

Universidade Federal de Ouro Preto – Escola de Minas  
Departamento de Engenharia Civil  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

# **CS-ASA Preprocessor: Sistema Gráfico Interativo de Pré-processamento para Análise Avançada de Estruturas**

**Ícaro Machado Prado**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação do  
Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da  
Universidade Federal de Ouro Preto, como parte dos  
requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia  
Civil, área de concentração: Construção Metálica

Orientadores: Prof. Dr. Ricardo Azoubel da Mota Silveira  
Prof<sup>ª</sup>. Dra. Andréa Regina Dias da Silva

Ouro Preto, Março de 2012

P896c Prado, Ícaro Machado.  
CS-ASA Preprocessador [manuscrito] : sistema gráfico interativo de pré-processamento para análise avançada de estruturas / Ícaro Machado Prado - 2012.

162f.: il. color.; graf.; tabs.

Orientadores: Prof. Dr. Ricardo Azoubel da Mota Silveira  
Profa. Dra. Andréa Regina Dias da Silva

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.  
Área de concentração: Construção Metálica.

1. Programas de computador - Pré-processador - Teses. 2. Métodos gráficos - Teses. 3. Análise estrutural (Engenharia) - Teses. 4. Método dos elementos finitos - Teses. I. Universidade Federal de Ouro Preto. II. Título.

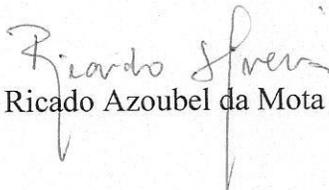
CDU: 624.014.2:519.674

Catlogação: [sisbin@sisbin.ufop.br](mailto:sisbin@sisbin.ufop.br)

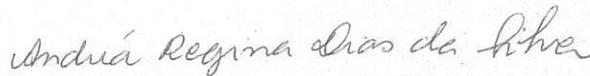
**CS-ASA PREPROCESSOR: PROGRAMA GRÁFICO INTERATIVO  
DE PRÉ-PROCESSAMENTO PARA ANÁLISE AVANÇADA DE  
ESTRUTURAS**

**AUTOR: ÍCARO MACHADO PRADO**

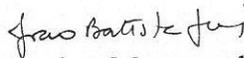
Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 07 de março de 2012, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:



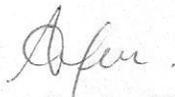
Prof. Dr. Ricardo Azoubel da Mota Silveira (Orientador / UFOP)



Profa. Dra. Andréa Regina Dias da Silva (Orientadora / UFOP)



Prof. Dr. João Batista Marques de Sousa Jr. (UFOP)



Prof. Dr. Anderson Pereira (TeCGraf/PUC-RJ)

*“Assuma consigo mesmo o compromisso de estar sempre melhorando.”*

*H. Jackson Brown Jr*

À minha família e aos meus orientadores

# Agradecimentos

Registro aqui meus sinceros agradecimentos.

Ao meu orientador, prof. Ricardo Azoubel da Mota Silveira, pela amizade, dedicação e orientação durante toda a realização deste trabalho. Pela confiança em mim depositada, pelas sugestões e colaborações e por acreditar na minha capacidade. Por me mostrar que um trabalho bem feito e com qualidade necessita de muita paciência, atenção, estímulo, exigência e concentração. Enfim, pela marcante orientação, todos os ensinamentos e, também, pelo apoio, entusiasmo e por me tornar parte de seu projeto, muito obrigado.

À minha co-orientadora, profa. Andréa Regina Dias da Silva, pelo apoio técnico, pelas discussões e sugestões que engrandeceram este trabalho, pela incansável disponibilidade em me ajudar, e dividir comigo seus conhecimentos. Pelo incentivo, amizade e pela colaboração em todas as fases do desenvolvimento desta dissertação, muito obrigado.

À Suzy, pela paciência nos momentos em que não pude estar presente, por aliviar minhas preocupações e ouvir com carinho minhas queixas e lamentações. Por se mostrar sempre feliz com minhas conquistas. E ainda, por me inspirar a ser uma pessoa cada vez melhor. Agradeço também ao meu filho, Miguel, que mesmo tão pequeno despertou em mim nobres sentimentos e uma energia “espontânea” para terminar este trabalho e, sobretudo, acreditar em sonhos.

Aos meus pais que compreenderam minha ausência ao longo do período em que este sonho estava em construção, que sempre me apoiaram e acreditaram na realização desta conquista.

Aos meus amigos e amigas, por compreenderem a minha ausência, e ainda sempre me receberem com palavras de incentivo.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PROPEC), pela disponibilidade e atenção em todos os momentos.

Agradeço também ao PROPEC, pela oportunidade e pela confiança.

À Róvia, pelo carinho, atenção e amizade em resolver todos os problemas.

Ao prof. Ivan Fábio Mota Menezes e Joabson Lima Alves, ambos do TeCGraf/Puc-Rio, pela ajuda e sugestões que ajudaram a engrandecer este trabalho.

Ao TeCGraf/Puc-Rio, pelos toolkits essenciais para a confecção da ferramenta proposta.

Aos colegas de turma, pelo convívio agradável.

À Capes pela ajuda financeira na concretização deste trabalho.

A todos, que de certa maneira, contribuíram para que este projeto fosse possível.

Resumo da Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

## **CS-ASA PREPROCESSOR: PROGRAMA GRÁFICO INTERATIVO DE PRÉ-PROCESSAMENTO PARA ANÁLISE AVANÇADA DE ESTRUTURAS**

**Ícaro Machado Prado**

Março/2012

*Orientadores:* Ricardo Azoubel da Mota Silveira  
Andréa Regina Dias da Silva

Pré-processadores gráficos são, atualmente, ferramentas importantes e imprescindíveis para os programas de análise estrutural baseados no Método dos Elementos Finitos. Tais ferramentas fornecem uma interface amigável com o usuário, auxiliando-o na edição/visualização do modelo estrutural, tornando, assim, a análise mais eficiente. Nesse sentido, este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma ferramenta computacional para pré-processamento, denominada *CS-ASA Preprocessor*, cujo objetivo principal é auxiliar o analista na utilização do programa CS-ASA, (Silva, 2009) — Sistema Computacional para Análise Avançada Estática e Dinâmica de Estruturas de Aço. Com esse pré-processador, além da modelagem estrutural (definição da malha, condições de contorno, carregamentos atuantes, ligações semirrígidas, entre outros), informações referentes ao tipo de análise que se pretende realizar são geradas. Como resultado da descrição do modelo e definição da análise, produzem-se arquivos de dados, chamados arquivos neutros, que serão utilizados pelo programa de análise CS-ASA como informações de entrada. O ambiente gráfico-interativo foi desenvolvido utilizando a linguagem de programação C. O sistema de interface IUP e recursos da biblioteca gráfica bidimensional CD são também usados para criação do ambiente. As funcionalidades do pré-processador, as características principais dos arquivos neutros gerados, dentre outras informações, serão detalhadas ao longo do trabalho aqui desenvolvido.

Abstract of Dissertation presented as partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Civil Engineering.

**CS-ASA PREPROCESSOR: INTERACTIVE GRAPHICS PREPROCESSOR  
PROGRAM FOR ADVANCED ANALYSIS OF STRUCTURES**

**Ícaro Machado Prado**

March/2012

*Advisors:* Ricardo Azoubel da Mota Silveira  
Andréa Regina Dias da Silva

Nowadays, interactive graphics preprocessors programs are important and indispensable tools for structural analysis based on finite element method or any other numerical application. These tools provide a user friendly interface, assisting the analyst in the structural model editing/visualization, and making the numerical study more efficient. Thus, this work presents the development of an interactive graphics preprocessing tool, named CS-ASA Preprocessor, whose primary purpose is to assist the analyst in using the CS-ASA Program, (Silva, 2009) – Computational System for Advanced Static and Dynamic Analysis of Steel Structures. Besides the structural modeling (finite element mesh, boundary conditions, applied loading, semi-rigid joints, among others), information regarding the type of analysis as well as the solution strategy can be generated by program developed. As result of structural modeling and analysis definition, data files are produced, here called neutral files, which can be used by CS-ASA users as input information. The interactive graphical environment was developed using the C programming language. The IUP interface system and the CD two dimensional graphics library resources are also used for the computational environment creation. The preprocessor tool features, the main characteristics of neutral files generated, among other information, are detailed along this dissertation.

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>x</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xv</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Considerações Iniciais e Objetivos .....	1
1.2 Trabalhos Relacionados .....	3
1.3 Organização do Trabalho .....	6
<b>2 O Programa CS-ASA</b>	<b>7</b>
2.1 Introdução .....	7
2.2 Características Gerais do CS-ASA .....	8
2.3 Análises Numéricas Avançadas com o CS-ASA .....	13
<b>3 O Pré-Processador</b>	<b>16</b>
3.1 Introdução .....	16
3.2 O Ambiente Gráfico .....	17
3.3 Os Menus .....	17
3.3.1 Menu Arquivo .....	18
3.3.2 Menu Exibir .....	19
3.3.3 Menu Inicialização .....	20
3.3.4 Menu Formulações .....	22
3.3.5 Menu Malha .....	25
3.3.6 Menu Condições de Contorno .....	35
3.3.7 Menu Ligações Semirrígidas .....	37
3.3.8 Menu Gráficos .....	46
3.3.9 Menu Carregamentos .....	48
3.3.10 Menu Análise Estática Não Linear .....	50
3.3.11 Menu Análise Dinâmica .....	57

<b>4</b>	<b>Os Arquivos Neutros</b>	<b>71</b>
4.1	Introdução .....	71
4.2	Arquivo Neutro 1 .....	71
4.3	Arquivo Neutro 2 .....	86
4.4	Arquivo Neutro 3 .....	93
<b>5</b>	<b>Exemplos de Aplicação do CS-ASA <i>Preprocessor</i></b>	<b>103</b>
5.1	Introdução .....	103
5.2	Exemplo 1: Análise Estática Linear .....	104
5.3	Exemplo 2: Análise Estática Não Linear .....	115
5.3.1	Não Linearidade Geométrica .....	117
5.3.2	Ligações Semirrígidas .....	120
5.3.3	Inelasticidade do Aço .....	127
5.3.4	Acoplamento dos Três Efeitos .....	129
5.4	Exemplo 3: Análise Dinâmica Não Linear .....	130
5.4.1	Ligações Semirrígidas e Não Linearidade Geométrica .....	131
5.4.2	Inelasticidade do Aço .....	134
<b>6</b>	<b>Considerações Finais</b>	<b>138</b>
6.1	Introdução .....	138
6.2	Conclusões .....	139
6.3	Sugestões para Trabalhos Futuros .....	140
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>142</b>

# Lista de Figuras

1.1	Interação entre os programas CS-ASA Preprocessor e CS-ASA.....	3
2.1	Programa CS-ASA: análises e efeitos considerados .....	10
2.2	Entrada de dados e saída de resultados .....	11
2.3	Formulações implementadas no sistema computacional.....	12
2.4	Análises estáticas não lineares com o CS-ASA .....	14
2.5	Análises dinâmicas não lineares com o CS-ASA.....	15
3.1	Interface gráfica do CS-ASA Preprocessor.....	18
3.2	As opções do menu <i>Arquivo</i> e informações gerais sobre o programa.....	19
3.3	Botões da barra de ferramentas e diálogo para geração do arquivo neutro.....	19
3.4	Menu <i>Exibir</i> .....	19
3.5	Menu <i>Inicialização</i> .....	20
3.6	Diálogos após acionar os comandos do menu <i>Inicialização</i> .....	21
3.7	Tipos de problema numa análise dinâmica .....	22
3.8	Menu <i>Formulações</i> .....	22
3.9	Formulações para a análise linear com ligações semirrígidas.....	23
3.10	Formulações para análise estática não linear .....	23
3.11	Formulações para análise dinâmica não linear.....	24
3.12	Tipos de análise inelástica.....	24
3.13	Norma usada para expressar a variação do módulo tangente.....	25
3.14	Critérios usados para definir a plastificação da seção.....	25
3.15	Menu <i>Malha</i> .....	25
3.16	Diálogo para escolha do modelo estrutural .....	26
3.17	Geração dos pontos nodais em pórticos .....	27
3.18	Diálogos para fornecer as coordenadas nodais de um pórtico .....	27
3.19	Mensagem de alerta para a ocorrência de erro na geração dos pontos nodais .....	27

3.20	Parâmetros usados na modelagem de um arco senoidal.....	28
3.21	Coordenadas dos pontos nodais de um arco senoidal .....	29
3.22	Parâmetros usados na modelagem de um arco circular (ou polar).....	30
3.23	Coordenadas dos pontos nodais de um arco circular .....	30
3.24	Parâmetros usados na modelagem de um arco parabólico .....	31
3.25	Coordenadas dos pontos nodais de um arco parabólico.....	31
3.26	Geração dos elementos finitos.....	32
3.27	Aviso sobre a ocorrência de erro na geração dos elementos.....	32
3.28	Diálogo para definir as propriedades dos materiais .....	33
3.29	Geração dos grupos de elementos com mesmo material.....	34
3.30	Geração das propriedades das seções transversais .....	35
3.31	Menu <i>Condições de contorno</i> .....	36
3.32	Diálogos para impor restrições aos pontos nodais .....	37
3.33	Menu <i>Ligações semirrígidas</i> .....	37
3.34	Ligação semirrígida: comportamento e representação gráfica .....	38
3.35	Aviso e diálogo para definir o comportamento da ligação.....	40
3.36	Modelando a ligação semirrígida numa análise linear .....	41
3.37	Excentricidade da ligação.....	42
3.38	Modelando a ligação semirrígida numa análise linear .....	42
3.39	Modelos matemáticos para descrever o comportamento da ligação .....	43
3.40	Número de diferentes tipos de ligação .....	43
3.41	Modelo exponencial .....	44
3.42	Modelo de potências.....	45
3.43	Modelo multilinear .....	45
3.44	Grupos de elementos cujas ligações nas extremidades são iguais .....	46
3.45	Menu <i>Gráficos</i> .....	47
3.46	Parâmetros para construção de gráficos .....	47
3.47	Menu <i>Carregamentos</i> .....	48
3.48	Tipo e forma de aplicação da carga.....	49
3.49	Carga concentrada .....	50
3.50	Carga uniformemente distribuída.....	50
3.51	Menu <i>Análise estática não linear</i> .....	51
3.52	Submenu <i>Informações básicas</i> .....	52
3.53	Estratégia de incremento de carga e de iteração.....	52

