segundo eixo
M_{fg}	Momento fletor devido aos carregamentos gravitacionais;
M_{fintx}	Momento interno (eixo "x")
M_{finty}	Momento interno (eixo "y")

M_{lt}	Momento fletor devido aos carregamentos laterais;
M_{fx}	Momento fletor máximo na direção do eixo “x” do perfil
M_{fx1}	Módulo do momento no primeiro nó (eixo “x”)
M_{fx2}	Módulo do momento no segundo nó (eixo “x”)
M_{fy}	Momento fletor máximo na direção do eixo “y” do perfil
M_{fy1}	Módulo do momento no primeiro nó (eixo “y”)
M_{fy2}	Módulo do momento no segundo nó (eixo “y”)
M_r	Momento resistente fatorado
$M_{r\phi x}$	Momento resistente fatorado do eixo “x” (flambagem fora do plano)
$M_{r\phi y}$	Momento resistente fatorado do eixo “y” (flambagem fora do plano)
M_{rx}	Momento resistente fatorado do eixo “x”
M_{ry}	Momento resistente fatorado do eixo “y”
n	Parâmetro de cálculo
n _{cp}	Número dos pontos calculados
ndisp	Deslocamento do nó
nfvis	“Flag” para visibilidade do nó
prescdisl	“Flag” para deslocamentos prescritos
rotlibi	“Flag” de liberação de rotação do nó inicial
rotlibj	“Flag” de liberação de rotação do nó final
r_x	Raio de giração do eixo “x”
r_y	Raio de giração do eixo “y”
sec	Características do perfil escolhido da tabela
secid	Índice do perfil selecionado na tabela
select	“Flag” de seleção

selval	“Flag” para seleção dos esforços
skewang	Ângulo do apoio
sup[3]	Condições do apoio
supvis	“Flag” para visibilidade do apoio
t_f	Espessura da mesa
T_f	Esforço de tração do perfil
T_r	Resistência a tração fatorada
t_w	Espessura da lama
type	Tipo da seção de acordo com a tabela de perfis
$U1_x$	Fator que contabiliza os efeitos de segunda ordem do eixo “x”
$U1_y$	Fator que contabiliza os efeitos de segunda ordem do eixo “y”
$U2$	Fator que contabiliza os efeitos globais de Segunda ordem
ulvis	“Flag” para visibilidade do carregamento uniforme
use	Conta o número de vezes que a propriedade é usada
V'	Força cisalhante equivalente de cada pavimento
value	Valor do esforço selecionado
Verc	Maior das duas verificações da seção aos esforços cisalhante
Verc1	Verificação da seção ao esforço cisalhante
Verc2	Verificação da seção ao esforço cisalhante
Verfl	Verificação da deflexão vertical da barra
Verfl1	Verificação da deflexão horizontal da barra
Verfp	Maior das duas verificações da seção a flambagem fora do plano
Verfp1	Verificação da seção a flambagem fora do plano
Verfp2	Verificação da seção a flambagem fora do plano

V_{erp}	Verificação da seção a flambagem no plano
V_{ers}	Verificação da seção ao esforço de compressão
V_f	Esforço corante do perfil
V_r	Resistência ao esforço cortante
W	Carga de vento;
W_x	Módulo de resistência elástica no eixo “x”
W_y	Módulo de resistência elástica no eixo “y”
y_i	Coordenada do nó inicial (eixo “y”)
y_j	Coordenada do nó final (eixo “y”)
Z_x	Módulo de resistência plástica no eixo “x”
Z_y	Módulo de resistência plástica no eixo “y”
λ	Parâmetro de esbeltez do perfil
Δf	Deslocamento lateral da estrutura
ϕ	Fator de segurança

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Motivação e Objetivos

Na grande maioria dos cursos os estudantes de engenharia estrutural passam a maior parte de seu tempo aprendendo somente os aspectos teóricos dos métodos tradicionais de análise estrutural. Usualmente, o estudante só vai compreender completamente o comportamento real de pórticos nos cursos mais avançados de projeto estrutural, ao final de sua graduação. Não raramente, este conhecimento só é adquirido após a graduação, durante a vida profissional ou em cursos de pós-graduação, pois o entendimento do comportamento estrutural requer experiência e conhecimento de análise e projeto estrutural. Por outro lado, o desenvolvimento da computação através de programas e interfaces gráficas, onde o usuário participa cada vez mais de forma ativa, é um fator de motivação extra dos alunos dos cursos de engenharia para o aprendizado de métodos e teorias tradicionais de análise estrutural.

Nesse contexto, o programa FTOOL – Programa de Análise de Pórticos Planos (Martha, 1994e 1999) foi desenvolvido para o ensino, a nível de graduação, de conceitos de análise estrutural. Uma de suas principais vantagens, advinda da interface gráfica adotada, permite ao usuário, de forma simples e intuitiva, manipular eficientemente os dados de entrada do modelo estrutural (pré-processamento). A partir da definição da estrutura, o programa executa uma análise linear, baseada no método da rigidez direta, e apresenta os resultados de uma forma gráfica explícita (pós-processamento). A integração das três etapas (pré-processamento, análise da estrutura e pós-processamento) permite aos usuários do programa o desenvolvimento de um plano de estudo individualizado, onde os diversos aspectos do comportamento estrutural de pórticos plano podem ser devidamente assimilados. Entretanto, este programa só considera aspectos de uma análise linear de pórticos planos genéricos.

A motivação para a realização deste trabalho foi a necessidade de elaborar um sistema gráfico interativo que realizasse, além das fases de pré-processamento, análise da estrutura e pós-processamento, as fases de dimensionamento estrutural e a reavaliação da estrutura para uma nova configuração. Este trabalho incorpora no programa FTOOL as etapas de dimensionamento de pórticos metálicos levando em consideração os critérios propostos na Norma Canadense de projetos de estruturas de aço de edificações - CAN/CSA-S16,1-94. A escolha da Norma Canadense foi feita por se tratar de uma norma moderna e atualizada e que serve como base para normas em outros países, inclusive no Brasil. Esta implementação contribui significativamente também para motivar e melhor esclarecer o aprendizado do projeto de estruturas de aço.

O trabalho é dividido em três partes. A primeira diz respeito às considerações de projeto estrutural, onde é feito um estudo dos conceitos de dimensionamento em aço proposto pela Norma Canadense - CAN/CSA-S16.1-94. Em seguida são mostradas as implementações destas etapas de dimensionamento no programa FTOOL. Depois disso são apresentadas as alterações feitas na interface gráfica do FTOOL para visualização dos resultados da etapa de dimensionamento. Finalmente, a eficiência do ambiente desenvolvido é comprovada através do dimensionamento de alguns pórticos.

1.2 Histórico e Trabalhos Correlatos

Pesquisas desenvolvidas na utilização de CAD aplicado ao projeto de edificações vêm sendo desenvolvidas desde a década de 1970. Os programas inicialmente desenvolvidos nesta linha de pesquisa permitiam uma abordagem dirigida principalmente à trilogia pré-processamento / análise estrutural / pós-processamento. A principal proposta era desenvolver as ferramentas necessárias para o suporte à etapa de análise (McGuire, 1988; Gattass, 1987).

Na verdade, assim como o projeto estrutural de edificações é uma etapa dentro de um conjunto maior que compõe a concepção e execução de uma construção (projeto, fabricação, montagem, etc.), a avaliação dos esforços é também uma sub-etapa entre outras que abrangem o projeto estrutural (concepção estrutural, detalhamento, etc.). Hoje existem sistemas que

promovem uma maior integração entre as diversas etapas envolvidas no projeto de edificações, porém uma integração completa entre todas estas etapas ainda não é plenamente executada. Esta integração se reflete nos sistemas de CAD, que deixam de ser simples sistemas de análise ou desenho para se tornarem sistemas integrados de automação de *design*.

Representar e integrar as diversas fases de um projeto é finalidade básica dos sistemas de CAD. As primeiras pesquisas para se elaborar um sistema de CAD integrado adotaram a estratégia de estabelecer a comunicação entre programas isolados, os quais representavam etapas específicas do projeto. Os sistemas de CAD integrado fazem parte de uma nova geração de sistemas de CAD, cuja atenção volta-se para o desenvolvimento de modelos completos de engenharia relativos ao produto.

Algumas pesquisas voltadas para a elaboração de sistema de CAD integrado para projetos de estruturas de aço foram desenvolvidas, dentre elas pode-se destacar: Lehtola (1996) que desenvolveu uma solução integrada e completa para o projeto de edificações de aço, Santi (1996) que desenvolveu um sistema gráfico interativo e configurável para automação do dimensionamento e detalhamento de ligações de viga/coluna em estruturas de aço, Holanda (1995) que desenvolveu um sistema de avaliação de distribuição de cargas em pavimentos de edificações, Mont'Alverne (1995) que desenvolveu um programa que realiza o pré-processamento de modelos unifilares com programação orientada a objetos e Gortaire (1991) que tratou especificamente dos aspectos relevantes do pré-processamento gráfico e interativo de edifícios reticulados.

1.3 Organização da Tese

Esta dissertação foi estruturada em sete capítulos, incluindo esta introdução, que corresponde ao Capítulo 1.

O Capítulo 2 apresenta detalhadamente a metodologia do dimensionamento de estruturas de aço implementadas no programa *FTOOL*, a partir dos critérios propostos na Norma Canadense de projetos de estruturas de aço de edificações - CAN/CSA-S16.1-94.

O capítulo 3 faz uma breve explanação sobre os efeitos de deslocamentos laterais em pórtico, comentando sobre a análise linear elástica e uma análise de segunda ordem (Método simplificado U1/U2 e Análise P-Delta).

O Capítulo 4 apresenta as estruturas de dados do programa FTOOL necessárias para o entendimento do trabalho, explicando com detalhes as principais modificações executadas no programa.

O Capítulo 5 mostra a interface gráfica do programa FTOOL, explicando todos os comandos, menus e submenus, já existentes e aqueles que foram implementados. São apresentados também as visualizações dos diagramas dos esforços internos, da configuração da deformada da estrutura e do dimensionamento estrutural.

No Capítulo 6, visando-se a um entendimento da funcionalidade e potencialidade do programa, mostra-se três exemplos de dimensionamento com diferentes situações encontradas em um projeto de pórticos metálicos.

Por fim, no Capítulo 7, são resumidas as principais considerações deste trabalho, assim como são apresentadas sugestões para futuras implementações no programa FTOOL.

1.4 Representação de Ponto Decimal

Neste trabalho optou-se por utilizar um ponto (“.”) para identificar as casa decimais de números reais, ao invés de utilizar uma vírgula, como é a convenção no Brasil. Isto foi feito para ficar consistente com o programa FTOOL que, por ter a sua interface em inglês, adota o ponto com símbolo.

CAPÍTULO 2

DIMENSIONAMENTO DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS

De acordo com a Norma Canadense CAN/CSA-S16.1-94 pode-se dividir em quatro as etapas necessárias para o dimensionamento dos perfis metálicos usados em um projeto estrutural. Este dimensionamento baseia-se em hipóteses onde os elementos presentes em pórticos indelocáveis sejam dimensionados como vigas-coluna. A utilização em estruturas deslocáveis implica em uma análise P-Delta - uma análise de 2ª ordem - ou no uso do método simplificado (U1 e U2) descrito na norma.

A primeira etapa para obter-se o dimensionamento dos elementos estruturais seria a determinação da classe do perfil, que é definida de acordo com a esbeltez das chapas que o compõem. A segunda etapa engloba uma série de verificações da resistência à flexão e à compressão. A terceira consiste na avaliação de resistência ao cisalhamento dos elementos estruturais. Finalmente, executa-se o cálculo da flecha e deslocamentos laterais admissíveis, comparando-os com os valores permitidos pela norma.

As referidas etapas estão dispostas abaixo de forma esquemática (vide também Figura 2.1).

(1) Determinação da classe da seção;

- Primeira;
- Segunda;
- Terceira; ou
- Quarta.

(2) Verificações:

- Resistência da seção ao esforço de flexo-compressão;
- Resistência da seção à flambagem no plano;

- Resistência da seção à flambagem fora do plano;
- Resistência da seção ao esforço cortante.

(3) Avaliação dos esforços de Segunda ordem.

(4) Determinação das flechas e deslocamentos laterais admissíveis.

Caso o perfil metálico analisado não passe em qualquer das verificações, torna-se necessária a escolha de outro perfil metálico.

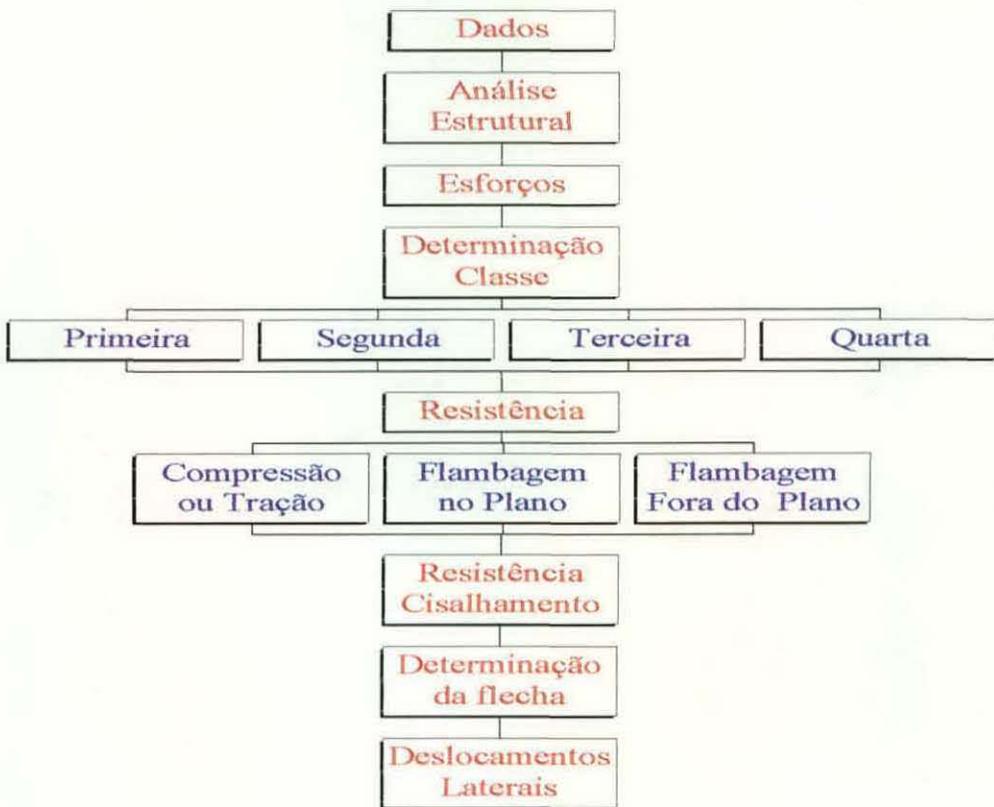


Fig. 2.1 - Algoritmo para verificação de um perfil metálico.

2.1 Determinação da Classe

A determinação da classe de um perfil metálico é feita através de sua esbeltez, ou seja, relação entre o comprimento e altura, e das espessuras das chapas que o constituem. Na Tabela 2.1 são apresentados os limites de cada uma das classes para o caso de elementos estruturais submetidos a flexo-compressão:

Tabela 2.1 - Relações para a determinação da classe de um perfil metálico.

Classe	Mesa	Alma
Primeira	$\frac{b}{2t_f} \leq \frac{145}{\sqrt{F_y}}$	$\frac{h}{t_w} \leq \frac{1100}{\sqrt{F_y}} \left(1 - \frac{0.39C_f}{A.F_y} \right)$
Segunda	$\frac{b}{2t_f} \leq \frac{170}{\sqrt{F_y}}$	$\frac{h}{t_w} \leq \frac{1700}{\sqrt{F_y}} \left(1 - \frac{0.39C_f}{A.F_y} \right)$
Terceira	$\frac{b}{2t_f} \leq \frac{200}{\sqrt{F_y}}$	$\frac{h}{t_w} \leq \frac{1900}{\sqrt{F_y}} \left(1 - \frac{0.61C_f}{A.F_y} \right)$
Quarta	$\frac{b}{2t_f} > \frac{200}{\sqrt{F_y}}$	$\frac{h}{t_w} > \frac{1900}{\sqrt{F_y}} \left(1 - \frac{0.61C_f}{A.F_y} \right)$

As classes são definidas da seguinte forma:

- **Primeira Classe:** Seções que atingem o momento plástico e posteriormente mantêm a capacidade de rotação de modo a produzir uma redistribuição do momento fletor;
- **Segunda Classe:** Seções que atingem o momento plástico, mas não permitem a redistribuição dos momentos fletores;

- **Terceira Classe:** Seções que atingem o momento do início de escoamento (flambagem inelástica);
- **Quarta Classe:** Seções que geralmente têm a flambagem local como o estado limite de resistência.

2.2 Etapas de Verificação

Na Figura 2.2 é apresentado um fluxograma com as principais etapas para a avaliação da resistência de projeto de vigas-coluna, assim como para determinação das flechas e dos deslocamentos laterais em serviço para uma estrutura de aço.

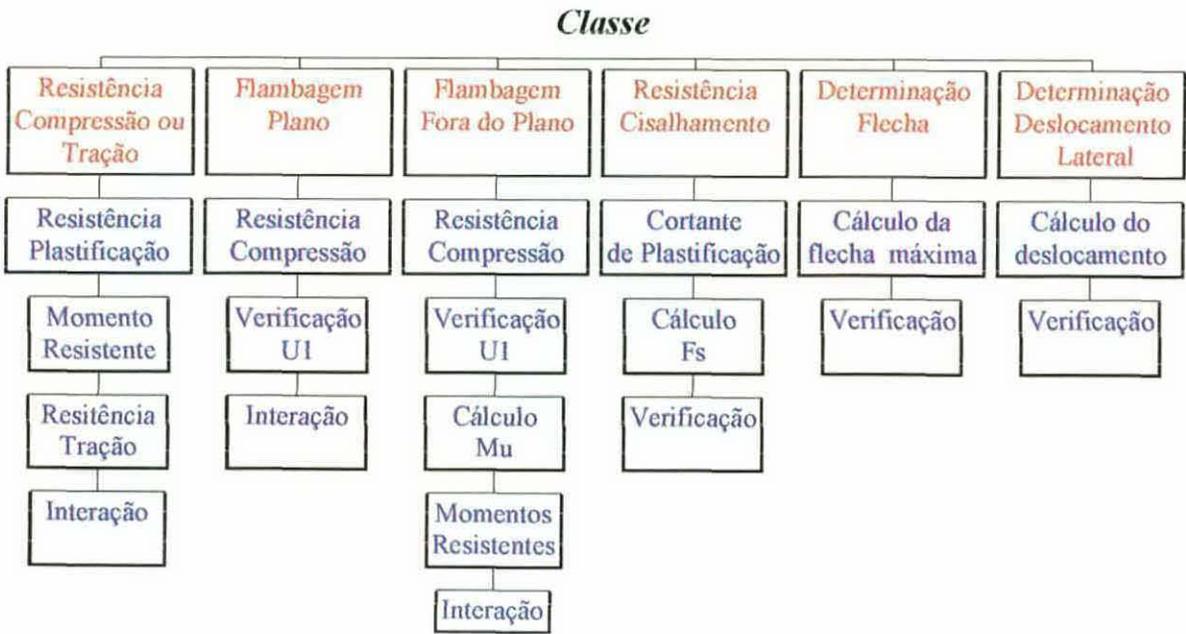


Fig. 2.2 - Etapas de cálculo em cada verificação.

2.3 Resistência da Seção à flexo-compressão

Pode-se dividir em quatro fases o estudo da resistência da seção no plano:

- Cálculo da resistência à compressão;
- Cálculo dos momentos resistentes;
- Cálculo da resistência à tração;
- Verificação da interação flexão - compressão.

2.3.1 Resistência à Compressão

A resistência à compressão de um perfil metálico é dada pela fórmula:

$$C_r = \phi A F_y \left(1 + \lambda^{2n}\right)^{-\frac{1}{n}} \quad (2.1)$$

onde :

- C_r → Resistência de projeto à compressão;
 A → Área de seção transversal;
 F_y → Tensão de escoamento nominal;
 λ → Parâmetro de esbeltez;
 ϕ → Coeficiente de resistência igual a 0,9;
 $n = \begin{cases} 1.34 & \text{(perfis laminados);} \\ 2.24 & \text{(perfis soldados).} \end{cases}$

O parâmetro de esbeltez (λ) é determinado pela fórmula abaixo:

$$\lambda = \frac{KL}{r_x} \sqrt{\frac{F_y}{E\pi^2}} \quad (2.2)$$

onde:

- λ → Parâmetro de esbeltez;
- E → Módulo de elasticidade;
- F_y → Tensão de escoamento do aço;
- L → Comprimento da barra;
- r_x → Raio de giração do eixo “x”;
- K → Coeficiente de flambagem efetivo.

O comprimento efetivo da coluna (KL) pode também ser determinado como indicado no apêndice B da norma CAN/CSA-S16.1-94. Neste estudo adotou-se um valor unitário para K , hipótese conservadora, mas válida para estruturas indeslocáveis como limite inferior.

2.3.2 Cálculo dos Momentos Resistentes (M_r)

Os momentos resistentes para os eixos “x” e “y” são dados pelas fórmulas:

- Primeira e Segunda classes:

$$M_{rx} = \phi \cdot Z_x \cdot F_y \quad (2.3)$$

$$M_{ry} = \phi \cdot Z_y \cdot F_y \quad (2.4)$$

- Terceira e Quarta classes:

$$M_{rx} = \phi \cdot W_x \cdot F_y \quad (2.5)$$

$$M_{ry} = \phi \cdot W_y \cdot F_y \quad (2.6)$$

onde:

M_{rx} → Momento resistente fatorado em relação ao eixo “x”;

M_{ry} → Momento resistente fatorado em relação ao eixo “y”;

Z_x → Módulo resistente plástico em relação ao eixo “x”;

Z_y → Módulo resistente plástico em relação ao eixo “y”;

W_x → Módulo resistente elástico em relação ao eixo “x”;

W_y → Módulo resistente elástico em relação ao eixo “y”;

F_y → Tensão nominal de escoamento do aço;

ϕ → Coeficiente de resistência igual a 0.9.

2.3.3 Resistência à Tração

O valor da resistência da seção à tração é dado pelo o menor valor calculado pelas fórmulas abaixo:

$$T_r = \phi \cdot A \cdot F_y \quad (2.7)$$

$$T_r = 0.85\phi \cdot A \cdot F_u \quad (2.8)$$

onde :

T_r → Resistência de projeto à tração;

A → Área de seção transversal;

F_u → Tensão limite de ruptura do aço;

F_y → Tensão nominal de escoamento do aço;

ϕ → Coeficiente de resistência igual a 0.9.

2.3.4 Interação Flexão - Compressão

As peças sujeitas a esforços de flexo-compressão, são analisadas através de superfícies de interação para cada seção:

- Para Primeira classe tem-se:

$$\frac{C_f}{C_r} + \frac{0,85M_{fx}}{M_{rx}} + \frac{0,60M_{fy}}{M_{ry}} \leq 1,00 \quad (2.9)$$

- Para as Segunda, Terceira e Quarta classes tem-se:

$$\frac{C_f}{C_r} + \frac{M_{fx}}{M_{rx}} + \frac{M_{fy}}{M_{ry}} \leq 1,00 \quad (2.10)$$

onde:

C_f → Força ponderada de compressão do perfil;

M_{rx} → Momento resistente fatorado na direção do eixo "x" calculado no item 2.3.2;

M_{ry} → Momento resistente fatorado na direção do eixo "y" calculado segundo o item 2.3.2;

M_{fx} → Momento ponderado em torno do eixo "x" do perfil;

M_{fy} → Momento ponderado em torno do eixo "y" do perfil.

2.4 Resistência da Seção à Flambagem no Plano

Pode-se dividir em três fases o estudo da flambagem da seção no plano:

- Cálculo da resistência de projeto à compressão do perfil metálico, no item 2.3.1;
- Inclusão dos momentos fletores de segunda ordem;
- Verificação da interação flexão - compressão.

2.4.1 Inclusão dos Momentos Fletores de Segunda Ordem

As resistências nominais à flexão são avaliadas para momentos fletores constantes ao longo da peça. Caso o diagrama de momentos seja mais favorável para a resistência da peça, o que ocorre na situação de variação linear dos momentos fletores, então deve-se proceder uma correção dos esforços atuantes através do coeficiente $U1$.

Antes do estudo do fator que contabiliza os efeitos de segunda ordem ($U1$), determina-se as cargas de flambagem de Euler nos eixos “x” e “y”:

$$C_{ex} = \frac{\pi^2 EA}{(L/r_x)^2} \quad (2.11)$$

$$C_{ey} = \frac{\pi^2 EA}{(L/r_y)^2} \quad (2.12)$$

onde:

- C_{ex}, C_{ey} → Carga de Euler;
- E → Módulo de elasticidade do material;
- A → Área da seção transversal;
- L → Comprimento da barra;
- r_x → Raio de giração do eixo “x”;
- r_y → Raio de giração do eixo “y”;

Os valores para w_1 , podem ser calculados de acordo com as seguintes hipóteses:

- Para peças sujeitas a carregamentos distribuídos ou uma série de cargas concentradas no vão:

$$w_1 = 1.00$$

- Para peças sujeitas a uma carga concentrada ou um momento concentrado entre apoios:

$$w_1 = 0.85$$

- Para peças sem carregamentos transversais entre apoios:

$$w_1 = 0.60 - 0.40k \geq 0.40 \quad (2.13)$$

Sendo k a razão entre os dois momentos de extremidade de trecho. O sinal de k depende da curvatura final gerada. Este será positivo se a curvatura for reversa e negativo no caso de curvatura simples.

Com base nestes dados calculam-se os valores de UI_x e UI_y .

$$UI_x = \left(\frac{w_1}{1 - \frac{C_f}{C_{ex}}} \right) \geq 0.40 \quad (2.14)$$

$$UI_y = \left(\frac{w_1}{1 - \frac{C_f}{C_{ey}}} \right) \geq 0.40 \quad (2.15)$$

2.4.2 Interação Flexão - Compressão no Plano

Após serem realizados os cálculos da resistência à compressão e dos fatores que contabilizam os efeitos de segunda ordem, executa-se a verificação da interação flexão - compressão no plano através das equações (2.16 e 2.17):

- Para Primeira classe:

$$\frac{C_f}{C_r} + \frac{0.85U1_x \cdot M_{fx}}{M_{rx}} + \frac{0.60U1_y \cdot M_{fy}}{M_{ry}} \leq 1.00 \quad (2.16)$$

- Para as Segunda, Terceira e Quarta classes:

$$\frac{C_f}{C_r} + \frac{U1_x \cdot M_{fx}}{M_{rx}} + \frac{U1_y \cdot M_{fy}}{M_{ry}} \leq 1.00 \quad (2.17)$$

2.5 Resistência da Seção à Flambagem Fora do Plano

A verificação da flambagem fora do plano pode ser dividida em cinco fases:

- Cálculo da resistência à compressão do perfil metálico;
- Cálculo do fator que contabiliza os efeitos de Segunda ordem;
- Cálculo da resistência a flexão última fora do plano;
- Cálculo dos momentos resistentes;
- Verificação da interação flexão - compressão fora do plano.

2.5.1 Resistência à Compressão da Seção

A única diferença em relação ao item 2.3.1, no cálculo da resistência à compressão da seção - equação (2.1), é que o parâmetro de esbeltez (λ) - equação (2.2) - que deve ser calculado a partir da equação (2.18).

$$\lambda = \frac{K.L}{r_y} \sqrt{\frac{F_y}{E\pi^2}} \quad (2.18)$$

2.5.2 Avaliação do Coeficiente U1

O estudo de U1 segue a mesma seqüência do item 2.4.1, sendo a única alteração nos limites inferiores permitidos para $U1_x$ e $U1_y$, nas equações (2.14) e (2.15), onde estes não podem ser menores que 1.00.

2.5.3 Cálculo da Resistência de Projeto à Flexão Fora do Plano (M_u)

Neste caso deve-se considerar a flambagem por torção, pela equação:

$$M_u = \frac{w_2 \pi}{L^2} \sqrt{E I_y I_T G + \left(\frac{E \pi}{L} \right)^2 I_y I_w} \quad (2.19)$$

onde :

- G → Módulo de elasticidade transversal;
- E → Módulo de elasticidade longitudinal;
- I_y → Momento de inércia no eixo "y";
- I_T → Momento polar de inércia;
- I_w → Constante de empenamento;
- L → Comprimento da barra.

Os valores de w_2 são avaliados seguindo as seguintes hipóteses:

- Quando o momento fletor em qualquer ponto dentro do comprimento não travado for maior que o momento final:

$$w_2 = 1.00$$

- Para comprimentos destravados sujeitos a momentos nas extremidades:

$$w_2 = 1.75 + 1.05k + 0.3k^2 \geq 2.50 \quad (2.20)$$

O valor de k já foi calculado no item 2.4.1, quando foi estudado o fator que contabiliza os efeitos de segunda ordem.

2.5.4 Cálculo dos Momentos Resistentes (M_{rfp})

Caso não ocorra flambagem lateral por torção no regime elástico, deve-se corrigir o valor da resistência para levar-se em conta a ocorrência de plastificação:

- Para a Primeira e Segunda classes:
 - Se M_u for menor ou igual a $0.67 M_p$ então:

$$M_{rfpx} = \phi M_u \quad (2.21)$$

$$M_{rfpy} = \phi M_u \quad (2.22)$$

- Se M_u for maior que $0.67 M_p$ então:

$$M_{rfpx} = 1.15\phi M_p \left(1 - \frac{0.28M_p}{M_u} \right) \quad (2.23)$$

$$M_{rfpy} = 1.15\phi M_p \left(1 - \frac{0.28M_p}{M_u} \right) \quad (2.24)$$

- Para a Terceira e Quarta classes:
 - Se M_u for menor ou igual a $0.67 M_y$ então:

$$M_{rfpx} = \phi M_y \quad (2.25)$$

$$M_{rfpy} = \phi M_y \quad (2.26)$$

- Se M_u for maior que $0.67 M_y$ logo:

$$M_{rfpx} = 1.15\phi \cdot M_y \left(1 - \frac{0.28M_y}{M_u} \right) \quad (2.27)$$

$$M_{rfpy} = 1.15\phi \cdot M_y \left(1 - \frac{0.28M_y}{M_u} \right) \quad (2.28)$$

2.5.5 Interações entre Flexão e Compressão Fora do Plano

De posse dos momentos resistentes, as verificações necessárias para a interação flexão - compressão fora do plano são:

- Para a Primeira classe:

$$\frac{C_f}{C_r} + \frac{0.85U1_x \cdot M_{fx}}{M_{rx}} + \frac{0.60U1_y \cdot M_{fy}}{M_{ry}} \leq 1.00 \quad (2.29)$$

$$\frac{C_f}{C_r} + \frac{0.85U1_x \cdot M_{fx}}{M_{rfpx}} + \frac{0.60U1_y \cdot M_{fy}}{M_{rfpy}} \leq 1.00 \quad (2.30)$$

- Já para Segunda, Terceira e Quarta classes:

$$\frac{C_f}{C_r} + \frac{U1_x \cdot M_{fx}}{M_{rx}} + \frac{U1_y \cdot M_{fy}}{M_{ry}} \leq 1.00 \quad (2.31)$$

$$\frac{C_f}{C_r} + \frac{U1_x \cdot M_{fx}}{M_{rfpx}} + \frac{U1_y \cdot M_{fy}}{M_{rfpy}} \leq 1.00 \quad (2.32)$$

2.6 Interação Flexão - Tração

Caso a força normal do perfil seja de tração, torna-se necessário a realização de duas verificações para a resistência da seção. Estas verificações são dadas pelas fórmulas:

- a) Primeira verificação a ser utilizada em todas classes (plastificação):

$$\frac{T_f}{T_r} + \frac{M_{fx}}{M_{rx}} \leq 1.00 \quad (2.33)$$

- b) Segunda verificação para o caso de esforços axiais pequenos e que mesmo assim pode ocorrer flambagem lateral por torção:

- Para Primeira e Segunda classes:

$$\frac{M_{fx}}{M_{rx}} - \frac{T_f \cdot Z_x}{M_{rx} \cdot A} \leq 1.00 \quad (2.34)$$

- Para Terceira e Quarta classes:

$$\frac{M_{fx}}{M_{rx}} - \frac{T_f \cdot W_x}{M_{rx} \cdot A} \leq 1.00 \quad (2.35)$$

onde:

- T_f → Força ponderada de tração do perfil;
- M_{rx} → Momento resistente fatorado na direção do eixo "x" calculado no item 2.5.3 ou 2.5.4 conforme o caso;
- Z_x → Módulo resistente plástico em relação ao eixo "x";
- W_x → Módulo resistente elástico em relação ao eixo "x";
- A → Área da seção transversal.

2.7 Resistência da Seção à Força Cortante

Nesta etapa, o procedimento adotado para a verificação da seção ao esforço cisalhante para o perfil metálico independe de sua classe. Sendo necessário o cálculo da tensão última de cisalhamento (F_s) e da resistência ao cortante de plastificação (V_r).