3.54	Opções do submenu <i>Informações básicas</i> .....	53
3.55	Alterar parâmetros para incremento direto do parâmetro de carga.....	54
3.56	Alterar parâmetros para incremento do comprimento do arco.....	54
3.57	Alterar parâmetros para incremento de uma componente de deslocamento.....	55
3.58	Alterar parâmetros para incremento de trabalho.....	55
3.59	Alternar entre estratégias de incremento de carga.....	56
3.60	Diálogo para definição do indicador de reanálise.....	56
3.61	Intervalo de incrementos de carga.....	57
3.62	Indicador de impressão nos arquivos de saída e na tela.....	57
3.63	Menu <i>Análise dinâmica</i> .....	58
3.64	Escolha entre a análise no domínio do tempo ou da frequência.....	59
3.65	Análise no domínio do tempo.....	59
3.66	Análise no domínio da frequência.....	60
3.67	Métodos de integração numérica e opções do método Generalizado.....	60
3.68	Parâmetros característicos dos métodos de integração.....	61
3.69	Casos particulares obtidos com o método Generalizado.....	62
3.70	Amortecimento proporcional.....	63
3.71	Diálogo para definição do uso da aceleração da base.....	64
3.72	Aceleração da gravidade.....	64
3.73	Modelagem de cargas gravitacionais como massa concentrada.....	65
3.74	Caixa de diálogo para escolha das condições iniciais.....	65
3.75	Deslocamentos e rotação do ponto nodal.....	66
3.76	Deslocamento inicial correspondente a um modo de vibração.....	66
3.77	Fator multiplicador da carga estática.....	67
3.78	Históricos de carregamento.....	67
3.79	Tipos de carregamento.....	68
3.80	Carregamento aproximado por segmentos de reta.....	68
3.81	Carregamento harmônico.....	69
3.82	Carregamento harmônico aplicado durante um tempo $t_f$ .....	69
3.83	Impressão de resultados na tela.....	70
3.84	Impressão de resultados nos arquivo de saída.....	70
4.1	Arquivo Neutro 1.....	73
4.2	Dados gerados para o modelo exponencial.....	82

4.3	Dados gerados para o modelo de potências com quatro parâmetros.....	83
4.4	Dados gerados para o modelo multilinear.....	84
4.5	Dados gerados para o modelo linear.....	84
4.6	Exemplo de um Arquivo Neutro 2.....	87
4.7	Arquivo Neutro 3.....	93
5.1	Pórtico com ligações rígidas.....	104
5.2	Diálogos do menu Inicialização.....	105
5.3	Diálogo com a escolha do modelo estrutural.....	106
5.4	Coordenadas dos pontos nodais.....	107
5.5	Geração automática dos pontos nodais.....	108
5.6	Conectividades dos elementos do pórtico.....	109
5.7	Geração automática dos elementos.....	110
5.8	Propriedades do material.....	111
5.9	Propriedades da seção transversal.....	112
5.10	Condições de contorno.....	113
5.11	Malha gerada.....	113
5.12	Diálogos para aplicação da carga concentrada.....	114
5.13	Malha gerada: carregamentos aplicados.....	115
5.14	Título do Arquivo Neutro 1.....	115
5.15	Arquivo Neutro 1: análise estática linear.....	116
5.16	Tipo de análise e formulação.....	117
5.17	Parte inicial do Arquivo Neutro 1: análise estática não linear.....	117
5.18	Diálogos para escolha das estratégias de solução não linear.....	118
5.19	Opções do submenu <i>Inicialização</i> .....	119
5.20	Impressão dos resultados.....	120
5.21	Arquivo Neutro 2: análise estática não linear.....	120
5.22	Pórtico com ligações semirrígidas: análise estática não linear.....	121
5.23	Formulações utilizadas.....	122
5.24	Dados iniciais para a modelagem das ligações.....	122
5.25	Quantidade de ligações.....	123
5.26	Tipo de ligação.....	123
5.27	Modelagem das ligações.....	124
5.28	Malha de elementos finitos.....	125

5.29	Arquivo Neutro 1: ligações com comportamento não linear .....	125
5.30	Arquivo Neutro 2 gerado para esse exemplo .....	127
5.31	Formulação para simulação dos efeitos da inelasticidade do aço .....	128
5.32	Escolha dos parâmetros para definir a formulação PHF-1 .....	128
5.33	Arquivo Neutro 1 numa análise inelástica .....	129
5.34	Arquivo Neutro 2.....	129
5.35	Formulação para a simulação conjunta dos três efeitos .....	130
5.36	Arquivo Neutro 1: acoplamento dos três efeitos .....	130
5.37	Arquivo Neutro 2: acoplamento dos três efeitos .....	130
5.38	Dados iniciais do problema .....	132
5.39	Arquivo Neutro 1: análise dinâmica não linear.....	132
5.40	Análise não linear no domínio do tempo.....	133
5.41	Parâmetros do método de Newmark .....	133
5.42	Parâmetros do carregamento harmônico .....	134
5.43	Arquivo Neutro 3 em sua estrutura mínima .....	134
5.44	Formulação não linear .....	135
5.45	Aceleração da base .....	135
5.46	Definindo o carregamento externo .....	136
5.47	Arquivo Neutro 3: análise dinâmica não linear.....	137

# Lista de Tabelas

3.1	Propriedades dos materiais .....	33
3.2	Propriedades das seções transversais .....	35
3.3	Representação gráfica dos apoios e tipos de restrições .....	36
3.4	Parâmetros do modelo exponencial para quatro tipos de ligações (Silva, 2009) ...	44
3.5	Convenção de sinais para cargas concentradas e momentos.....	49
3.6	Convenção de sinais para cargas uniformemente distribuídas.....	49
4.1	Dados gerais .....	75
4.2	Macro-comandos do Arquivo Neutro 1.....	76
4.3	Macro-comando <i>ppor</i> .....	76
4.4	Macro-comando <i>psin</i> .....	76
4.5	Macro-comando <i>ppol</i> .....	77
4.6	Macro-comando <i>ppar</i> .....	77
4.7	Macro-comando <i>elem</i> .....	77
4.8	Macro-comando <i>boun</i> .....	78
4.9	Macro-comando <i>mate</i> .....	79
4.10	Macro-comando <i>seca</i> .....	79
4.11	Macro-comando <i>stif</i> : relação momento-rotação linear.....	81
4.12	Macro-comando <i>stif</i> : relação momento-rotação não linear.....	81
4.13	Macro-comando <i>graf</i> .....	85
4.14	Carga aplicada nos pontos nodais .....	86
4.15	Carga aplicada nos elementos .....	86
4.16	Declaração dos macro-comandos .....	87
4.17	Formulações de segunda ordem e valores da variável <i>form</i> .....	88
4.18	Macro-comando <i>%PRINCIPAL</i> .....	89
4.19	Macro-comando <i>%CONTINC</i> .....	90

4.20	Macro-comando % <i>CHANGE</i> .....	90
4.21	Valores armazenados para a troca da estratégia .....	91
4.22	Macro-comando % <i>REANAL</i> .....	91
4.23	Macro-comando % <i>CALFREQ</i> .....	91
4.24	Macro-comando % <i>RELATO</i> .....	92
4.25	Macro-comando % <i>SCREEN</i> .....	92
4.26	Declaração dos macro-comandos do Arquivo Neutro 3 .....	94
4.27	Macro-comando % <i>DTEMPO</i> .....	95
4.28	Macro-comando % <i>DTEMPONL</i> .....	95
4.29	Macro-comando % <i>DFREQU</i> .....	95
4.30	Macro-comando % <i>AMORTP</i> .....	96
4.31	Macro-comando % <i>NEWMAR</i> .....	97
4.32	Macro-comando % <i>WILSON</i> .....	97
4.33	Macro-comando % <i>HILBER</i> .....	97
4.34	Macro-comando % <i>SMDUHA</i> .....	97
4.35	Macro-comando % <i>GENERA</i> .....	97
4.36	Macro-comando % <i>LOADMS</i> .....	98
4.37	Macro-comando % <i>DESINI</i> .....	99
4.38	Macro-comando % <i>VELINI</i> .....	99
4.39	Macro-comando % <i>ACELIN</i> .....	99
4.40	Macro-comando % <i>DESMOD</i> .....	99
4.41	Macro-comando % <i>FATEST</i> .....	100
4.42	Macro-comando % <i>FATSEN</i> .....	100
4.43	Macro-comando % <i>FATHAR</i> .....	100
4.44	Macro-comando % <i>FATCAR</i> .....	101
4.45	Macro-comando % <i>IMPTEL</i> .....	101
4.46	Macro-comando % <i>RELATO</i> .....	102

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Considerações Iniciais e Objetivos

A finalidade da análise estrutural é determinar a resposta da estrutura, ou seja, tensões, deformações, solicitações resultantes e deslocamentos, sob determinadas condições de contorno e carregamento. O processo completo de análise estrutural pode ser dividido em três etapas, a saber: a criação do modelo estrutural; o cálculo desse modelo; e, por fim, a visualização dos resultados. Na primeira etapa, o analista define os dados do problema, ou seja, a geometria do sistema estrutural, os materiais empregados, as propriedades geométricas das seções, o carregamento atuante, as condições de contorno, dentre outras informações. A etapa seguinte, a do cálculo estrutural propriamente dito, é responsável pela solução numérica do problema. Na terceira e última etapa, o analista concentra-se na verificação e visualização dos resultados obtidos na etapa anterior.

Todo esse processo, quando realizado manualmente ou mesmo sem o auxílio de recursos gráficos interativos, pode tornar a análise estrutural uma tarefa bastante complexa e extensa. Porém, o advento do computador e sua grande capacidade de armazenamento e manipulação de dados, aliado às modernas tecnologias, especialmente a computação gráfica, permitiu a criação de softwares com ambientes gráficos dinâmicos e interativos, possibilitando o analista automatizar essas três etapas (Azevedo e Conci, 2003). Portanto, com o emprego desses novos recursos computacionais avançados, o projetista ou analista pode passar por essas três etapas de uma forma mais eficiente, utilizando programas de pré-processamento, processamento e pós-processamento. Ferramentas gráficas interativas são usualmente empregadas na primeira e última etapa da análise estrutural.

A utilização desses recursos gráficos proporciona ao analista grande redução no esforço requerido para definição do modelo estrutural e interpretação dos resultados obtidos. Em outras palavras, esses recursos permitem maior precisão e qualidade aos dados que descrevem o problema estrutural. São inúmeros os recursos que essas ferramentas ou recursos gráficos oferecem, constituindo assim um amplo campo de pesquisa na área de métodos numéricos e computacionais aplicados à engenharia.

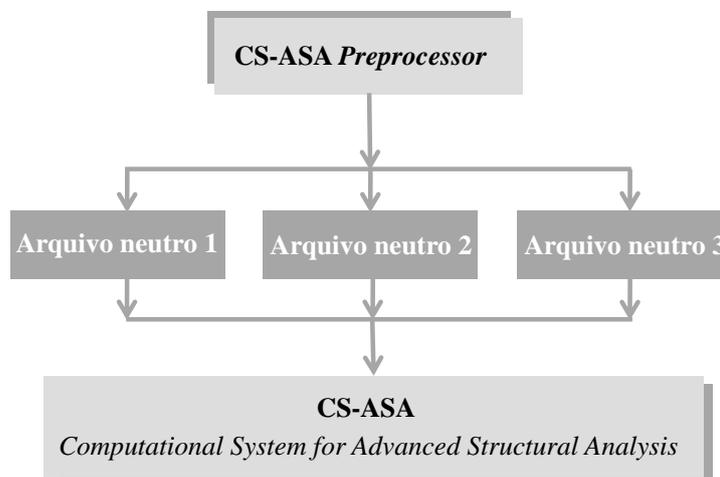
Perante as vantagens de utilização desses recursos gráficos interativos, procurou-se desenvolver nesta dissertação um programa de pré-processamento para o CS-ASA - *Computational System for Advanced Structural Analysis*. O referido sistema computacional foi desenvolvido por Silva (2009) em sua tese de doutorado e é capaz de realizar a análise estática e dinâmica de estruturas metálicas. Como será descrito no Capítulo 2, nesse sistema, atenção especial é dada às metodologias usadas para análise não linear, em que dez formulações de elemento finito de viga-coluna podem ser abordadas e combinadas em busca de uma modelagem estrutural mais real, com a consideração dos efeitos da não linearidade geométrica, flexibilidade da ligação e inelasticidade do aço.

O programa desenvolvido aqui foi denominado CS-ASA *Preprocessor*, cujo objetivo principal, como comentado, é ajudar o analista na utilização do CS-ASA. O CS-ASA *Preprocessor* é uma ferramenta para a geração dos dados necessários para análise de pórticos metálicos bidimensionais. Esse programa apresenta funcionalidades gráficas e interativas para a definição completa do modelo estrutural e do tipo de análise a ser realizada. Assim, com a sua utilização, definem-se os diversos atributos necessários para a modelagem estrutural, como a malha de elementos finitos (nós e elementos), condições de contorno, cargas atuantes, propriedades dos materiais e das seções, além da possibilidade da modelagem de ligações semirrígidas. É possível visualizar a malha de elementos finitos.

Durante a definição do problema estrutural, ou seja, a construção, e visualização de um modelo estrutural, podem ser gerados até três arquivos de dados, denominados arquivos neutros, que serão repassados ao programa de análise CS-ASA como informações de entrada para, em seguida, iniciar a análise numérica. A Figura 1.1 apresenta o esquema geral do processo de interação entre o CS-ASA *Preprocessor* e o CS-ASA.

Deve-se destacar que todo o trabalho de programação dessa ferramenta gráfica foi dividido em duas fases. A primeira foi para a criação do ambiente gráfico interativo, contemplando as etapas de construção da interface e do sistema de visualização da malha, utilizando as bibliotecas gráficas IUP e CD, ambas desenvolvidas pelo Grupo de Tecnologia em Computação Gráfica – TecGraf/PUC-Rio, e a segunda fase na

implementação das rotinas necessárias para a concepção do modelo estrutural, o armazenamento de seus dados e a geração dos arquivos neutros, utilizando a linguagem de programação C (Schildt, 1995; Rangel Netto *et al.*, 2004).



**Figura 1.1** Interação entre os programas CS-ASA *Preprocessor* e CS-ASA.

Esta dissertação faz parte de um amplo projeto de pesquisa em andamento (CNPq, Modalidade: Produtividade em Pesquisa, Processo: 304318/2010-8) sob coordenação do orientador deste trabalho e intitulado “*Análise Não Linear Estática e Dinâmica de Sistemas Estruturais Metálicos*”. Além disso, está inserida na linha de pesquisa *Mecânica Computacional* do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PROPEC/Deciv/EM) da UFOP.

Nas duas próximas seções destacam-se alguns trabalhos diretamente relacionados com o tema de pesquisa desta dissertação, e será feita também a descrição dos demais capítulos que a compõem.

## 1.2 Trabalhos Relacionados

Existem duas categorias de programas computacionais voltados às análises estruturais. A primeira diz respeito aos programas educacionais de uso não comercial (“caseiro”), que têm como objetivo introduzir ao usuário as técnicas numéricas para análise de estruturas. A maioria desses programas apresenta recursos gráficos limitados. Já os programas comerciais com versões educacionais, a segunda categoria, apesar de apresentarem certas

limitações e exigirem experiência e domínio de conceitos para serem utilizados, apresentam, em geral, ferramentas gráficas interativas bastante avançadas (Ferreira, 2008).