2.7.1 Cálculo da Resistência ao Esforço Cortante (V_r)

A resistência à força cortante é dado pela equação (2.36),

$$V_r = \phi A_w \cdot F_s \quad (2.36)$$

onde:

- F_s → Tensão limite de flambagem ao esforço cortante;
- V_r → Resistência ao esforço cisalhante
- A_w → Área da alma do perfil;
- d → Dimensão da alma do perfil;
- h → Altura entre as mesas;
- $A_w = \begin{cases} d \cdot t_w \text{ (perfis laminados);} \\ h \cdot t_w \text{ (perfis soldados).} \end{cases}$

2.7.2 Cálculo da Tensão Última de Cisalhamento (F_s)

Para o cálculo de F_s levou-se em consideração que a viga não possui enrijecedores transversais, sendo o valor adotado para coeficiente de empenamento por cisalhamento (k_v) igual a 5.34. O valor de F_s é determinado nas relações ao lado:

Para:

$$\frac{h}{t_w} \leq 1014 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

Tem-se:

$$F_s = 0.66F_y$$

Para:

$$1014 \sqrt{\frac{E}{F_y}} < \frac{h}{t_w} \leq 1160 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

Tem-se:

$$F_s = F_{cri} = 290 \sqrt{\frac{F_y \cdot k_v}{(h/t_w)}}$$

Para:

$$1160 \sqrt{\frac{E}{F_y}} < \frac{h}{t_w} \leq 1435 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

Tem-se:

$$F_s = F_{cri} + F_t$$

$$F_{cri} = 290 \sqrt{\frac{F_y \cdot k_v}{(h/t_w)}}$$

$$F_t = (0.50F_y - 0.866F_{cri}) \left(\frac{1}{\sqrt{1 + (a/h)^2}} \right)$$

Para:

$$1435 \sqrt{\frac{E}{F_y}} < \frac{h}{t_w}$$

Tem-se:

$$F_s = F_{cri} + F_t$$

$$F_{cri} = \frac{180000k_v}{\left(\frac{h}{t_w} \right)^2}$$

$$F_t = (0.50F_y - 0.866F_{cri}) \left(\frac{1}{\sqrt{1 + (a/h)^2}} \right)$$

2.7.3 Verificação do Esforço Cortante

A verificação necessária ao esforço cisalhante é dada pela fórmula:

$$\frac{V_f}{V_r} \leq 1,0 \quad (2.37)$$

onde:

V_f → Esforço ponderado de cisalhamento do perfil;

V_r → Resistência ao esforço cisalhante.

2.8 Determinação da Flecha e Deslocamento Lateral

De acordo com o apêndice “I” da Norma Canadense - CAN/CSA-S16.1-94, onde é apresentada uma tabela com vários tipos de projetos com suas deflexões máximas, adotam-se para o cálculo da flecha e deslocamento lateral os limites abaixo:

$$\text{flecha máxima} \leq \frac{L}{360} \quad (2.38)$$

$$\text{deslocamento lateral máximo} \leq \frac{H}{500} \quad (2.39)$$

onde:

L → Comprimento da barra,

H → Pé direito do pavimento.

CAPÍTULO 3

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE PÓRTICOS DE AÇO A CARREGAMENTOS LATERAIS

A maioria dos projetos de estruturas de aço apresentam deslocamentos laterais. Tais deslocamentos laterais podem ocorrer devido a carregamentos laterais ou por falta de simetria da estrutura ou de outros carregamentos.

Os principais métodos de análise estrutural para efeitos de deslocamentos laterais comumente empregados são resumidas neste capítulo.

3.1 Análise Linear Elástica

Este método é o mais simples e de larga utilização nos escritórios de projeto devido ao fato de ser o mais empregado desde os tempos do projeto pelo critério de tensões admissíveis.

A vantagem com a simplicidade existente na análise estrutural é perdida em parte pela dificuldade na avaliação e inclusão dos efeitos de segunda ordem e pela necessidade de avaliação dos coeficientes de flambagem das colunas.

Quando o projetista usa momentos fletores resultantes de uma análise estrutural linear de primeira ordem é necessário deixar uma certa reserva de resistência de viga-coluna para acomodação dos efeitos de segunda ordem.

A tendência moderna com o efetivo uso do método dos estados limites em projeto de estruturas de aço é a de utilização de equações de interação baseadas em esforços corrigidos de modo a incluir os efeitos das cargas axiais atuando na estrutura deformada.

A situação ideal seria a utilização de programas que efetuassem análise não-linear física e geométrica. Ocorre que tais procedimentos de análise estrutural são incrementais e caros do ponto de vista computacional.

Adota-se na prática hoje em dia a utilização do conceito de carga “notional” para a inclusão dos efeitos na estabilidade estrutural devido à existência da falta de prumo ou aos deslocamentos laterais das colunas.

A carga “notional” fixada em 0.005 (cinco por mil) da somatória das cargas verticais no pavimento é aplicada lateralmente de modo a forçar uma correção nos momentos fletores das vigas-colunas. Caso se trate de uma estrutura bastante rígida lateralmente a carga “notional” assim fixada não produz efeitos desnecessariamente conservadores e conseqüentemente os efeitos de deslocamento lateral também devem ser julgados desprezíveis. Entretanto, em estruturas deslocáveis a inclusão da carga “notional” tem se mostrado satisfatória e conservadora para consideração das implementações iniciais dos efeitos de deslocamentos laterais em peças comprimidas (Kennedy, 1994a).

3.2 Método Simplificado U1/U2

Este método foi introduzido inicialmente em regulamentos de projetos na Norma AISC (LRFD) de projeto nos estados limites e pela Norma Canadense – CAN/CSA-S16.1-90. Pelo método, os esforços são majorados por dois fatores, U1 e U2, que consideram de forma aproximada os efeitos de segunda ordem. U1 considera os efeitos locais na barra, tal como mostrado no Capítulo 2 (ver equações (2.14) e (2.15)). U2 considera os efeitos globais da estrutura. O efeito local é calculado automaticamente no FTOOL.

Na consideração dos efeitos globais os momentos fletores fatorados são avaliados em duas etapas:

$$M_f = M_{fg} + U2.M_{fl} \quad (3.1)$$

onde :

M_f → Momento fletor fatorado;

M_{fg} → Momento fletor devido aos carregamentos gravitacionais;

M_{fl} → Momento fletor devido aos carregamentos laterais;

U2 → Fator que contabiliza os efeitos globais de segunda ordem.

M_{fg} são os momentos fletores obtidos numa análise estrutural de primeira ordem com restrições das deslocabilidades laterais da estrutura.

Em seguida, com a aplicação das reações de apoio obtidas na avaliação de M_{fg} a uma estrutura deslocável lateralmente, obtêm-se os esforços M_R e as deformações laterais que servem para a avaliação da rigidez lateral da estrutura e do fator de correção U_2 :

$$U_2 = \frac{1}{1 - \left[\frac{\sum C_f \cdot \Delta f}{\sum V_f \cdot H} \right]} \leq 1.40 \quad (3.2)$$

onde :

- C_f → Esforço axial da coluna;
- Δf → Deslocamento lateral da estrutura;
- V_f → Esforço cisalhante nas colunas do pavimento;
- H → Pé direito do pavimento.

Desse modo, os esforços avaliados na equação (3.1), incluem de modo aproximados os efeitos de segunda ordem globais devidos aos deslocamentos laterais dos pontos de aplicação das cargas axiais nas vigas-colunas.

Cabe notar que o fator de correção de M_R está limitado a 1.40, ou seja, somente podem ser corrigidos os esforços em até 40% daqueles obtidos na análise linear elástica, e caso isso não ocorra certamente a estrutura é muito flexível lateralmente. Pode-se sugerir a colocação de contraventamentos ou a substituição de vigas e colunas por perfis mais pesados.

Caso seja de interesse manter a estrutura projetada, deve-se executar uma análise completa de segunda ordem (elasto-plástica não-linear) ou então uma análise P-Delta.

O método U_1/U_2 foi adotado no dimensionamento deste trabalho tendo em vista a facilidade de implementação no programa FTOOL.

3.3 Análise P - Delta

Esta análise é uma alternativa ao método simplificado U1/U2, pois trata-se de um cálculo iterativo em que suas etapas transformam o efeito dos deslocamentos sucessivos em forças horizontais equivalentes (Galambos, 1988).

É um método de aplicação relativamente fácil, que consiste dos seguintes passos:

- **Primeiro passo:** Aplicar na estrutura uma combinação de carregamentos fatorados;
- **Segundo passo:** Calcular as deflexões laterais de cada piso, Δ_i , efetuando uma análise elástica de 1ª ordem na estrutura;
- **Terceiro passo:** Determinar o valor da força cisalhante equivalente de cada piso pela fórmula:

$$V'_i = \frac{\sum P_i}{H_i} [\Delta_{i+1} - \Delta_i] \quad (3.3)$$

onde:

$\sum P_i$ → Somatório das forças axiais horizontais no pavimento i ;

H_i → Pé direito do pavimento i ;

Δ_{i+1}, Δ_i → Deslocamento do piso $i+1$, e i , respectivamente.

- **Quarto passo:** Calcular a carga horizontal fictícia do piso pela fórmula abaixo:

$$H'_i = V'_{i+1} - V'_i \quad (3.4)$$

- **Quinto passo:** Repetir o primeiro passo, adicionando no carregamento combinado a carga horizontal fictícia calculada;
- **Sexto passo:** Repetir do segundo até o quinto passo, parando somente quando encontrar uma convergência satisfatória, de aproximadamente 1%. De acordo com a Norma Canadense, caso esta convergência

ultrapasse cinco ciclos, isso indica que a estrutura é excessivamente flexível.

Com o final destas iterações, determina-se os esforços e deslocamentos finais da estrutura provocados pelos efeitos de 1ª ordem e de 2ª ordem. Para melhor entendimento deste método, é mostrado na Figura 3.1 um fluxograma de execução do processo de análise.

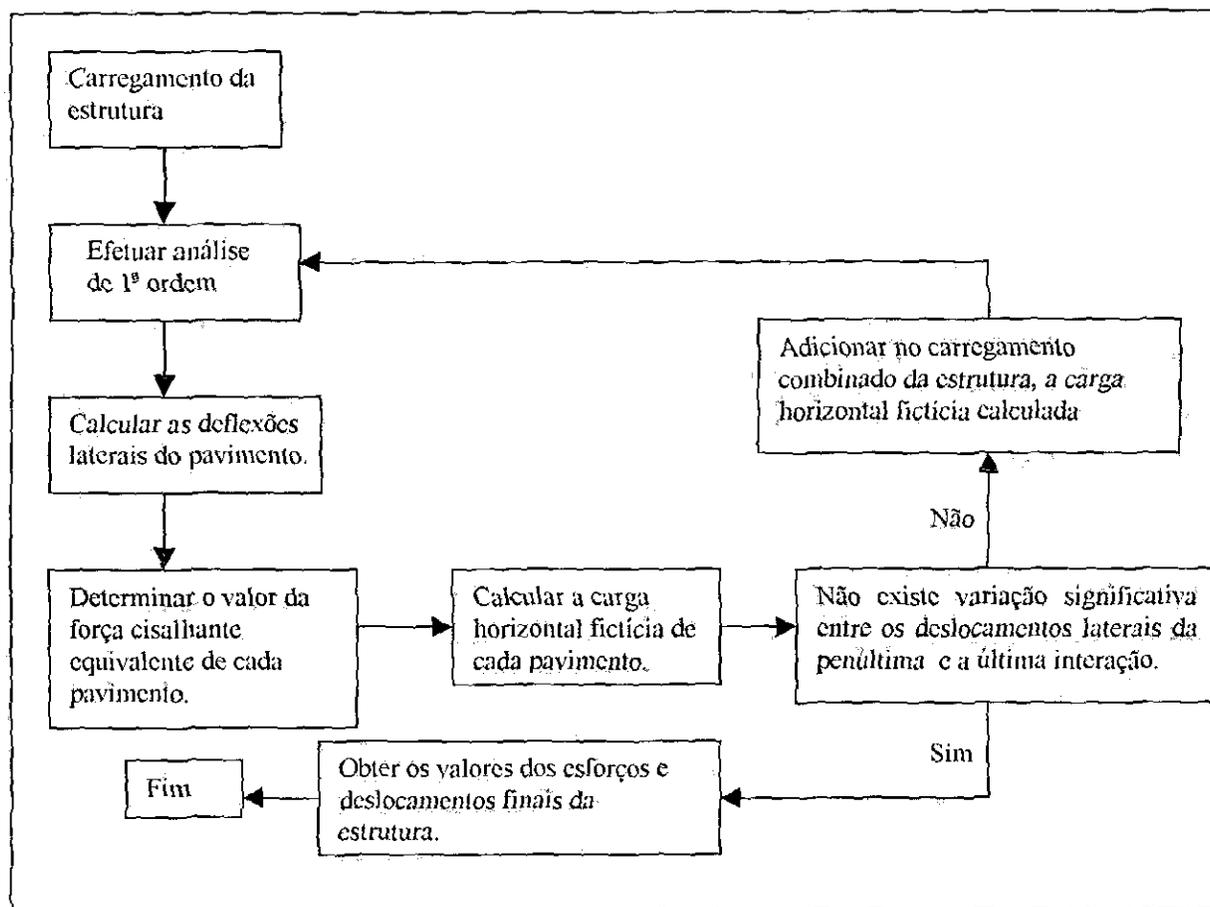


Fig. 3.1 – Fluxograma para execução do método P-Delta.

No dimensionamento estrutural com esforços baseados na análise P-Delta os coeficientes de flambagem podem ser tomados iguais a 1.0, exceto em estruturas contraventadas, quando tais coeficientes podem ser menores que 1.0 e neste caso, por razões de economia de material, procede-se barra por barra o cálculo das verificações.

CAPÍTULO 4

IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

O programa FTOOL foi inicialmente desenvolvido para realizar análises estruturais de pórticos planos. Neste trabalho, o programa foi estendido para analisar estruturas metálicas constituídas de perfis metálicos, assim como proceder as avaliações de resistência previstas pela norma CAN/CSA-S16.1-94 no dimensionamento dos perfis. Apresenta-se a seguir as estruturas de dados que contêm os atributos existentes no FTOOL, incluindo os atributos implementados neste trabalho, possibilitando assim o dimensionamento de um pórtico plano,

As estruturas de dados existentes no FTOOL para os blocos dos atributos estão divididas em:

- Estrutura de dados para o bloco de atributos do nó;
- Estrutura de dados para o bloco de atributos da barra;
- Estrutura de dados para o bloco de atributos do modelo.

As implementações feitas nas estruturas de dados podem ser facilmente visualizadas nas figuras encontradas neste capítulo, já que as estruturas existentes no programa são representadas pela cor azul e as implementadas pela cor vermelha.

4.1 Estrutura de Dados para o Bloco de Atributos do Nó

A Figura 4.1 mostra a estrutura de dados pertencente ao bloco de atributos de um nó, contendo informações necessárias para a definição de um nó dentro da criação de um modelo estrutural. Estes atributos estão subdivididos em quatro partes:

- Atributos com as características dos nós;
- Atributos com as características dos apoios;
- Atributos com as características das forças nodais;

- Atributos com as características dos deslocamentos e rotações nodais.

No programa os atributos dos nós são o seu número, um “flag” de visibilidade (visível ou invisível) e um “flag” de seleção. Já para os apoios tem-se suas condições (livre ou fixo), o seu ângulo e também um “flag” de visibilidade (visível ou invisível). As forças aplicadas no nó são identificadas por um ponteiro para a definição das forças aplicadas ao nó. E por fim os atributos para os deslocamentos, que podem ser os valores dos deslocamentos e rotação de um nó e um “flag” para deslocamentos prescritos.

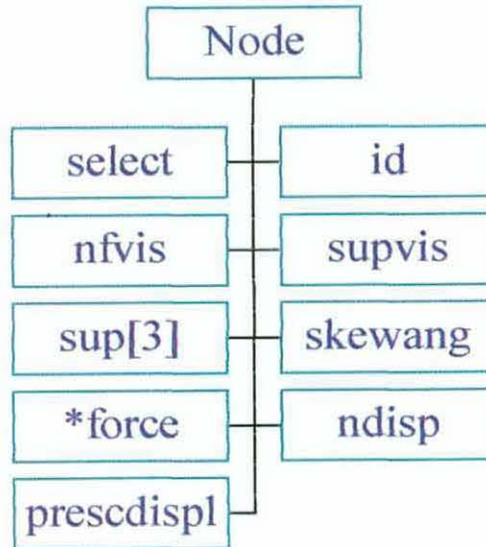


Fig. 4.1 - Estrutura de dados do bloco de atributos do nó.

Os campos da estrutura de dados do bloco de atributos do nó que aparecem na Figura 4.1 estão detalhados abaixo:

int	select	→	“Flag” de seleção;
int	id	→	Número do nó;
int	nfvis	→	“Flag” para visibilidade do nó;
int	supvis	→	“Flag” para visibilidade do apoio;
char	sup[3]	→	Condições do apoio;

double skewang	→	Ângulo do apoio;
Tnodalforce *force	→	Ponteiro para as forças do nó;
Tnodaldisp ndisp	→	Deslocamentos do nó;
int prescdispl	→	“Flag” para deslocamentos prescritos.

4.2 Estrutura de Dados para o Bloco de Atributos da Barra

A Figura 4.2 mostra a estrutura de dados pertencente ao bloco de atributos de uma barra. Algumas informações armazenadas nesta estrutura têm papel fundamental na definição da barra do modelo. Como exemplo pode-se armazenar:

- Número da barra;
- Ponteiros para as definições das propriedades geométricas da barra e do material a ser empregado na barra;
- Ponteiros para as definições do carregamento (uniforme ou linear) que é aplicado na barra;
- “Flag” para liberação de rotação (livre ou fixo) tanto para o nó inicial como para o nó final da barra;
- “Flag” para a visibilidade dos carregamentos (uniforme e linear).

No FTOOL, não existe carga concentrada aplicada na barra. Quando isto ocorre deve-se criar um nó na barra, dividindo-a em duas. As barras também armazenam informações que são usadas no pós-processamento, como:

- Esforços dos nós (inicial e final);
- Número de pontos usados para traçado de diagramas;
- Esforços ao longo da barra para desenho dos diagramas;
- Momentos fletores locais máximos;
- Máximos esforços ou deslocamentos e posição ao longo da barra;
- Ponteiro para lista de verificações de projeto.

O bloco de atributos da barra foi o que mais sofreu modificações na presente implementação computacional, pois no FTOOL as barras não estavam adaptadas para receber as propriedades dos perfis metálicos tipo “I”, assim como as propriedades de material que geralmente são utilizadas no dimensionamento.

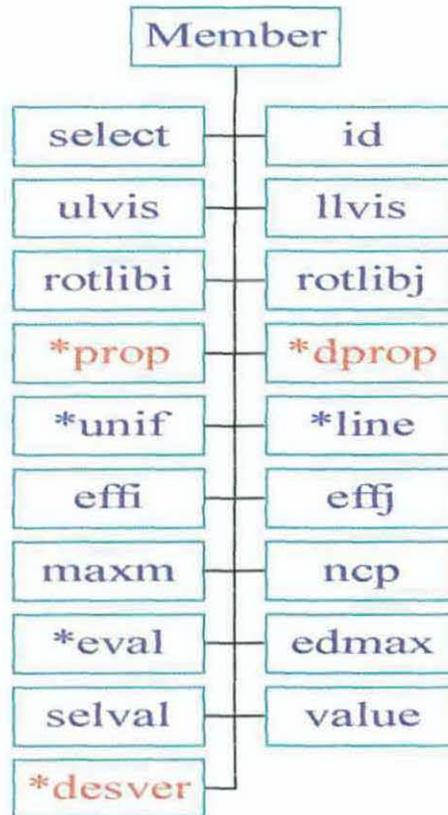


Fig. 4.2 - Estrutura de dados do bloco de atributos da barra.

Abaixo são detalhados os campos do bloco de atributos da barra que aparecem na Figura 4.2:

- | | | | |
|-----|--------|---|--|
| int | select | → | “Flag” de seleção; |
| int | id | → | Número da barra; |
| int | ulvis | → | “Flag” para a visibilidade do carregamento uniforme; |
| int | llvis | → | “Flag” para a visibilidade do carregamento linear; |

int	rotlibi	→	“Flag” de liberação de rotação do nó inicial;
int	rotlibj	→	“Flag” de liberação de rotação do nó final;
Tmemprop	*prop	→	Ponteiro para as propriedades da barra ;
Tdesprop	*dprop	→	Ponteiro para as propriedades do material;
Tunifload	*unif	→	Ponteiro para a carga uniforme;
Tlineload	*line	→	Ponteiro para a carga concentrada;
Tendeffort	effi	→	Esforços do nó inicial;
Tendeffort	effj	→	Esforços do nó final;
Tmaxmom	maxm	→	Momentos fletores locais máximos;
int	nep	→	Números dos pontos calculados;
Teffplot	edval	→	Esforços ao longo da barra para desenho dos diagramas;
Tpoint	edmax	→	Máximos esforços ou deslocamentos com suas posições ao longo da barra;
int	selval	→	“Flag” para seleção dos esforços;
Teffplot	value	→	Valor do esforço selecionado;
Tdesver	*desver	→	Ponteiro para a lista de verificações de projeto.

4.3 Estrutura de Dados para o Bloco de Atributos do Modelo

O bloco de atributos do modelo estrutural (que representa um pórtico) armazena os diversos tipos de listas que são determinados pelo usuário durante a geração do pórtico. Estas listas estão divididas em (Figura 4.3):

- Lista de forças nodais;
- Lista de cargas uniformes;
- Listas de cargas concentradas;
- Lista de propriedades de barra;
- Lista de propriedades de material.

A lista de propriedades de barra foi ampliada neste trabalho para receber as demais propriedades dos perfis metálicos. A lista com as propriedades de material que foi totalmente implantada no programa.



Fig. 4.3 - Estrutura de dados para o bloco de atributos do modelo.

4.4 Estrutura de Dados das Propriedades de Barra.

A lista de propriedades de uma barra é uma estrutura de dados onde são armazenadas todas as informações dos perfis metálicos tipo “I” utilizados pelas barras do modelo. Cada bloco de atributos da lista contém informações do tipo:

- Área transversal do perfil;
- Momento de inércia transversal;
- Dimensão da mesa do perfil;
- Dimensão da alma do perfil;
- Altura do perfil;
- Espessura da mesa;
- Espessura da alma.

Algumas importantes informações de perfil utilizadas no dimensionamento do modelo estrutural também estão armazenadas nesta estrutura, dentre elas o tipo do perfil (VS, CS ou CVS) e a direção dos eixos principais. A Figura 4.4 mostra a definição desta estrutura.

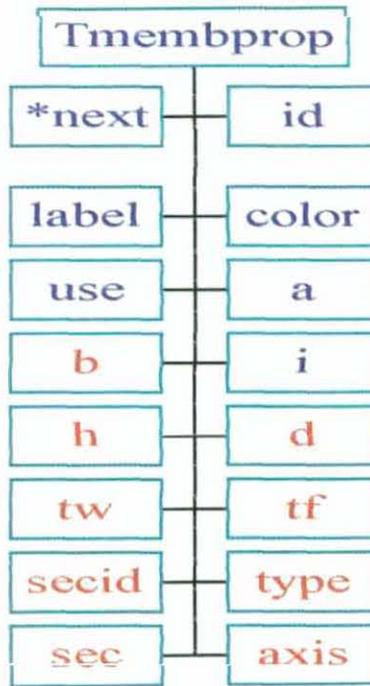


Fig. 4.4 - Bloco de propriedades de barra.

Sendo:

struct _membprop	*next	→	Ponteiro para o próximo bloco de propriedades;
int	id	→	Código de identificação;
int	use	→	Contador do número de vezes que a propriedade é usada;
char	label[LABEL_SIZE]	→	Nome da propriedade;
int	color	→	Cor da propriedade;
double	area	→	Área transversal da seção;
double	i	→	Momento de inércia da seção transversal;
double	b	→	Dimensão da mesa do perfil;
double	d	→	Dimensão da alma do perfil;

double h	→ Dimensão da alma do perfil;
double tf	→ Espessura da mesa;
double tw	→ Espessura da alma;
int type	→ Tipo da seção de acordo com a tabela de perfis;
int secid	→ Índice do perfil selecionado na tabela;
int axis	→ Direção do eixo principal do perfil;
Section sec	→ Características completas do perfil escolhido da tabela.

4.5 Estrutura de Dados da Propriedades do Material

Neste trabalho foi implementada uma estrutura de dados para armazenar propriedades de materiais utilizados em pórticos metálicos. No FTOOL, o módulo de elasticidade longitudinal era definido na estrutura de dados das propriedades da barra. No entanto, este foi deslocado para a estrutura de dados de materiais. Além do módulo de elasticidade longitudinal, encontram-se também definidas nesta estrutura as seguintes propriedades de material:

- Módulo de elasticidade longitudinal;
- Tensão limite de escoamento;
- Módulo de elasticidade transversal;
- Tensão limite de resistência do aço.

Além disso, duas variáveis que auxiliam no dimensionamento do modelo estrutural estão definidas nesta estrutura. Embora não sejam propriedades de material, e sim propriedades de projeto, optou-se por armazená-las nesta estrutura, pois tratam-se de propriedades globais do modelo e não específicas de cada barra. São elas:

- Coeficiente de resistência;
- Parâmetro de flambagem de coluna, que depende do tipo de perfil (laminado ou soldado).

- Atributos com as características dos deslocamentos e rotações nodais.

No programa os atributos dos nós são o seu número, um “flag” de visibilidade (visível ou invisível) e um “flag” de seleção. Já para os apoios tem-se suas condições (livre ou fixo), o seu ângulo e também um “flag” de visibilidade (visível ou invisível). As forças aplicadas no nó são identificadas por um ponteiro para a definição das forças aplicadas ao nó. E por fim os atributos para os deslocamentos, que podem ser os valores dos deslocamentos e rotação de um nó e um “flag” para deslocamentos prescritos.

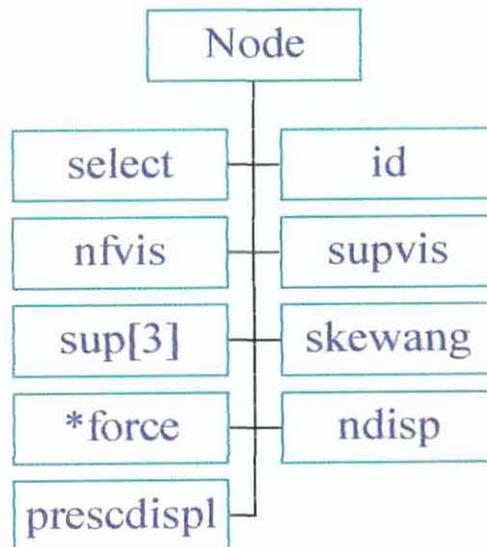


Fig. 4.1 - Estrutura de dados do bloco de atributos do nó.

Os campos da estrutura de dados do bloco de atributos do nó que aparecem na Figura 4.1 estão detalhados abaixo:

int	select	→	“Flag” de seleção;
int	id	→	Número do nó;
int	nfvis	→	“Flag” para visibilidade do nó;
int	supvis	→	“Flag” para visibilidade do apoio;
char	sup[3]	→	Condições do apoio;

int use	→ Contador do número de vezes que a propriedade é usada;
char label[LABEL_SIZE]	→ Nome da propriedade;
int color	→ Cor de retorno;
double Fy	→ Tensão limite de escoamento;
double e	→ Módulo de elasticidade longitudinal;
double G	→ Módulo de elasticidade transversal;
double Fu	→ Tensão limite de resistência do aço;
double N	→ Parâmetro de flambagem de coluna;
double fi	→ Coeficiente de resistência.

4.6 Bloco de Dados com as Propriedades Geométricas de Perfil

Esta estrutura de dados, implantada no programa, é responsável pelo armazenamento de todas as propriedades geométricas da seção do perfil metálico a ser aplicada em barras do modelo e conseqüentemente, pode ser utilizada no dimensionamento do pórtico. Cada bloco de atributos de propriedade de barra (Figura 4.4) contém uma referência para seu correspondente bloco de propriedades geométricas de perfil. A Figura 4.6 mostra a distribuição desta estrutura de dados:

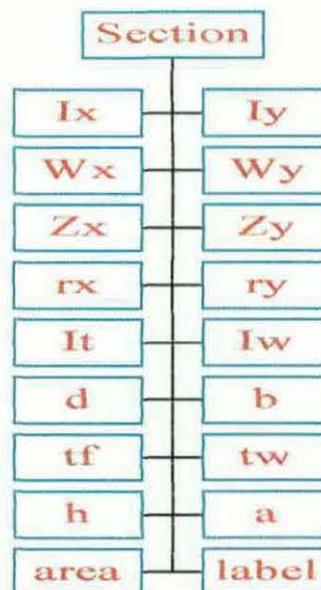


Fig. 4.6 - Bloco de dados com as propriedades geométricas de perfil.

Os campos da estrutura de dados de perfil são:

double area	→	Área transversal da seção;
double Ix	→	Momento de inércia transversal (eixo x);
double Iy	→	Momento de inércia transversal (eixo y);
double Wx	→	Módulo resistente elástico (eixo x);
double Wy	→	Módulo resistente elástico (eixo y);
double Zx	→	Módulo resistente plástico (eixo x);
double Zy	→	Módulo resistente plástico (eixo y);
double rx	→	Raio de giração (eixo x);
double ry	→	Raio de giração (eixo y);
double It	→	Momento de inércia a polar;
double Iw	→	Constante de empenamento;
double b	→	Dimensão da mesa;
double d	→	Altura do perfil;
double h	→	Dimensão da alma do perfil;
double tf	→	Espessura da mesa;
double tw	→	Espessura da alma;
double a	→	Espessura do filete de solda.

Pode-se observar que alguns parâmetros da seção transversal estão repetidos no bloco de propriedades da barra (Figura 4.4). No bloco de propriedades da barra se encontram os principais parâmetros utilizados para as verificações da resistência de projeto. O bloco de dados do perfil é apenas uma referência para uma tabela de propriedades geométricas.

4.7 Bloco de Dados com os Parâmetros de Verificação de Resistência

Este bloco de dados implementado neste trabalho, é responsável pelo armazenamento de todos os esforços necessários para a realização do dimensionamento de uma barra do modelo estrutural. O objetivo desta estrutura de dados é agrupar em um único bloco de dados

os parâmetros de cálculo necessários para se fazer as verificações de projeto de uma barra (vide Capítulo 2). Este bloco de dados é criado a partir das respostas de análise realizada, toda vez que é feita a verificação de uma barra. Os esforços contidos neste bloco são:

- Esforço axial ponderado;
- Esforço ponderado cortante;
- Momentos ponderados em torno dos eixos “x” e “y”;
- Momentos nos nós iniciais e finais nos eixos “x” e “y”;
- Momentos internos nos eixos “x” e “y”.

É válido salientar que adotou-se para os esforços e os momentos da direção do eixo “y” o valor zero, já que o programa FTOOL só analisa estruturas no plano. Entretanto, na formulação teórica já estão sendo utilizados os valores para ambos os eixos, tendo em vista implementações futuras.

Armazenam-se também neste bloco as seguintes informações:

- Coordenadas da barra no eixo “y” dos nós inicial e final;
- Comprimento efetivo de flambagem da barra;
- Comprimento efetivo da barra;
- Flecha máxima da barra.

A Figura 4.7 mostra como foram distribuídas as informações no bloco de parâmetros de cálculo.



Fig. 4.7 - Blocos de dados com parâmetros de cálculo.

Os parâmetros de cálculo são:

double L	→	Comprimento da barra;
double K	→	Coefficiente efetivo de flambagem da barra;
double Mf1	→	Momento no primeiro nó (eixo “x”);
double Mf2	→	Momento no segundo nó (eixo “x”);
double Mfx1	→	Módulo do momento no primeiro nó (eixo “x”);
double Mfx2	→	Módulo do momento no segundo nó (eixo “x”);
double Mfy1	→	Módulo do momento no primeiro nó (eixo “y”);
double Mfy2	→	Módulo do momento no segundo nó (eixo “y”);
double Mfintx	→	Momento interno (eixo “x”);
double Mfinty	→	Momento interno (eixo “y”);
double Cf	→	Esforço fatorado de compressão;
double Tf	→	Esforço fatorado de tração;
double Vf	→	Esforço cisalhante fatorado;
double fl	→	Flecha da barra;
double yi	→	Coordenada do nó inicial (eixo “y”);
double yj	→	Coordenada do nó final (eixo “y”);
double Mfx	→	Momento máximo (eixo “x”);
double Mfy	→	Momento máximo (eixo “y”).

4.8 Bloco de Dados com as Verificações Realizadas

A Figura 4.8 apresenta o bloco de dados que armazena todos os valores das verificações realizadas nas barras do modelo estrutural gerado, além de algumas informações complementares sobre a seção do perfil metálico analisado. Estas verificações estão divididas em:

- Resistência da seção ao esforço de flexo - compressão;
- Resistência da seção à flambagem no plano;
- Resistência da seção à flambagem fora do plano;
- Resistência da seção ao esforço de cisalhante;
- Deflexão vertical;
- Deflexão horizontal.

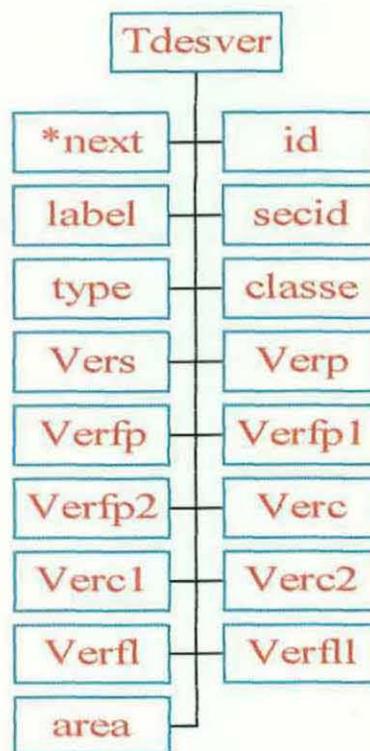


Fig. 4.8 - Bloco de dados com as verificações realizadas.

Abaixo são detalhados os campos do bloco de verificações realizadas:

struct_tdesver *next	→	Ponteiro para as próximas verificações;
int id	→	Código de identificação;
char label[LABEL_SIZE]	→	Nome do perfil verificado;
int type	→	Tipo da seção de acordo com a tabela de perfis;

int classe	→	Classe do perfil;
double Vers	→	Verificação da seção ao esforço de compressão;
double Verp	→	Verificação da seção a flambagem no plano;
double Verfp	→	Maior das duas verificações da seção a flambagem fora do plano;
double Verfp1	→	Verificação da seção a flambagem fora do plano;
double Verfp2	→	Verificação da seção a flambagem fora do plano;
double Verfc	→	Maior das duas verificações da seção aos esforços cisalhante;
double Verfc1	→	Verificação da seção ao esforço cisalhante;
double Verfc2	→	Verificação da seção ao esforço cisalhante;
double Verfl	→	Verificação da deflexão vertical da barra;
double Verfl1	→	Verificação da deflexão horizontal da barra;
double area	→	Área da seção transversal.