Dentre esses programas computacionais, um dos mais conhecidos é o FTool (*Two-Dimensional Frame Analysis Tool*; Martha, 1999), que foi idealizado pelo professor Luiz Fernando Martha do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio. Ele apresenta um sistema gráfico interativo bastante eficiente, mas só pode ser usado para análise linear de estruturas reticuladas planas. Esse programa reúne em uma mesma plataforma recursos para a criação e manipulação do modelo (pré-processamento), a análise (processamento) e a visualização dos resultados (pós-processamento). O FTool pode ser baixado gratuitamente em [www.tecgraf.puc-rio.br/ftool/ftooleng.html](http://www.tecgraf.puc-rio.br/ftool/ftooleng.html).

O INSANE, *Interactive Structural ANalysis Environment* (Fonseca e Pitangueira, 2007), é um programa para análise estrutural de vigas, treliças, pórticos planos e grelhas. Foi desenvolvido no Departamento de Engenharia de Estruturas da UFMG e sua proposta principal é ser um programa acadêmico, livre e de código aberto, sendo sujeito a alterações que visam adequá-lo à demanda educacional. Ele foi desenvolvido em Java (Deitel e Deitel, 2005) e apresenta as três etapas da análise estrutural acopladas. A ideia central do programa INSANE, segundo seus autores, é suprir as necessidades acadêmicas quanto à utilização de ferramentas computacionais em análise estrutural, de uma maneira simples, direta e objetiva.

Outro programa computacional de análise estrutural é o AcadFrame (<http://www.set.eesc.usp.br/acadframe>). Trata-se de uma ferramenta desenvolvida na Escola de Engenharia de São Carlos da USP pelo GMEC – Grupo de Mecânica Computacional, que utiliza o Método dos Elementos Finitos para análise de pórticos e treliças planas incluindo não linearidade geométrica, efeito de temperatura e combinação de ações externas. Seu processador foi desenvolvido em linguagem Fortran, e o pré-processador em Delphi, utilizando as ferramentas OpenGL (Hearn e Baker, 2003) e GLScene (<http://www.glscene.org>). Não possui o módulo de pós-processamento.

O PORT 3D (Ferro, 2001), é um aplicativo para análise de pórticos espaciais. Ele apresenta um pré-processador que é responsável pela aquisição, avaliação e verificação dos dados da estrutura, bem como pelo armazenamento dessas informações em arquivos específicos. Esse programa foi desenvolvido em linguagem Delphi, através de um grupo de pesquisa da Faculdade de Engenharia da UNESP, e permite a visualização dos dados da estrutura e acesso às etapas intermediárias de cálculo. Além disso, o PORT 3D é altamente didático, possuindo em todas as etapas da análise informações e mensagens através de

legendas e figuras. Dessa forma, o usuário pode verificar passo a passo o que está acontecendo durante o processamento ou análise, com possível detecção de falhas na entrada de dados. Com os recursos gráficos incorporados é possível ainda a visualização da estrutura espacial, facilitando o aprendizado e a aplicação de diversos conceitos matemáticos envolvidos.

No trabalho intitulado “*Um Sistema Não Linear para Análise de Pórticos Planos Semirrígidos*”, (Del Savio *et al*, 2005) descreve o desenvolvimento de um sistema computacional para análise estrutural, denominado de FTool/SRC, concebido para executar análises não lineares de pórticos planos com ligações semirrígidas. Esse programa foi desenvolvido a partir do FTool e sua interface gráfica combina, em um ambiente amigável, as fases de pré-processamento, análise estrutural e pós-processamento. No sistema FTool/SRC toda a entrada de dados referente às ligações semirrígidas é feita usando recursos gráficos que não existem na atual versão do Ftool.

Pravia e Kripka (2001) apresentam o programa VISUALBARRAS. Desenvolvida no laboratório computacional da Universidade de Passo Fundo, essa ferramenta numérica foi implementada em Delphi e na atual versão é possível realizar análises de treliças e pórticos planos. Um dos aspectos importantes do aplicativo é a apresentação de todos os cálculos intermediários da análise e tópicos sobre a teoria empregada.

Em trabalho recente, Santos (2010) desenvolveu um sistema que serve como pré e pós-processador para análise de treliças planas. Esse sistema foi acoplado ao processador ATREDLIN, desenvolvido pelo professor Romel Dias Vanderlei da Universidade Estadual de Maringá, capaz de realizar quatro tipos de análises em treliças planas: elástica linear, não linear geométrica, não linear física, e com dupla não linearidade. Como resultados da análise, ele fornece deslocamentos nodais do modelo, esforços e deformações nos elementos, e as reações de apoio. O ATREDLIN foi desenvolvido em Fortran.

Desenvolvidos no Brasil, os programas comerciais TQS (<http://www.tqs.com.br>) e Eberick (<http://www.altoqi.com.br>) são voltados para o projeto de edificações em concreto armado e permitem análises de pórticos espaciais. Já o CYPECAD (Cypecad, 1997), também comercial, foi desenvolvido para a modelagem de estruturas espaciais em concreto e aço, e possui alto nível de automação. Esses três programas apresentam recursos gráficos interativos avançados.

O sistema computacional MASTAN2 (Ziemian e McGuire, 2006), que foi desenvolvido usando o MATLAB (Chapman, 2003b), pode ser descrito como um programa para análise avançada de estruturas reticuladas planas e espaciais com

capacidades de pré-processamento, análise e pós-processamento. As opções do pré-processador incluem a definição da geometria da estrutura, condições de contorno, aplicações de cargas e propriedades dos elementos. As rotinas de análise fornecem as seguintes opções: elástica e inelástica de primeira ou segunda ordem. O pós-processador inclui a possibilidade de interpretação do comportamento da estrutura por meio de diagramas de deformação e esforços, impressão de resultados em arquivos de formato texto e facilidades para desenho das curvas carga-deslocamento.

Outro programa computacional comercial bastante usado no meio acadêmico e profissional é o ANSYS (Ansys, 2003). Trata-se de um programa de elementos finitos com interface gráfica avançada e que pode ser usado para resolver diversos problemas de engenharia. Outros programas comerciais que apresentam capacidades gráficas avançadas de pré e pós-processamento são: ABAQUS (Abaqus, 2001), SAP 2000 (Dieguez e Costa, 2004) e LUSAS (Lusas, 1995).

### **1.3 Organização do Trabalho**

Esta dissertação é constituída por seis capítulos. Capítulo 2 traz informações detalhadas sobre o programa CS-ASA (Silva, 2009) e procura justificar o desenvolvimento desta dissertação. Faz-se então uma apresentação geral do CS-ASA, com suas principais características e potencialidades.

No Capítulo 3 é descrito detalhadamente o ambiente computacional desenvolvido neste trabalho, com destaque para os menus, submenus e caixas de diálogo que compõem sua interface gráfica interativa e comandam a geração da malha de elementos finitos e dos arquivos neutros.

No Capítulo 4 são apresentados os arquivos neutros gerados através do CS-ASA *Preprocessor*. Atenção é direcionada à descrição dos macro-comandos e blocos de variáveis que compõem cada arquivo.

Aplicações do CS-ASA *Preprocessor* envolvendo a modelagem de um pórtico metálico de dois andares, com ou sem ligações semirrígidas, são mostradas no Capítulo 5. Análises estática e dinâmica são consideradas.

Por fim, são feitas observações de caráter conclusivas no Capítulo 6, incluindo sugestões para novos projetos.

# Capítulo 2

## O Programa CS-ASA

### 2.1 Introdução

Este capítulo apresenta as características gerais do sistema computacional CS-ASA (*Computational System for Advanced Structural Analysis*) idealizado e desenvolvido por Silva (2009). Destaca-se, mais uma vez, que esse sistema pode ser considerado a principal justificativa para implementação do programa gráfico desta dissertação.

O CS-ASA foi pensado de forma que à medida que novas formulações e novos tipos de elementos finitos fossem desenvolvidos, esses pudessem ser adaptados de maneira fácil e rápida. Desde 2009, implementações adicionais aconteceram nessa ferramenta numérica e novos resultados já foram obtidos (Maximiano *et al.*, 2011; Silva *et al.*, 2011).

Para o desenvolvimento do sistema CS-ASA, utilizou-se uma base computacional já existente (Silveira, 1995), escrita em linguagem *Fortran 77* (Press *et al.*, 1992) com alguns recursos do *Fortran 90*. Uma característica marcante do *Fortran 77* são as regras de alinhamento das linhas do programa, uma herança da era dos cartões perfurados. No CS-ASA, o *Fortran 90/95* (Chapman, 2003a), que não segue esse formato, é usado. Embora essa não seja uma linguagem orientada a objetos — que favorece a produtividade de programação, o rápido desenvolvimento de aplicativos e a redução do custo de manutenção — ela possui algumas características dessas linguagens, além da utilização de comandos breves para a execução de operações matriciais permitindo uma simplificação na escrita de muitos problemas matemáticos. Versões mais recentes, *Fortran 2003* (Metcalf *et al.*, 2004; Chapman, 2007) e *Fortran 2008*, são orientadas a objetos. Na versão 2003, além dessa filosofia de programação, que oferece uma maneira mais efetiva de separar a programação de um código grande e complexo em tarefas independentes, e

também permite a construção de um novo código baseado em rotinas já existentes, outras melhorias ocorreram. Entre elas destaca-se a interoperabilidade com a linguagem de programação C, ou seja, a capacidade de interagir com tal linguagem. Já se encontram compiladores *Fortran* com várias características do *Fortran 2003* (Intel<sup>®</sup> Visual Fortran Compiler v11, 2008), entretanto, um compilador com suporte para todos os recursos dessas duas versões mais recentes ainda é inexistente.

Com o Fortran 90/95, utilizou-se uma programação estruturada em módulos (classes) cujo funcionamento interno pode ser alterado sem a necessidade de alterar o programa que o utiliza. Isso vem favorecendo a melhoria da produtividade da programação, e facilitando a expansão do CS-ASA com o desenvolvimento de novas funcionalidades.

As características gerais do CS-ASA são apresentadas na próxima seção.

## **2.2 Características Gerais do CS-ASA**

Com o desenvolvimento do CS-ASA, visou-se obter um sistema computacional para análise numérica avançada de estruturas metálicas. Para isso, utilizou-se uma base computacional desenvolvida inicialmente por Silveira (1995) para investigar a instabilidade elástica de colunas, arcos e anéis com restrições unilaterais de contato.

Posteriormente, sob a supervisão do orientador desta dissertação, outros trabalhos foram realizados usando essa base. No primeiro deles, Galvão (2000) desenvolveu um programa onde diversas formulações geometricamente não lineares para elementos de pórticos planos foram implementadas e testadas. Neste mesmo ano, Rocha (2000) estudou estratégias de solução não linear para o traçado completo da trajetória de equilíbrio. Ainda com relação à análise estática, Pinheiro (2003) estudou e implementou formulações não lineares para análise de sistemas treliçados planos e espaciais, e também, uma formulação não linear para pórticos planos com ligações semirrígidas. Para análise dinâmica, Galvão (2001, 2004) tornou possível o estudo de vibração em treliças planas, pórticos planos e espaciais e implementou métodos de integração numérica, explícitos e implícitos, para análise de pórticos planos considerando o efeito da flexibilidade da ligação. Apenas o comportamento linear da ligação foi considerado em seu trabalho. Além disso, uma estratégia adaptativa que permite o controle automático do intervalo de tempo no processo de integração das equações diferenciais de movimento foi acrescentada.

Novamente com relação à análise estática, formulações não lineares que consideram o efeito da inelasticidade do aço em pórticos planos com ligações rígidas foram

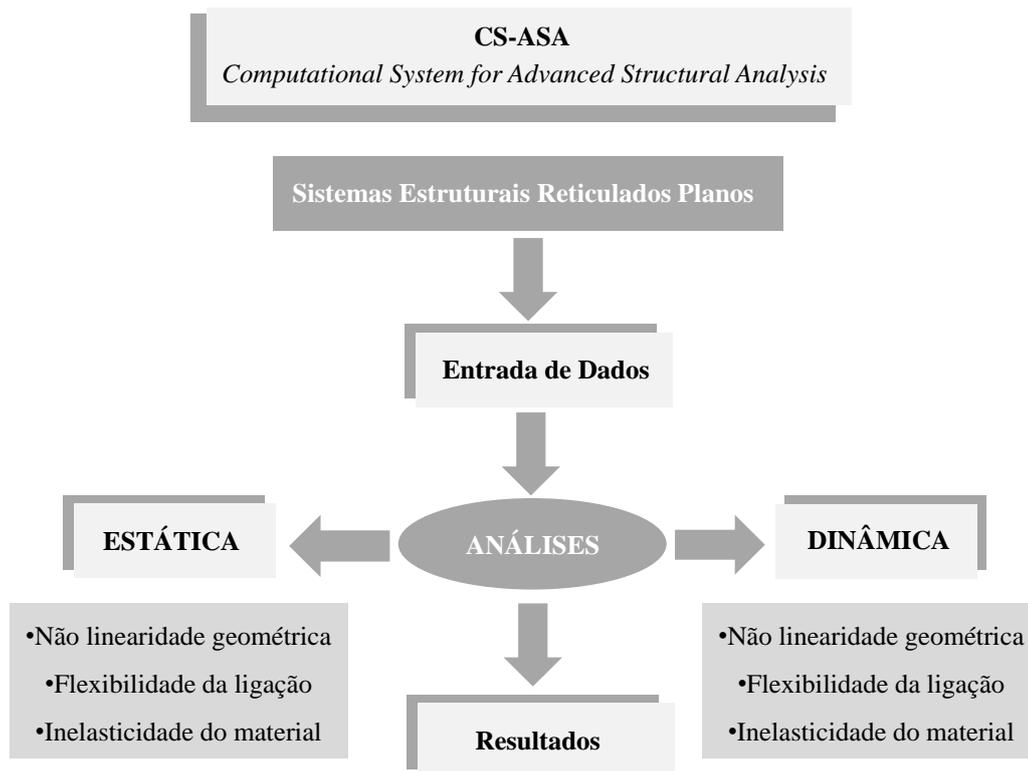
implementadas por Machado (2005). Por último, Rocha (2006) e Santos (2007) consideraram em um único elemento finito de viga-coluna os efeitos não lineares, possibilitando a análise inelástica de segunda ordem em estruturas metálicas com ligações semirrígidas. Cabe esclarecer que em cada um desses trabalhos foram desenvolvidos programas computacionais independentes a partir da mesma base computacional.

Com Silva (2009), procurou-se expandir ainda mais a base computacional existente, porém, incluindo grande parte das formulações estudadas pelos pesquisadores citados no parágrafo anterior no sistema computacional proposto. Em Silva (2009), criou-se também a possibilidade de interação entre as diversas formulações não lineares implementadas.