O programa além de fazer as verificações de todas as barras do pórtico, cria para cada barra, uma lista de perfis do mesmo tipo do perfil selecionado pelo usuário que poderiam ser utilizados na estrutura, ou seja, contendo somente aqueles perfis que satisfazem os critérios de resistência. O ponteiro para o topo desta lista fica armazenado no bloco de atributos da barra (vide Figura 4.2). Depois o programa faz um ordenação desses perfis da seguinte forma: o primeiro da lista é o perfil definido pelo usuário na fase de pré-processamento e os demais são ordenados pelo valor do peso do perfil, permitindo ao usuário a escolha de uma estrutura mais leve, conseqüentemente mais econômica. Somente os dez perfis mais leves são armazenados na lista de verificações de uma barra. O usuário tem a possibilidade de visualizar os perfis contidos na lista, com suas propriedades. Além disso, ele pode escolher o perfil mais adequado para o perfil corrente da barra, ou de um grupo de barras, conforme será explicado no Capítulo 5.

CAPÍTULO 5

INTERFACE GRÁFICA

A interface gráfica utilizada no programa FTOOL foi criada com o propósito de melhor atender as necessidades do usuário, tornando simples o uso do programa. Neste programa, pode-se dividir os menus e submenus em duas etapas. A primeira é composta pelos botões que auxiliam na fase de pré-processamento do modelo (edição, visualização, definição das propriedades dos elementos estruturais, definição dos tipos de carregamentos, salvar, copiar, etc.) e a segunda pelos botões que realizam o pós-processamento do modelo gerado, ou seja, a visualização da deformada da estrutura, dos diagramas de esforços internos (momentos fletores, esforços cortantes e esforços normais), o dimensionamento e a geração de um arquivo tipo texto contendo a memória de cálculo da estrutura analisada. A Figura 5.1 mostra a interface atual do programa.

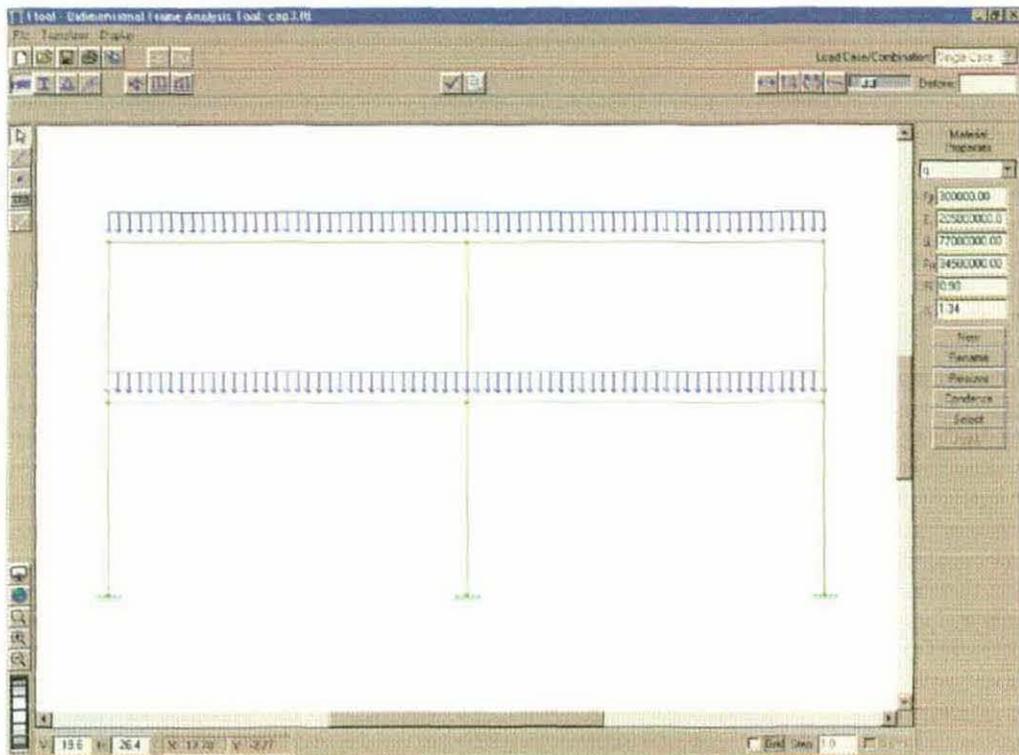


Fig. 5.1 – Tela do programa com um quadro como exemplo.

Os detalhes destes menus e submenus estão presentes neste capítulo, onde são descritas suas respectivas funções, indicando as implementações realizadas e quando necessário fazendo comparações dos menus e submenus do programa original com aqueles que foram implementados.

5.1 Menu Principal

Será mostrado inicialmente como está distribuído o menu principal e as funções que podem ser encontradas nele.

5.1.1 Menu *File*

O Menu *File*, em cascata, contém opções de informações sobre o programa e opções para salvar o modelo corrente em um arquivo de disco, carregar na memória um modelo de um arquivo previamente salvo, começar a editar um novo modelo, exportar a imagem para arquivos com formatos específicos, indicar o número total de barras e nós existentes no modelo, determinar o limite da janela de trabalho e por fim a opção de saída do programa. Pode-se observar este menu na Figura 5.2.

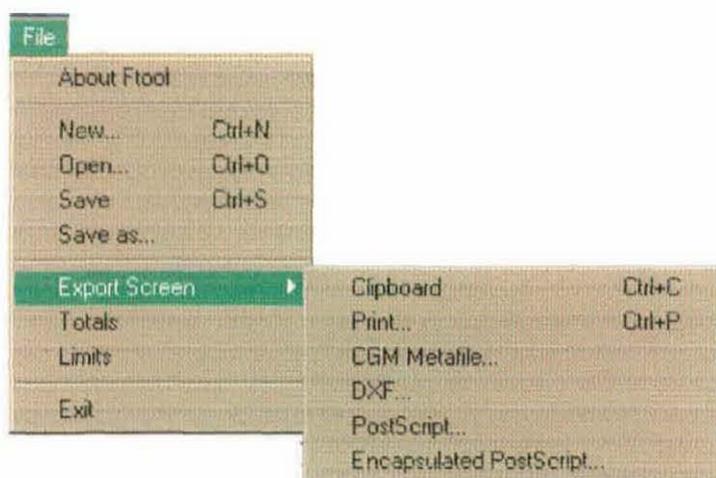


Fig. 5.2 – Menu *File*.

5.1.2 Menu *Transform*

O Menu *Transform* é outro menu em cascata responsável pela elaboração do modelo, auxiliando o usuário na criação das barras e dos nós. Este menu só é ativado quando um grupo de barras ou nós estiver selecionado. Suas principais funções estão mostradas na Figura 5.3.

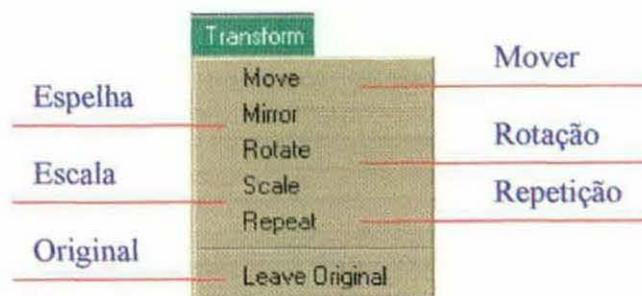


Fig. 5.3 – Menu *Transform*

5.1.3 Menu *Display*

Neste menu o usuário pode escolher de acordo com sua preferência, qual a cor de fundo de tela, tendo para cada cor de fundo selecionada diferentes cores relacionadas com as barras e nós do modelo. Outra opção do usuário é trabalhar com todos os elementos do modelo com a cor preta e fundo de tela branco. Isto permite que a imagem do modelo possa ser impressa em uma impressora em preto e branco. Pode-se também especificar quais os atributos que devem ser mostrados na tela durante o manuseio do programa. No entanto devido a estrutura do programa, alguns atributos só estarão disponíveis quando estiver sendo realizado o pós-processamento do modelo. Na Figura 5.4 é mostrado o Menu *Display* com suas funções.

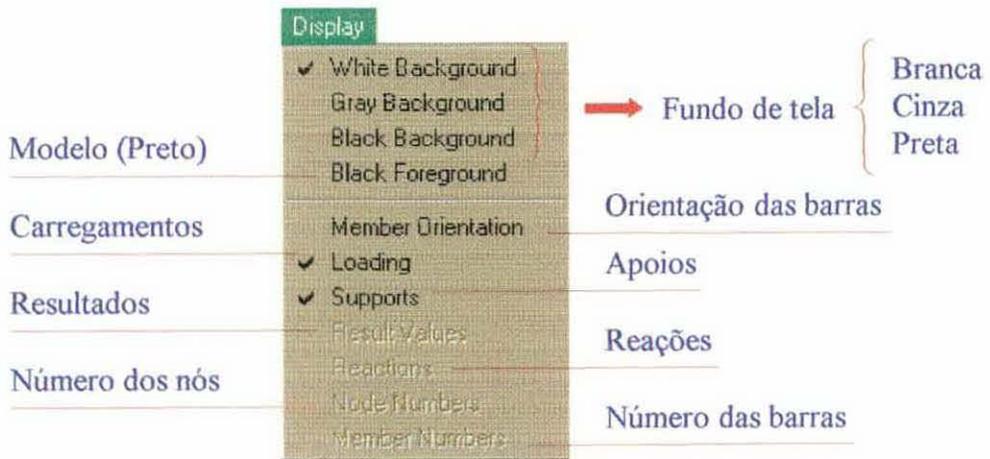


Fig. 5.4 - Menu *Display*

5.1.4 Menu de Controle

Este menu é composto por cinco botões que repetem as opções mais usadas do menu principal *File*. A Figura 5.5 mostra o menu de controle com suas respectivas funções.



Fig. 5.5 – Menu de Controle.

5.2 Controle de Visualização e Coordenadas

No canto inferior esquerdo e na borda inferior da interface do programa encontram-se os menus para o controle de visualização e para o controle do espaço de coordenadas.

5.2.1 Menu de Visualização

Este menu é responsável pelo controle da visualização do modelo, podendo ser controlada pelos botões de *Zoom* ou por uma escala que define o espaço de trabalho (Figura 5.6).

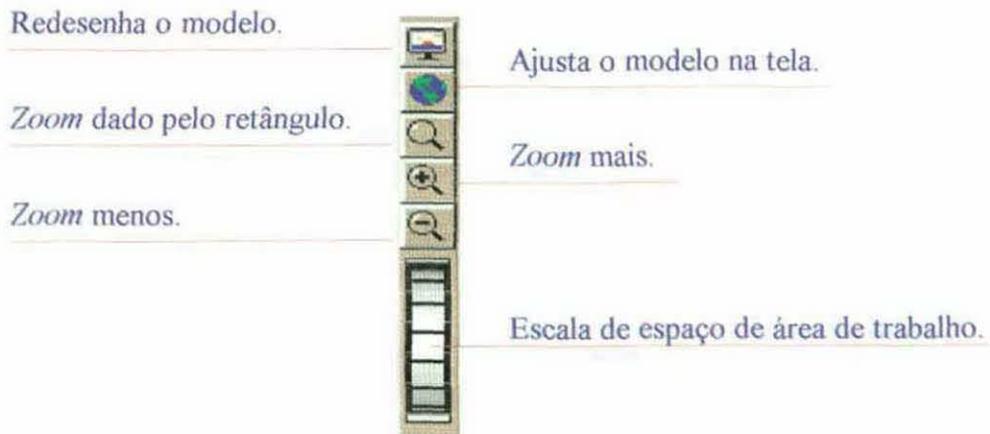


Fig. 5.6 – Menu de Visualização.

5.2.2 Menu de Controle de Coordenadas

Neste menu encontram-se as informações referentes ao espaço de coordenadas de trabalho e funções que controlam a posição do cursor do “mouse” (Figura 5.7).

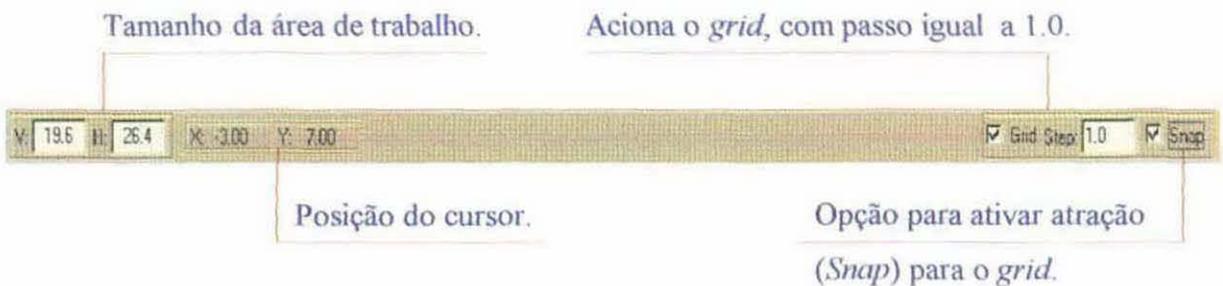


Fig. 5.7 - Menu de Controle de Coordenadas.

5.3 Fase de Pré-processamento

A fase de pré-processamento consiste na criação e modificação do modelo estrutural. O programa de análise estrutural FTOOL possui um editor gráfico interativo bastante inteligente para a criação do reticulado do modelo. Isto se baseia em uma estrutura de dados poderosa e eficiente, baseada em topologia computacional [Mäntylä, 1988]. Os menus a serem estudados com mais detalhes nesta fase são:

- Edição;
- *Undo e Redo*;
- Atributos do modelo;
- Carregamentos.

Os menus que definem as propriedades dos elementos pertencentes ao modelo (nós e barras) ativam um submenu que é mostrado no lado direito da tela. Mais adiante, estes submenus serão mostrados com mais detalhes.

5.3.1 Menu de Edição

Este menu é composto por cinco botões (Figura 5.8). Por meio dele o usuário define a geometria do modelo, ou seja, as posições dos membros e nós. Esta definição pode ser realizada tanto pelo “mouse” quanto pelo teclado. Para isso existe um botão que ativa o teclado caso o usuário prefira definir o modelo usando esse recurso. A inserção de uma barra é feita indicando as posições dos dois nós extremos do membro. Se não existir um nó na posição extrema, este é criado automaticamente. Um nó também pode ser inserido em um membro. Isto é usado, por exemplo, para aplicar uma carga concentrada no interior de um membro, que neste caso é dividido em dois. Outra utilidade da inserção de um nó no interior da barra é a aplicação de uma carga distribuída (uniforme ou linear) parcialmente em um vão.

A necessidade de criação de um nó no interior de um membro não é uma limitação do FTOOL. Na verdade esta é uma estratégia para simplificar a interface com o usuário. Com isso evita-se que o usuário tenha que especificar os parâmetros para o posicionamento de cargas

concentradas em membros ou cargas distribuídas parciais. Por isso, O FTOOL só permite as cargas distribuídas abrangendo todo o comprimento de um membro.



Fig. 5.8 – Menu de Edição.

5.3.2 Menu de *Undo* e *Redo*

Qualquer seqüência de passos de modelagem pode ser desfeita usando o botão *Undo*, e também a última tarefa desfeita pode ser refeita usando o botão *Redo*. Os botões deste menu são mostrados na Figura 5.9.



Fig. 5.9 – Menu de *Undo* e *Redo*.

5.3.3 Menu de Atributos do Modelo

Este é um dos menus mais importantes do programa (Figura 5.10). Através dele todos os atributos necessários para a elaboração do modelo são introduzidos, exceto o carregamento. Este menu é composto por quatro botões, sendo que cada um deles aciona um

submenu específico no lado direito da tela. É neste menu que o usuário define e aplica as propriedades das barras e as condições de apoio dos nós. As sub-seções que se seguem descrevem em detalhe as opções do menu e seus respectivos submenus. O submenu com as propriedades dos materiais foi implementado neste trabalho. Já o submenu com as propriedades geométricas das seções transversais das barras foi inteiramente refeito. Isto porque as propriedades geométricas dos perfis tipo “I” e as propriedades dos materiais são indispensáveis no dimensionamento de estruturas metálicas.

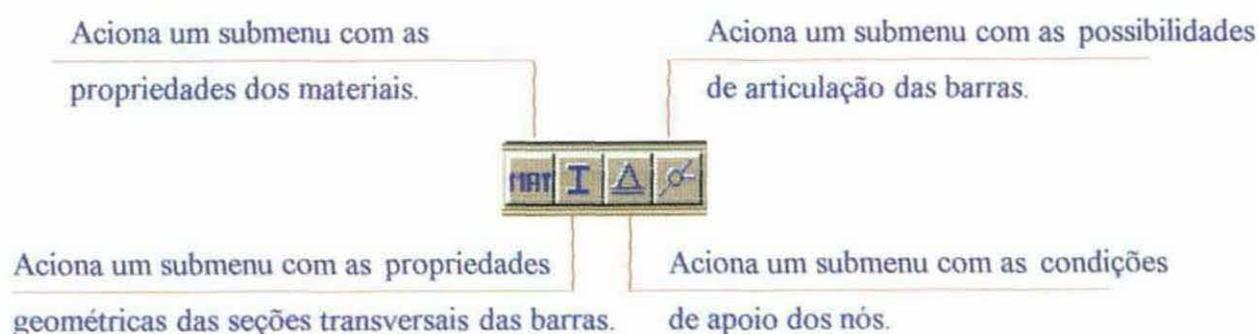


Fig. 5.10 – Menu de Atributos do Modelo.

5.3.3.1 Submenu de Propriedades dos Materiais

Através deste submenu, o usuário define as propriedades dos materiais do modelo, e alguns parâmetros de cálculo a serem utilizados no dimensionamento dos membros. A Figura 5.11 mostra o submenu que é acionado quando o botão de propriedades dos materiais é selecionado.

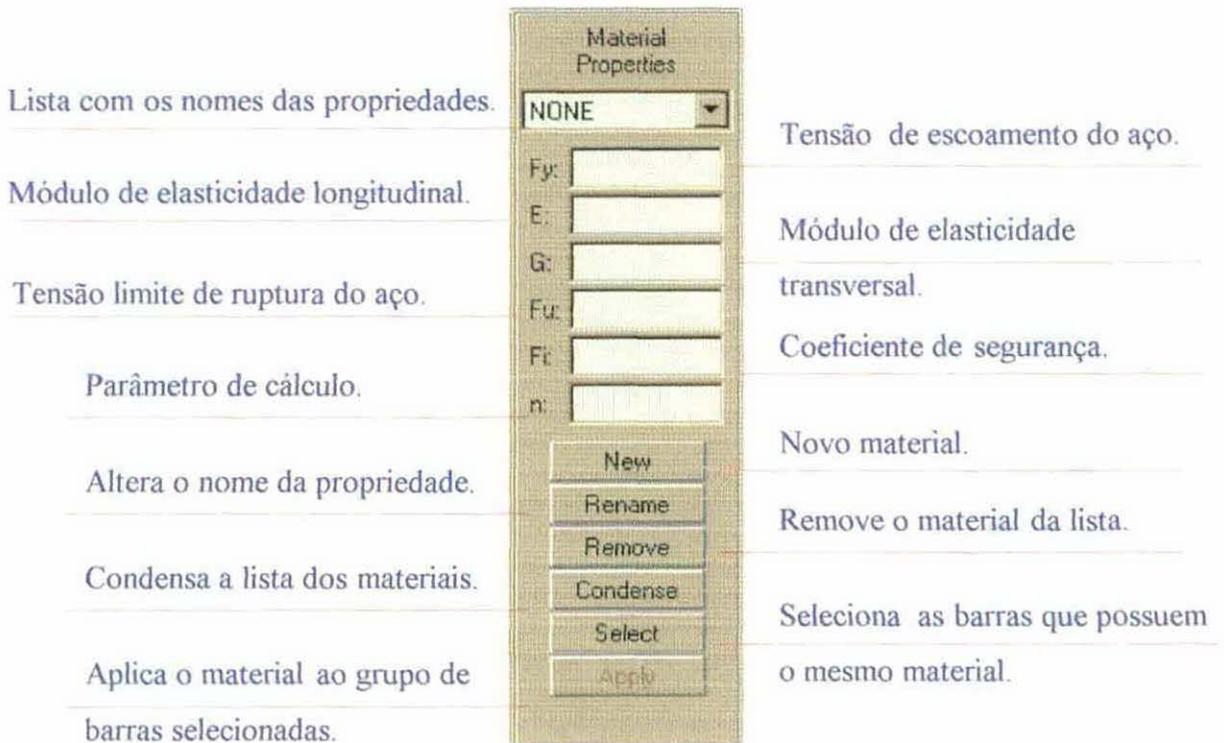


Fig. 5.11 – Submenu de propriedades dos materiais.

Algumas observações podem ser feitas:

1. Quando o botão *New* é acionado, ele carregará um outro submenu pedindo ao usuário que informe o nome do material a ser aplicado (Figura 5.12). Um novo bloco de propriedade de materiais é criado e adicionado à lista de propriedades;



Fig. 5.12 – Submenu para um novo material.

2. O botão *Apply* é utilizado para atribuir a propriedade de material corrente ao grupo de barras selecionadas. Vale lembrar que este botão só encontra-se ativo quando pelo menos uma barra do modelo estiver selecionada;
3. O efeito de condensar a lista de materiais significa eliminar todos os materiais que não estão sendo utilizados pelas barras do modelo;
4. Na versão original do FTOOL, o módulo de elasticidade longitudinal estava situado no submenu das propriedades das seções transversais. No entanto, nesta nova versão optou-se por agrupar o módulo de elasticidade, com as outras nas propriedades dos materiais que foram introduzidas no programa.

5.3.3.2 Submenu de Propriedades Geométricas das Seções Transversais

Este submenu tem a finalidade de permitir ao usuário definir as propriedades geométricas das barras que fazem parte do modelo exibir as principais características do perfil metálico utilizado. A Figura 5.13 mostra como estão distribuídas estas características neste submenu, que foi completamente refeito o trabalho para atender as necessidades do dimensionamento de estruturas metálicas.

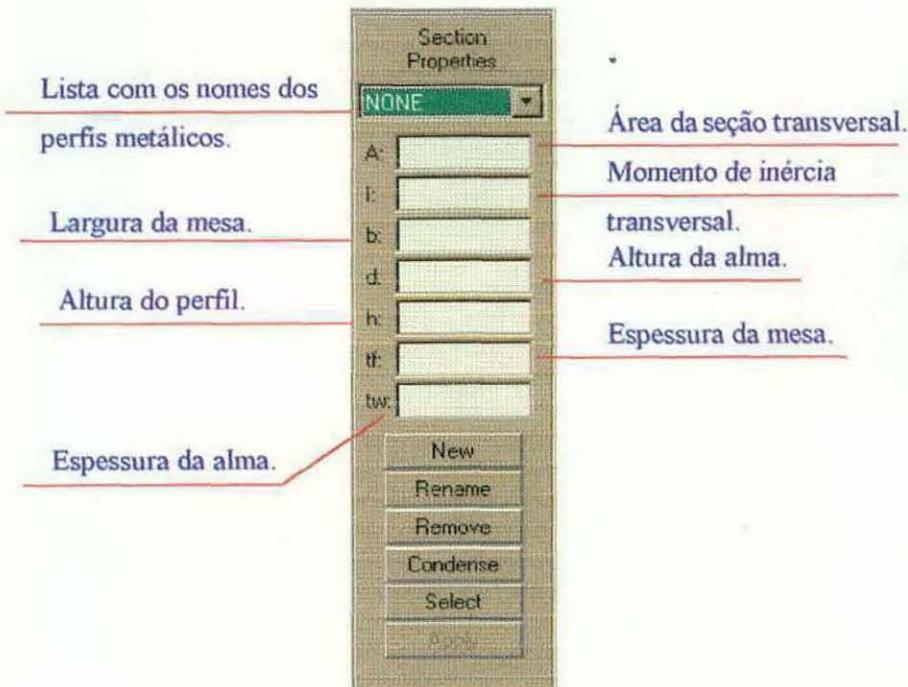


Fig. 5.13 - Submenu das propriedades geométricas das seções transversais das barras.

Os demais botões têm as mesmas funções do submenu das propriedades dos materiais da barra mostradas na seção anterior. A única diferença encontra-se no submenu que define uma nova propriedade de seção transversal (Figura 5.14), que é acionado pelo botão *New*. Foi implementado um botão *Table* cuja função é carregar um diálogo através do qual o usuário seleciona o perfil metálico de seção transversal a ser criada (Figura 5.15).

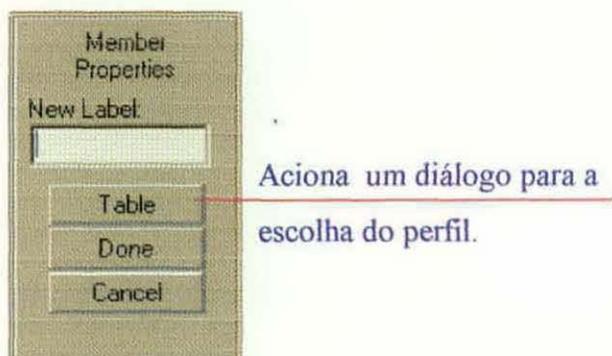


Fig. 5.14 - Submenu para uma nova propriedade.

O diálogo da Figura 5.15 mostra todos os perfis metálicos tipo “I” existentes em uma tabela lida de um arquivo, com suas respectivas propriedades geométricas. O programa guarda todas essas características na memória e mostra ao usuário apenas aquelas consideradas mais importantes no submenu definido na Figura. 5.13.

Pode-se observar na Figura 5.15 a existência de dois quadros. Um localizado à esquerda da tela, contendo todos os nomes dos perfis metálicos da tabela de acordo com o seu tipo (VS, CS e CVS), e o outro, situado à direita da tela, contendo todas as propriedades geométricas do perfil selecionado. O usuário tem a opção de mudar o eixo principal do perfil, para isso basta ele escolher entre os eixos “X” e “Y”. Vale lembrar que as propriedades são atualizadas automaticamente tanto na mudança do nome do perfil, como do seu eixo. Observa-se que existem dois outros botões. O *Select* que seleciona o perfil e retorna para o submenu da Figura 5.14 o nome do perfil com suas características geométricas e o *Quit*, caso o usuário desista da seleção de um perfil metálico.

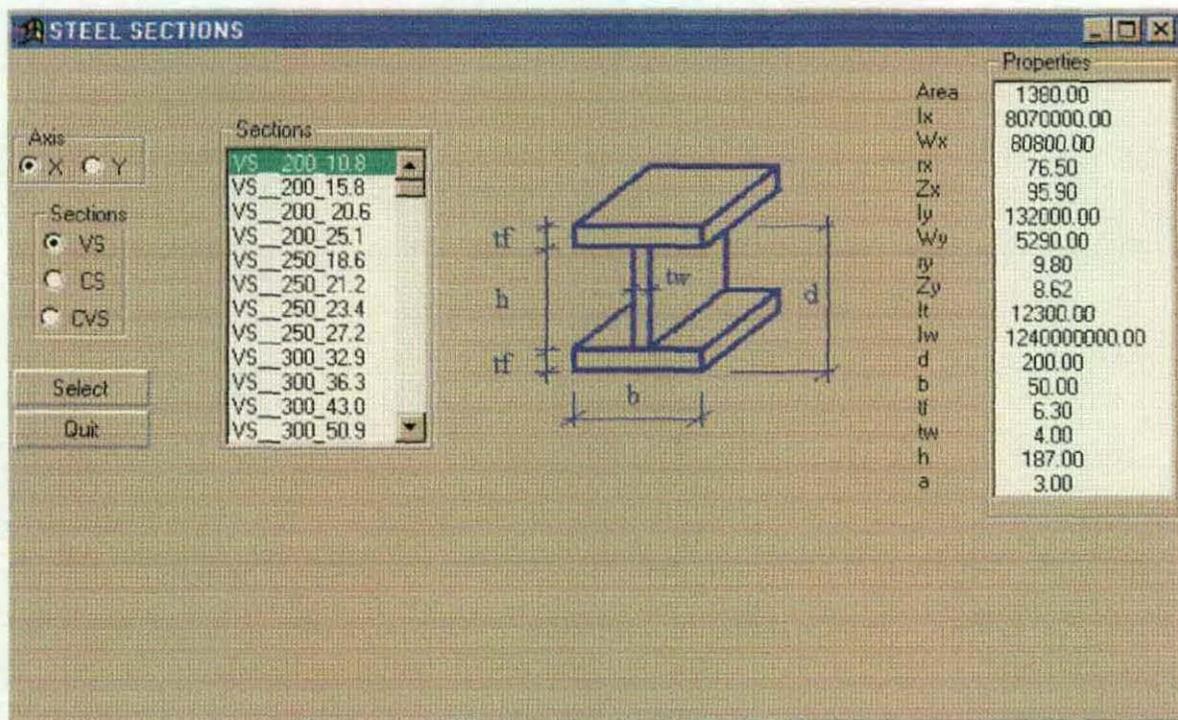


Fig. 5.15 - Diálogo para a escolha da seção de um perfil metálico.

5.3.3.3 Submenu de Condições de Apoio dos Nós

Através deste submenu o usuário define-se as componentes de deslocamentos na direção "x" e "y" e a rotação em torno do eixo "z" estão liberados ou não. Define-se também o ângulo do apoio, bem como se há algum deslocamento ou rotação prescrita. A Figura 5.16 mostra a disposição deste submenu.

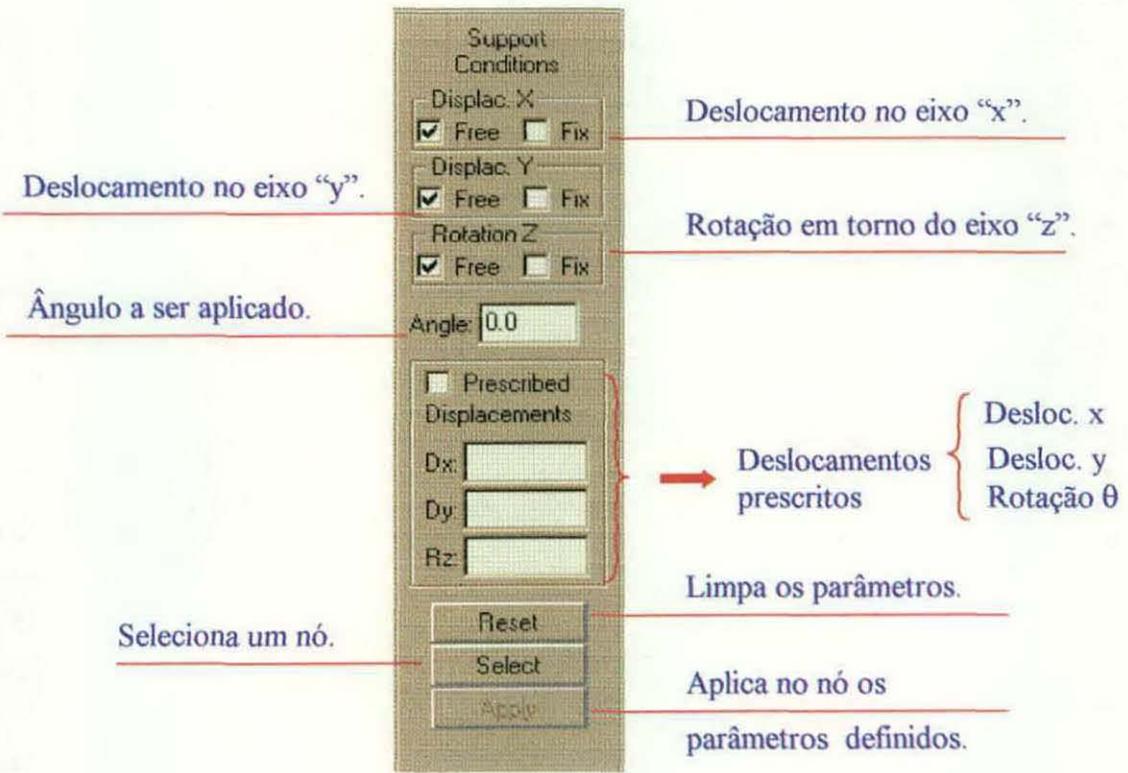


Fig. 5.16 - Submenu de condições de apoio dos nós.

5.3.3.4 Submenu com as Possibilidades de Articulação das Barras

O programa oferece vários tipos de articulações que o usuário pode aplicar na estrutura. Esses tipos de articulações estão descritos na Figura 5.17.

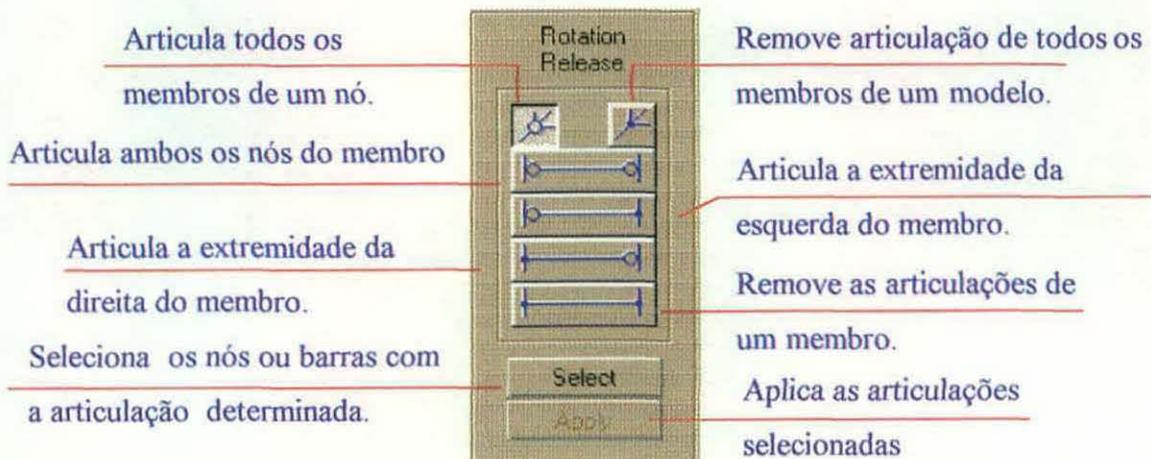


Fig.5.17 – Submenu com as possibilidades de articulação das barras.

5.3.4 Menu de Carregamentos

Este menu serve para definir os tipos de carregamentos a serem atribuídos aos elementos do modelo (Figura 5.18). Divide-se em três botões, sendo um para os carregamentos nodais, outro para os carregamentos uniformemente distribuídos em barras e o último para os carregamentos linearmente distribuídos em barras. Cada um deles aciona um submenu situado no lado direito da tela, onde o usuário define as características do carregamento.

Aciona o submenu para
carregamentos nodais.

Aciona o submenu para carregamentos
uniformemente distribuídos.



Aciona o submenu para
carregamentos linearmente distribuídos.

Fig. 5.18 – Menu de Carregamentos.

5.3.4.1 Submenu do Carregamento Nodal

Caso o modelo apresente algum carregamento nodal, ou seja, forças concentradas (força horizontal, força vertical ou momento), é neste submenu que se define seus valores (Figura 5.19).

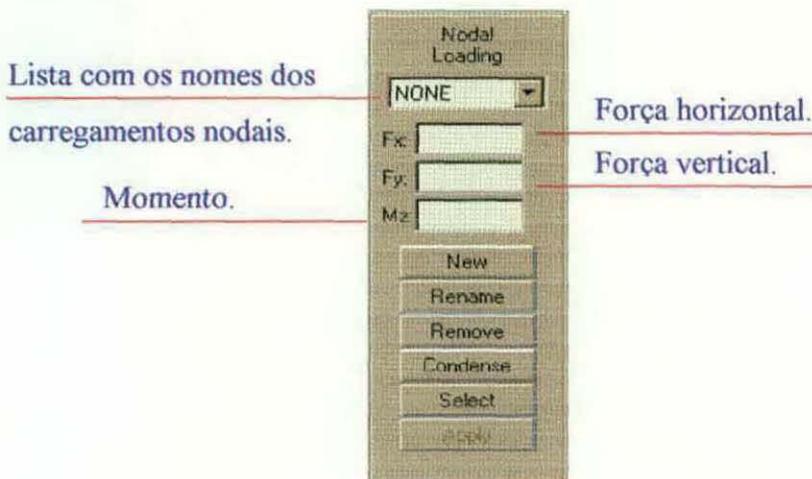


Fig. 5.19 – Submenu para a definição dos carregamentos nodais.

5.3.4.2 Submenu do Carregamento Uniforme

A Figura 5.20 mostra o submenu onde se define os valores dos carregamentos uniformemente distribuídos, a serem aplicados nos membros do modelo. A carga distribuída pode ter componentes na direção do eixo “x” e do eixo “y”, que se referem às direções dos eixos globais da estruturas ou dos eixos locais das barras aplicadas, dependendo da opção de direção (global ou local).

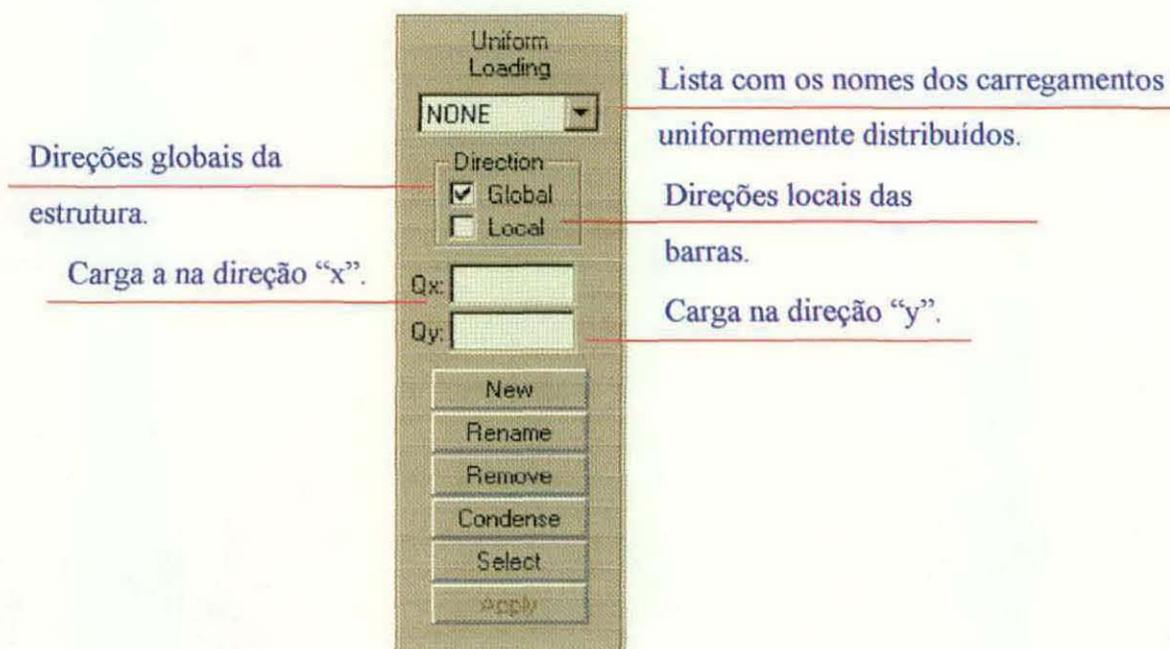


Fig. 5.20 – Submenu de carregamento uniforme.

5.3.4.3 Submenu do Carregamento Linear

A Figura 5.21 mostra o submenu onde se define os valores dos carregamentos linearmente distribuídos, a serem aplicados nos membros do modelo. A carga linear também pode ter componentes na direção do eixo “x” e do eixo “y”, que se referem às direções dos

eixos globais da estruturas ou dos eixos locais das barras aplicadas, dependendo da opção de direção (global ou local).

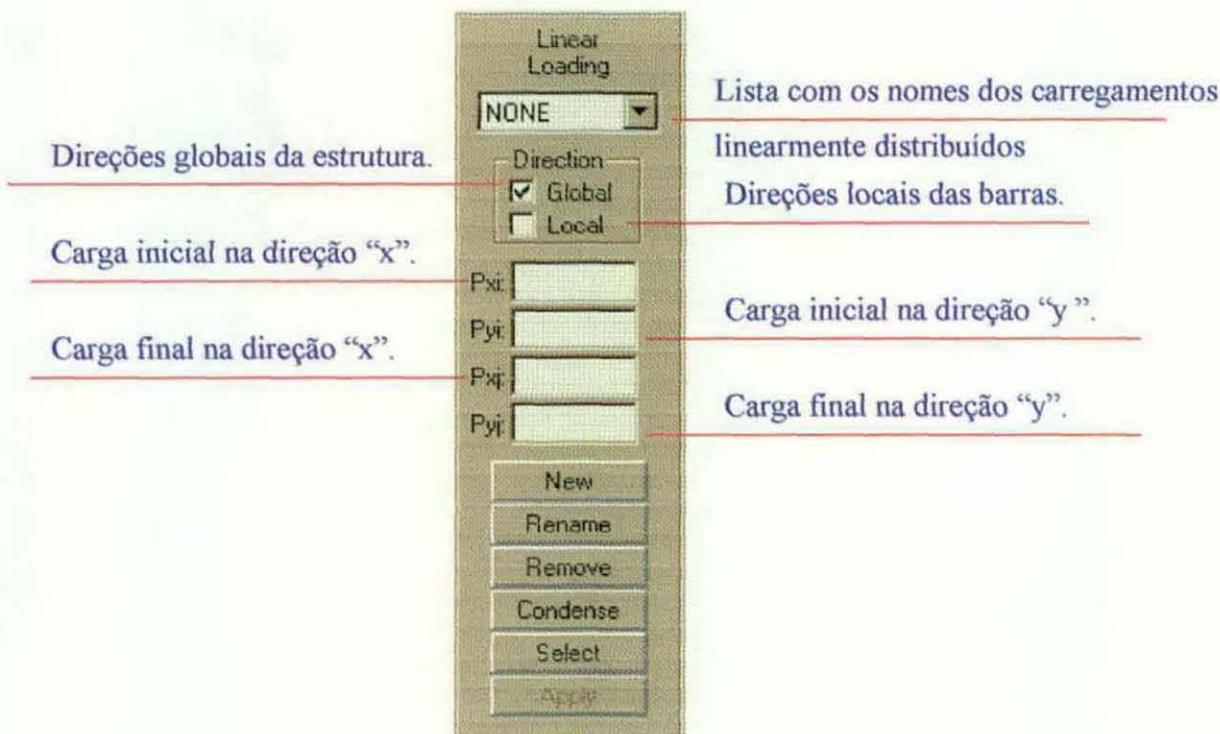


Fig. 5.21 – Submenu de carregamento linear.

5.4 Fase de Pós-processamento

A fase de pós-processamento consiste na visualização dos resultados de análise do modelo gerado. Em uma análise estrutural típica de um modelo, os resultados da simulação são a configuração deformada da estrutura, os diagramas de esforços internos (momentos fletores, forças cortantes e forças normais), os valores numéricos dos deslocamentos e esforços internos e os valores das reações de apoio. Neste trabalho também foi implementado o dimensionamento da estrutura com a impressão de uma memória de cálculo. Durante a execução do programa estes resultados podem ser consultados e visualizados em qualquer estágio da simulação, e em qualquer ordem.

A facilidade com que os resultados da análise podem ser visualizados proporciona um entendimento adequado do comportamento estrutural pelo usuário. Com a implementação realizada, o usuário poderá visualizar os membros que passaram no dimensionamento e com suas respectivas verificações.

O usuário pode ir e voltar entre as fases de pré-processamento e pós-processamento, testando diversas concepções, geometrias e atributos para a estrutura, sempre interpretando os resultados destes experimentos.

Para a realização do pós-processamento existem três botões que acionam a visualização do esforços internos e outro que aciona a configuração deformada do modelo gerado. Neste trabalho foram acrescentados a este menu mais dois botões, sendo um deles responsável pelo dimensionamento do pórtico metálico e outro para a impressão da memória de cálculo. Vale ressaltar que estes botões só serão ativados quando terminada a fase de pré-processamento. As Figuras 5.22 e 5.23 mostram o conjunto de botões pertencentes a este menu. Em seguida são exemplificados as opções do pós-processamento.

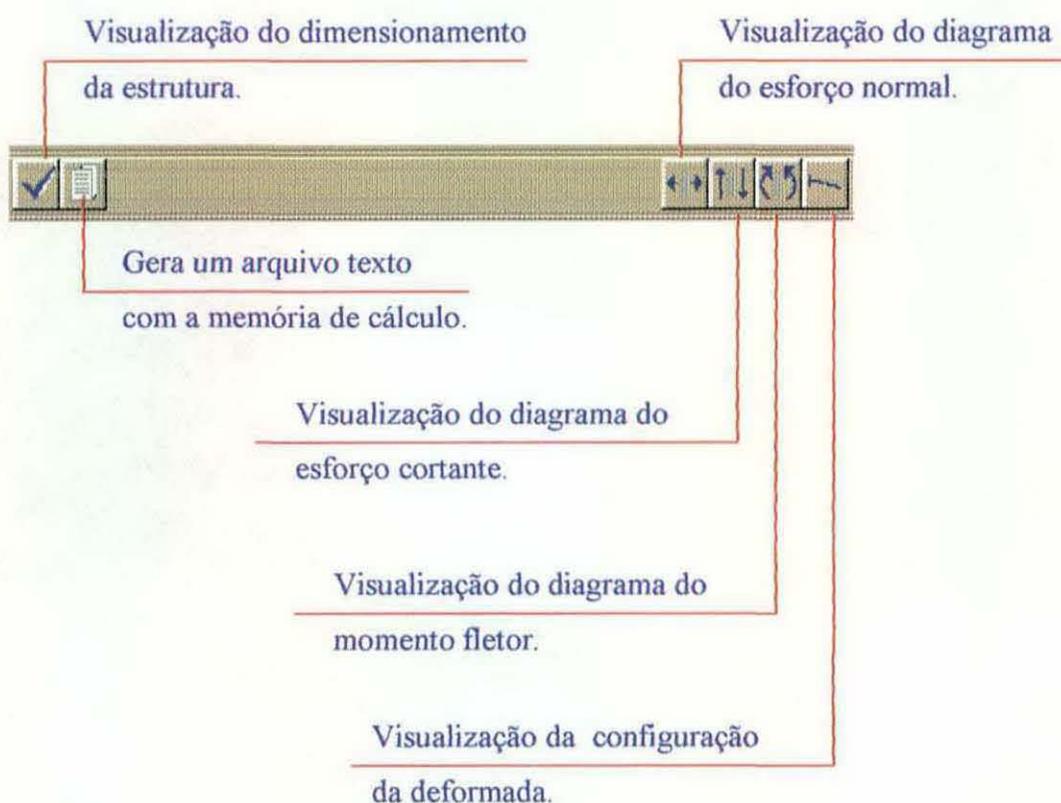
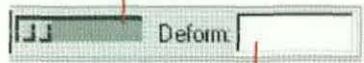


Fig. 5.22 – Menu da fase de pós-processamento.

Potenciômetro responsável
pela ampliação.



Fator de escala para a
configuração da deformada.

Fig. 5.23 – Menu de ampliação dos diagramas de esforços e da deformada.

A Figura 5.24 mostra a tela com o diagrama de forças normais de um modelo.

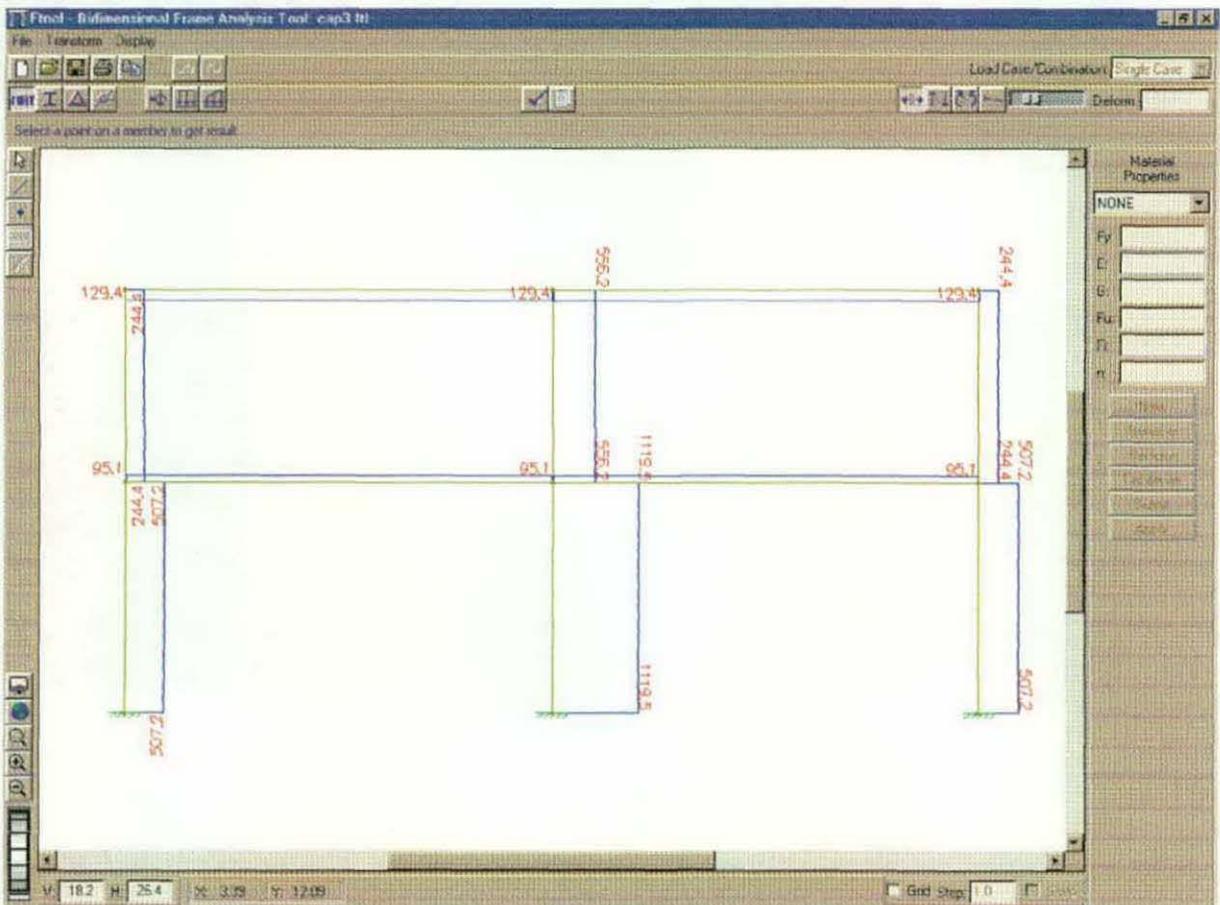


Fig. 5.24 – Tela de pós-processamento com diagrama de forças normais [kN].

A Figura 5.25 mostra a tela com o diagrama de forças cortantes do modelo.

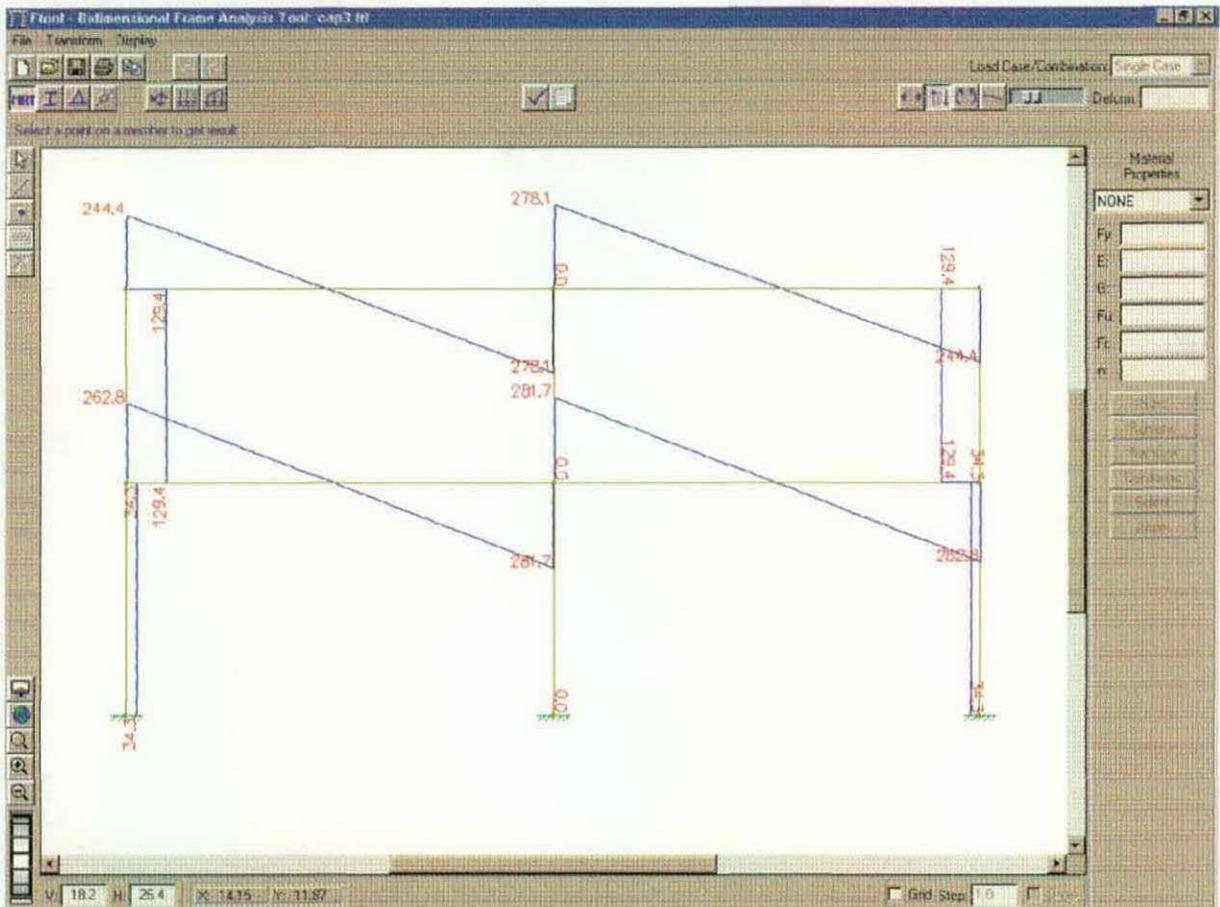


Fig. 5.25 – Tela de pós-processamento com diagrama de forças cortantes [kN].

A Figura 5.26 mostra a tela com o diagrama de momentos fletores do modelo.

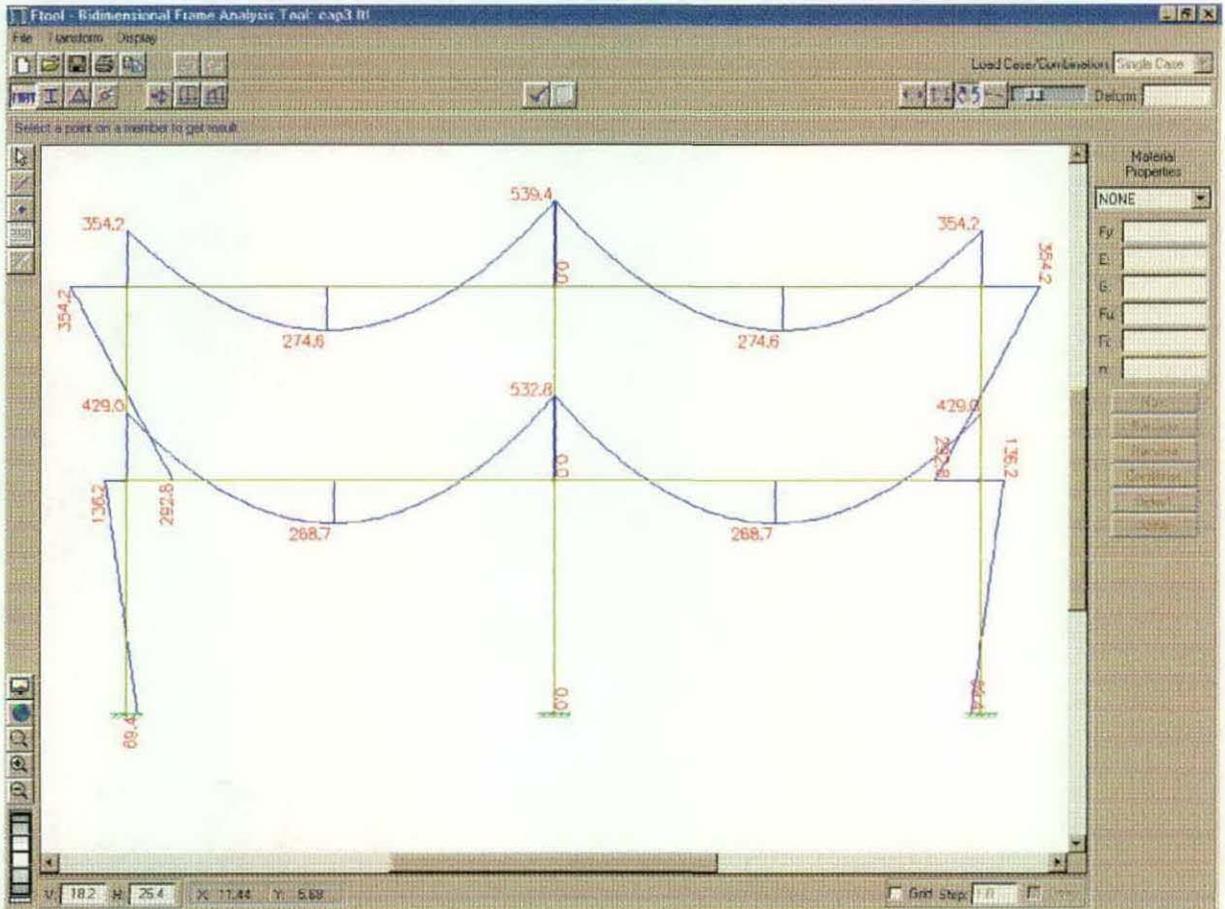


Fig. 5.26 – Tela de pós-processamento com o diagrama de momentos fletores [kN.m].

A Figura 5.27 mostra a tela com a configuração deformada do modelo.

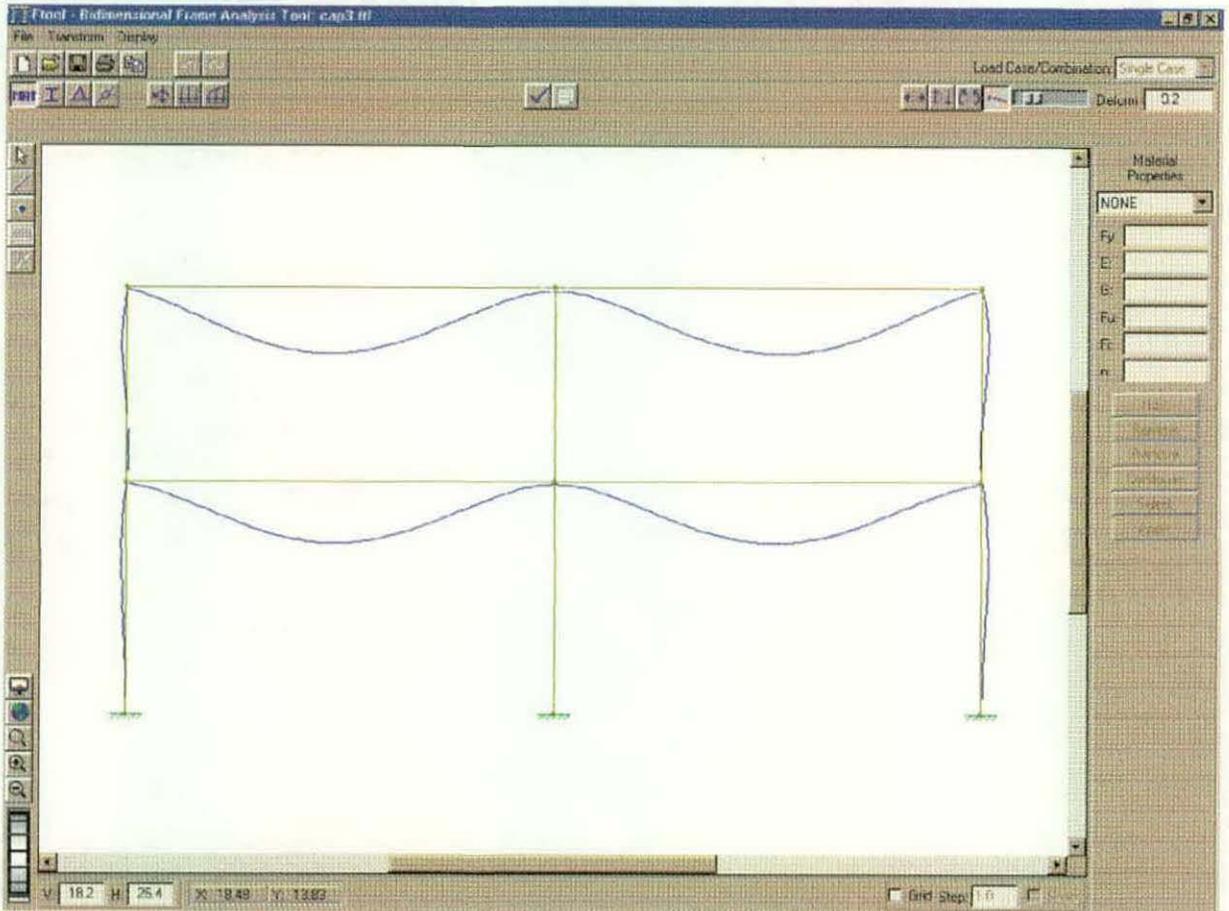


Fig. 5.27 – Tela de pós-processamento com a configuração deformada do modelo.

Quando é realizado o dimensionamento do modelo, o usuário pode optar por dois tipos de visualização da estrutura metálica. Caso nenhuma das barras do modelo esteja selecionada, o programa exibe o modelo em cores, sendo a cor de cada barra definida de acordo com os resultados das verificações nela realizada (Figura 5.28). O usuário pode escolher a visualização do modelo para as seguintes situações:

- Resistência da seção à força de compressão ou tração;
- Resistência da seção à flambagem no plano;
- Resistência da seção à flambagem fora do plano;
- Resistência da seção ao esforço cisalhante.

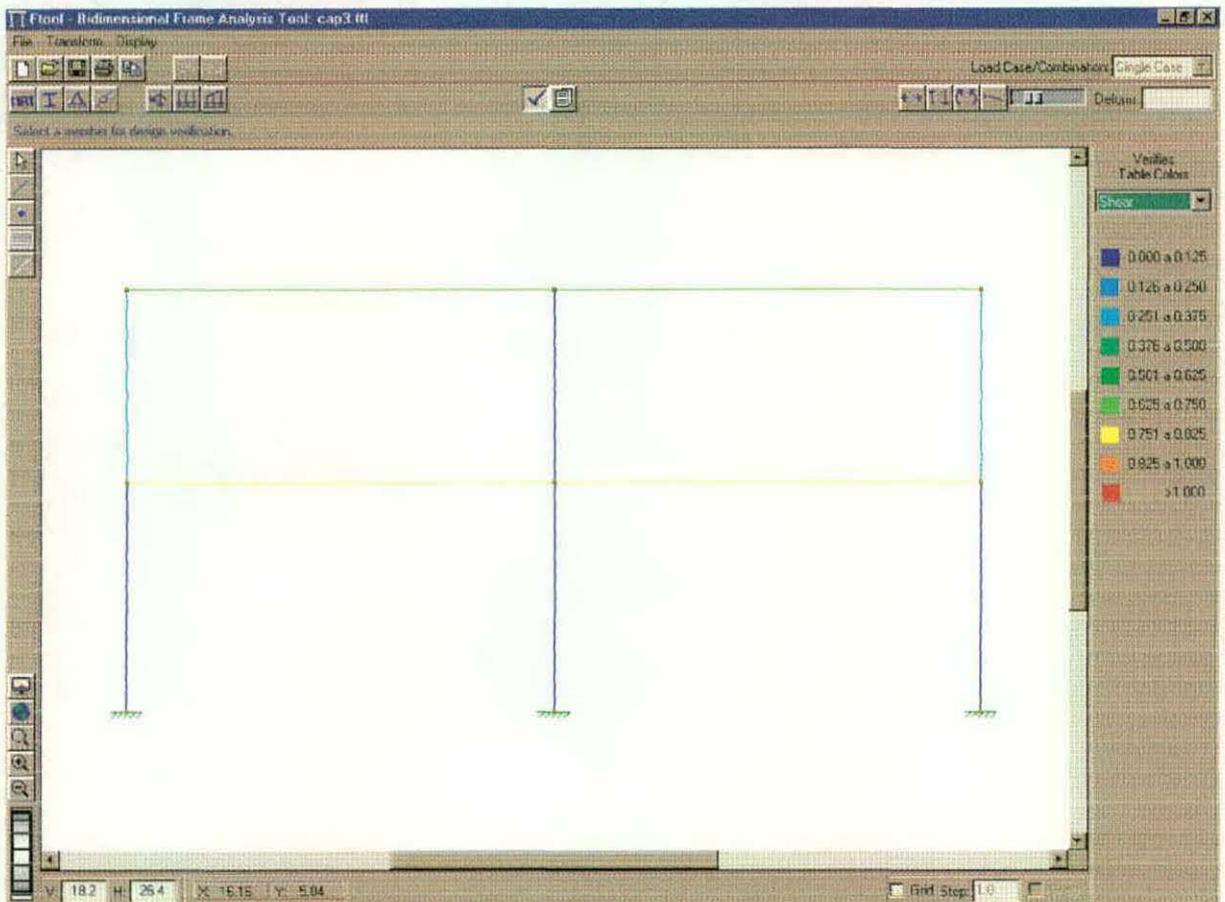


Fig. 5.28 – Tela de pós-processamento com o diagrama das verificações.

Quando o usuário seleciona uma barra específica do modelo, o programa aciona no lado direito da tela um submenu que apresenta a classe do perfil, os valores das verificações realizadas, os deslocamentos verticais e laterais e uma lista com dez perfis que atendem às solicitações impostas ao modelo. Esta lista contém as dez seções com os menores valores de área para o tipo de perfil selecionado. Este submenu possibilita também ao usuário substituir qualquer barra ou grupo de barras sem ter que voltar a fase de pré-processamento, bastando para isso simplesmente acionar um botão, a Figura 5.29 mostra como esta distribuído este submenu.