Dessa forma, o CS-ASA é capaz de realizar a análise estática e dinâmica de estruturas metálicas. Porém, atenção especial é dada às metodologias usadas para análise não linear. Dez formulações de elemento finito de viga-coluna podem ser abordadas e combinadas em busca de uma modelagem estrutural mais real, com a consideração dos efeitos da não linearidade geométrica, flexibilidade da ligação e inelasticidade do aço. A influência de imperfeições geométricas iniciais e tensões residuais também pode ser considerada.

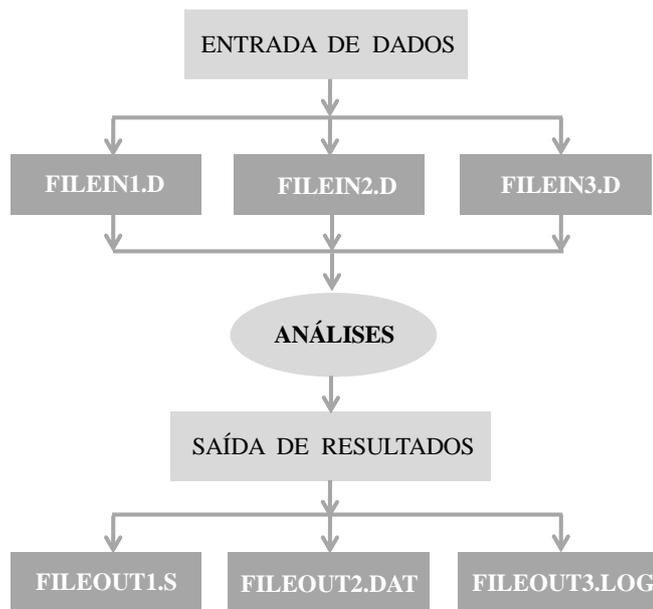
Cabe ressaltar que o sistema pode ainda realizar a análise não linear de treliças planas e espaciais, considerando apenas o efeito da não linearidade geométrica. Duas formulações foram estudadas e implementadas por Pinheiro (2003). É possível também efetuar a análise dinâmica linear de treliças planas e espaciais (Galvão, 2001). É importante destacar que, para análise transiente linear, Galvão (2000) implementou os seguintes métodos de integração: Newmark, Wilson- $\theta$ , Diferença Central e Hilbert. Silva (2009) implementou o método generalizado proposto por Modak e Sotelino (2002), Superposição modal através da integral de Duhamel, além de tornar possível a análise linear no domínio da frequência.

Seguindo o formato tradicional de um programa de elementos finitos ilustrado na Figura 2.1, o programa CS-ASA é capaz de efetuar a análise estática e dinâmica de estruturas metálicas, como já destacado. Os vários efeitos não lineares que podem ser simulados em cada uma dessas análises estão também indicados nessa figura. Em geral, o processo de simulação numérica na mecânica computacional é dividido em três etapas, pré-processamento, análise e pós-processamento, que normalmente são tratadas de forma independente. Tradicionalmente, o pré-processamento, que é a etapa inicial da análise computacional, consiste na leitura de um ou mais arquivos texto em formatos específicos. Os dados contidos nesses arquivos serão, em seguida, processados para obtenção das respostas que serão impressas em arquivos texto para pós-processamento.



**Figura 2.1** Programa CS-ASA: análises e efeitos considerados (Silva, 2009)

O programa gráfico interativo desenvolvido nesta dissertação, o CS-ASA *Preprocessor*, foi idealizado com o intuito de auxiliar o usuário do CS-ASA exatamente nessa primeira etapa do processo de simulação numérica, ou seja, na etapa de pré-processamento. Assim, através desse ambiente gráfico, o usuário será direcionado para inicialmente definir o tipo de análise, se linear ou não linear; o modelo estrutural a ser analisado, treliça ou pórtico, e a característica da análise, estática ou dinâmica. Para a análise dinâmica, uma escolha entre a análise transiente ou de vibração livre deve ser feita. O estudo no regime elástico ou inelástico é possível. A presença ou não de ligações semirrígidas é outra informação necessária. Se houver ligações semirrígidas, o seu comportamento momento-rotação, que é representado através de algum modelo matemático desenvolvido para essa finalidade, deve ser fornecido. Além disso, é necessário informar as características geométricas e físicas do modelo estrutural, a discretização em elementos finitos, as condições de contorno e o carregamento atuante. Todas essas informações, imprescindíveis para se realizar uma análise estrutural, serão gravadas no arquivo de dados FILEIN1.D indicado na Figura 2.2., através da utilização do CS-ASA *Preprocessor*. Os arquivos de dados serão chamados aqui de arquivos neutros.



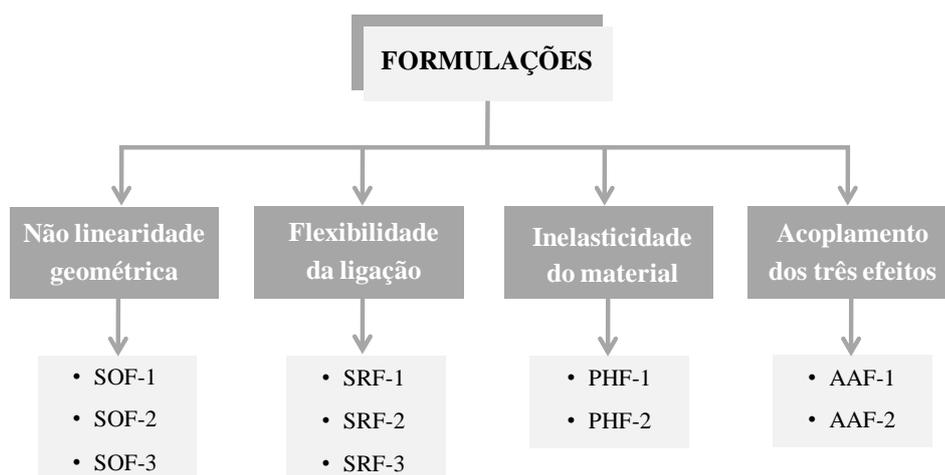
**Figura 2.2** Entrada de dados e saída de resultados (Silva, 2009)

Para uma análise estática não linear, a formulação escolhida, de acordo com o efeito desejado na análise, deve também ser informada. Isso é feito no arquivo de dados *FILEIN2.D*. As formulações implementadas no CS-ASA para a simulação dos efeitos referenciados na Figura 2.1 são indicadas na Figura 2.3. Os diálogos presentes no CS-ASA *Preprocessor* poderão ajudar o analista na geração desse segundo arquivo de dados.

Como se pode observar através da Figura 2.3, têm-se três formulações SOF-1,2,3 (*Second order finite element formulation*) que consideram os efeitos da não linearidade geométrica. Para simular os efeitos da semirrigidez da ligação, outras três, SRF-1,2,3 (*Semi-rigid finite element formulation*), foram implementadas. Para considerar a plastificação nos membros estruturais têm-se as formulações PHF-1,2 (*Plastic-hinge finite element formulation*) e para a simulação conjunta de todos os três efeitos mencionados, têm-se duas formulações AAF-1,2 (*Advanced analysis finite element formulation*). Numa análise não linear, além da formulação a ser adotada, os parâmetros que gerenciam a estratégia incremental-iterativa baseada no método de Newton-Raphson padrão ou modificado são informações necessárias. Dentre esses parâmetros, podem ser citados: o número de passos de carga, o máximo de iterações desejadas, o incremento inicial do parâmetro de carga, as estratégias de incremento de carga e de iteração escolhidas e a tolerância para convergência. Mais uma vez, vale enfatizar que rotinas gráficas interativas implementadas no CS-ASA *Preprocessor* viabilizam a definição de todos esses parâmetros de uma forma direta e objetiva.

O arquivo de entrada FILE3IN.D é necessário quando se realiza uma análise dinâmica. A formulação para simulação dos efeitos possíveis nesse tipo de análise (Figura 2.1) deve ser indicada. Outros dados relacionados nesse arquivo são: número de passos de tempo, incremento de tempo e a tolerância no processo iterativo. As condições iniciais para deslocamento, velocidade e aceleração nodais, o amortecimento viscoso e a função descritiva da excitação dinâmica devem também ser indicados. Como os dois arquivos anteriores, esse terceiro arquivo de entrada pode também ser gerado através do CS-ASA *Preprocessor*.

Uma vez obtidos esses três arquivos, inicia-se a análise numérica propriamente dita. Como resultados da análise têm-se principalmente os deslocamentos nodais e os esforços atuantes na estrutura. Numa análise estática não linear, essas grandezas são determinadas a cada incremento de carga. Numa análise dinâmica, outras variáveis, tais como velocidade e aceleração a cada instante de tempo, são obtidas; frequências e modos de vibração são também informações relevantes. Alguns arquivos de resultados com extensão .S, .DAT e .LOG são gerados pelo programa CS-ASA. A Figura 2.2 resume esses arquivos. No arquivo FILEOUT1.S, uma listagem completa com todas as informações da análise, ou seja, descrição do modelo estrutural, formulações utilizadas, coordenadas e forças nodais a cada passo incremental ou instante de tempo, entre outros detalhes da análise são impressos.



**Figura 2.3** Formulações implementadas no sistema computacional (Silva, 2009)

Um segundo arquivo de resultados, FILEOUT2.DAT, é usado para construção direta de gráficos. Curvas carga-deslocamento, deslocamento-tempo, e a variação das cinco

primeiras frequências naturais com o carregamento para um nó selecionado são impressas em arquivos com essa extensão. Quando se realiza uma análise dinâmica, o momento, a rigidez e a rotação para uma determinada ligação com comportamento não linear são gravados em arquivos similares. Esses dados são usados, por exemplo, para definir a curva que representa o comportamento histerético dessa ligação. Ainda em um arquivo com a extensão .DAT, tem-se para um elemento escolhido, a variação das forças internas, força axial e momento fletor, em suas extremidades.

Por fim, no arquivo FILE3OUT.LOG, as forças internas durante o processo de carregamento da estrutura ou a cada passo de tempo em uma análise dinâmica são impressas. O acompanhamento da degradação da rigidez indicando os instantes de início de escoamento e de plastificação da seção transversal nos membros, e a perda de rigidez das ligações presentes na estrutura são informações gravadas em um desses arquivos.

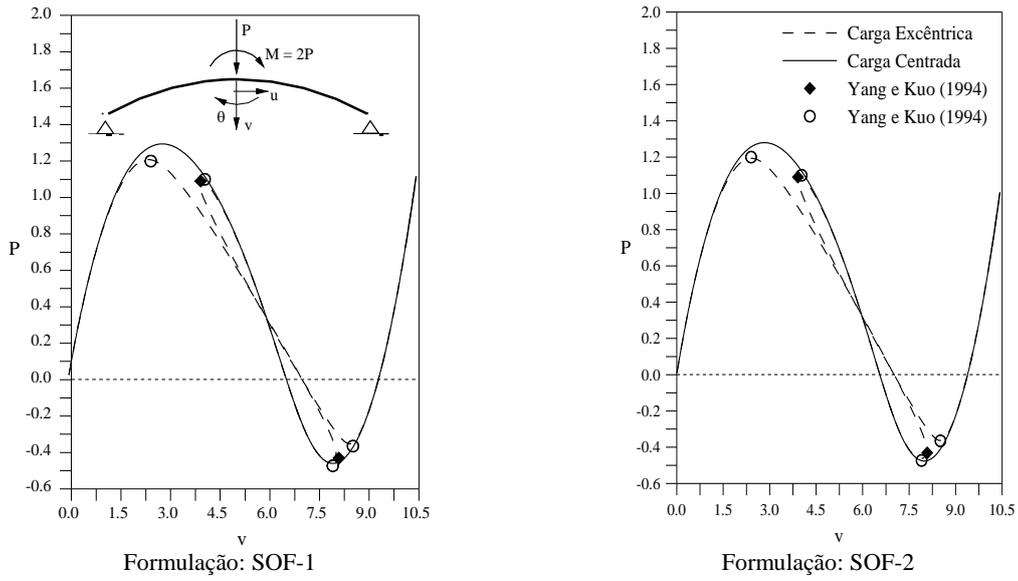
### **2.3 Análises Numéricas Avançadas com o CS-ASA**

Esta seção traz algumas análises estáticas e dinâmicas realizadas e apresentadas por Silva (2009) através do programa CS-ASA, em que vários efeitos não lineares são considerados. Na Figura 2.4, por exemplo, são apresentados resultados de análises estáticas não lineares; já a Figura 2.5 é organizada apenas com análises dinâmicas não lineares.

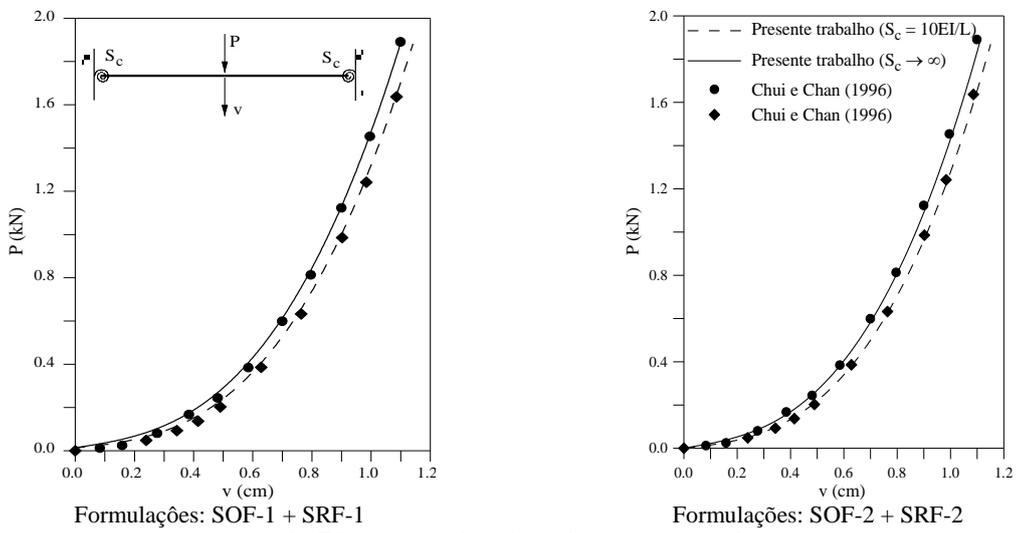
A Figura 2.4a fornece as trajetórias de equilíbrio de um arco circular esbelto (perfeito e imperfeito) obtidas através de duas formulações de segunda ordem que estão presentes no CS-ASA. Já a Figura 2.4b apresenta os resultados de uma viga em que os efeitos de segunda ordem e da semirrigidez são considerados. Por fim, a análise de um portal simples em que todos os efeitos não lineares estão acoplados. Em Silva (2009) podem ser encontrados maiores detalhes dessas modelagens.

A resposta transiente de uma viga submetida a uma carga momento que varia no tempo é ilustrada na Figura 2.5a. Note que duas formulações geometricamente não lineares foram usadas na solução numérica desse problema. A Figura 2.5b mostra os resultados de uma análise de vibração não linear de uma coluna com ligação semirrígida; dois efeitos não lineares são acoplados nesse estudo.

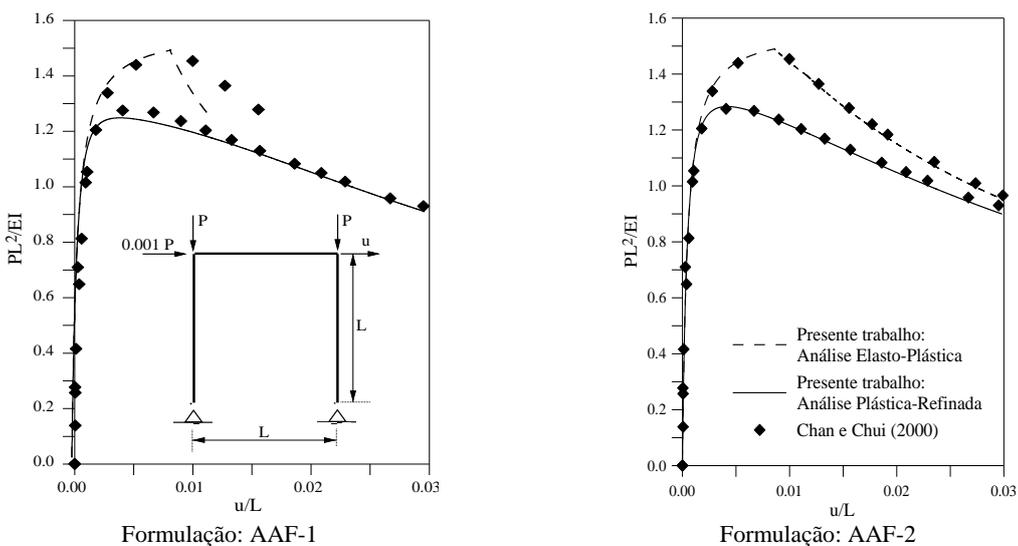
Os resultados de uma análise estrutural dinâmica, nos quais os efeitos da inelasticidade do material são também considerados, podem ser vistos em Silva *et al.* (2011).



(a) Efeitos: segunda ordem

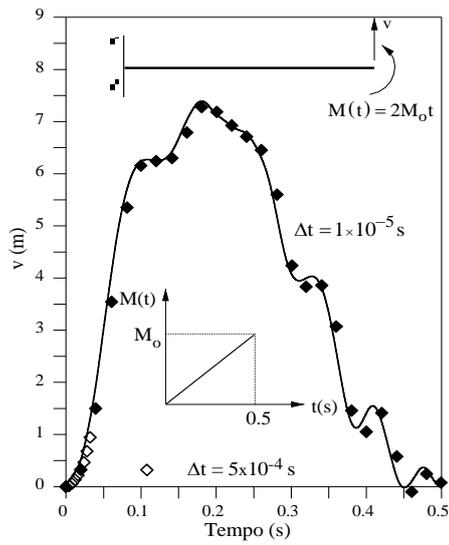


(b) Efeitos: segunda ordem e ligação semirrígida

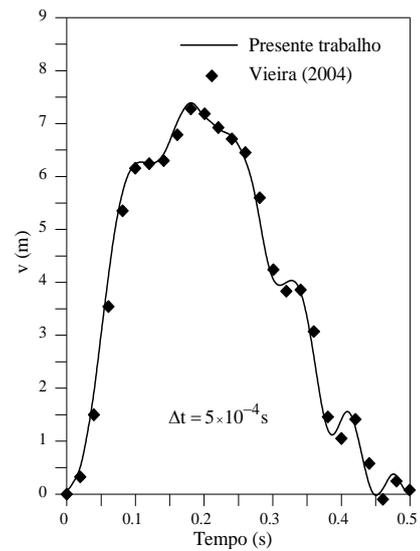


(c) Efeitos: segunda ordem, ligação semirrígida e inelástico

**Figura 2.4** Análises estáticas não lineares com o CS-ASA

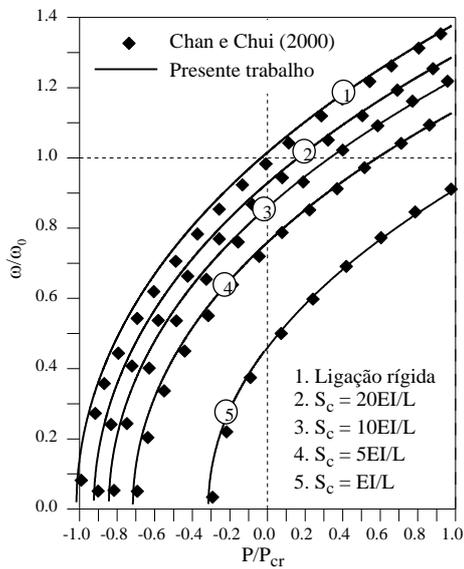


Formulação: SOF-1

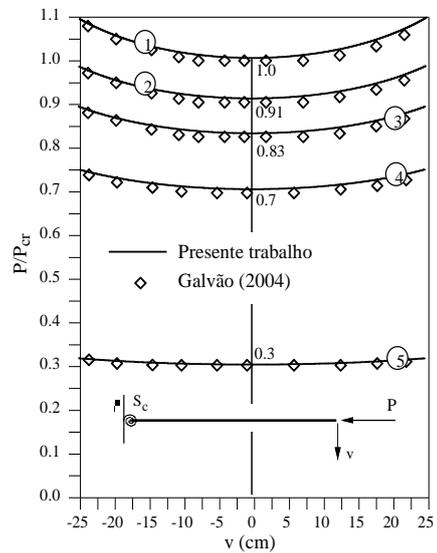


Formulação: SOF-2

(a) Efeitos: segunda ordem



Análise de vibração



Análise estática não linear

(b) Efeitos: segunda ordem e ligação semirrígida

**Figura 2.5** Análises dinâmicas não lineares com o CS-ASA

# Capítulo 3

## O Pré-processador

### 3.1 Introdução

Este capítulo mostra os recursos disponíveis no programa computacional de pré-processamento, CS-ASA Preprocessor, desenvolvido neste trabalho. Como mencionado nos capítulos anteriores, o pré-processador foi criado para auxiliar o usuário do programa CS-ASA na geração dos arquivos neutros usados na etapa inicial da análise estrutural. Esses arquivos neutros, que vinham sendo gerados manualmente usando um editor de texto, poderão ser produzidos de forma interativa. Além disso, o programa permite a visualização gráfica de modelos estruturais reticulados planos. Dentre as características do pré-processador citam-se a modelagem estrutural (definição da malha, condições de contorno, carregamento e ligações semirrígidas) e a geração de parâmetros característicos das análises realizadas pelo CS-ASA e discutidas no Capítulo 2. Cabe ressaltar que a elaboração de um material explicativo para a geração dos arquivos de entrada é também um objetivo deste trabalho.

Com o uso do pré-processador, o analista terá, após a descrição do modelo estrutural e definição dos parâmetros da análise, os arquivos de dados ou arquivos neutros que serão utilizados pelo programa de análise como informações de entrada.

Na Seção 3.2, mostra-se o ambiente gráfico, destacando as ferramentas utilizadas na sua construção. Já na Seção 3.3, descrevem-se as funcionalidades do pré-processador por meio da apresentação dos menus, submenus e caixas de diálogo que compõe sua interface.

## 3.2 O Ambiente Gráfico

Para desenvolver o pré-processador foram utilizadas duas ferramentas, IUP (*Portable User Interface*) e CD (*Canvas Draw*), desenvolvidas pelo Grupo de Tecnologia em Computação Gráfica da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, o Tecgraf/PUC-Rio. A primeira trata-se de um sistema de criação de interface com uma biblioteca de aproximadamente cem funções para a criação e manipulação de diálogos. A outra é responsável pela geração e visualização de primitivas geométricas bidimensionais nos elementos de interface. Destaca-se que, neste trabalho, as primitivas geométricas utilizadas foram linhas e pontos. O IUP oferece uma API (*Application Program Interface*) de configuração através de três linguagens básicas: C, Lua e LED. Além disso, é portátil, ou seja, o seu uso permite que o software desenvolvido seja executado sobre diversas plataformas sem a necessidade de alteração do seu código. Cabe destacar que a linguagem de programação C padrão ANSI (Schildt, 1995; Rangel Netto *et al.*, 2004) foi usada na implementação do pré-processador discutido neste capítulo. Por outro lado, o CD foi projetado para ser usado em conjunto com o IUP, tendo como objetivo principal tornar os programas que utilizam primitivas gráficas tão portáteis quanto os que usam o IUP. O download, o manual e outras informações relacionadas a essas duas ferramentas podem ser obtidos nos sítios <http://www.tecgraf.puc-rio.br/iup> e <http://www.tecgraf.puc-rio.br/cd>.

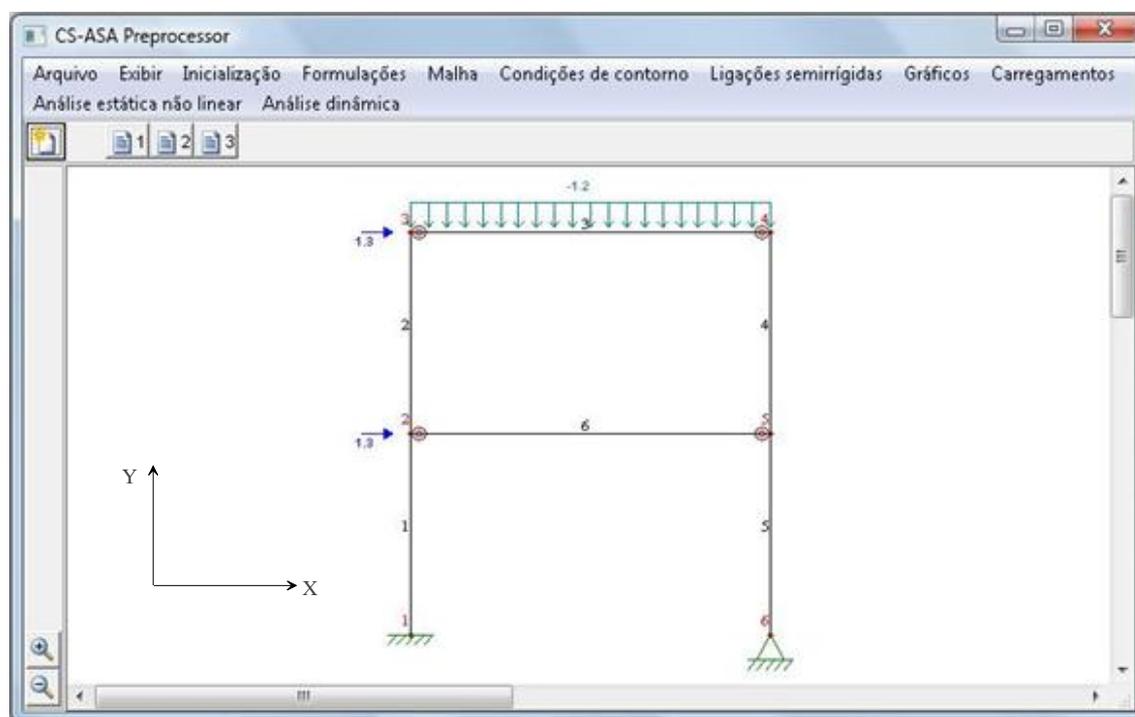
A Figura 3.1 ilustra a interface gráfica do CS-ASA Preprocessor. Mostram-se a área de desenho ou canvas, a barra de menus e a barra de ferramentas com quatro botões. Para aumentar ou diminuir o tamanho do modelo estrutural na área de desenho, os botões *Zoom+* e *Zoom-*, localizados no canto inferior esquerdo da tela, estão disponíveis. Já para ajustar a sua posição, têm-se as barras de rolagem horizontal e vertical.

Na próxima seção serão descritos detalhadamente cada um dos onze menus desenvolvidos.

## 3.3 Os Menus

Todas as informações referentes à construção do modelo estrutural e os parâmetros específicos para o tipo de análise que se pretende realizar são inseridos através da barra de menus. A estrutura de menus do programa é composta pelas opções: *Arquivo*, *Exibir*, *Inicialização*, *Formulações*, *Malha*, *Condições de contorno*, *Ligações semirrígidas*, *Gráficos*, *Carregamentos*, *Análise estática não linear* e *Análise dinâmica*. Todas essas

opções podem ser visualizadas na Figura 3.1. Os recursos disponíveis no pré-processador foram agrupados nesses menus, cujas opções, da esquerda para a direita, obedecem à sequência de gravação dos dados nos três arquivos neutros. Nessa figura, representam-se também a direção e o sentido positivo dos eixos globais,  $X$  e  $Y$ .

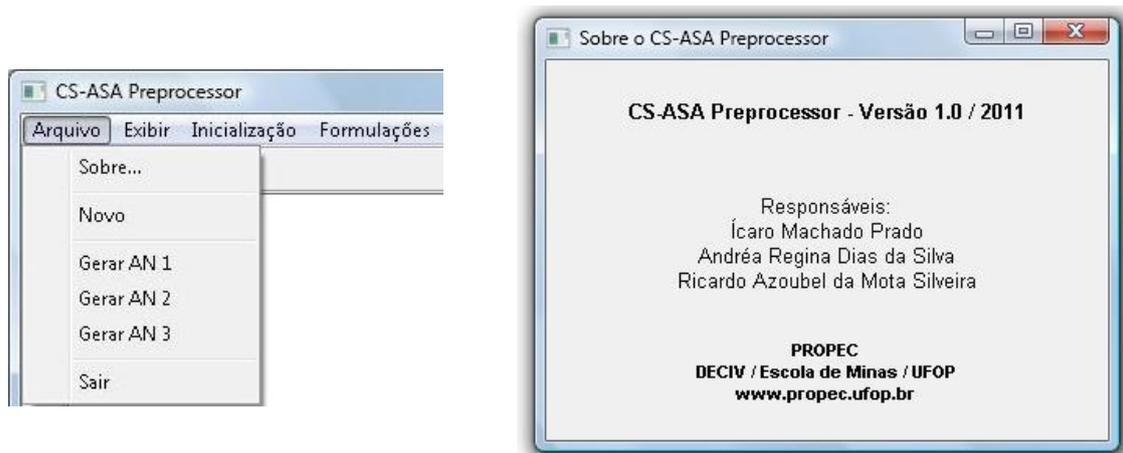


**Figura 3.1** Interface gráfica do CS-ASA Preprocessor

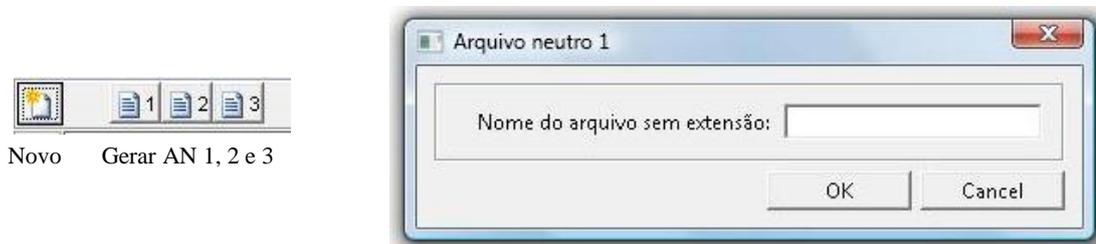
### 3.3.1 Menu *Arquivo*

A Figura 3.2 apresenta as opções do menu *Arquivo*. Estão incluídos nesse menu os comandos para obter informações sobre o programa (*Sobre...*), iniciar uma nova modelagem (*Novo*), gerar cada um dos três arquivos neutros (*Gerar AN*) e a opção de sair do programa. Entre tais comandos, os mais importantes, *Novo* e *Gerar AN*, foram agrupados no conjunto de botões da barra de ferramentas ilustrada na Figura 3.3a.