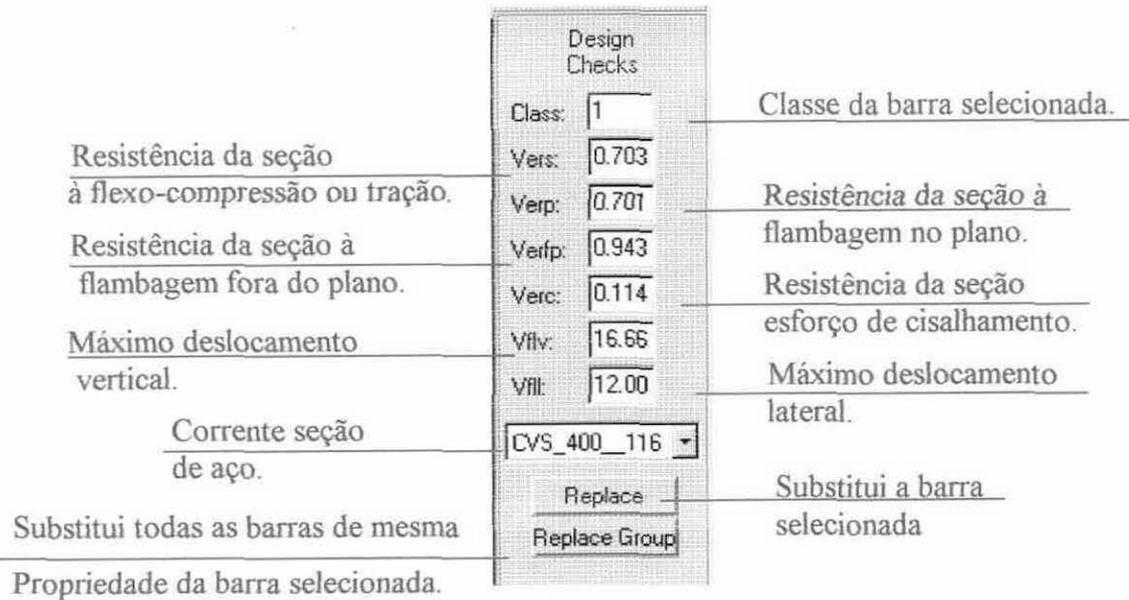


Fig. 5.29 – Submenu das verificações das barras do modelo.

Os resultados das interações realizadas na estrutura, mostrados na figura 5.28 com seus respectivos valores foram calculados pelas fórmulas exibidas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Interações realizadas na estrutura.

Interação	Valor	Equações
Resistência da Seção à Flexo-Compressão ou Tração	0.703	(2.9 e 2.10)
Resistência da Seção à Flambagem no Plano	0.710	(2.18 e 2.19)
Resistência da Seção à Flambagem Fora do Plano	0.943	(2.31 a 2.34)
Resistência da Seção ao Esforço Cisalhante	0.114	(2.39)
Máximo Deslocamento Vertical	16.66	(2.40)
Máximo Deslocamento Lateral	12.00	(2.41)

No Capítulo 6 serão apresentados três tipos de exemplos de dimensionamento de pórticos metálicos, mostrando as alternativas existentes no programa.

CAPÍTULO 6

EXEMPLOS DE DIMENSIONAMENTO

Este capítulo apresenta três exemplos do uso do programa FTOOL para dimensionamento de pórticos planos. Primeiro é apresentado um exemplo completo de dimensionamento de um pórtico indeslocável lateralmente, através do processo iterativo proposto (vide Capítulo 2). O segundo exemplo apresenta um pórtico deslocável através dos conceitos de rigidez e deformabilidade estrutural, U1 e U2 adotados pela Norma Canadense CAN/CSA-S16.1-94. Finalmente um pórtico deslocável é projetado através de uma análise P-Delta.

6.1 Dimensionamento Tradicional de um Pórtico Plano Indeslocável

De forma a ilustrar o uso do programa FTOOL, um exemplo de dimensionamento de um pórtico indeslocável composto de dois pavimentos (seis viga, oito colunas e dois tirantes), mostrado na Figura 6.1, será apresentado a seguir. As cargas utilizadas na estrutura foram fatoradas de acordo com a combinação equação (6.1), presente na Norma Canadense CAN/CSA-S16.1-94:

$$1.25D + 1.05(L_a + W) \quad (6.1)$$

onde:

D → Carga permanente;

L_a → Carga acidental;

W → Carga de vento.

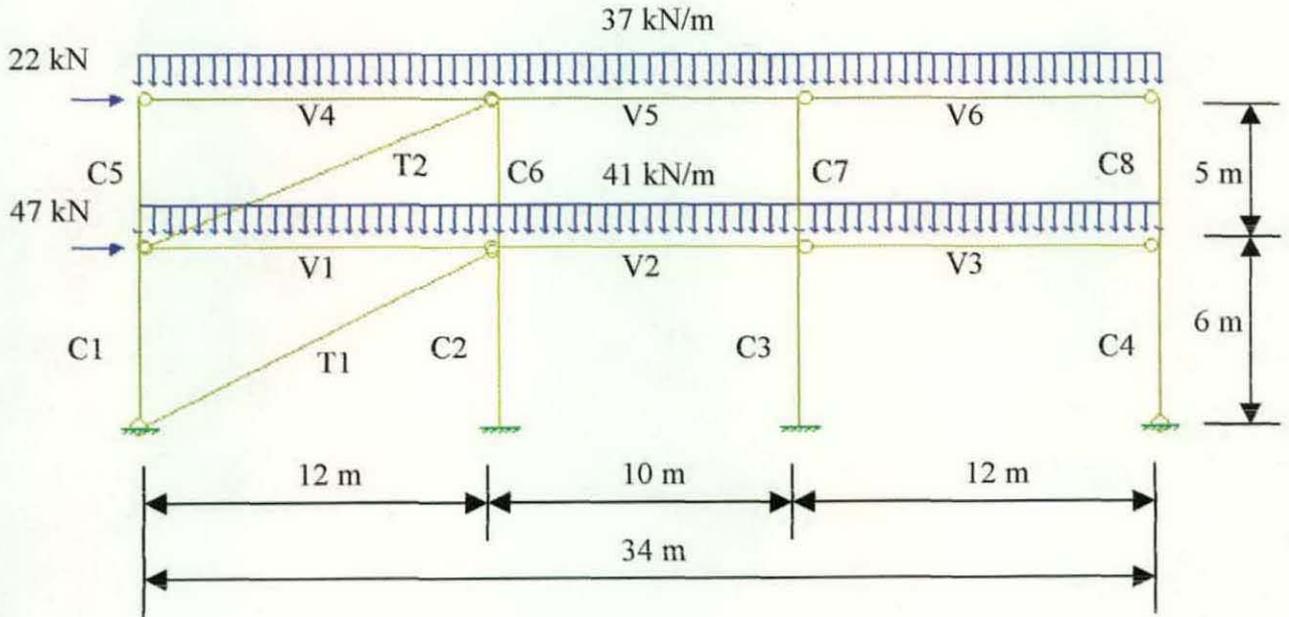


Fig. 6.1 - Pórtico com seus carregamentos ponderados (1º exemplo).

Os carregamentos aplicados no pórtico e a combinação realizada neles podem ser visualizadas na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Cargas com suas respectivas combinações (1º exemplo).

		Normal (kN)	Ponderada (kN)			Normal (kN)	Ponderada (kN)
2º Piso	D	10.80	≅ 13.50	1º Piso	D	18.00	≅ 22.00
	L	22.50	≅ 23.50		L	18.00	≅ 19.00
	W	17.50	≅ 18.40		W	38.00	≅ 39.90

Aplicando o conceito de carga “notional” introduzido pela Norma Canadense CAN/CSA-S16.1-94 e adicionando-as à parcela da carga de vento fatorada, tem-se a carga lateral final a ser aplicada nos pavimentos dos pórticos: 22.00 kN para o 2º piso e 47 kN para o 1º piso.

Adotaram-se as seguintes propriedades do material para este exemplo:

- $F_y = 3 \times 10^5 \text{ kN/m}^2$ (Tensão de escoamento);
- $E = 2.05 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$ (Módulo de elasticidade transversal);
- $G = 7.7 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$ (Módulo de cisalhamento);
- $F_u = 4 \times 10^5 \text{ kN/m}^2$ (Tensão limite de ruptura do aço);
- $\phi = 0.9$ (Coeficiente de resistência);
- $N = 1.34$ (Parâmetro de cálculo do perfil laminado).

Todos os perfis usados no pórtico são compostos de perfis soldados, pré-dimensionados de acordo com a relação de vão/altura igual a 20. Isto conduz ao uso de perfis tipo VS 500x72.6 (para as vigas V2 e V5), VS 600x111 (para as vigas V1,V3, V4 e V6), CVS 300x47.5 (para as colunas C1,C2, C3 e C4), CVS 250x33.8 (para as colunas C5,C6, C7 e C8). Para os tirantes (T1 e T2) usou-se o perfil mais leve da tabela das vigas soldadas, ou seja a VS 200x10.8. Os diagramas de momentos fletores e de forças cortantes, gerados a partir de uma análise linear e elástica, estão representados nas Figura 6.2 e 6.3 e na Tabela 6.2.

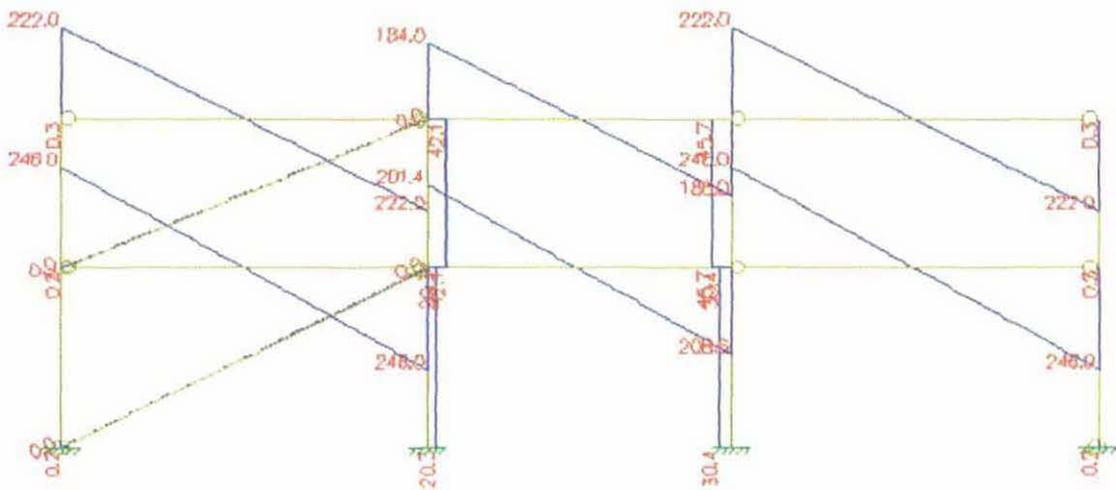


Fig. 6.2 - Diagrama de forças cortantes (primeira análise do 1º exemplo) [kN].

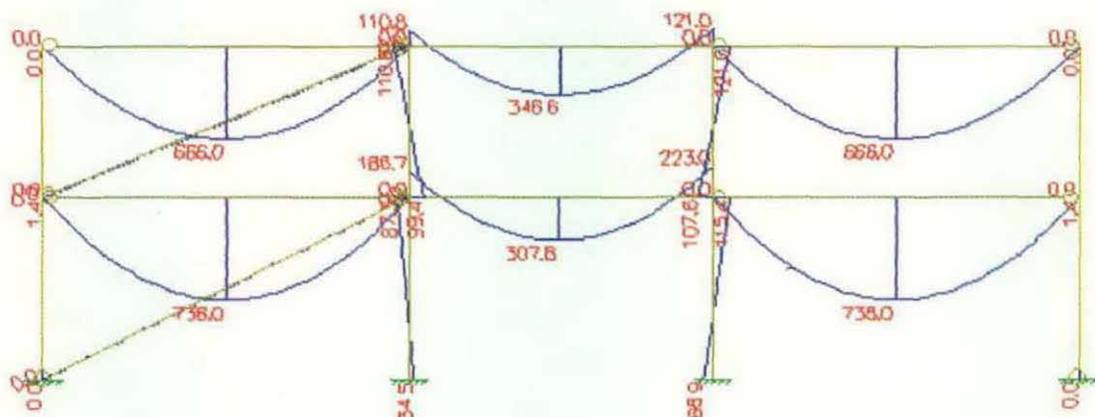


Fig. 6.3 - Diagrama de momentos fletores (primeira análise do 1º exemplo) [kN.m].

Tabela 6.2 - Esforços internos e deslocamentos máximos presentes nas barras do modelo após a primeira análise (1º exemplo).

Barra	V inicial (kN)	V final (kN)	M inicial (kN.m)	M final (kN.m)	$\Delta_{Vertical}$ (mm)	$\Delta_{Lateral}$ (mm)
C1	0.2	0.2	0.0	1.4	0.0	5.6
C2	20.3	20.3	34.5	87.3	0.0	5.6
C3	30.4	30.4	68.9	115.4	0.0	11.1
C4	0.2	0.3	0.0	1.4	0.0	5.6
C5	0.3	0.3	1.4	0.0	0.0	3.3
C6	42.2	42.2	99.4	110.8	0.0	3.8
C7	45.7	45.7	107.6	121	0.0	2.9
C8	0.3	0.3	1.4	0.0	0.0	2.9
V1	246	246	0.0	0.0	60.7	0.0
V2	201.4	208.6	186.7	223	35.9	0.0
V3	246	246	0.0	0.0	60.7	0.0
V4	222	222	0.0	0.0	56.9	0.0
V5	184.8	188	110.8	121	45	0.0
V6	222	222	0.0	0.0	56.9	0.0

A partir desses esforços passa-se ao dimensionamento de cada barra da estrutura, onde os resultados dos estados limites últimos estão apresentados nas Figuras 6.4 a 6.7. Estes resultados são os fatores de resistências calculados através das expressões dos diferentes tipos de interações realizadas na estrutura, como está demonstrado no Capítulo 2. Os estados limites de utilização correspondentes, os máximos deslocamentos laterais e as flechas são apresentados na memória de cálculo gerada pelo programa.

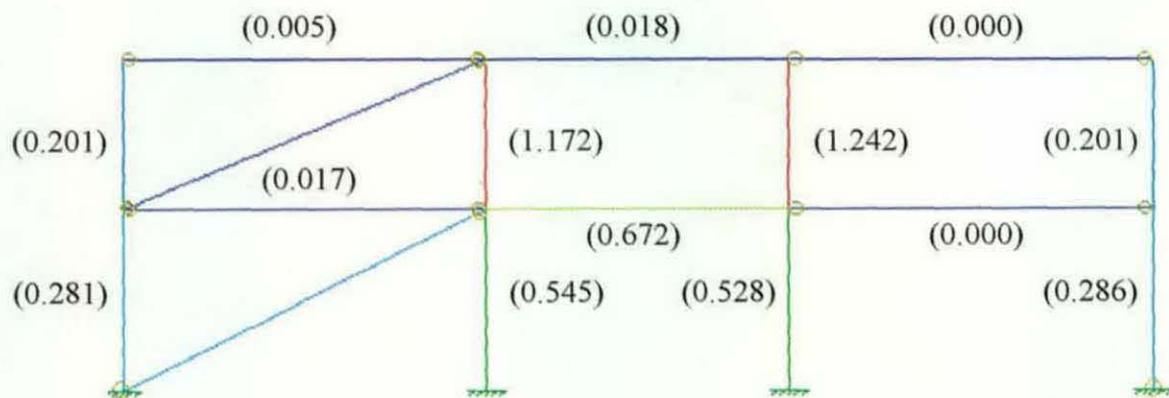


Fig. 6.4 – Fator de resistência axial da seção (primeira análise do 1º exemplo).

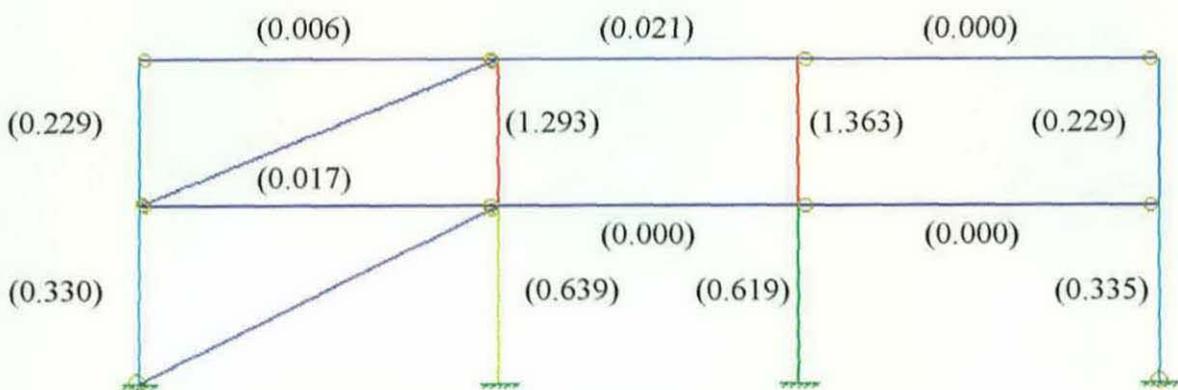


Fig. 6.5 – Fator de resistência à flambagem no plano (primeira análise do 1º exemplo).

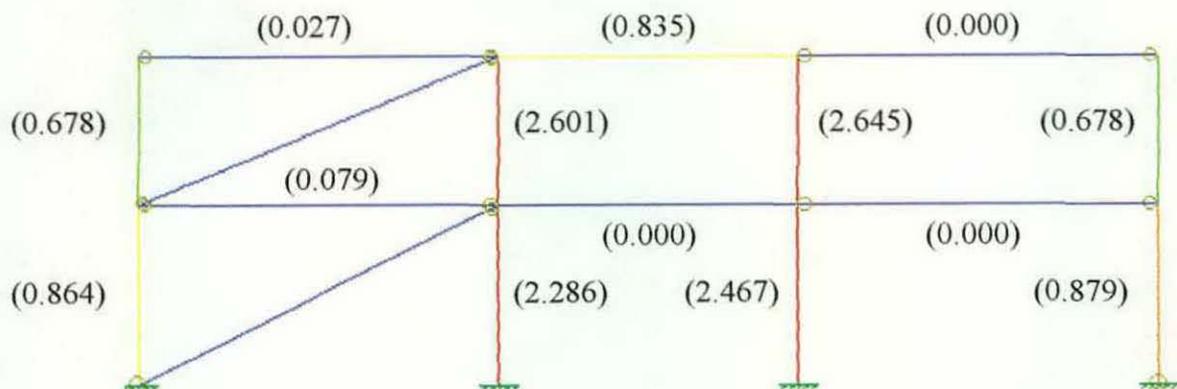


Fig. 6.6 – Fator de resistência à flambagem fora do plano (primeira análise do 1º exemplo).

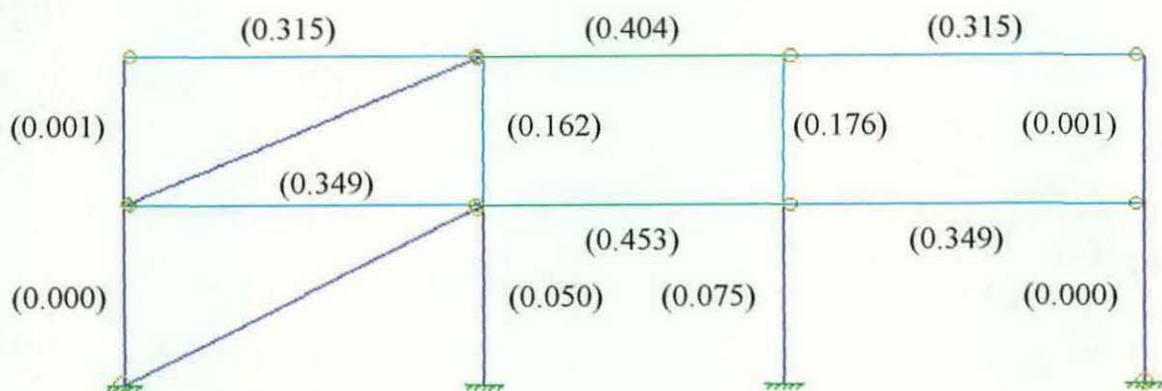


Fig. 6.7 – Fator de resistência da seção ao esforço cortante (primeira análise do 1º exemplo).

De acordo com as análises destes resultados, verifica-se que as colunas C6 e C7 não atendem ao estado limite último de estabilidade global. As colunas C2, C3, C6 e C7 e finalmente as colunas C6 e C7 não atendem ao estado limite último de flexo-compressão e ou flexo-tração. Com base nestes resultados foi então executada uma nova escolha de perfis para a estrutura, de forma a minimizar o peso e conseqüentemente o custo da obra, tal como indicado na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 – Tabela com as novas propriedades das barras.

Colunas	Dimensão
C2	CVS 300x95.5
C3	CVS 300x95.5
C6	CVS 300x56.5
C7	CVS 300x56.5

O programa permite uma nova análise da estrutura a partir do uso das novas seções modificadas e são então gerados novos diagramas de forças cortantes e momentos fletores, ilustrados nas Figura 6.8 e 6.9 e na Tabela 6.4.

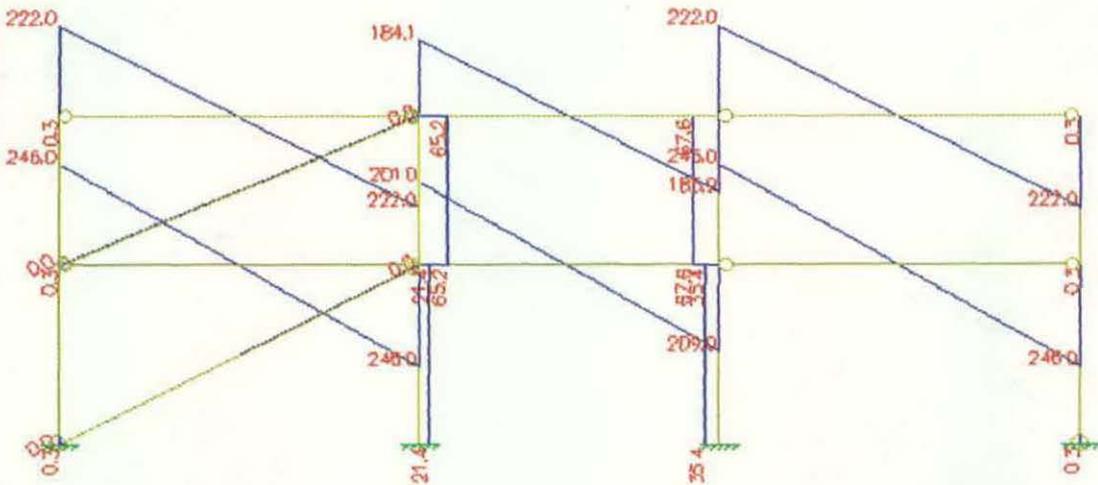


Fig. 6.8 - Diagrama de forças cortantes (segunda análise do 1º exemplo) [kN].

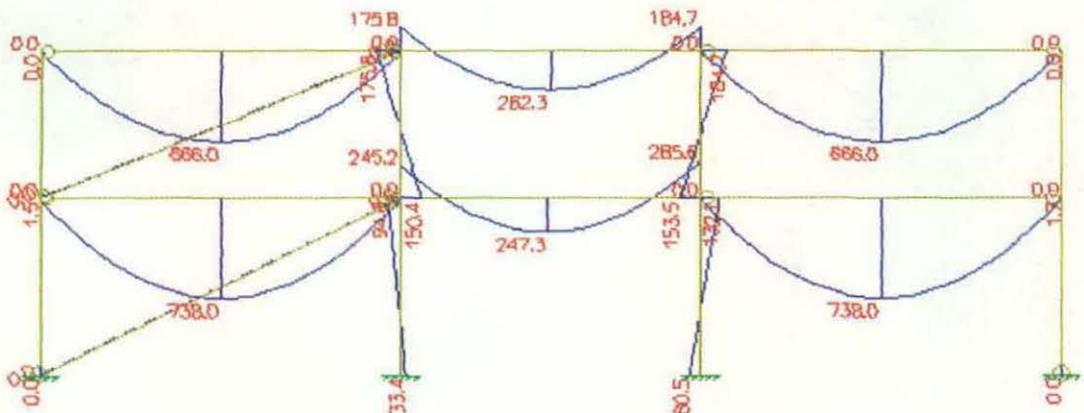


Fig. 6.9 - Diagrama de momentos fletores (segunda análise do 1º exemplo) [kN.m].

Tabela 6.4 - Esforços internos e deslocamentos máximos presentes nas barras do modelo após a segunda análise (1º exemplo).

Barra	V inicial (kN)	V final (kN)	M inicial (kN.m)	M final (kN.m)	Δ_{Vertical} (mm)	Δ_{Lateral} (mm)
C1	0.3	0.3	0.0	1.5	0.0	4.6
C2	21.4	21.4	33.4	94.8	0.0	4.3
C3	35.4	35.4	80.5	132.1	0.0	7.1
C4	0.3	0.3	0.0	1.7	0.0	4.6
C5	0.3	0.3	1.5	0.0	0.0	1.7
C6	65.2	65.2	150.5	175.8	0.0	2.0
C7	67.6	67.6	153.5	184.7	0.0	2.7
C8	0.3	0.3	1.7	0.0	0.0	1.3
V1	246	246	0.0	0.0	59.5	0.0
V2	201.4	209	245.2	285.6	25.2	0.0
V3	246	246	0.0	0.0	59.5	0.0
V4	222	222	0.0	0.0	55.3	0.0
V5	184.1	185.9	175.8	184.7	32.7	0.0
V6	222	222	0.0	0.0	55.3	0.0

Esta etapa geralmente não é executada no projeto tradicional devido a quantidade de trabalho envolvido para tal. Por outro lado, esta nova análise possibilita um melhor aproveitamento dos perfis e a verificação se os mesmos são de fato adequados as solicitações impostas. Os resultados de um novo dimensionamento levando em conta estes esforços estão representados nas Figuras 6.10 a 6.13.

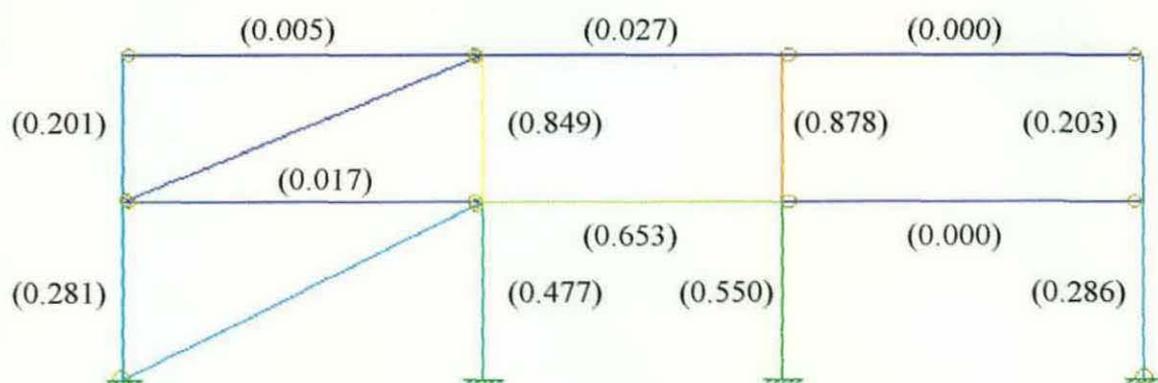


Fig. 6.10 – Fator de resistência axial da seção (segunda análise do 1º exemplo).

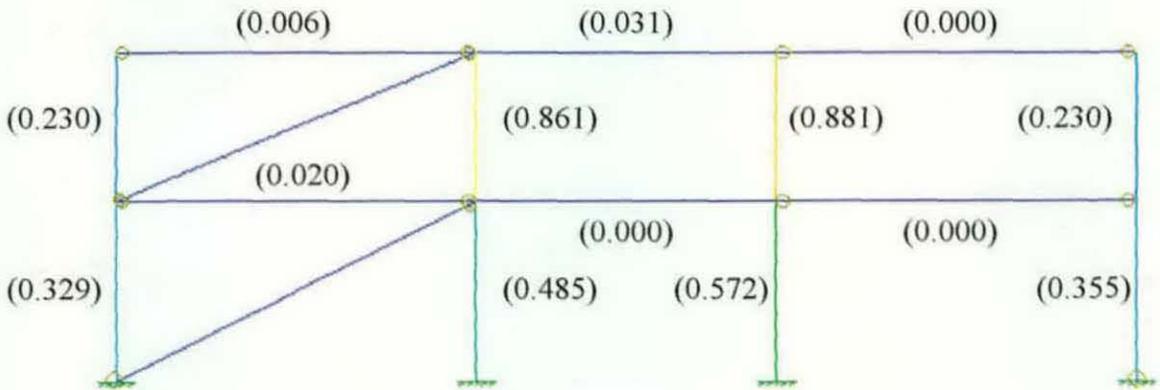


Fig. 6.11 – Fator de resistência à flambagem no plano (segunda análise do 1º exemplo).

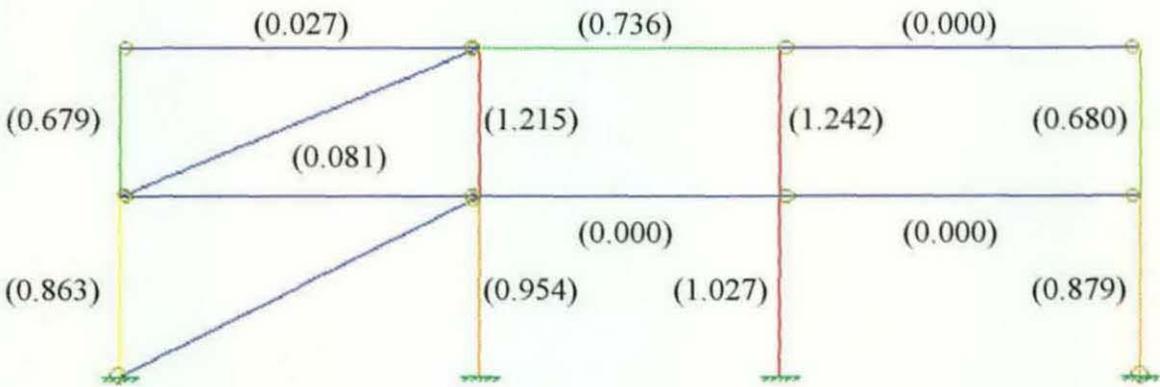


Fig. 6.12 – Fator de resistência à flambagem fora do plano (segunda análise do 1º exemplo).

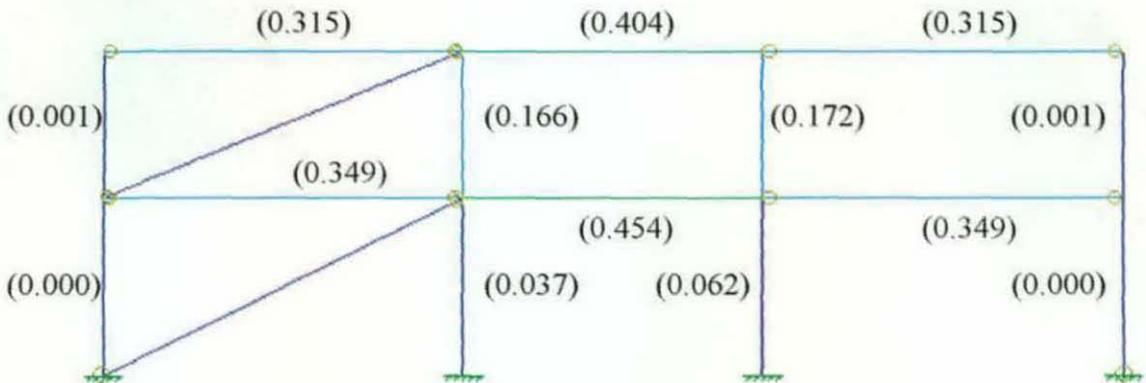


Fig. 6.13 – Fator de resistência da seção ao esforço cortante (segunda análise do 1º exemplo).

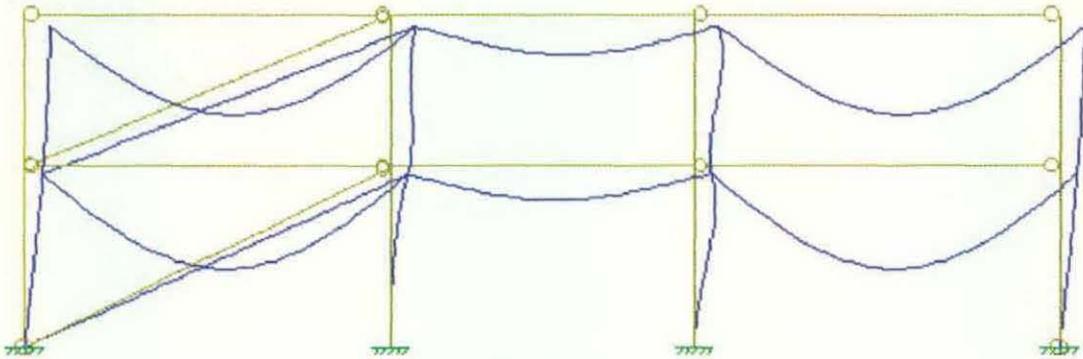


Fig. 6.16 – Configuração da deformada do pórtico (análise final do 1º exemplo) [fator de amplificação igual a 132.7].

Tabela 6.5 - Esforços internos e deslocamentos máximos presentes nas barras do modelo após a análise final (1º exemplo).

Barra	V inicial (kN)	V final (kN)	M inicial (kN.m)	M final (kN.m)	Δ_{Vertical} (mm)	Δ_{Lateral} (mm)
C1	0.3	0.3	0.0	1.6	0.0	4.4
C2	6.0	6.0	0.6	35.4	0.0	4.3
C3	26.4	26.4	64.3	93.9	0.0	5.0
C4	0.3	0.3	0.0	1.6	0.0	4.3
C5	0.3	0.3	1.6	0.0	0.0	1.2
C6	45.7	45.7	112.2	116.2	0.0	1.4
C7	53.6	53.6	129.8	138.7	0.0	1.2
C8	0.3	0.3	1.6	0.0	0.0	1.1
V1	246	246	0.0	0.0	29.1	0.0
V2	197.4	212.6	147.6	223.8	9.6	0.0
V3	246	246	0.0	0.0	29.4	0.0
V4	222	222.8	0.0	0.0	27.6	0.0
V5	182.8	187.2	116.2	138.3	11.1	0.0
V6	222	222.8	0.0	0.0	27.6	0.0

Os resultados da verificação final da estrutura podem ser observados nas Figuras 6.17 a 6.20.

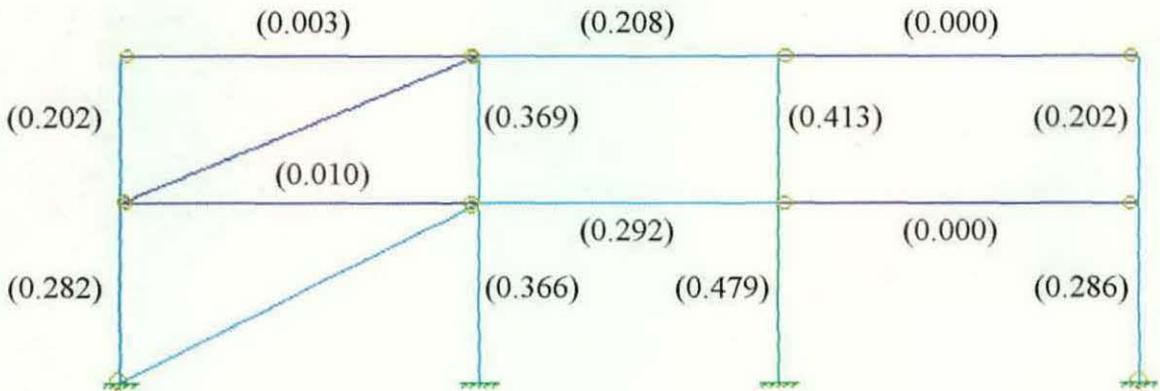


Fig. 6.17 – Fator de resistência axial da seção (análise final do 1º exemplo).

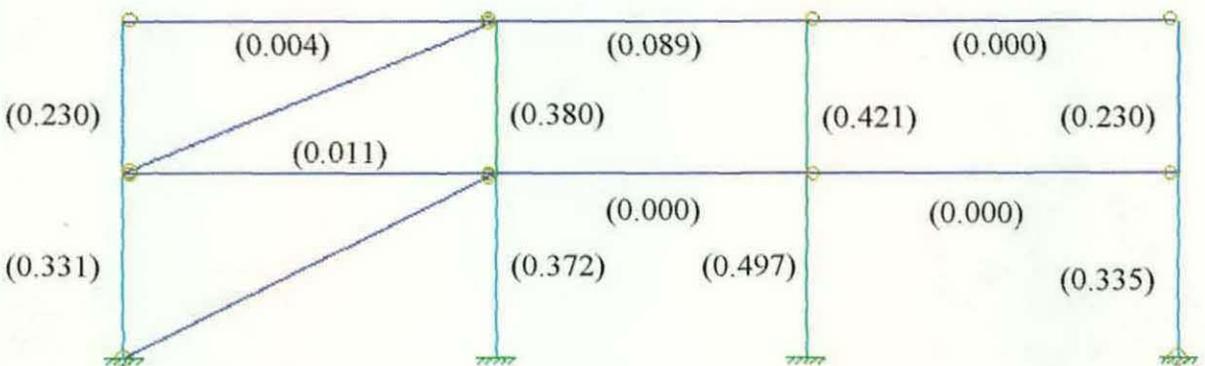


Fig. 6.18 – Fator de resistência à flambagem no plano (análise final do 1º exemplo).

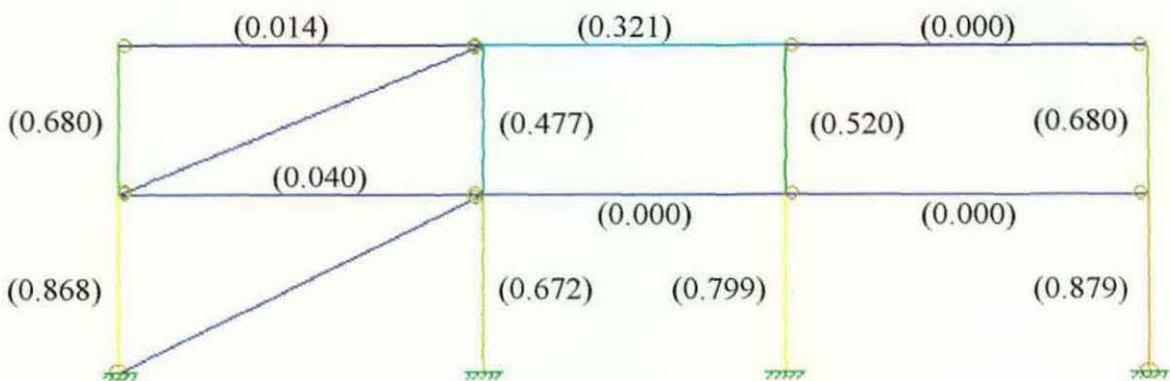


Fig. 6.19 – Fator de resistência à flambagem fora do plano (análise final do 1º exemplo).

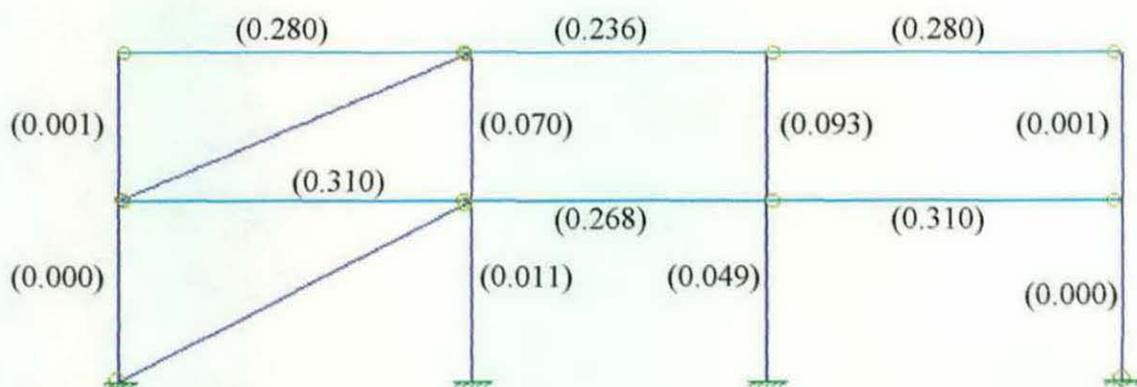


Fig. 6.20 – Fator de resistência da seção ao esforço cortante (análise final do 1º exemplo).

6.2 Exemplo do Dimensionamento de um Pórtico Plano usando o Método Simplificado U2.

Este exemplo apresenta a análise e dimensionamento de um pórtico deslocável composto de quatro pavimentos (vinte vigas e seis colunas) tal como mostrado na Figura 6.21. As cargas utilizadas na estrutura foram fatoradas de acordo a equação (6.1). O processo de dimensionamento segue os critérios recomendados pela Norma Canadense CAN/CSA-S16.1-94 para estruturas deslocáveis, com consideração da estabilidade através dos parâmetros U1 e U2.

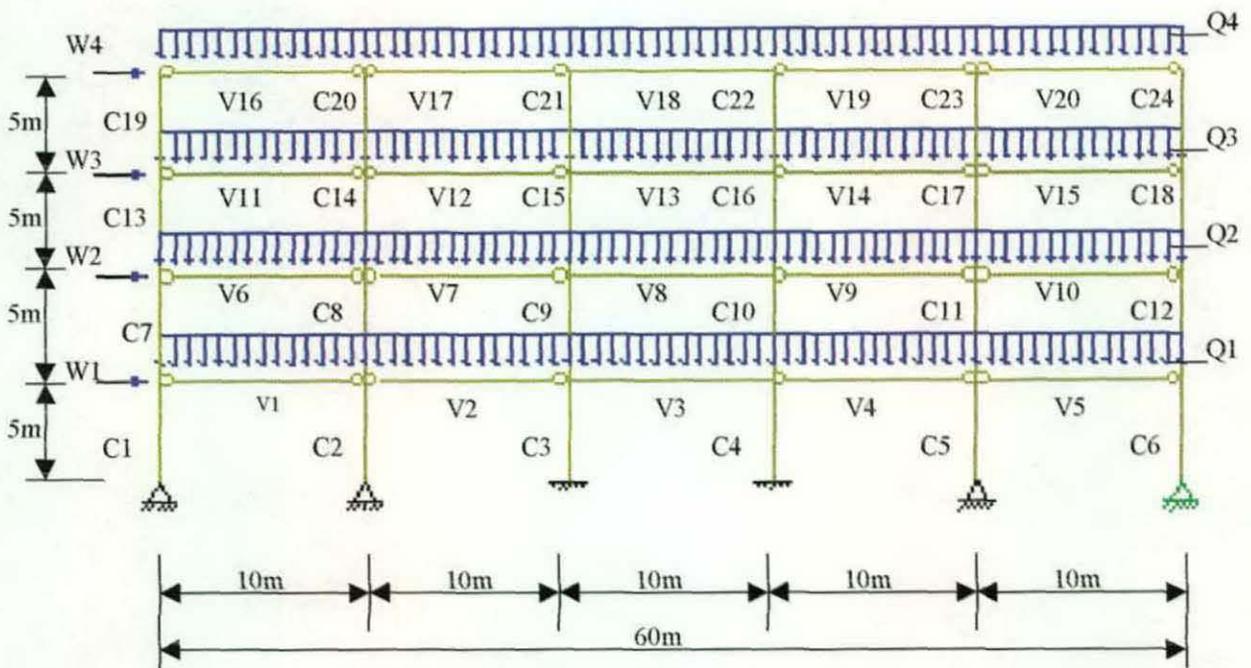


Fig. 6.21 - Primeiro pórtico deslocável analisado.

Os carregamentos aplicados no pórtico e a combinação realizada nelas podem ser visualizadas melhor na Tabela 6.6.

Tabela 6.6 – Cargas com suas respectivas combinações (2º exemplo).

		Normal (kN)	Ponderada (kN)			Normal (kN)	Ponderada (kN)
1º Piso	D	18.00	≅ 22,00	2º Piso	D	10.80	≅ 13.50
	L	18.00	≅ 19.00		L	22.50	≅ 23.50
	W	38.00	≅ 39.90		W	17.50	≅ 18.40
		Normal (kN)	Ponderada (kN)			Normal (kN)	Ponderada (kN)
3º Piso	D	8.50	≅ 10.60	4º Piso	D	6.00	≅ 7.50
	L	17.00	≅ 17.90		L	12.00	≅ 12.60
	W	14.00	≅ 14.70		W	8.00	≅ 8.40

Adotou-se as mesmas propriedades do material usados no primeiro exemplo deste capítulo. Os valores dos carregamentos ponderados do pórtico estão representados na Tabela 6.7

Tabela 6.7 – Carregamentos ponderados do pórtico (2º exemplo).

Carga	Valor (kN/m)
Q1	41.00
Q2	37.00
Q3	28.50
Q4	20.10
Carga	Valor (kN)
W1	39.90
W2	18.40
W3	14.70
W4	8.00

O processo de pré-dimensionamento adotado usou os mesmos conceitos do primeiro exemplo, gerando o uso de perfis apresentados na Tabela 6.8.

Tabela 6.8 – Perfis utilizados no pórtico (2º exemplo).

Barra	Perfil	Barra	Perfil	Barra	Perfil
C1	CVS 250x37.5	C16	CVS 300x56.5	V7	VS 500x72.6
C2	CVS 250x37.5	C17	CVS 250x33.8	V8	VS 600x 95.0
C3	CVS 300x56.5	C18	CVS 250x33.8	V9	VS 500x72.6
C4	CVS 300x56.5	C19	CVS 250x33.8	V10	VS 500x72.6
C5	CVS 250x37.5	C20	CVS 250x33.8	V11	VS 500x61.1
C6	CVS 250x37.5	C21	CVS 300x56.5	V12	VS 500x61.1
C7	CVS 250x37.5	C22	CVS 300x56.5	V13	VS 600x 95.0
C8	CVS 250x37.5	C23	CVS 250x33.8	V14	VS 500x61.1
C9	CVS 300x56.5	C24	CVS 250x33.8	V15	VS 500x61.1
C10	CVS 300x56.5	V1	VS 500x72.6	V16	VS 500x61.1
C11	CVS 250x37.5	V2	VS 500x72.6	V17	VS 500x61.1
C12	CVS 250x37.5	V3	VS 600x 95.0	V18	VS 600x 95.0
C13	CVS 250x33.8	V4	VS 500x72.6	V19	VS 500x61.1
C14	CVS 250x33.8	V5	VS 500x72.6	V20	VS 500x61.1
C15	CVS 300x56.5	V6	VS 500x72.6		

6.2.1 Cálculo do Esforços Internos Devido aos Carregamentos Gravitacionais

A análise dos esforços internos utilizando apenas as cargas gravitacionais leva em consideração que o pórtico não se desloque lateralmente. Neste caso é necessário que se trave o pórtico colocando apoios nos nós da extremidade, como indicado na Figura 6.22.

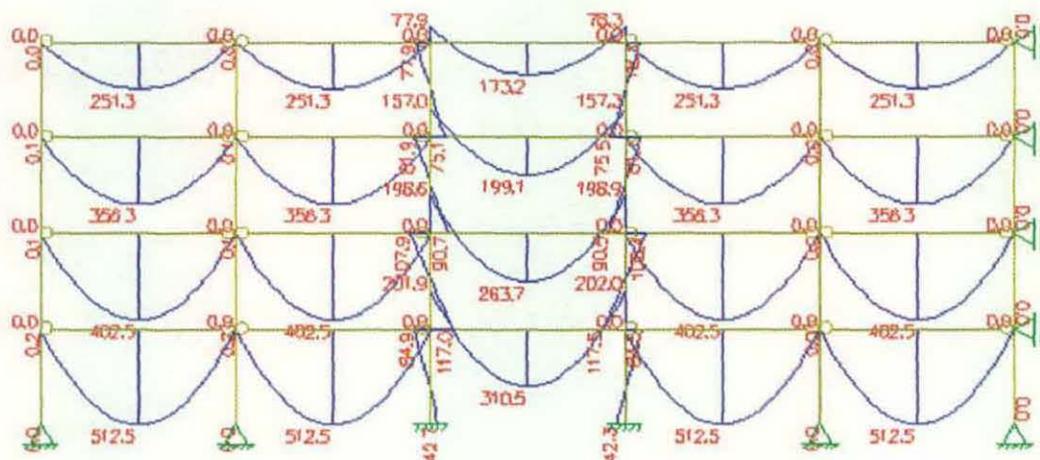


Fig. 6.24 - Diagrama de momentos fletores (cargas gravitacionais) [kN.m].

Tabela 6.9 - Esforços internos e deslocamentos máximos presentes nas barras do modelo após a análise das cargas gravitacionais.

Barra	V _{inicial} (kN)	V _{final} (kN)	M _{inicial} (kN.m)	M _{final} (kN.m)	Barra	V _{inicial} (kN)	V _{final} (kN)	M _{inicial} (kN.m)	M _{final} (kN.m)
C1	0.0	0.0	0.0	0.2	C23	0.0	0.0	0.0	0.0
C2	0.0	0.0	0.0	0.2	C24	0.0	0.0	0.0	0.0
C3	25.5	25.5	42.7	84.9	V1	205	205	0.0	0.0
C4	25.4	25.4	0.0	0.0	V2	205	205	0.0	0.0
C5	0.0	0.0	0.0	0.0	V3	205	205	201.9	202
C6	0.0	0.0	42.3	84.5	V4	205	205	0.0	0.0
C7	0.0	0.0	0.1	0.1	V5	205	205	0.0	0.0
C8	0.0	0.0	0.1	0.1	V6	185	185	0.0	0.0
C9	45.0	45.0	117.0	107.9	V7	185	185	0.0	0.0
C10	45.2	45.2	117.5	108.4	V8	185	185	198.6	198.9
C11	0.0	0.0	0.0	0.0	V9	185	185	0.0	0.0
C12	0.0	0.0	0.0	0.0	V10	185	185	0.0	0.0
C13	0.0	0.0	0.1	0.1	V11	142.5	142.5	0.0	0.0
C14	0.0	0.0	0.1	0.1	V12	142.5	142.5	0.0	0.0

Barra	V inicial (kN)	V final (kN)	M inicial (kN.m)	M final (kN.m)	Barra	V inicial (kN)	V final (kN)	M inicial (kN.m)	M final (kN.m)
C15	34.5	34.5	90.7	81.9	V13	142.5	142.5	157.0	157.3
C16	34.5	34.5	90.5	81.7	V14	142.5	142.5	0.0	0.0
C17	0.0	0.0	0.0	0.0	V15	142.5	142.5	0.0	0.0
C18	0.0	0.0	0.0	0.0	V16	100.5	100.5	0.0	0.0
C19	0.0	0.0	0.1	0.0	V17	100.5	100.5	0.0	0.0
C20	0.0	0.0	0.1	0.0	V18	100.5	100.5	77.9	78.3
C21	30.6	30.6	75.1	77.9	V19	100.5	100.5	0.0	0.0
C22	30.8	30.8	75.5	78.3	V20	100.5	100.5	0.0	0.0

As reações de apoio necessárias para impedir o deslocamento lateral do pórtico foram: -0.53 kN (R1), 0.45 kN (R2), -0.35 kN (R3) e 0.20 kN (R4). O próximo passo para o dimensionamento do pórtico é o cálculo do coeficiente U2.

6.2.2 Cálculo do Coeficiente U2

Para o cálculo do coeficiente U2 torna-se necessário fazer uma análise do pórtico da Figura 6.21 utilizando apenas a carga de vento fatorada adicionada pela carga “notional”. A Figura 6.25 mostra a nova configuração do pórtico estudado.

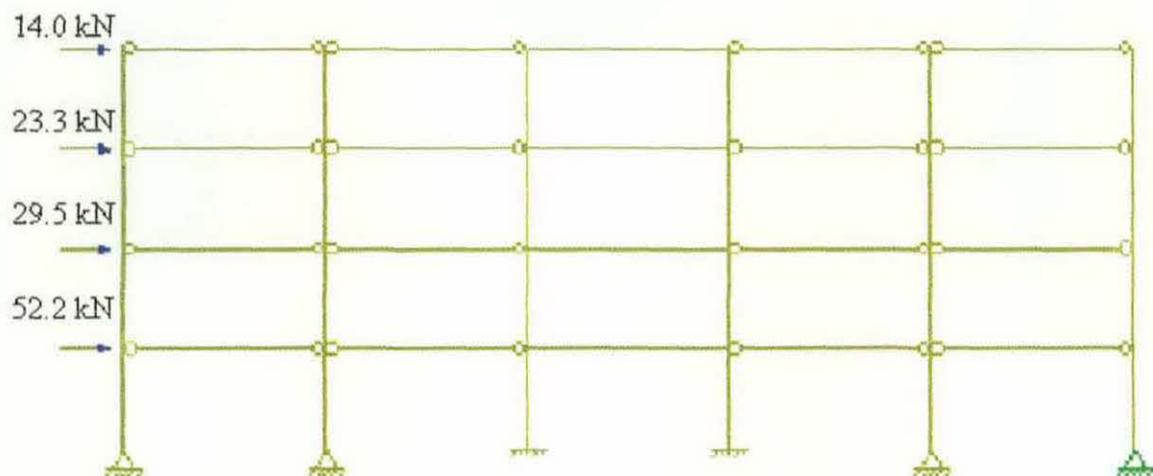


Fig. 6.25 – Pórtico para o cálculo do coeficiente U2.

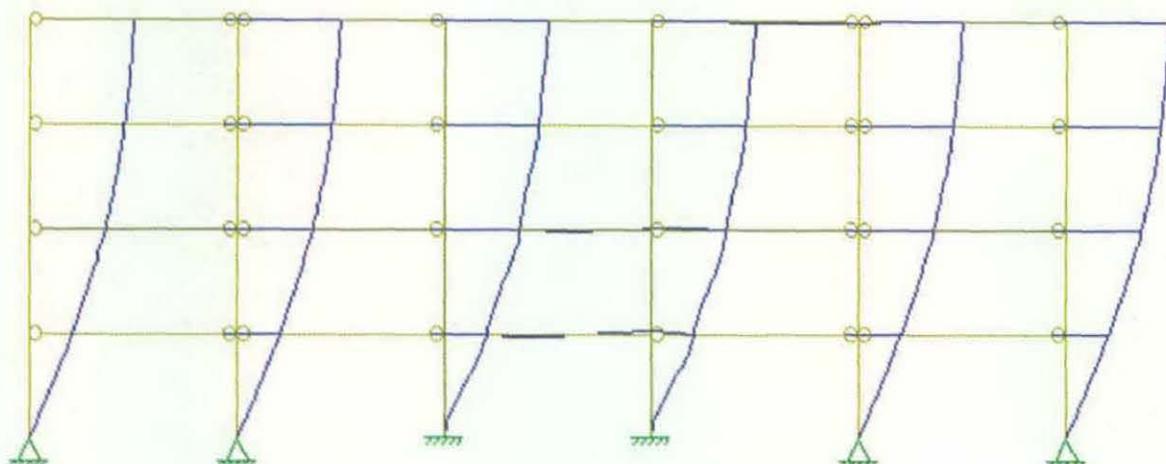


Fig. 6.28 - Configuração da deformada do pórtico (cargas laterais) [fator de amplificação igual a 66.2].

Tabela 6.10 - Esforços internos e deslocamentos máximos presentes nas barras do modelo quando sujeitas as cargas laterais.

Barra	V inicial (kN)	V final (kN)	M inicial (kN.m)	M final (kN.m)	Δ_{Vertical} (mm)	Δ_{Lateral} (mm)
C1	0.8	0.8	0.0	4.3	0.0	31.5
C2	0.8	0.8	0.0	4.0	0.0	31.2
C3	58.1	58.1	156.2	134.1	0.0	31.8
C4	57.9	57.9	155.6	133.6	0.0	30.8
C5	0.7	0.7	0.0	3.6	0.0	30.9
C6	0.7	0.7	0.0	3.6	0.0	30.9
C7	0.0	0.0	4.3	4.1	0.0	23.6
C8	0.1	0.1	4.0	4.3	0.0	23.7
C9	33.2	33.2	78.9	86.9	0.0	23.0
C10	33.3	33.3	79.2	87.1	0.0	27.9
C11	0.2	0.2	3.6	4.5	0.0	23.8
C12	0.7	0.7	3.6	4.5	0.0	23.8
C13	0.1	0.1	4.1	3.4	0.0	14.0
C14	0.2	0.2	4.3	3.3	0.0	14.0
C15	19.1	19.1	44.6	50.7	0.0	14.0
C16	19.1	19.1	44.5	50.7	0.0	14.1
C17	0.2	0.2	4.5	3.3	0.0	14.1

Barra	V _{inicial} (kN)	V _{final} (kN)	M _{inicial} (kN.m)	M _{final} (kN.m)	Δ _{Vertical} (mm)	Δ _{Lateral} (mm)
C18	0.2	0.2	4.5	3.3	0.0	14.1
C19	0.7	0.7	3.4	0.0	0.0	6.4
C20	0.7	0.7	3.3	0.0	0.0	6.6
C21	8.3	8.3	18.5	23.1	0.0	6.6
C22	8.3	8.3	18.5	23.1	0.0	6.5
C23	0.7	0.7	3.3	0.0	0.0	6.5
C24	0.7	0.7	3.3	0.0	0.0	6.5
V1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
V2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
V3	42.6	42.6	213	213	0.0	0.0
V4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
V5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
V6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
V7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
V8	26.3	26.3	131.5	131.6	0.0	0.0
V9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
V10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
V11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
V12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
V13	3.8	3.8	69.2	69.2	0.0	0.0
V14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
V15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
V16	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
V17	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
V18	4.6	4.6	23.1	23.1	0.0	0.0
V19	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
V20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Com base nestes resultados, a Tabela 6.11 mostra o valor dos coeficientes U₂ calculados para os quatro pavimentos do pórtico, Figura 6.21.

Tabela 6.11 – Cálculo do coeficiente U2.

Piso	ΣV_f (kN/m)	ΣW (kN/m)	Altura (mm)	Δ (mm)	U2
1	2460.00	119.00	5000.00	30.8	1.15
2	2220.00	66.80	5000.00	27.9	1.23
3	1710.00	37.30	5000.00	14.1	1.15
4	1206.00	14.00	5000.00	6.5	1.13

6.2.3 Dimensionamento do Pórtico

Nesta etapa após o cálculo dos coeficientes U2, as cargas laterais são amplificadas por estes fatores. Já as cargas gravitacionais se mantêm as mesmas Tabela 6.12. Gerados então novos diagramas de forças cortantes e de momentos fletores, estão representados nas Figuras 6.29 e 6.30 e seus resultados na Tabela 6.13.

Tabela 6.12 – Carregamentos ponderados final do pórtico.

Carga	Valor (kN/m)
Q1	41.00
Q2	37.00
Q3	28.50
Q4	20.10
Carga	Valor (kN)
W1	45.90
W2	22.60
W3	16.90
W4	9.00

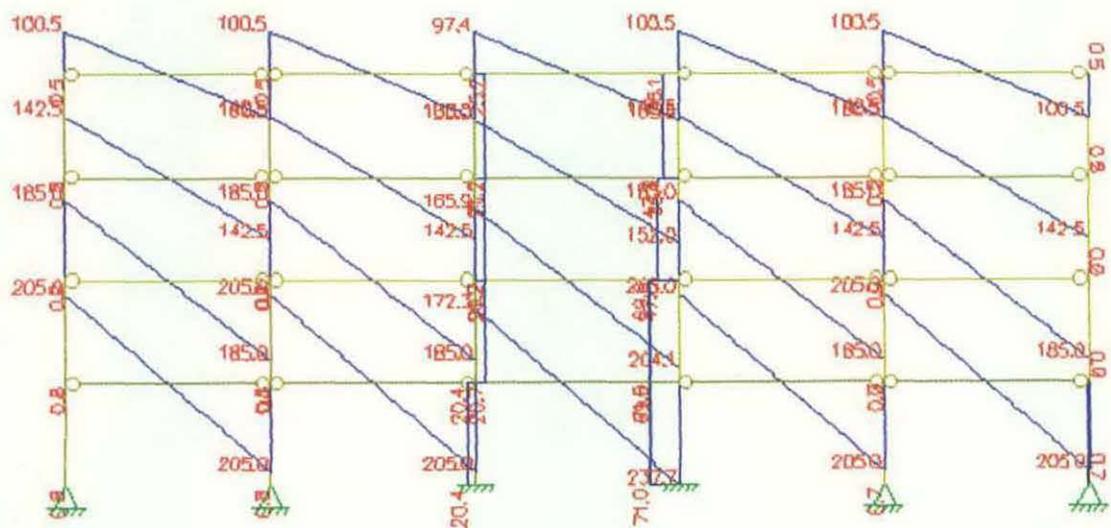


Fig. 6.29 - Diagrama de forças cortantes (cargas finais do 2º exemplo) [kN].

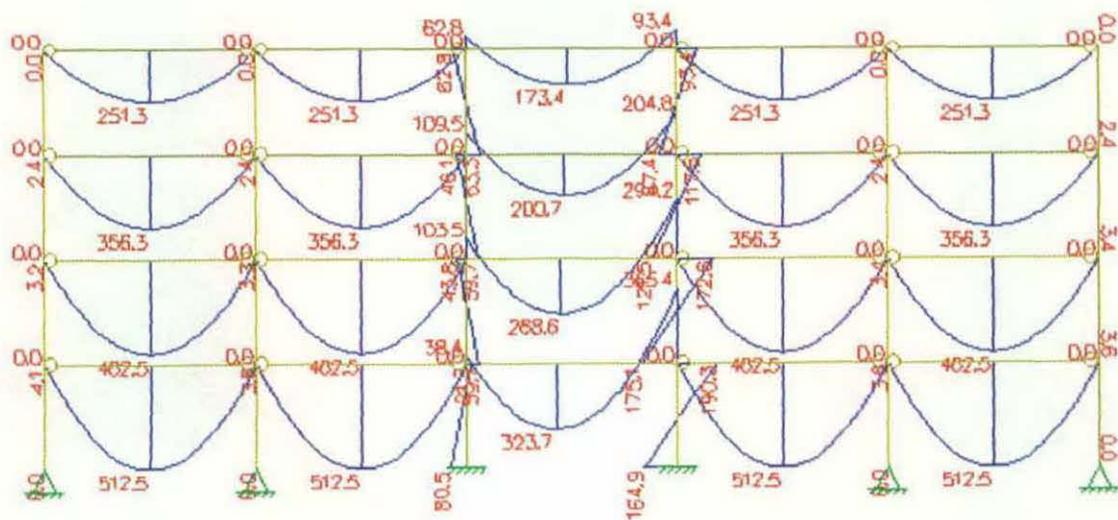


Fig. 6.30 - Diagrama de momentos fletores (cargas finais do 2º exemplo) [kN.m].

Tabela 6.13 - Esforços internos e deslocamentos máximos presentes nas barras do modelo com a combinação final de cargas do (2º exemplo).

Barra	V _{inicial} (kN)	V _{final} (kN)	M _{inicial} (kN.m)	M _{final} (kN.m)	Δ _{Vertical} (mm)	Δ _{Lateral} (mm)
C1	0.8	0.8	0.0	4.1	0.0	24.7
C2	0.8	0.8	0.0	3.0	0.0	24.5
C3	20.4.1	20.4	80.5	21.3	0.0	24.3
C4	71.0	71.0	164.9	190.3	0.0	24.7
C5	0.7	0.7	0.0	3.6	0.0	24.2
C6	0.7	0.7	0.0	3.6	0.0	24.2
C7	0.2	0.2	4.1	3.1	0.0	17.5
C8	0.1	0.1	3.8	3.3	0.0	17.6
C9	20.7	20.7	59.7	43.9	0.0	17.6
C10	69.6	69.6	175.1	172.6	0.0	17.6
C11	0.0	0.0	3.6	3.4	0.0	17.7
C12	0.0	0.0	3.6	3.4	0.0	17.7
C13	0.2	0.2	3.1	2.4	0.0	9.8
C14	0.2	0.2	3.3	2.4	0.0	9.8
C15	21.2	21.2	59.7	46.1	0.0	10.0
C16	47.8	47.8	121.5	117.5	0.0	9.9
C17	0.2	0.2	3.4	2.4	0.0	9.3
C18	0.2	0.2	3.4	2.4	0.0	9.9
C19	0.5	0.5	2.4	0.0	0.0	4.4
C20	0.7	0.7	2.4	0.0	0.0	4.4
C21	25.2	25.2	63.3	62.8	0.0	5.1
C22	36.2	36.2	87.4	93.4	0.0	4.9
C23	0.5	0.5	2.4	0.0	0.0	4.8
C24	0.5	0.5	2.4	0.0	0.0	4.4
V1	205	205	0.0	0.0	65.7	0.0
V2	205	205	0.0	0.0	66.1	0.0
V3	172.3	237.7	38.4	365.4	22.2	0.0
V4	205	205	0.0	0.0	66.3	0.0
V5	185	185	0.0	0.0	65.6	0.0
V6	185	185	0.0	0.0	63.0	0.0
V7	185	185	0.0	0.0	63.8	0.0

Barra	V _{inicial} (kN)	V _{final} (kN)	M _{inicial} (kN.m)	M _{final} (kN.m)	Δ_{Vertical} (mm)	Δ_{Lateral} (mm)
V8	165.9	204.0	103.5	294.2	21.9	0.0
V9	185	185	0.0	0.0	64.1	0.0
V10	185	185	0.0	0.0	63.0	0.0
V11	142.5	142.5	0.0	0.0	62.8	0.0
V12	142.5	142.5	0.0	0.0	63.7	0.0
V13	133.0	147.8	109.5	204.8	19.8	0.0
V14	142.5	142.5	0.0	0.0	64.0	0.0
V15	142.5	142.5	0.0	0.0	62.8	0.0
V16	100.5	100.5	0.0	0.0	48.2	0.0
V17	100.5	100.5	0.0	0.0	49.1	0.0
V18	97.4	103.6	62.8	93.4	19.9	0.0
V19	100.5	100.5	0.0	0.0	49.4	0.0
V20	100.5	100.5	0.0	0.0	48.22	0.0

De acordo com a Tabela 6.13 conclui-se que: as colunas do primeiro e segundo piso (C1 a C12) não atendem ao deslocamento máximo lateral (10 mm) permitido pela norma; as colunas do terceiro piso (C13 a C18) encontram-se próximo ao limite permitido pela norma; quase todas as vigas não atenderam ao deslocamento máximo vertical (27.7 mm) permitido pela norma. Decidiu-se então modificar as seções das barras do pórtico, antes de se fazer o dimensionamento. As novas seções estão representadas na Tabela 6.14.

Tabela 6.14 – Novos perfis utilizados no pórtico (2º exemplo).

Barra	Perfil	Barra	Perfil	Barra	Perfil
C1	CVS 350x105	C16	CVS 350x97.8	V7	VS 650x155
C2	CVS 350x105	C17	CVS 350x97.8	V8	VS 700x122.0
C3	CVS 400x116	C18	CVS 350x97.8	V9	VS 650x155
C4	CVS 400x116	C19	CVS 350x97.8	V10	VS 650x155
C5	CVS 350x105	C20	CVS 350x97.8	V11	VS 650x114
C6	CVS 350x105	C21	CVS 400x116	V12	VS 650x114
C7	CVS 350x105	C22	CVS 400x116	V13	VS 700x122.0

Barra	Perfil	Barra	Perfil	Barra	Perfil
C8	CVS 350x105	C23	CVS 350x97.8	V14	VS 650x114
C9	CVS 300x56.5	C24	CVS 350x97.8	V15	VS 650x114
C10	CVS 300x56.5	V1	VS 650x155	V16	VS 650x114
C11	CVS 400x116	V2	VS 650x155	V17	VS 650x114
C12	CVS 400x116	V3	VS 700x122.0	V18	VS 700x122.0
C13	CVS 350x97.8	V4	VS 650x155	V19	VS 650x114
C14	CVS 350x97.8	V5	VS 650x155	V20	VS 650x114
C15	CVS 300x56.5	V6	VS 650x155		

Os novos diagramas de forças cortantes, de momentos fletores e a configuração da deformada, estão ilustrados nas Figura 6.31 a6.33 e seus resultados na Tabela 6.15.