Ao escolher qualquer uma das três opções de geração dos arquivos neutros, caixa de diálogo similar à mostrada na Figura 3.3b é apresentada ao usuário. O nome do arquivo com tamanho máximo de 80 caracteres deverá ser fornecido. Os arquivos neutros serão salvos com formato texto, e a extensão usada é “.d”. Vale esclarecer que essa geração deverá ser feita após os comandos dos demais menus terem sido acionados.



**Figura 3.2** As opções do menu *Arquivo* e informações gerais sobre o programa



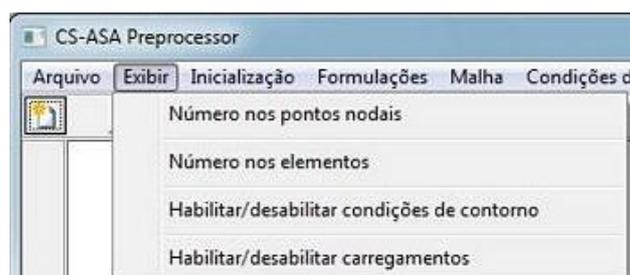
(a) Botões de comandos

(b) Nome do arquivo

**Figura 3.3** Botões da barra de ferramentas e diálogo para geração do arquivo neutro

### 3.3.2 Menu *Exibir*

No menu *Exibir* estão reunidas as opções para mostrar a numeração dos pontos nodais e dos elementos, e também para habilitar e desabilitar as condições de contorno e os carregamentos (Figura 3.4). Trata-se, assim, de um menu que contém os comandos para alterar a visualização dos atributos do modelo estrutural. Na Figura 3.1 pode-se observar uma estrutura na qual a numeração dos nós e elementos são exibidas, e as condições de contorno e os carregamentos estão habilitados.



**Figura 3.4** Menu *Exibir*

### 3.3.3 Menu *Inicialização*

A Figura 3.5 mostra os cinco comandos do menu *Inicialização*. O usuário deve começar a modelagem por esse menu. Todas as opções precisam, obrigatoriamente, ser selecionadas, e os diálogos associados devem ser preenchidos pelo usuário.

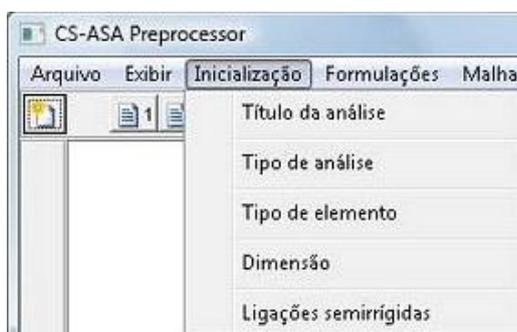


Figura 3.5 Menu *Inicialização*

Os diálogos abertos ao se escolher cada uma das opções são mostrados na Figura 3.6. A opção *Título da análise* abre o diálogo da Figura 3.6a para que o usuário forneça um título — uma frase com número máximo de caracteres igual a 80 — para a análise.

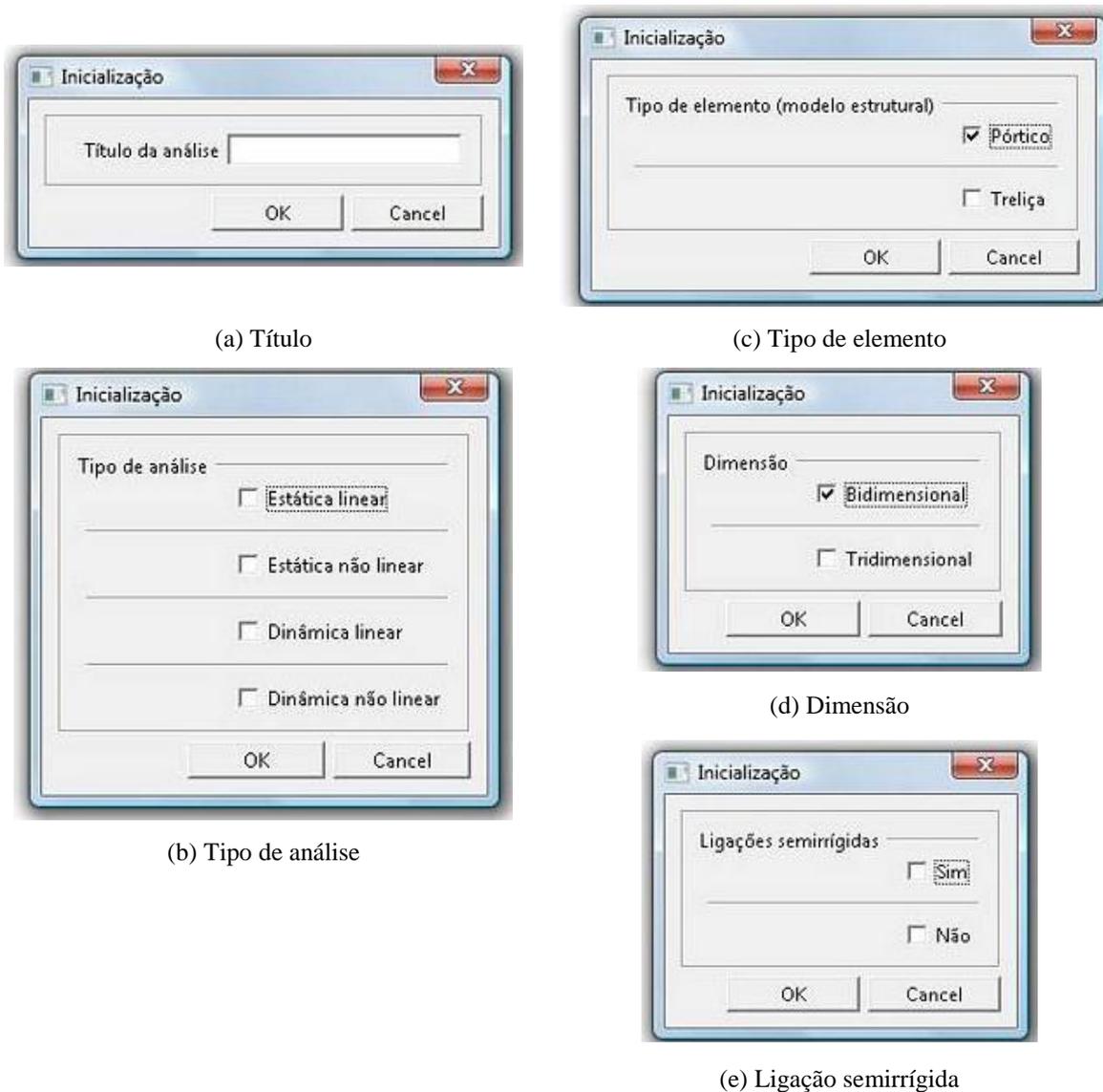
Ao selecionar o comando *Tipo de análise*, o diálogo da Figura 3.6b é aberto para a definição do tipo de análise estrutural. Para uma análise dinâmica o usuário deve definir também o *Tipo de problema*. Caso a análise seja linear, uma escolha entre *vibração livre* ou *análise transiente* deve ser feita (Figura 3.7a). Destaca-se que, na análise de vibração livre, as frequências e os modos de vibração são obtidos usando o método de Jacobi (Bregbia e Ferrante, 1986). Já para uma análise dinâmica não linear as opções são *vibração da estrutura pré-carregada* e *análise transiente* como exibe o diálogo da Figura 3.7b. Mais adiante, comentários sobre esses dois tipos de análise serão feitos.

O programa CS-ASA faz análises de pórticos e treliças. A escolha entre um desses tipos de modelos estruturais é feita usando a opção *Tipo de elemento*. Embora se apresente a possibilidade de modelar *Pórtico* ou *Treliça*, o pré-processador disponibiliza apenas a opção *Pórtico*. Sendo assim, esse modelo está selecionado na caixa de diálogo mostrada na Figura 3.6c, e o usuário necessita apenas confirmar tal opção, clicando no botão *OK*. É importante esclarecer que a opção *Pórtico* é usada na modelagem de qualquer estrutura usando o elemento de viga-coluna reticulado plano apresentado em Silva (2009).

Para especificar se a estrutura a ser modelada é plana ou espacial, seleciona-se a opção *Dimensão*. O CS-ASA *Preprocessor* foi desenvolvido para modelagem de pórticos

bidimensionais (ou planos); a opção tridimensional (ou espacial) é uma sugestão para trabalhos futuros. Em virtude disso, basta o usuário confirmar a opção *Bidimensional* já selecionada no diálogo mostrado na Figura 3.6d.

A opção *Ligações semirrígidas* do menu *Inicialização* é usada para informar sobre a presença de ligações semirrígidas no modelo. A caixa de diálogo ilustrada na Figura 3.6e é apresentada ao usuário. Se a opção selecionada for *Não*, consideram-se todas as ligações entre os membros estruturais como perfeitamente rígidas; se *Sim*, alguma ligação é considerada semirrígida. Nesse último caso, o usuário deverá informar, após gerar a malha de elementos finitos, a posição e o comportamento momento-rotação das ligações semirrígidas. Essas informações são dadas acessando o menu *Ligações semirrígidas*, que será descrito mais adiante na Subseção 3.3.7.



**Figura 3.6** Diálogos após acionar os comandos do menu *Inicialização*



(a) Análise linear

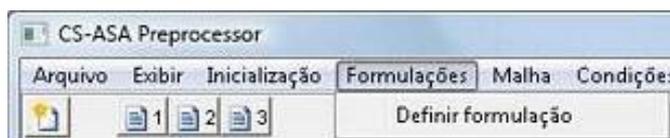


(b) Análise não linear

**Figura 3.7** Tipos de problema numa análise dinâmica

### 3.3.4 Menu *Formulações*

Após passar obrigatoriamente pelas opções do menu *Inicialização*, o usuário poderá definir a formulação de elementos finitos através do menu *Formulações* e clicando na opção *Definir formulação* (Figura 3.8).



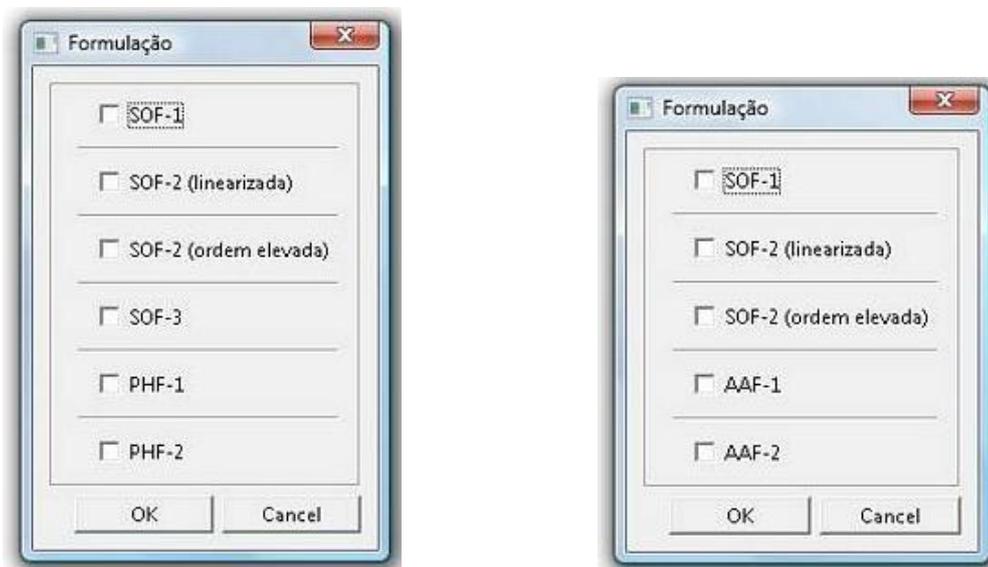
**Figura 3.8** Menu *Formulações*

As formulações implementadas no CS-ASA foram apresentadas no Capítulo 2 de acordo com o efeito não linear considerado. Sendo assim, dependendo do tipo de análise desejada, será apresentada ao usuário uma das caixas de diálogo apresentadas nas Figuras 3.9, 3.10 e 3.11. Na Figura 3.9 tem-se o diálogo para o caso da análise linear de uma estrutura com ligações entre os membros estruturais consideradas semirrígidas. Para a análise estática não linear com ligações rígidas tem-se o diálogo da Figura 3.10a. Como comentado no capítulo anterior, as quatro primeiras formulações, SOF-1, SOF-2 linearizada, SOF-2 de ordem elevada e SOF-3, simulam os efeitos da não linearidade geométrica. As demais, PHF-1 e PHF-2, os efeitos da inelasticidade do material. Se houver ligações semirrígidas na estrutura, as formulações disponíveis são SOF-1 e SOF-2 para simular os efeitos da não linearidade geométrica, e AAF-1 e AAF-2 para simular conjuntamente os efeitos de segunda ordem, da inelasticidade do material e da flexibilidade da ligação. Essas opções são indicadas na caixa de diálogo da Figura 3.10b. É

importante destacar que, se as formulações SOF forem escolhidas, o efeito da flexibilidade da ligação é simulado usando as formulações SRF. Nesse caso, a caixa de diálogo da Figura 3.9 é apresentada ao usuário na sequência. Cada uma dessas formulações é detalhada em Silva (2009). Para a análise dinâmica, as formulações disponíveis são ilustradas na Figura 3.11.