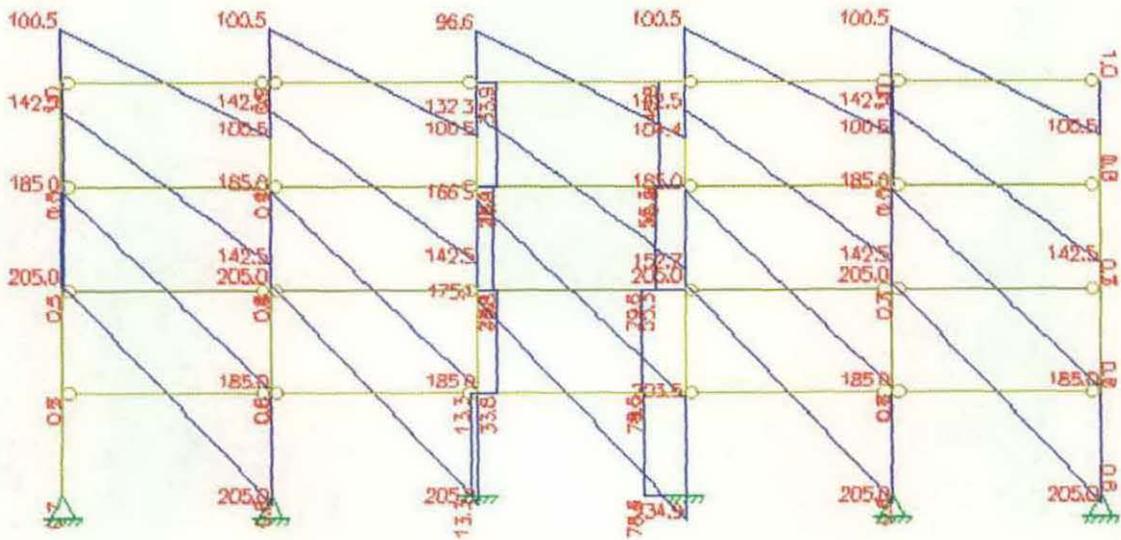


Fig. 6.31 - Diagrama de forças cortantes para as novas seções (2º exemplo) [kN].

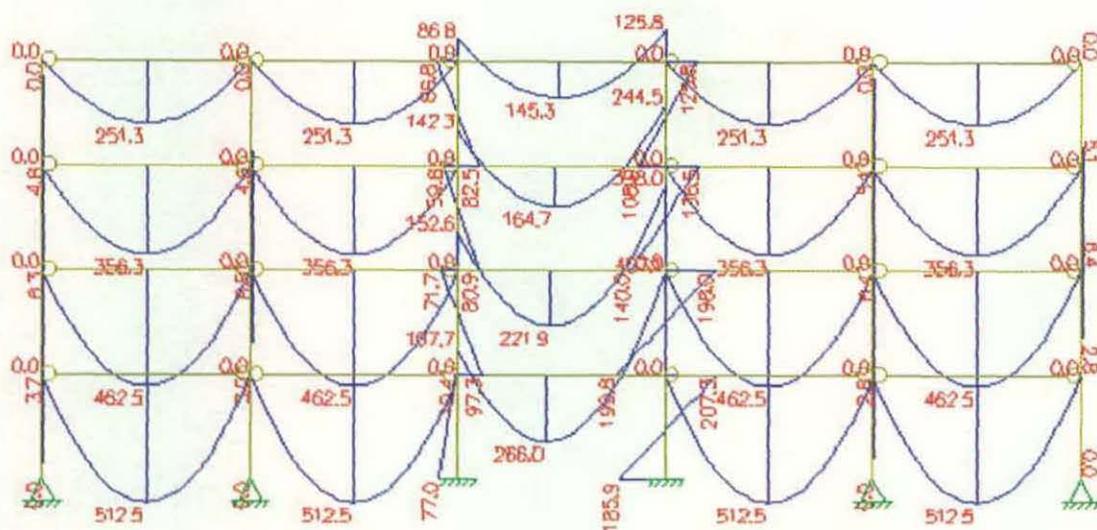


Fig. 6.32 - Diagrama de momento fletor para as novas seções (2º exemplo) [kN.m].

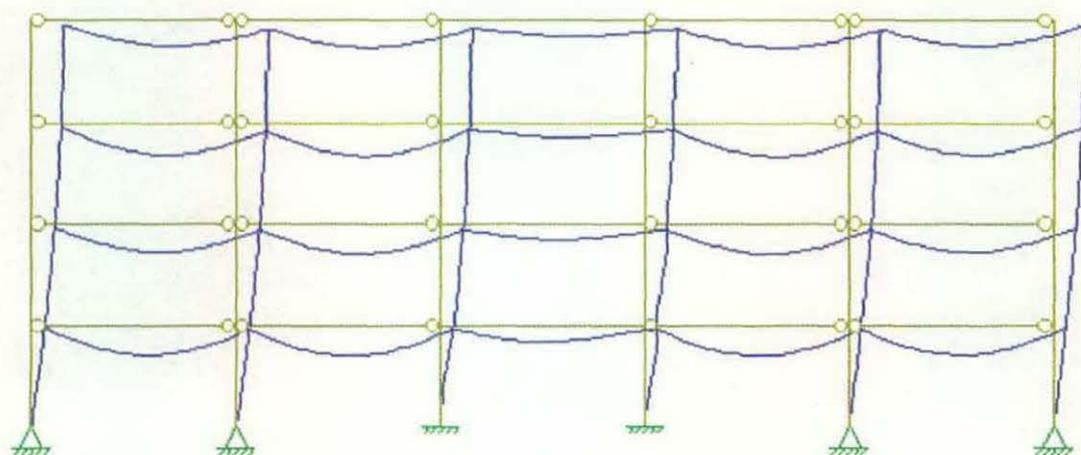


Fig. 6.33 - Configuração da deformada do pórtico para as novas seções (2º exemplo) [fator de amplificação 80.1].

Tabela 6.15 - Esforços internos e deslocamentos máximos presentes nas barras do modelo após a nova análise da estrutura (2º exemplo).

Barra	V inicial (kN)	V final (kN)	M inicial (kN.m)	M final (kN.m)	Δ_{Vertical} (mm)	Δ_{Lateral} (mm)
C1	0.7	0.7	0.0	3.7	0.0	7.6
C2	0.6	0.6	0.0	3.0	0.0	7.5
C3	13.3	13.3	77.0	10.4	0.0	7.3
C4	70.8	70.8	185.9	207.3	0.0	7.3
C5	0.6	0.6	0.0	2.8	0.0	7.4
C6	0.6	0.6	0.0	2.8	0.0	6.2
C7	0.5	0.5	3.7	6.3	0.0	6.2
C8	0.7	0.7	3.0	6.8	0.0	6.3
C9	33.8	33.8	97.3	71.7	0.0	6.3
C10	79.8	79.8	199.8	198.0	0.0	6.3
C11	0.7	0.7	2.8	6.4	0.0	6.2
C12	0.7	0.7	2.8	6.4	0.0	3.7
C13	0.3	0.3	6.3	4.8	0.0	3.8
C14	0.4	0.4	6.8	4.6	0.0	3.8
C15	28.1	28.1	80.9	86.8	0.0	3.7
C16	55.3	55.3	140.0	136.5	0.0	3.8
C17	0.3	0.3	6.4	5.1	0.0	3.8
C18	0.3	0.3	6.4	5.1	0.0	3.8
C19	0.9	0.9	4.8	0.0	0.0	2.0
C20	0.9	0.9	4.6	0.0	0.0	1.9
C21	33.9	33.9	82.5	86.8	0.0	2.0
C22	46.7	46.7	108.0	125.8	0.0	2.2
C23	1.0	1.0	5.1	0.0	0.0	1.9
C24	1.0	1.0	5.1	0.0	0.0	1.9
V1	205	205	0.0	0.0	17.9	0.0
V2	205	205	0.0	0.0	18.3	0.0
V3	175.1	234.9	107.7	407.1	9.6	0.0
V4	205	205	0.0	0.0	18.4	0.0
V5	185	185	0.0	0.0	17.9	0.0
V6	185	185	0.0	0.0	17.5	0.0
V7	185	185	0.0	0.0	18.2	0.0
V8	166.5	203.5	152.6	338	9.6	0.0

Barra	V inicial (kN)	V final (kN)	M inicial (kN.m)	M final (kN.m)	Δ_{Vertical} (mm)	Δ_{Lateral} (mm)
V9	185	185	0.0	0.0	18.4	0.0
V10	185	185	0.0	0.0	17.5	0.0
V11	142.5	142.5	0.0	0.0	19.8	0.0
V12	142.5	142.5	0.0	0.0	20.6	0.0
V13	132.3	152.7	142.3	244.5	8.8	0.0
V14	142.5	142.5	0.0	0.0	20.8	0.0
V15	142.5	142.5	0.0	0.0	19.8	0.0
V16	100.5	100.5	0.0	0.0	15.3	0.0
V17	100.5	100.5	0.0	0.0	16.2	0.0
V18	96.6	104.4	86.8	125.8	9.1	0.0
V19	100.5	100.5	0.0	0.0	16.4	0.0
V20	100.5	100.5	0.0	0.0	15.3	0.0

De acordo a Tabela 6.15, verifica-se que as novas seções das barras do pórtico analisado satisfazem tanto o deslocamento máximo vertical quanto o deslocamento lateral máximo. Com o término desta etapa passa-se ao dimensionamento das barras da estrutura nas Figuras 6.34 a 6.37 e Tabela 6.16.

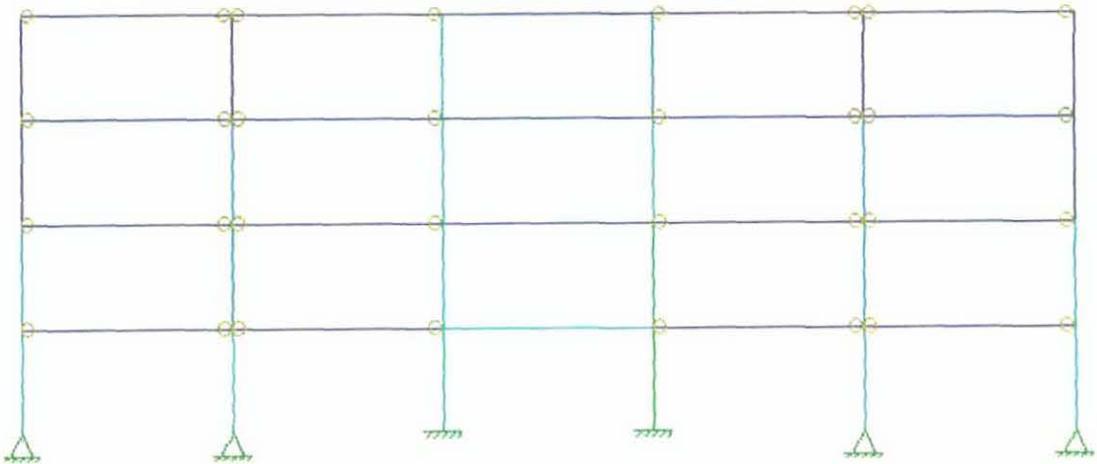


Fig. 6.34 – Fator de resistência axial da seção (2º exemplo).

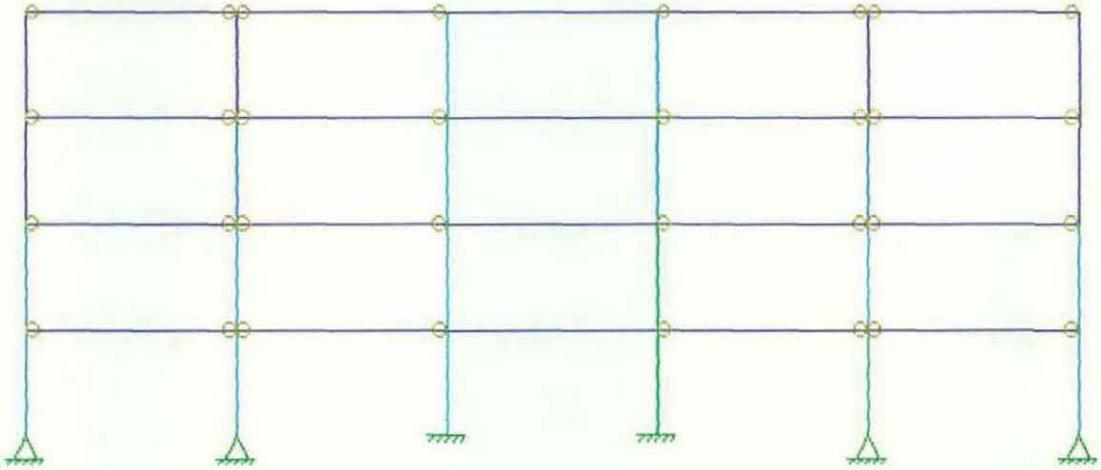


Fig. 6.35 – Fator de resistência à flambagem no plano (2º exemplo).

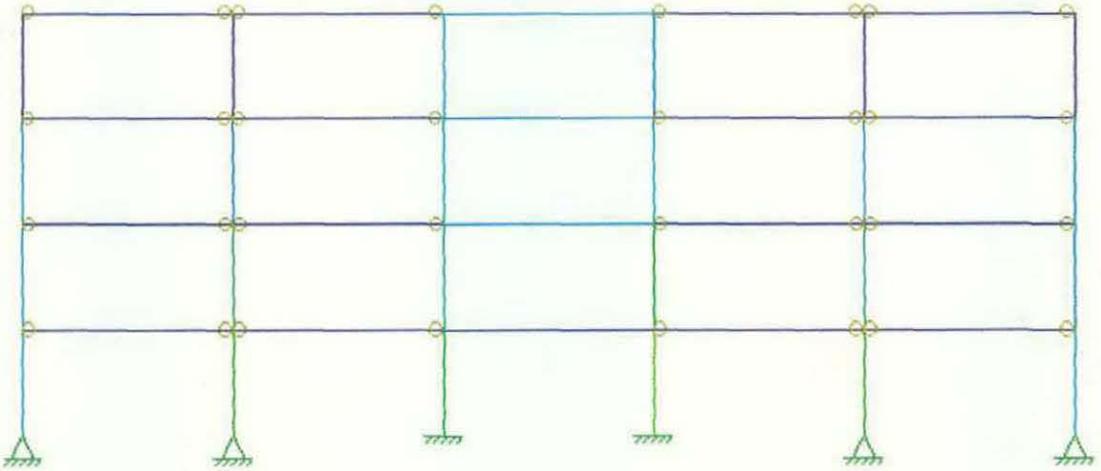


Fig. 6.36 – Fator de resistência à flambagem fora do plano (2º exemplo).

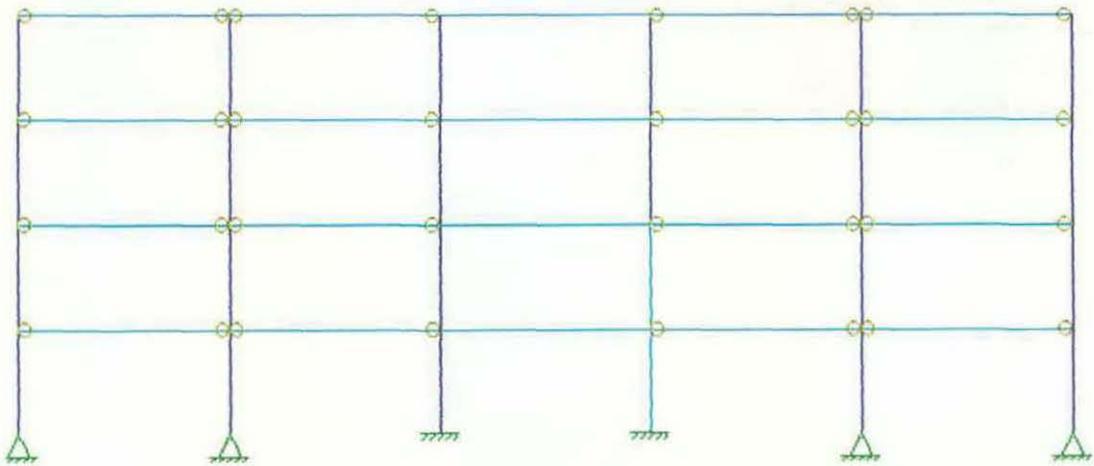


Fig. 6.37 – Fator de resistência da seção ao esforço cortante (2º exemplo).

Tabela 6.16 – Resultados do dimensionamento realizado no pórtico (2º exemplo).

Barra	Vers	Verp	Verfp	Verc	Barra	Vers	Verp	Verfp	Verc
C1	0.18	0.19	0.30	0.001	C23	0.06	0.07	0.11	0.001
C2	0.35	0.37	0.59	0.00	C24	0.04	0.03	0.06	0.001
C3	0.40	0.37	0.52	0.02	V1	0.010	0.01	0.03	0.28
C4	0.60	0.61	0.73	0.13	V2	0.04	0.01	0.03	0.28
C5	0.35	0.38	0.59	0.00	V3	0.28	0.00	0.00	0.28
C6	0.18	0.19	0.30	0.00	V4	0.00	0.00	0.00	0.28
C7	0.13	0.13	0.21	0.00	V5	0.00	0.00	0.00	0.28
C8	0.25	0.26	0.41	0.001	V6	0.004	0.004	0.01	0.25
C9	0.33	0.33	0.41	0.10	V7	0.003	0.003	0.01	0.25
C10	0.48	0.49	0.57	0.13	V8	0.006	0.004	0.25	0.25
C11	0.25	0.26	0.41	0.00	V9	0.00	0.006	0.00	0.25
C12	0.13	0.13	0.21	0.001	V10	0.00	0.00	0.00	0.25
C13	0.08	0.08	0.13	0.001	V11	0.004	0.00	0.06	0.19
C14	0.15	0.16	0.25	0.00	V12	0.004	0.004	0.06	0.19
C15	0.22	0.21	0.27	0.05	V13	0.002	0.002	0.17	0.19
C16	0.30	0.31	0.35	0.09	V14	0.00	0.00	0.00	0.19
C17	0.16	0.15	0.24	0.00	V15	0.002	0.002	0.01	0.19
C18	0.08	0.08	0.13	0.001	V16	0.002	0.003	0.01	0.19
C19	0.04	0.04	0.06	0.001	V17	0.00	0.00	0.00	0.13
C20	0.06	0.06	0.11	0.001	V18	0.001	0.01	0.17	0.13
C21	0.16	0.15	0.18	0.06	V19	0.00	0.00	0.00	0.13
C22	0.21	0.20	0.08	0.08	V20	0.00	0.00	0.00	0.13

6.3 Exemplo de Dimensionamento de um Pórtico plano usando o Método de Análise P-Delta.

Esta seção apresenta o dimensionamento de um pórtico deslocável através do processo P-Delta, mantendo as cargas fatoradas da Tabela 6.7 e os perfis pré-dimensionados como mostra a Tabela 6.17. A Figura 6.38 mostra o pórtico com a nova solução estrutural adotada.

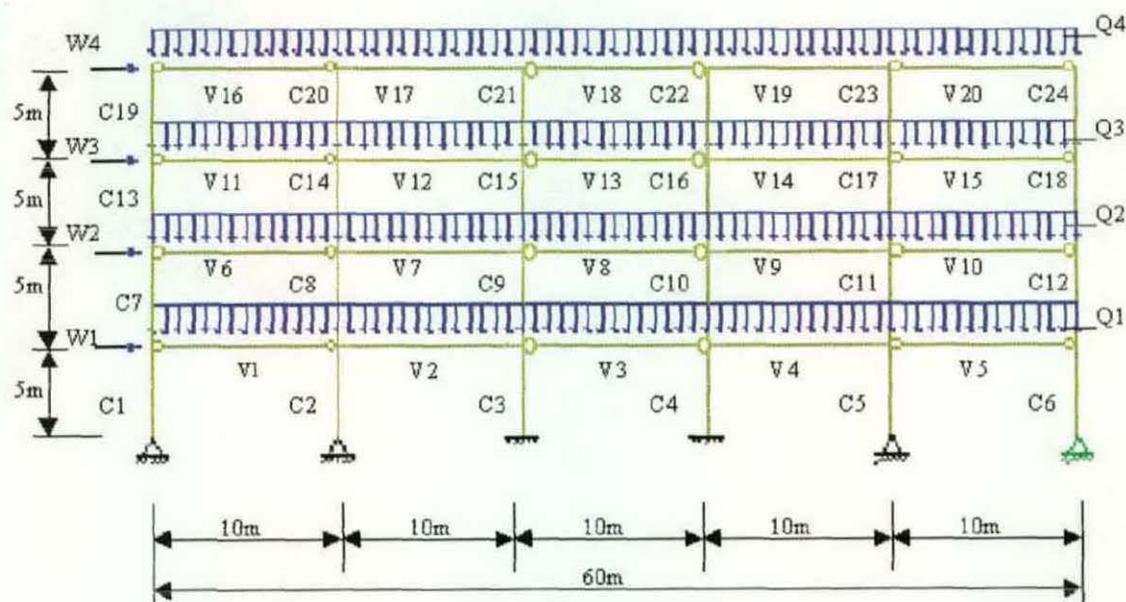


Fig. 6.38 – Segundo pórtico deslocável analisado.

Tabela 6.17 – Perfis utilizados no pórtico (3º exemplo).

Barra	Perfil	Barra	Perfil	Barra	Perfil
C1	CVS 250x37.5	C16	CVS 300x56.5	V7	VS 600x 95.0
C2	CVS 300x56.5	C17	CVS 300x56.5	V8	VS 500x72.6
C3	CVS 300x56.5	C18	CVS 250x33.8	V9	VS 600x 95.0
C4	CVS 300x56.5	C19	CVS 250x33.8	V10	VS 500x72.6
C5	CVS 300x56.5	C20	CVS 300x56.5	V11	VS 500x61.1
C6	CVS 250x37.5	C21	CVS 300x56.5	V12	VS 600x 95.0
C7	CVS 250x37.5	C22	CVS 300x56.5	V13	VS 500x61.1

Barra	Perfil	Barra	Perfil	Barra	Perfil
C8	CVS 300x56.5	C23	CVS 300x56.5	V14	VS 600x 95.0
C9	CVS 300x56.5	C24	CVS 250x33.8	V15	VS 500x61.1
C10	CVS 300x56.5	V1	VS 500x72.6	V16	VS 500x61.1
C11	CVS 300x56.5	V2	VS 600x 95.0	V17	VS 600x 95.0
C12	CVS 250x37.5	V3	VS 500x72.6	V18	VS 500x61.1
C13	CVS 250x33.8	V4	VS 600x 95.0	V19	VS 600x 95.0
C14	CVS 300x56.5	V5	VS 500x72.6	V20	VS 500x61.1
C15	CVS 300x56.5	V6	VS 500x72.6		

6.3.1 Análise P-Delta do Pórtico

Será realizada uma série de iterações no pórtico até que ele estabilize o seu deslocamento lateral. Estas iterações tem como finalidade calcular as cargas laterais finais que serão adicionadas nas cargas de vento fatorada (W) de cada pavimento. O resultados das cargas calculadas na primeira interação pode ser observada na Tabela 6.18.

Tabela 6.18 – P-Delta – Cargas laterais (primeira interação).

H (Piso1) = H7+H8+H9+H10+H11+H12	=	-15,58 kN
H (Piso2) = H13+H14+H15+H16+H17+H18	=	-7,69 kN
H (Piso3) = H19+H20+H21+H22+H24+H24	=	-11,85 kN
H (Piso2) = H25+H26+H27+H28+H29+H30	=	-8,34 kN

Usando estas cargas, uma segunda interação foi realizada. As novas cargas encontradas apresentam uma variação de 59,2 % em relação à primeira interação, tornando necessária a realização de uma terceira interação substituindo as cargas da Tabela 6.18 pelas da Tabela 6.19.

Tabela 6.19 – P-Delta - Cargas laterais (segunda iteração).

H (Piso1) = $H7+H8+H9+H10+H11+H12$	=	-23,02 kN
H (Piso2) = $H13+H14+H15+H16+H17+H18$	=	-12,02 kN
H (Piso3) = $H19+H20+H21+H22+H24+H24$	=	-20,10 kN
H (Piso2) = $H25+H26+H27+H28+H29+H30$	=	-13,62 kN

Após a realização de uma terceira iteração, as novas cargas encontradas apresentam uma variação de 22,4 % em relação à segunda iteração. Como esta variação é ainda muito grande, torna-se necessária a execução de uma quarta iteração utilizando as cargas encontradas na Tabela 6.20.

Tabela 6.20 – P-Delta - Cargas laterais (terceira iteração).

H (Piso1) = $H7+H8+H9+H10+H11+H12$	=	-27,13 kN
H (Piso2) = $H13+H14+H15+H16+H17+H18$	=	-14,62 kN
H (Piso3) = $H19+H20+H21+H22+H24+H24$	=	-25,36 kN
H (Piso2) = $H25+H26+H27+H28+H29+H30$	=	-16,89 kN

Após a realização de uma quarta iteração, as novas cargas encontradas apresentavam uma variação de 14,3 % em relação à terceira iteração. Como esta variação é ainda muito grande, torna-se necessária a execução de uma quinta e última iteração utilizando as cargas encontradas pelas da Tabela 6.21.

Tabela 6.21 – P-Delta - Cargas laterais (quarta iteração).

H (Piso1) = $H7+H8+H9+H10+H11+H12$	=	-28,83 kN
H (Piso2) = $H13+H14+H15+H16+H17+H18$	=	-16,79 kN
H (Piso3) = $H19+H20+H21+H22+H24+H24$	=	-28,02 kN
H (Piso2) = $H25+H26+H27+H28+H29+H30$	=	-18,77 kN

Nesta iteração, as novas cargas apresentam uma variação de apenas 6,2 % em relação a iteração anterior. A Figura 6.39 mostra a variação das cargas em função do número de iterações efetivadas. Já Tabela 6.22 mostra as cargas finais encontradas, que serão adicionadas as cargas de ventos de cada piso para o dimensionamento do pórtico.

Tabela 6.22 – P-Delta - Cargas laterais (quinta iteração).

H (Piso1) = $H7+H8+H9+H10+H11+H12$	=	-30,91 kN
H (Piso2) = $H13+H14+H15+H16+H17+H18$	=	-17,20 kN
H (Piso3) = $H19+H20+H21+H22+H24+H24$	=	-30,36 kN
H (Piso2) = $H25+H26+H27+H28+H29+H30$	=	-20,01 kN

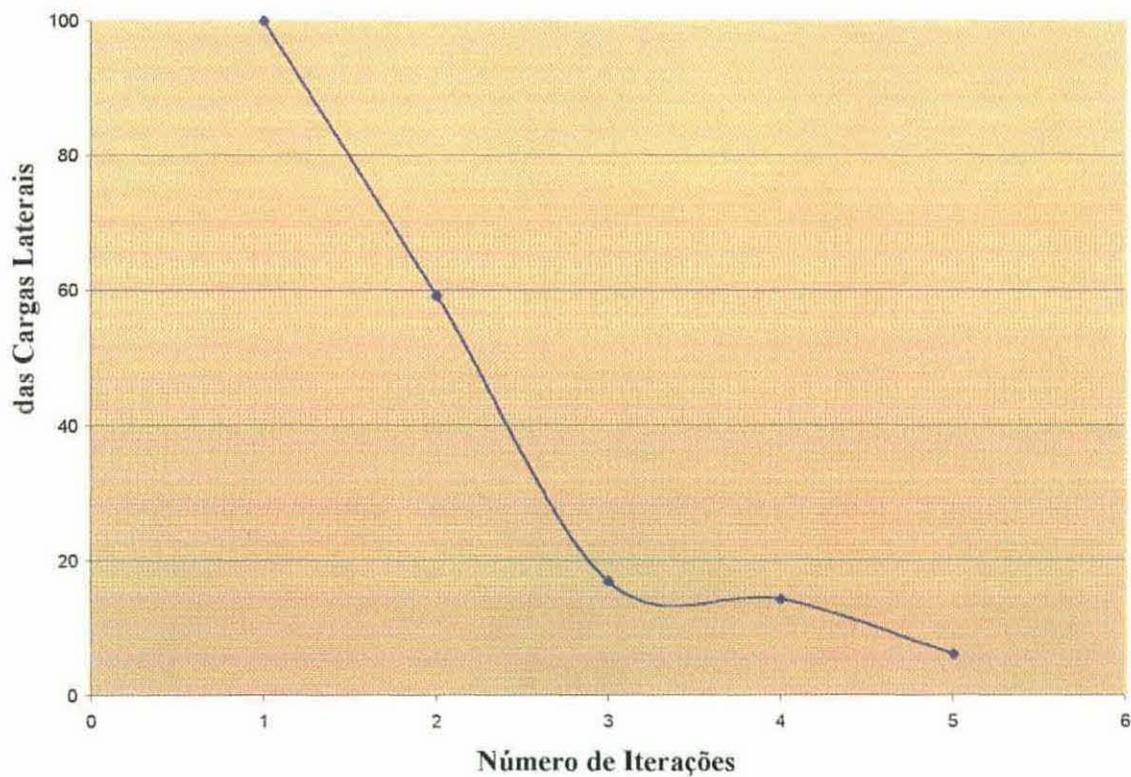


Fig. 6.39 – Variação da carga lateral através do processo P-Delta.

Os diagramas de forças cortantes e dos momentos fletores do pórtico, estão representados na Figuras 6.40 e 6.41 e seus resultados na Tabela 6.23.

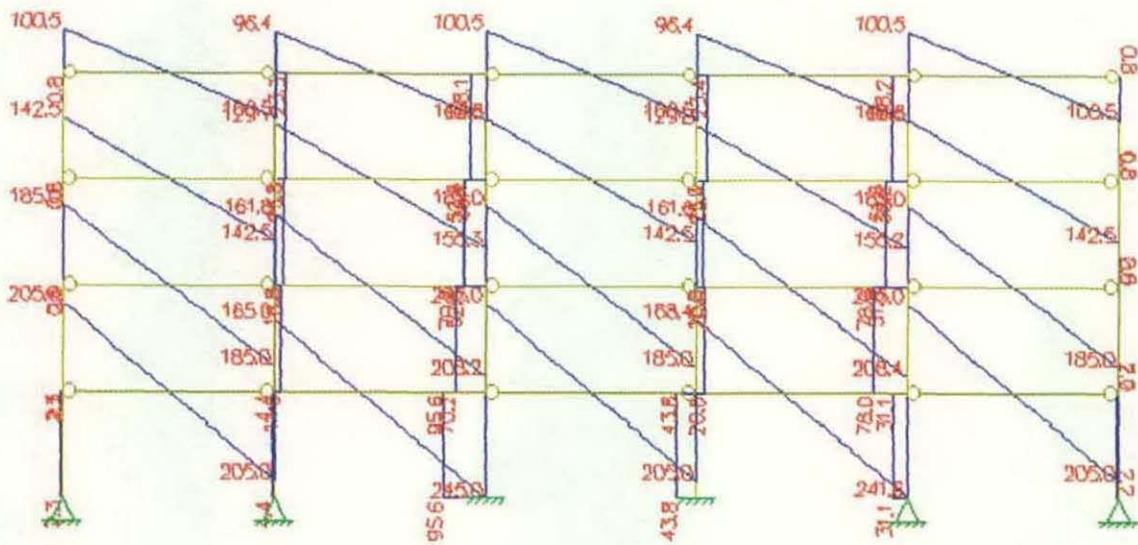


Fig. 6.40 - Diagrama de forças cortantes (cargas finais do 3º exemplo) [kN].

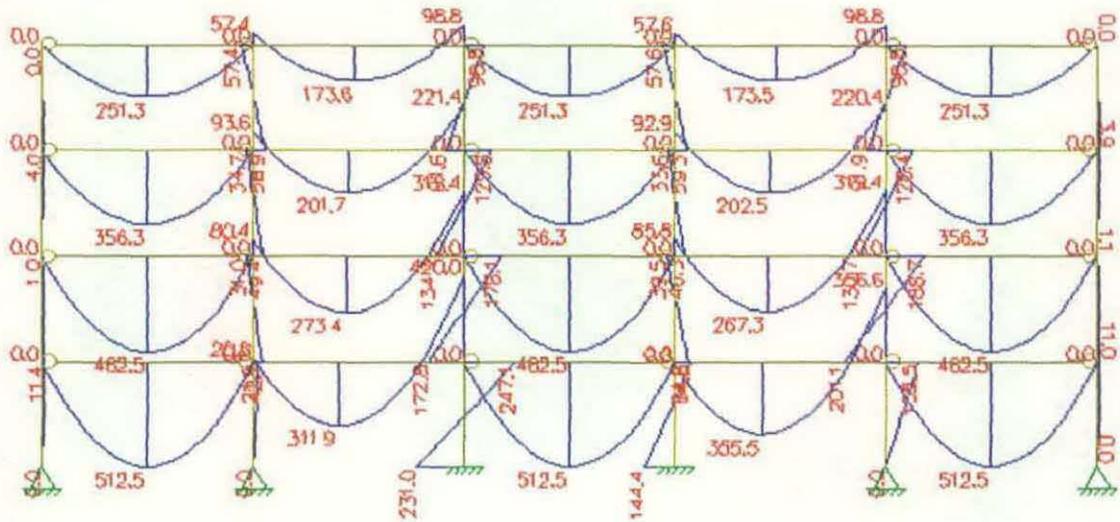


Fig. 6.41- Diagrama de momentos fletores (cargas finais do 3º exemplo) [kN.m].

Tabela 6.23 - Esforços internos e deslocamentos máximos presentes nas barras do modelo após a análise do pórtico (3º exemplo).