**Figura 3.9** Formulações para a análise linear com ligações semirrígidas



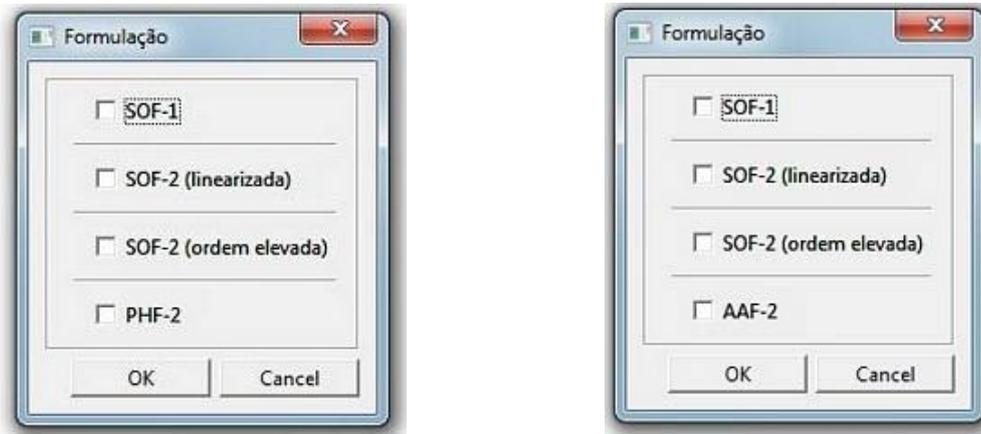
(a) Modelo estrutural com ligações rígidas

(b) Modelo estrutural com ligações semirrígidas

**Figura 3.10** Formulações para análise estática não linear

As formulações PHF-1, PHF-2, AAF-1 ou AAF-2 caracterizam uma análise inelástica, na qual o método da rótula plástica é utilizado para controlar o estado de plasticidade do membro estrutural. Duas abordagens, elastoplástica e plástica refinada,

estão implementadas no CS-ASA. Sendo assim, o usuário, após escolher uma das quatro formulações supracitadas, deverá optar por uma das duas abordagens usando o diálogo da Figura 3.12. Se forem escolhidas as formulações PHF-1 ou AAF-1, o usuário deverá informar ainda a norma usada para definir as equações que expressam a variação do módulo tangente com a carga axial. As curvas de resistência para colunas do LRFD-AISC (AISC, 1986) e/ou CRC (Galambos, 1998) são as opções, como mostra a Figura 3.13. Adicionalmente, o critério usado para simular a degradação da rigidez da seção deverá ser informado. Quatro modelos matemáticos, listados na Figura 3.14, estão disponíveis no CS-ASA. A expressão que representa cada um deles pode ser encontrada em Silva (2009). Cabe destacar que as formulações PHF-2 e AAF-2 seguem as prescrições da norma britânica BS5950 (1990).



(a) Modelo estrutural com ligações rígidas

(b) Modelo estrutural com ligações semirrígidas

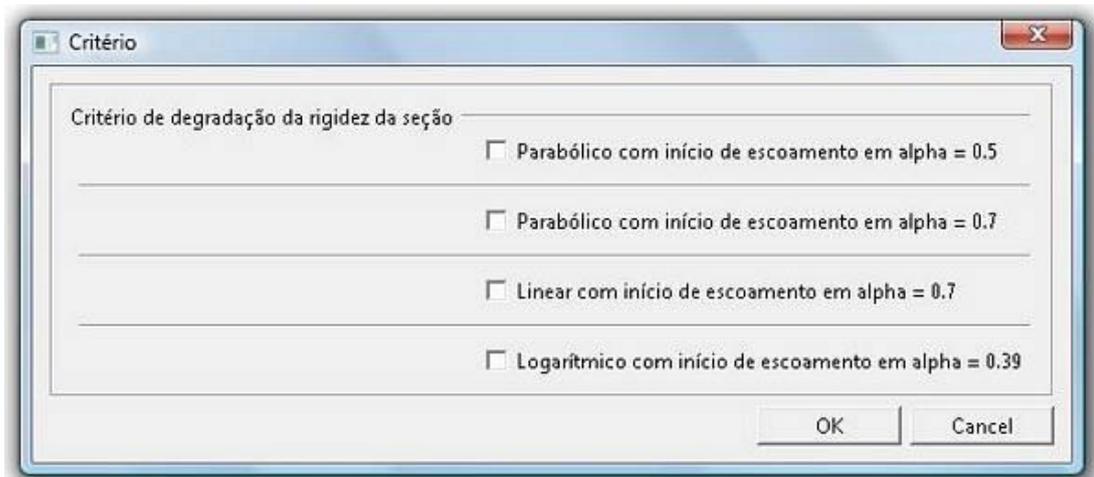
**Figura 3.11** Formulações para análise dinâmica não linear



**Figura 3.12** Tipos de análise inelástica



**Figura 3.13** Norma usada para expressar a variação do módulo tangente (Silva, 2009)



**Figura 3.14** Critérios usados para definir a plastificação da seção (Silva, 2009)

### 3.3.5 Menu *Malha*

O menu *Malha* reúne as opções para a geração da geometria do modelo estrutural definindo a malha de elementos finitos. É possível também atribuir, aos elementos gerados, propriedades referentes aos materiais e às seções transversais. Os comandos desse menu são exibidos na Figura 3.15 e serão discutidos a seguir.



**Figura 3.15** Menu *Malha*

### 1. Submenu *Coordenadas Nodais*

Através da opção *Coordenadas nodais* do menu *Malha*, pode ser feita a escolha entre a geração dos pontos nodais de pórticos — associação de vigas e colunas — ou arcos, como exemplifica a Figura 3.16. No caso dos arcos, têm-se como opções as formas senoidal, polar ou circular, e também parabólica. Nessa etapa é estabelecida, além das coordenadas, a numeração dos pontos nodais.

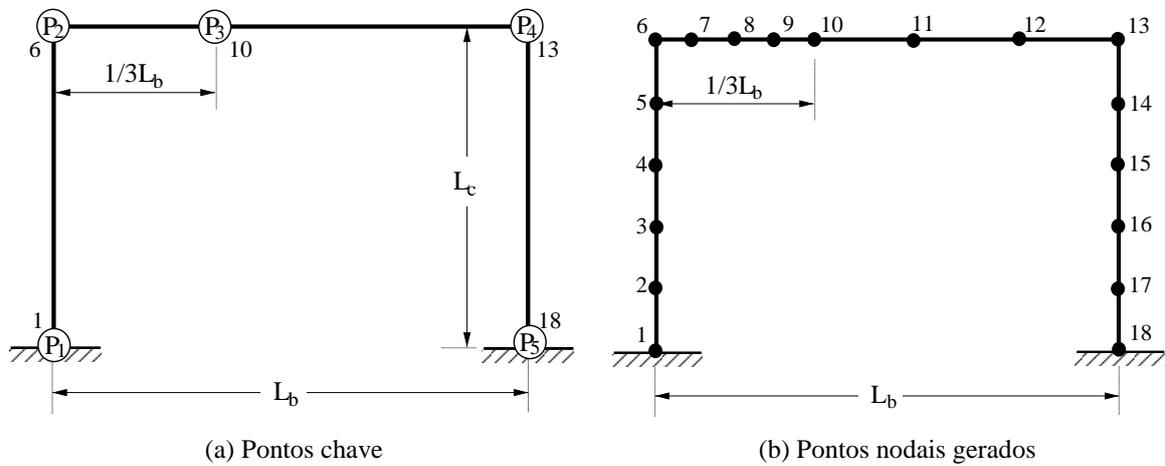


**Figura 3.16** Diálogo para escolha do modelo estrutural

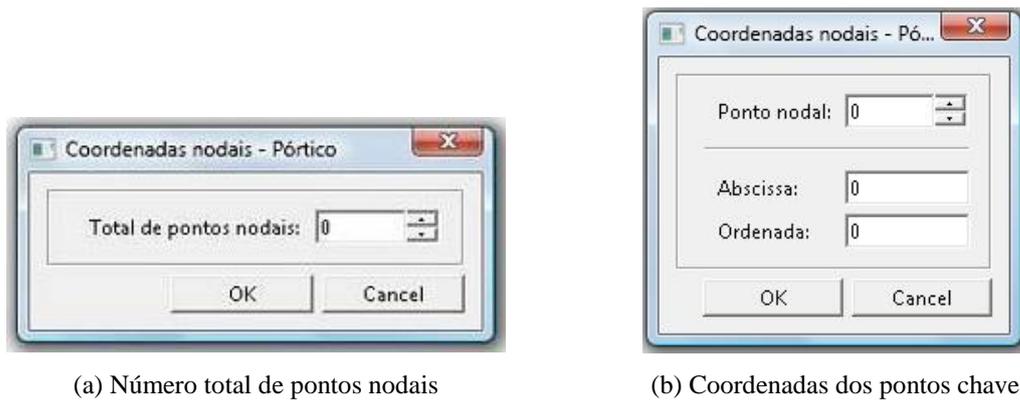
A geração das coordenadas dos pontos nodais em pórticos pode ser feita automaticamente através da definição de alguns pontos de referência, chamados aqui de pontos chave. Tais pontos definem, em geral, as extremidades das diferentes vigas e colunas que constituem o pórtico. Além disso, são usados para definir regiões com discretizações distintas em um mesmo membro. A Figura 3.17a ilustra um pórtico simples no qual, de acordo com a explicação anterior, foi necessário definir cinco pontos chave,  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ ,  $P_4$  e  $P_5$ . A partir da numeração usada para os pontos chave, são gerados, de forma automática, os pontos nodais em cada um dos membros delimitados por esses pontos de referência como mostra a Figura 3.17b. Através das coordenadas dos pontos chave, as coordenadas dos outros nós são também obtidas. Cabe esclarecer que as unidades de medida das coordenadas podem ser quaisquer. Entretanto, certa atenção na definição das unidades é imprescindível para que a análise seja efetuada corretamente.

Selecionando a opção *Pórtico* na Figura 3.16, as caixas de diálogo ilustradas na Figura 3.18 são apresentadas, uma por vez, ao usuário. O número total de pontos nodais (Figura 3.18a), e o número e as coordenadas dos pontos chave devem ser fornecidos, como

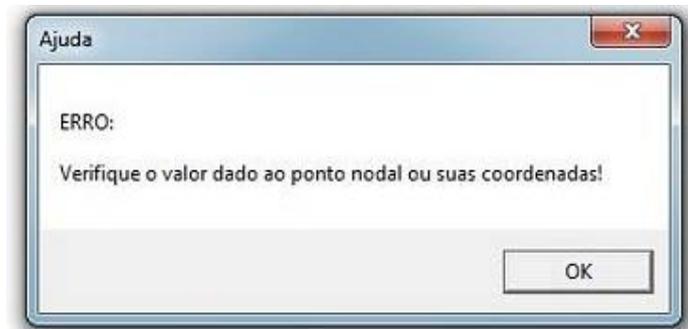
mostra a Figura 3.18b. Caso ocorra algum erro na geração dos pontos, mensagens de alerta são apresentadas. Um exemplo é mostrado na Figura 3.19.



**Figura 3.17** Geração dos pontos nodais em pórticos



**Figura 3.18** Diálogos para fornecer as coordenadas nodais de um pórtico



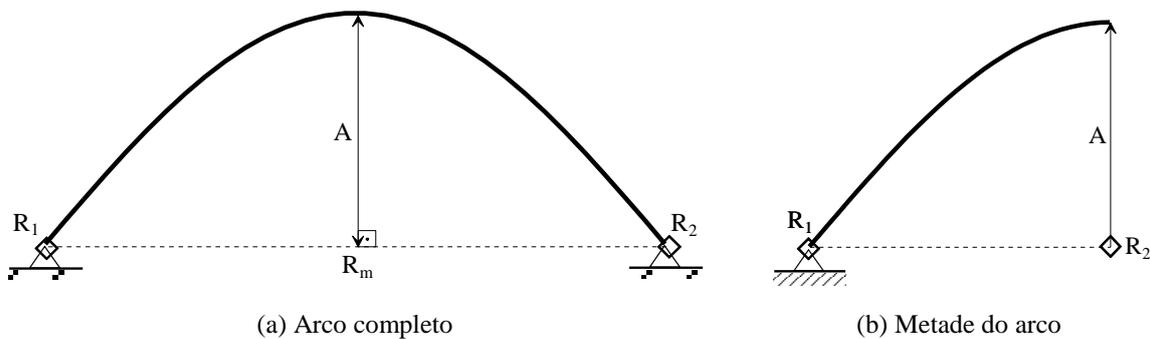
**Figura 3.19** Mensagem de alerta para a ocorrência de erro na geração dos pontos nodais

Como mencionado anteriormente, além dos pórticos, a modelagem de arcos também pode ser feita de forma automática. A primeira possibilidade é a geração de um arco no qual as coordenadas dos pontos nodais obedecem à relação:

$$y = A \operatorname{sen} \left( \pi \frac{x}{L} \right) \quad (3.1)$$

sendo  $A$  a amplitude,  $L$  a distância entre as extremidades do arco e  $x$  a abscissa do ponto considerado. Nesse caso, a estrutura é nomeada de arco senoidal.

Para a representação de um arco senoidal, dois pontos de referência, indicados na Figura 3.20 por  $R_1$  e  $R_2$ , devem informados. Esses pontos definem, no caso do arco completo (Figura 3.20a), as suas extremidades. Levando em consideração a simetria do modelo e discretizando apenas a metade do arco, o ponto  $R_1$  refere-se a uma das extremidades e  $R_2$  representa o ponto médio entre as duas extremidades do arco, como exemplificado na Figura 3.20b. A amplitude — altura medida na vertical a partir do ponto médio entre  $R_1$  e  $R_2$ , ou a partir de  $R_2$ , como pode ser visualizado, respectivamente, nas Figuras 3.20a e 3.20b — deve, também, ser informada. Cabe destacar que o ponto  $R_1$  deve ter numeração 1 para corresponder ao ponto nodal 1, e  $R_2$  é considerado com numeração igual ao total de pontos nodais.



**Figura 3.20** Parâmetros usados na modelagem de um arco senoidal

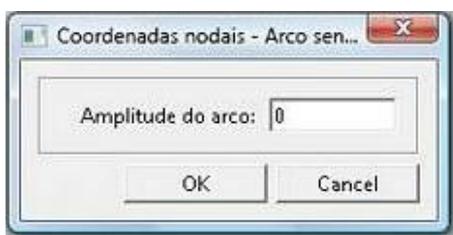
As caixas de diálogo, se a opção *Arco senoidal* na Figura 3.16 for selecionada, são exibidas na Figura 3.21. Além dos parâmetros destacados no parágrafo anterior, o número total de pontos nodais deve ser informado, e a opção de se modelar o arco completo ou apenas a sua metade deve ser feita. Uma caixa de diálogo semelhante à da Figura 3.21d é também mostrada para que sejam fornecidas as coordenadas do ponto de referência  $R_2$ .