Barra	V inicial (kN)	V final (kN)	M inicial (kN.m)	M final (kN.m)	Δ_{Vertical} (mm)	Δ_{Lateral} (mm)
C1	2.3	2.3	0.0	11.4	0.0	37.9
C2	4.3	4.3	0.0	21.9	0.0	37.6
C3	95.6	95.6	231.0	247.1	0.0	37.4

Barra	V _{inicial} (kN)	V _{final} (kN)	M _{inicial} (kN.m)	M _{final} (kN.m)	Δ _{Vertical} (mm)	Δ _{Lateral} (mm)
C4	43.8	43.8	144.4	74.6	0.0	37.2
C5	31.1	31.1	0.0	155.5	0.0	38.7
C6	2.2	2.2	0.0	11.4	0.0	37.4
C7	2.1	2.1	11.4	1.0	0.0	20.7
C8	14.6	14.6	42.1	31.0	0.0	20.6
C9	70.2	70.2	172.8	178.1	0.0	21.0
C10	20.8	20.8	64.8	39.5	0.0	20.8
C11	77.9	77.9	201.1	188.7	0.0	20.7
C12	2.0	2.0	11.0	1.0	0.0	20.5
C13	0.6	0.6	1.0	4.0	0.0	13.1
C14	16.8	16.8	49.4	34.7	0.0	13.0
C15	52.8	52.8	134.3	129.8	0.0	12.9
C16	16.0	16.0	46.3	33.6	0.0	13.0
C17	51.8	51.8	130.7	128.4	0.0	13.0
C18	0.6	0.6	1.2	3.9	0.0	12.9
C19	0.8	0.8	4.0	0.0	0.0	5.8
C20	23.3	23.3	58.9	57.4	0.0	5.9
C21	38.2	38.2	91.6	98.8	0.0	6.4
C22	23.4	23.4	54.4	57.6	0.0	5.9
C23	38.2	38.2	92.0	98.8	0.0	6.4
C24	0.8	0.8	3.9	0.0	0.0	5.9
V1	205.0	205.0	0.0	0.0	64.4	0.0
V2	165.0	245.0	20.2	420.0	20.8	0.0
V3	205.0	205.0	0.0	0.0	65.1	0.0
V4	168.0	241.6	9.8	356.6	24.4	0.0
V5	205.0	205.0	0.0	0.0	64.7	0.0
V6	185.0	185.0	0.0	0.0	61.0	0.0
V7	161.8	208.2	80.4	312.4	22.1	0.0
V8	185.0	185.0	0.0	0.0	62.1	0.0
V9	161.6	208.4	85.8	319.4	21.7	0.0
V10	185.0	185.0	0.0	0.0	61.4	0.0
V11	142.5	142.5	0.0	0.0	60.2	0.0
V12	129.7	155.3	13.6	221.4	19.8	0.0
V13	142.5	142.5	0.0	0.0	61.5	0.0
V14	129.8	155.2	92.9	220.4	19.9	0.0

Barra	V _{inicial} (kN)	V _{final} (kN)	M _{inicial} (kN.m)	M _{final} (kN.m)	Δ_{Vertical} (mm)	Δ_{Lateral} (mm)
V15	142.5	142.5	0.0	0.0	60.6	0.0
V16	100.5	100.5	0.0	0.0	45.3	0.0
V17	96.4	104.4	57.4	98.8	19.8	0.0
V18	100.5	100.5	0.0	0.0	46.6	0.0
V19	96.4	104.6	57.7	98.8	19.9	0.0
V20	100.5	100.5	0.0	0.0	55.8	0.0

De acordo com a Tabela 6.23 conclui-se que: as colunas do primeiro, segundo e terceiro piso (C1 a C18) não atendem ao deslocamento máximo lateral (10 mm) permitido pela norma; algumas das vigas não atenderam ao deslocamento máximo vertical (27.7 mm) permitido pela norma. Decidiu-se então modificar as seções das barras do pórtico, antes de se fazer o dimensionamento. As novas seções dos perfis alterados, estão representadas na Tabela 6.24.

Tabela 6.24 – Novos perfis utilizados no pórtico (3º exemplo).

Barra	Perfil	Barra	Perfil	Barra	Perfil
C1	CVS 500x180	C16	CVS 350x136	V7	VS 600x140
C2	CVS 500x180	C17	CVS 350x136	V8	VS 600x152
C3	CVS 500x180	C18	CVS 350x136	V9	VS 600x152
C4	CVS 500x180	C19	CVS 250x33.8	V10	VS 600x152
C5	CVS 500x180	C20	CVS 300x56.5	V11	VS 600x140
C6	CVS 500x180	C21	CVS 300x56.5	V12	VS 600x140
C7	CVS 400x116	C22	CVS 300x56.5	V13	VS 600x152
C8	CVS 400x116	C23	CVS 300x56.5	V14	VS 600x140
C9	CVS 400x116	C24	CVS 250x33.8	V15	VS 600x152
C10	CVS 400x116	V1	VS 600x152	V16	VS 600x152
C11	CVS 400x116	V2	VS 600x140	V17	VS 600x140
C12	CVS 400x116	V3	VS 600x152	V18	VS 600x152
C13	CVS 350x136	V4	VS 600x140	V19	VS 600x140

Barra	Perfil	Barra	Perfil	Barra	Perfil
C14	CVS 350x136	V5	VS 600x152	V20	VS 600x140
C15	CVS 350x136	V6	VS 600x152		

Os novos diagramas de forças cortantes, de momentos fletores e a configuração da deformada, estão ilustrados nas Figuras 6.42 a 6.44 e seus resultados na Tabela 6.25.

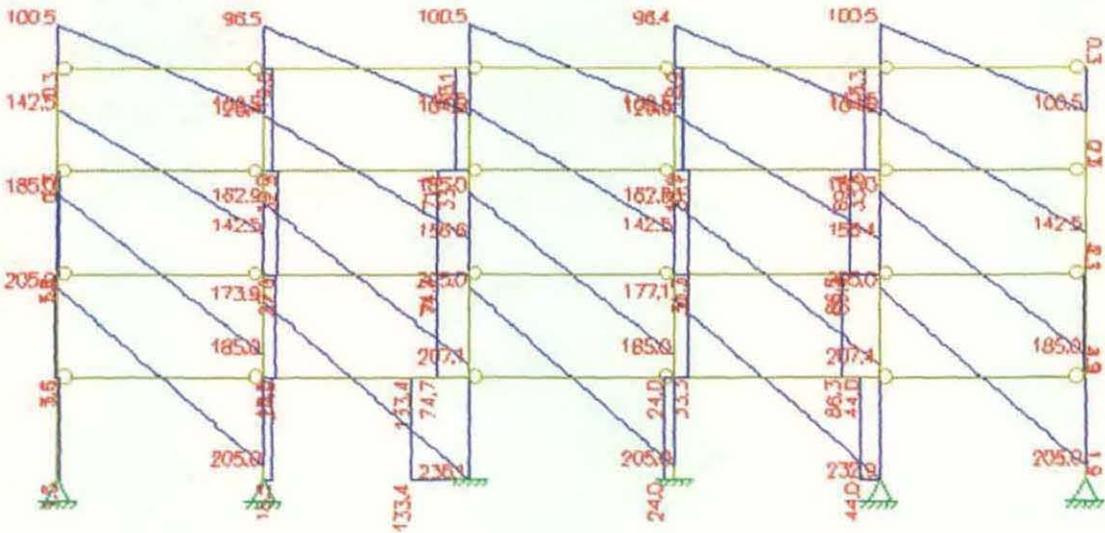


Fig. 6.42 - Diagrama de forças cortantes para as novas seções (3º exemplo) [kN].

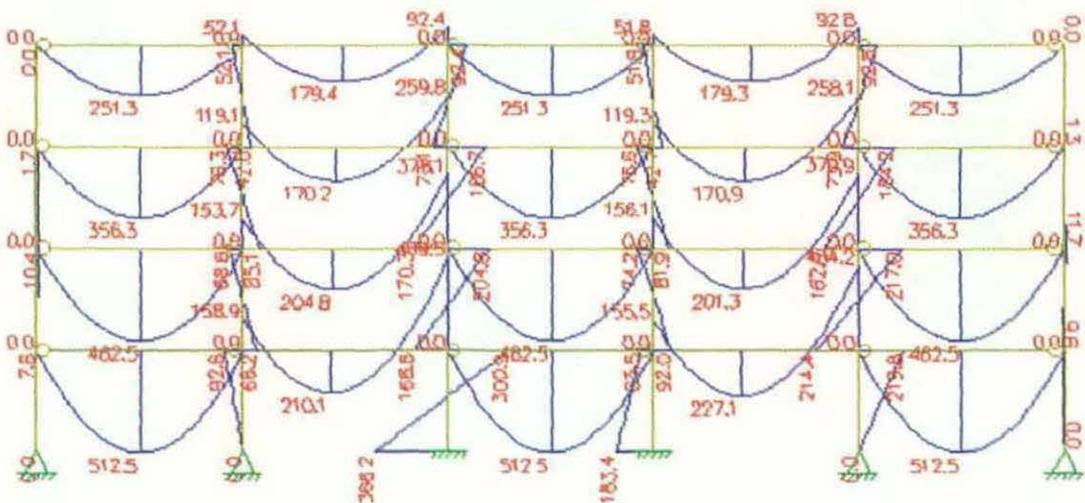


Fig. 6.43 - Diagrama de momentos fletores para as novas seções (3º exemplo) [kN.m].

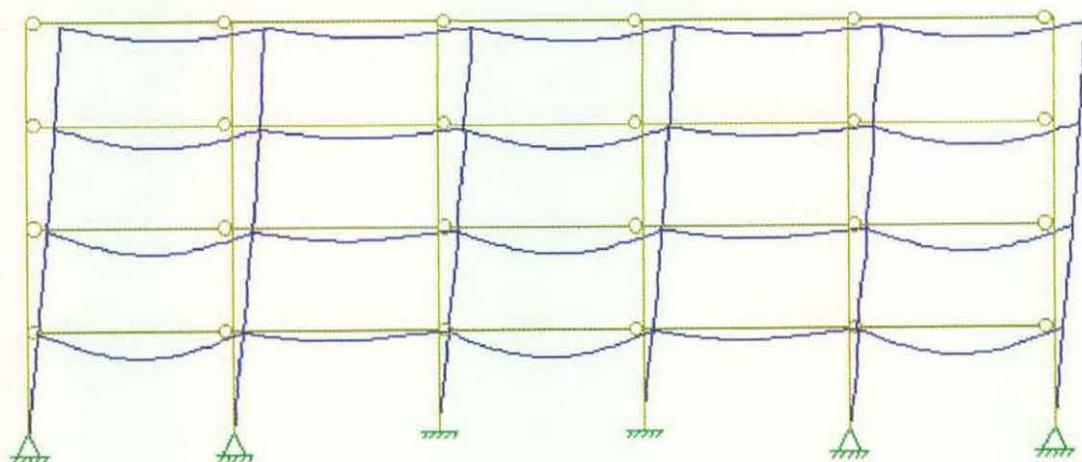


Fig. 6.44 – Configuração da deformadas para as novas seções (3º exemplo) [fator amplificador igual a 65.4].

Tabela 6.25 - Esforços internos e deslocamentos máximos presentes nas barras do modelo após a nova análise da estrutura (3º exemplo).

Barra	V inicial (kN)	V final (kN)	M inicial (kN.m)	M final (kN.m)	Δ_{Vertical} (mm)	Δ_{Lateral} (mm)
C1	1.5	1.5	0.0	7.6	0.0	9.0
C2	18.5	18.5	0.0	92.6	0.0	8.9
C3	133.4	133.4	366.2	300.9	0.0	8.6
C4	24.0	24.0	183.4	63.5	0.0	8.6
C5	44.0	44.0	0.0	219.8	0.0	8.8
C6	1.9	1.9	0.0	9.6	0.0	8.8
C7	3.6	3.6	7.6	10.4	0.0	9.6
C8	27.0	27.0	66.3	68.6	0.0	9.7
C9	74.7	74.7	168.6	204.8	0.0	9.9
C10	33.3	33.3	92.0	74.3	0.0	9.8
C11	71.4	71.4	214.4	217.0	0.0	9.5
C12	33.3	33.3	9.6	1.7	0.0	9.5
C13	86.3	86.3	10.4	1.7	0.0	7.8
C14	4.3	4.3	85.1	76.3	0.0	7.7
C15	1.74	1.74	170.3	186.7	0.0	7.6
C16	32.3	32.3	81.8	76.6	0.0	7.5
C17	69.4	69.4	162.9	184.2	0.0	7.6

Barra	V inicial (kN)	V final (kN)	M inicial (kN.m)	M final (kN.m)	Δ_{Vertical} (mm)	Δ_{Lateral} (mm)
C18	2.1	2.1	11.7	1.3	0.0	7.5
C19	0.34	0.34	1.7	0.0	0.0	5.5
C20	19.0	19.0	42.8	52.0	0.0	5.5
C21	33.1	33.1	73.1	92.4	0.0	6.7
C22	18.9	18.9	42.7	51.8	0.0	5.7
C23	33.6	33.6	73.9	92.83	0.0	6.7
C24	0.3	0.3	1.5	0.0	0.0	5.6
V1	205.0	205.0	0.0	0.0	20.6	0.0
V2	173.1	232.9	158.9	469.5	10.5	0.0
V3	205.0	205.0	0.0	0.0	20.6	0.0
V4	168.0	241.6	155.34	434.2	11.9	0.0
V5	205.0	205.0	0.0	0.0	20.3	0.0
V6	185.0	185.0	0.0	0.0	19.4	0.0
V7	162.9	207.1	153.7	375.1	12.4	0.0
V8	185.0	185.0	0.0	0.0	20.1	0.0
V9	162.6	207.4	156.1	379.9	12.2	0.0
V10	185.0	185.0	0.0	0.0	19.5	0.0
V11	142.5	142.5	0.0	0.0	17.2	0.0
V12	128.6	156.4	119.1	259.8	11.9	0.0
V13	142.5	142.5	0.0	0.0	18.6	0.0
V14	129.8	155.2	119.3	258.1	12.0	0.0
V15	142.5	142.5	0.0	0.0	17.4	0.0
V16	100.5	100.5	0.0	0.0	13.5	0.0
V17	96.5	104.5	52.1	92.4	14.9	0.0
V18	100.5	100.5	0.0	0.0	14.5	0.0
V19	96.5	104.6	51.8	92.8	14.9	0.0
V20	100.5	100.5	0.0	0.0	13.7	0.0

Depois de realizado a análise do pórtico e verificado os deslocamentos laterais e verticais, parte-se agora para o dimensionamento da estrutura, que pode ser observados nas Figuras 6.45 a 6.48 e seus resultados na Tabela 6.26.

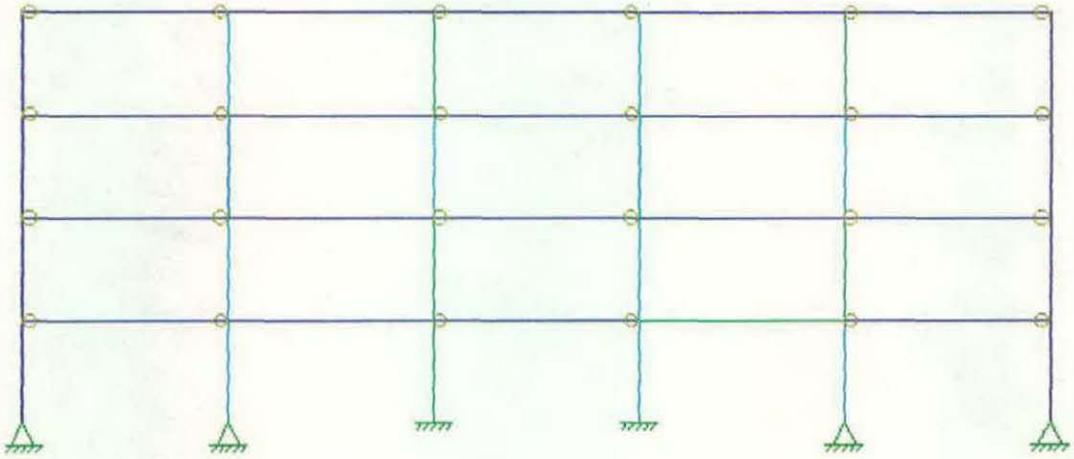


Fig. 6.45 – Fator de resistência axial da seção (3º exemplo).

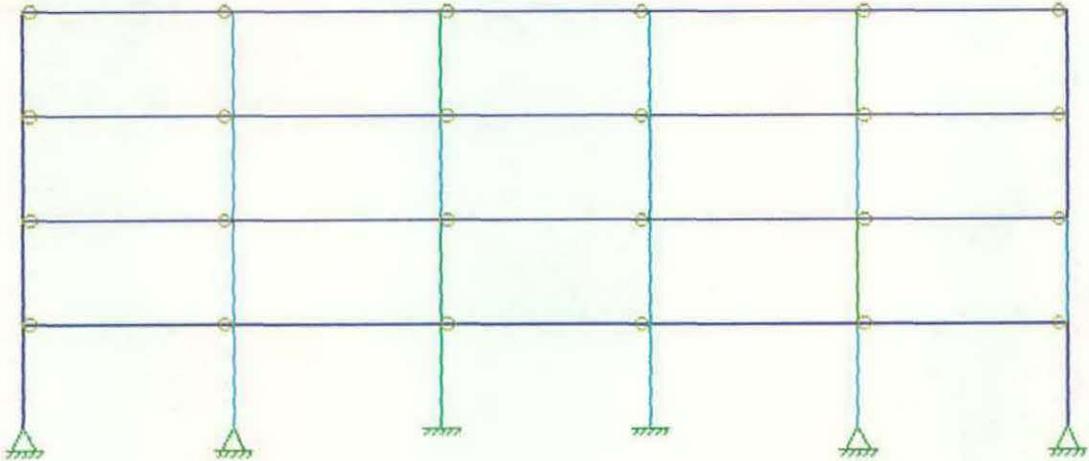


Fig. 6.46 – Fator de resistência à flambagem no plano (3º exemplo).

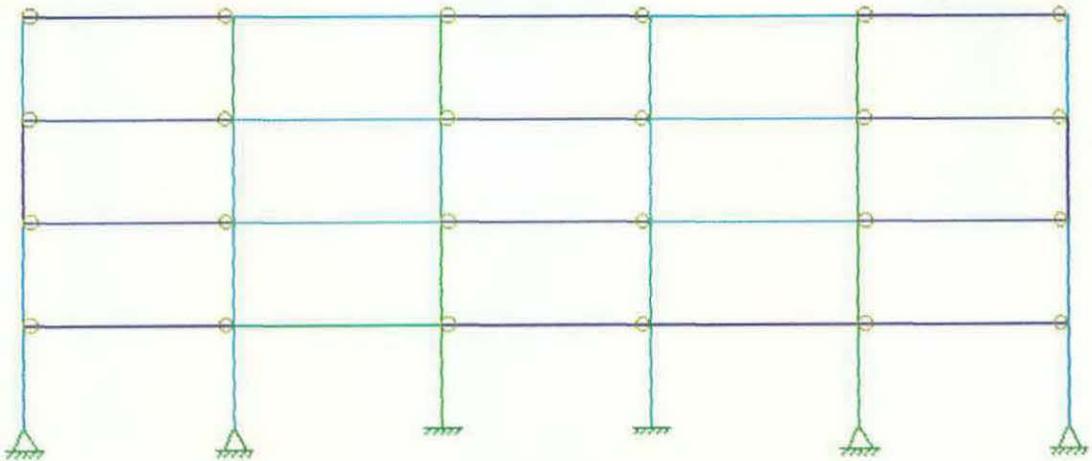


Fig. 6.47 – Fator de resistência à flambagem fora do plano (3º exemplo).

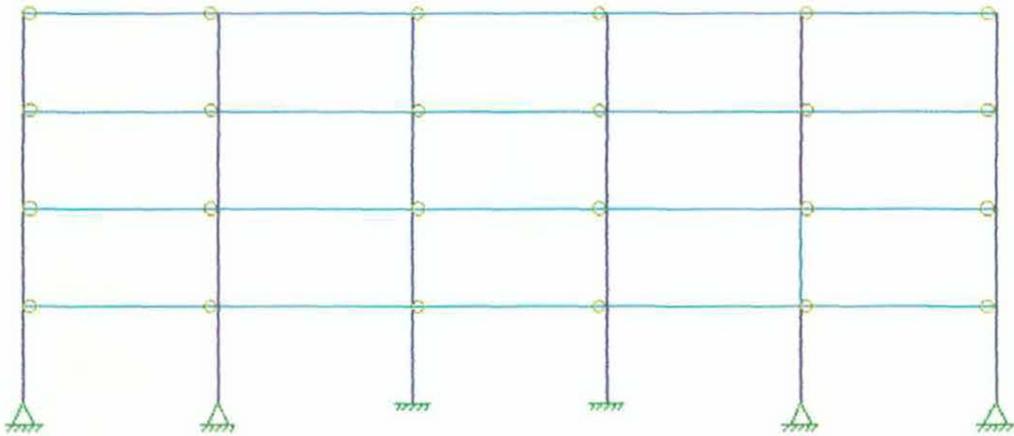


Fig. 6.48 – Fator de resistência da seção ao esforço cortante (3º exemplo).

Tabela 6.26 – Resultados do dimensionamento realizado no pórtico do 3º exemplo.

Barra	Vers	Verp	Verfp	Verc	Barra	Vers	Verp	Verfp	Verc
C1	0.11	0.11	0.14	0.00.1	C23	0.44	0.43	0.62	0.09
C2	0.26	0.24	0.31	0.002	C24	0.10	0.11	0.31	0.00
C3	0.47	0.46	0.53	0.10	V1	0.01	0.02	0.04	0.30
C4	0.32	0.26	0.38	0.02	V2	0.02	0.02	0.43	0.33
C5	0.37	0.31	0.43	0.00	V3	0.001	0.08	0.005	0.30
C6	0.11	0.11	0.14	0.001	V4	0.04	0.00	0.00	0.33
C7	0.12	0.12	0.16	0.005	V5	0.01	0.00	0.00	0.30
C8	0.29	0.30	0.37	0.05	V6	0.05	0.06	0.02	0.27
C9	0.48	0.38	0.57	0.12	V7	0.07	0.08	0.37	0.29
C10	0.32	0.32	0.40	0.05	V8	0.004	0.004	0.01	0.27
C11	0.50	0.52	0.59	0.14	V9	0.007	0.007	0.36	0.29
C12	0.12	0.13	0.16	0.006	V10	0.001	0.001	0.003	0.27
C13	0.07	0.06	0.10	0.002	V11	0.01	0.10	0.30	0.21
C14	0.21	0.22	0.28	0.04	V12	0.18	0.02	0.35	0.22
C15	0.35	0.36	0.43	0.08	V13	0.004	0.004	0.01	0.21
C16	0.21	0.21	0.28	0.04	V14	0.01	0.01	0.32	0.22
C17	0.35	0.35	0.42	0.08	V15	0.00	0.00	0.00	0.21
C18	0.07	0.06	0.10	0.002	V16	0.005	0.006	0.02	0.15
C19	0.10	0.11	0.32	0.001	V17	0.14	0.016	0.31	0.15
C20	0.29	0.29	0.44	0.05	V18	0.002	0.03	0.01	0.15
C21	0.44	0.43	0.62	0.08	V19	0.01	0.01	0.29	0.15

Barra	Vers	Verp	Verfp	Verc	Barra	Vers	Verp	Verfp	Verc
C22	0.29	0.29	0.44	0.05	V20	0.00	0.00	0.00	0.15

CAPÍTULO 7

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho descreve um sistema gráfico interativo, denominado *FTOOL (Frame Analysis Tool)*, para o ensino e automatização das tarefas de projeto estrutural de pórticos planos. No trabalho foram incorporadas as tarefas de dimensionamento de estruturas de aço segundo a Norma Canadense de projetos de estruturas de aço de edificações - CAN/CSA-S16.1-94. A integração completa das fases de pré-processamento, análise estrutural, pós-processamento e dimensionamentos, através de uma interface amigável e eficiente, cria um ambiente onde os resultados de um passo da modelagem podem ser interpretados pelo estudante e usados como informação para determinar as modificações de modelagem no passo seguinte. Ao testar diferentes concepções estruturais, acredita-se que os estudantes podem vir a compreender melhor o comportamento estrutural e as fases de dimensionamento dos pórticos.

Com as implementações realizadas no programa *FTOOL*, os estudantes de engenharia e os engenheiros civis executam um projeto estrutural com maior rapidez. Isso se deve ao fato de que diversas análises podem ser realizadas em um curto espaço de tempo para uma mesma estrutura, testando-se diferentes tipos de perfis metálicos. Com tal recurso, o usuário define uma estrutura mais econômica que pode atender com segurança as solicitações previstas em projeto. Pode-se também testar possíveis padronizações de elementos e ligações visando uma facilidade de fabricação e montagem.

Os critérios de dimensionamento implantados no programa permitem aos usuários não só a automatização das etapas, bem como explorar melhor as possibilidades de entendimento dos modos de ruína dos elementos estruturais e dos parâmetros controladores do dimensionamento da estrutura metálica. Estas etapas compreendem desde a determinação da classe até a cálculo dos estados limites últimos e de utilização dos perfis pertencentes à estrutura. Estas verificações são feitas através da visualização dos resultados realizados na

estrutura como um todo ou através de consultas individuais, barra a barra. A memória de cálculo gerada pelo programa auxilia os alunos no entendimento de todas as etapas do processo de dimensionamento estrutural em aço.

Uma das principais preocupações deste trabalho foi não modificar as estruturas de dados do programa FTOOL. As implementações necessárias foram realizadas com vista ao dimensionamento de estruturas metálicas, sem a modificação da filosofia inicial adotada pelo programam. Foram implantadas no programa duas novas estruturas de dados, sendo uma para armazenar as propriedades geométricas dos perfis metálicos soldados (VS, CS, CVS) e outra para armazenar as verificações dos estados últimos limites juntamente com os deslocamentos (verticais e laterais) máximos permitidos pela Norma Canadense. Outra preocupação deste trabalho foi implementar nas fórmulas utilizadas pelo programa a possibilidade de continuação deste trabalho para a realização do dimensionamento de estruturas metálicas tridimensionais.

A interface gráfica do FTOOL foi elaborada com o intuito de tornar interativo o manuseio do programa pelo usuário. Neste trabalho foi criado um diálogo para a escolha dos perfis metálicos a serem utilizados na modelagem da estrutura. Implantou-se no programa dois submenus que são acionados apenas na fase de pós-processamento da estrutura. O primeiro submenu é responsável pela visualização dos resultados das análises dos estados limites últimos de cada barra analisada. Neste submenu encontra-se uma lista contendo dez perfis que podem ser usados como opções no caso da escolha ou de substituição do perfil pelo usuário, que pode modificar apenas uma barra específica previamente selecionada ou então todas as barras com as mesmas propriedades da barra. O outro submenu serve para a visualização dos resultados da análise de estados limites da estrutura como um todo, onde o usuário escolhe um tipo de verificação e através de uma escala de cores ele pode visualizar as barras que estão sendo mais solicitadas e fazer uma análise mais detalhada destas.

O projeto estrutural metálico tradicional, hoje em dia, é executado em quatro fases: lançamento, análise, dimensionamento e detalhamento. O dimensionamento de um pórtico estrutural em aço pode ser caracterizado de acordo com suas características de deslocabilidade: estruturas deslocáveis e estruturas indeslocáveis. Estruturas deslocáveis são

aquelas que a estabilidade lateral é garantida somente pelas peças (vigas e colunas) e ligações que a compõem. Já no caso de estruturas indeslocáveis, os contraventamentos são os elementos responsáveis diretos pela estabilidade lateral da estrutura. O processo de dimensionamento de uma estrutura deslocável por sua vez pressupõe o perfeito entendimento de uma estrutura indeslocável. Um dos grandes problemas que ocorrem no projeto de uma estrutura é que quando se alteram as propriedades geométricas de algum membro da estrutura após um primeiro dimensionamento, os novos esforços gerados para o dimensionamento das barras modificam-se, havendo a possibilidade de que alguns perfis que passaram no primeiro dimensionamento não atenderem aos novos estados limites últimos. Caso uma re-análise não seja efetuada, os resultados deste processo de dimensionamento podem ser anti-econômicos, uma vez que a tendência é aumentar a margem de segurança para cobrir possíveis erros de modelagem e de fabricação. O programa permite também o dimensionamento de estruturas deslocáveis, através de uma análise de segunda ordem na estrutura tanto pelo método simplificado $U1/U2$ como por uma análise P-Delta. Para isto foi necessário dividir em etapas estes processos, como está demonstrado nos exemplos 6.2 e 6.3. Embora esta análise não esteja totalmente integrada no FTOOL, o projetista consegue ganhar bastante tempo realizando estas etapas através do uso do programa, pois o cálculo dos esforços e as leituras dos deslocamentos laterais são feitas com mais rapidez do que se fossem feitos manualmente.

Várias sugestões podem ser feitas para a continuação deste sistema. O trabalho ainda está no início e faltam muitas etapas para se chegar ao objetivo final. Para uma melhor utilização do programa como um sistema integrado para o dimensionamento de estruturas de aço são apresentadas as seguintes sugestões:

- Implementação de vários casos de carregamentos que atuam independentemente, assim como combinações destes casos;
- Implementação de análise de segunda ordem da estrutura elasto-plástica;
- Implementação da análise de estruturas reticuladas tridimensionais;

- Implementação de novas seções de perfis laminados (seções tubulares, barras chatas e cabos de aço, etc.);
- Implementações do dimensionamento de ligações semi-rígidas;
- Implementação da visualização da memória de cálculo na tela do computador, com a possibilidade de alternância entre a tela do FTOOL e a tela da memória de cálculo;
- Consideração de um atributo nodal para classificar o nó quanto à restrição lateral. Isto é necessário para implementar análise de flambagem fora do plano;
- Identificação automática de nós auxiliares que são criados em membros apenas para aplicação de cargas concentradas ou cargas distribuídas parciais. Isto é necessário para poder considerar o comprimento real do membro no caso de análise de segunda ordem;
- Implementação do dimensionamento da estrutura, levando em consideração critérios de outras normas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAN/CSA-S16.1-94, Canadian Standards Association, "Limit States Design of Steel Structures", National Standard of Canada, Rexdale, Ontario, 1994.

GALAMBOS, T.V. 1988. Guide to stability design criteria for metal structures (4th ed.). Structural Stability Research Council, John Wiley & Sons, Inc., New York, NY.

GATTASS, M. e LOPES, M. J. R., 1987, "Projeto de um Pré-processador para Pórticos Tridimensionais", Colloquial, 87, Porto Alegre, RS, Brasil.

GOTAIRE, C. J.C., 1991, "Consistência Geométrica e Recurso de "Undo" no Pré-Processamento de Edifícios", Dissertação de Mestrado, Dpto. de Engenharia Civil, PUC-Rio, RJ, Brasil, Novembro.

HOLANDA, A.S., 1995, "Contribuições para a Automação do Projeto Estrutural Metálico", Tese de Mestrado, Dpto. De Engenharia Civil, PUC-Rio, RJ, Brasil, Abril.

KENNEDY, D. J. L., 1994 a, "Resistance Formulations for Steel Components", Anais do 2º Simpósio Brasileiro de Estruturas de Aço, Paraná, Brasil.

LETHOLA, N., 1996, "Desenvolvimento de Sistema Integrado para Projeto de Estruturas de Aço de Edificações", Tese de Doutorado, Dpto. de Engenharia Civil, PUC-Rio, RJ, Brasil, Abril.

McGUIRE, W., 1988, "Iterative Computer Graphics and Steel Design", Anais do 3º Simpósio Brasileiro de Estruturas de Aço", págs. 143-178, PUC-Rio, RJ, Brasil.

MÄNTYLÄ, M., 1988, "An Introduction to Solid Modeling", Computer Science Press, Rockville, Maryland.

MARTHA, L.F., Corseuil, E.T.; Figueiredo, V.S., "An Academical Graphics System for for 2D Frame Structures", Anais do 2º Simpósio Brasileiro de Estruturas de Aço, CEFET, Curitiba, PR, Out. 1994, pp. 110-114, 1994.

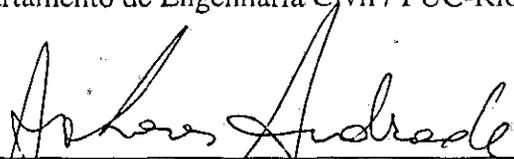
MONT'ALVERNE, A.M., 1995, "Pré-Processador para Modelos Unifilares com Manipulação Direta e Programação Orientada a Objetos", Tese de Mestrado, Dpto. De Engenharia Civil, PUC-Rio, RJ, Brasil, Março.

SANTI, M. R., 1996, "Proposta de Um Sistema Configurável para o Projeto de Ligações Viga/Coluna em Estruturas de Aço", Dissertação de Mestrado, Dpto. de Engenharia Civil, PUC-Rio, RJ, Brasil.

“Um Sistema Gráfico-Interativo para Análise e Dimensionamento de Pórticos Planos em Aço”. Dissertação de Mestrado apresentada por RICARDO HISSA PEIXOTO em 05 de Março de 1999 ao Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio e aprovada pela Comissão Julgadora, formada pelos seguintes professores:



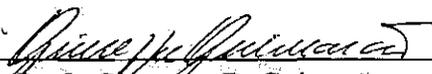
Prof. Luiz Fernando C.R. Martha (Orientador)
Departamento de Engenharia Civil / PUC-Rio



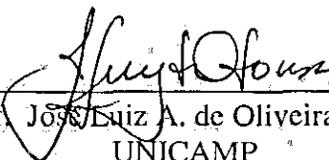
Prof. Sebastião Arthur L. de Andrade (Co-Orientador)
Departamento de Engenharia Civil / PUC-Rio



Prof. Pedro C.G. da Silva Vellasco (Co-Orientador)
UERJ



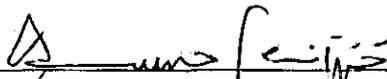
Prof. Giuseppe B. Guimarães
Departamento de Engenharia Civil / PUC-Rio



Prof. José Luiz A. de Oliveira e Sousa
UNICAMP

Visto e permitida a impressão,

Rio de Janeiro, 9 / 6 / 99



Prof. Paulo Batista Gonçalves
Coordenador dos Programas de Pós-Graduação
do Centro Técnico Científico