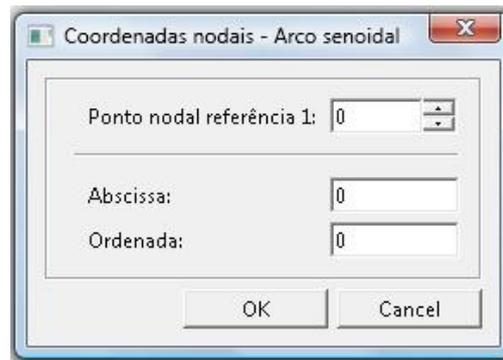
(a) Número total de pontos nodais



(b) Opção de modelagem



(c) Amplitude do arco



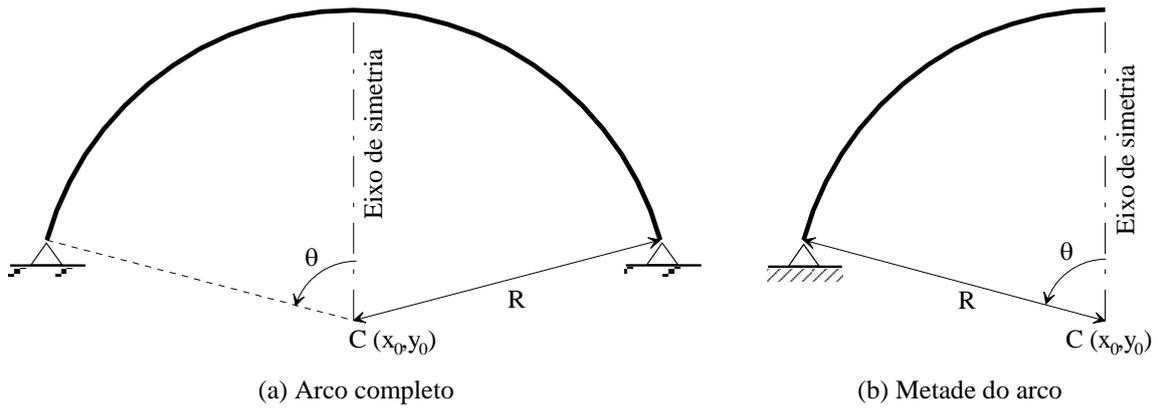
(d) Coordenada do ponto  $R_1$

**Figura 3.21** Coordenadas dos pontos nodais de um arco senoidal

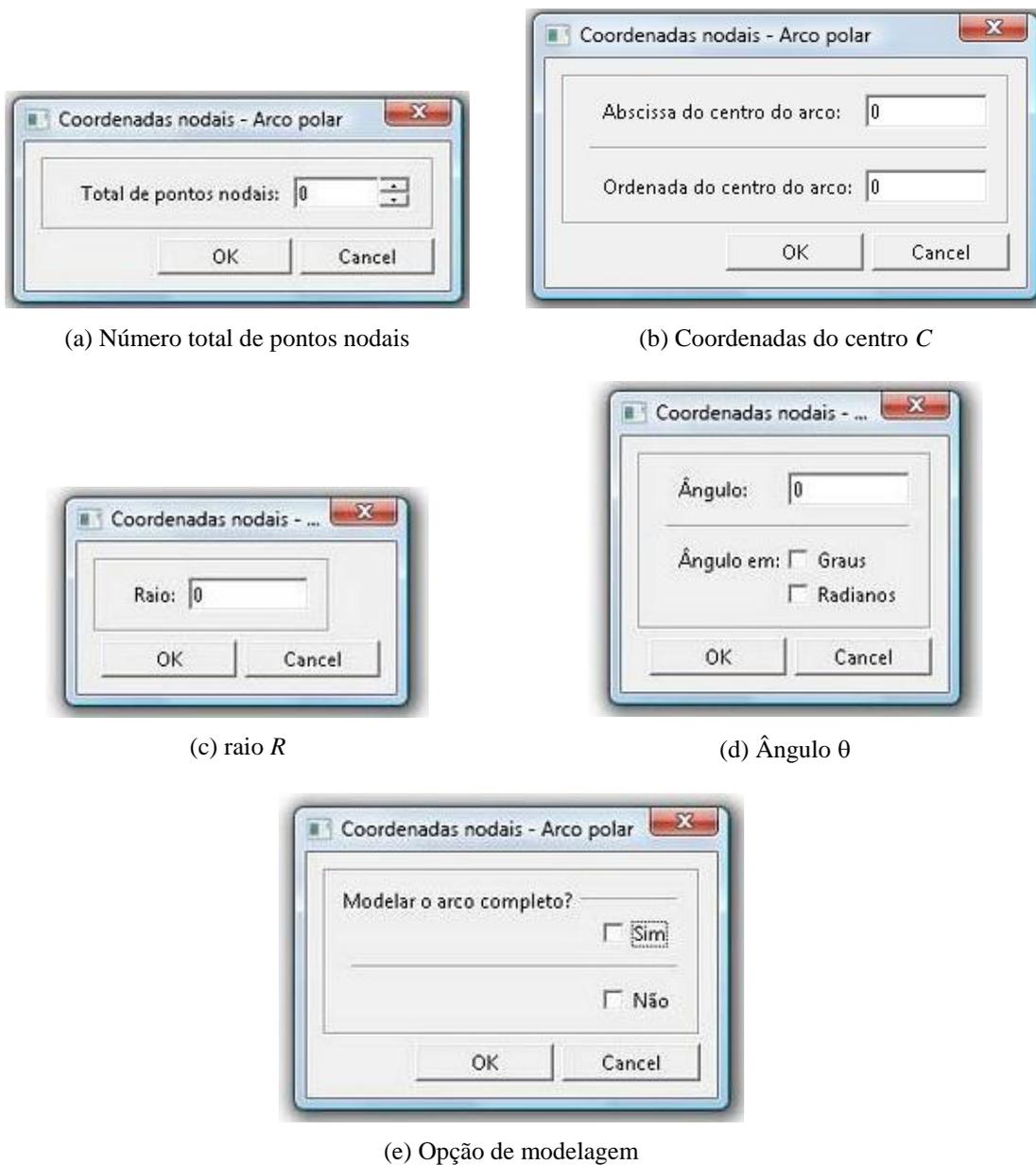
Na modelagem do arco polar (circular) é necessário que sejam fornecidas, após a definição do número total de pontos nodais, as coordenadas  $x_0$  e  $y_0$  do centro  $C$ , o raio  $R$ , e o ângulo  $\theta$ , que é medido a partir do eixo de simetria. Esse eixo deve estar posicionado sempre na direção vertical como indicado na Figura 3.22. As coordenadas dos pontos nodais gerados respeitarão a equação de uma circunferência, dada por:

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = R^2 \quad (3.2)$$

As caixas de diálogo nas quais o usuário define os parâmetros para a modelagem do arco circular são mostradas na Figura 3.23. Na sequência de leitura estão: o número total de pontos nodais (Figura 3.23a), as coordenadas do centro (Figura 3.23b), o raio da circunferência (Figura 3.23c) e o ângulo  $\theta$ , que pode ser medido em graus ou radianos como indicado na Figura 3.23d. A caixa de diálogo para escolha entre a representação do arco completo ou não é exibida na Figura 3.23e.



**Figura 3.22** Parâmetros usados na modelagem de um arco circular (ou polar)

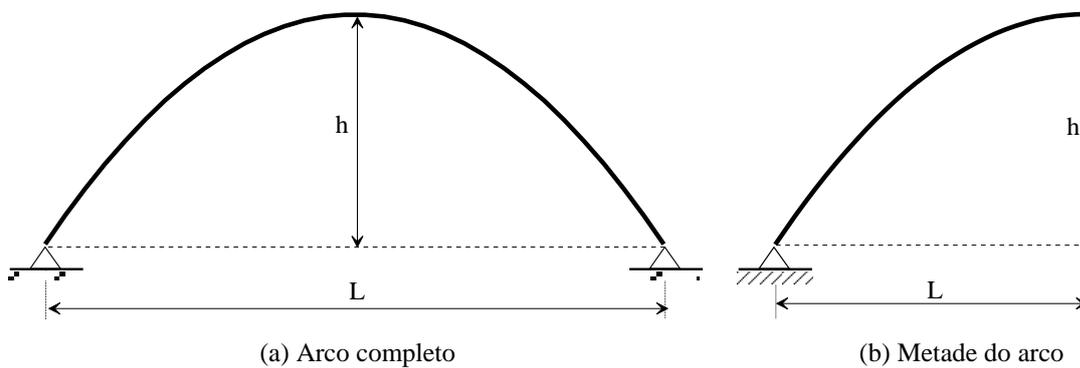


**Figura 3.23** Coordenadas dos pontos nodais de um arco circular

A última opção de modelagem é a do arco parabólico no qual as coordenadas dos pontos nodais são definidas através da seguinte equação do 2º grau:

$$y = -\frac{1}{4a}x^2 + \frac{1}{4a}x \quad (3.3)$$

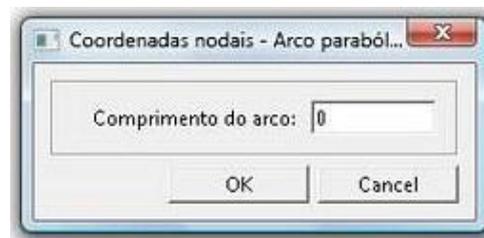
com  $a = L^2/16h$ , sendo  $L$  o comprimento do arco e  $h$  a sua altura central. Os parâmetros  $L$  e  $h$  são indicados na Figura 3.24, e as caixas de diálogo usadas no processo de definição dos pontos nodais do arco parabólico podem ser visualizadas na Figura 3.25.



**Figura 3.24** Parâmetros usados na modelagem de um arco parabólico



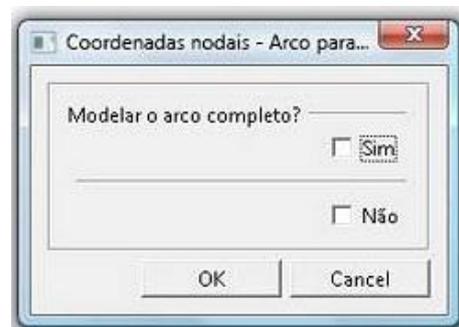
(a) Número total de pontos nodais



(b) Comprimento  $L$



(c) Altura  $h$

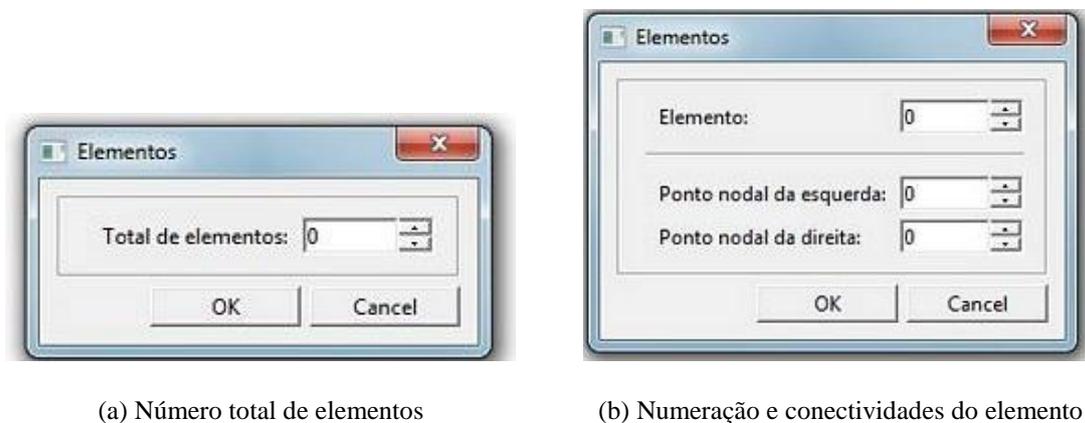


(d) Opção de modelagem

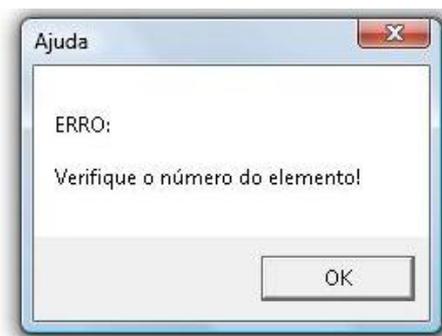
**Figura 3.25** Coordenadas dos pontos nodais de um arco parabólico

## 2. Submenu *Elementos*

Concluída a etapa de definição dos pontos nodais, pode-se realizar a geração dos elementos finitos através da opção *Elementos*. Ao acionar esse comando, o diálogo da Figura 3.26a é apresentado ao usuário para que o número total de elementos seja informado. O próximo passo é definir a conectividade — pontos nodais da extremidade esquerda e direita — de cada um dos elementos. Além disso, um número deve ser fornecido para identificá-los como mostra a Figura 3.26b. Essa geração pode ser feita automaticamente caso o número de cada um dos elementos e suas conectividades respeitem uma mesma sequência. Se o usuário observar então algumas dessas sequências numéricas, basta informar o primeiro e o último elemento de cada uma delas. Cabe destacar que a geração automática dos elementos acelera o processo de geração da malha, entretanto, não há problema se os elementos forem fornecidos um por vez. A geração deve iniciar pelo elemento de número 1 e terminar com o elemento de número correspondente ao total de elementos. Caso ocorra algum erro na geração, o usuário será notificado através de mensagens de alerta, como mostra a Figura 3.27, e todo o processo deverá ser reinicializado.



**Figura 3.26** Geração dos elementos finitos



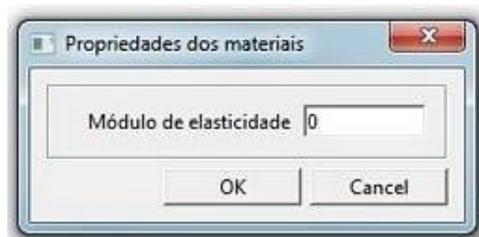
**Figura 3.27** Aviso sobre a ocorrência de erro na geração dos elementos

### 3. Submenu *Materiais*

A opção *Materiais* abre os diálogos para que sejam fornecidas as propriedades dos diferentes materiais usados na estrutura. Além do número total de materiais (Figura 3.28a), os parâmetros ou as propriedades de cada um deles devem ser indicados. Para uma análise estática linear, apenas o módulo de elasticidade é necessário. Nesse caso, a caixa de diálogo mostrada na Figura 3.28b é apresentada. Caso opte-se por uma análise dinâmica, além do módulo de elasticidade, a densidade do material, que pode ser dada nas unidades massa/volume ou massa/comprimento, deve ser fornecida. Numa análise não linear, as propriedades dos materiais variam de acordo com a formulação de elementos finitos escolhida, como indica a Tabela 3.1. Como já destacado, a densidade deve também ser informada caso a análise não linear seja dinâmica. Mais uma vez, ressalta-se que as unidades de medida devem ser compatíveis.



(a) Número de materiais



(b) Análise estática linear

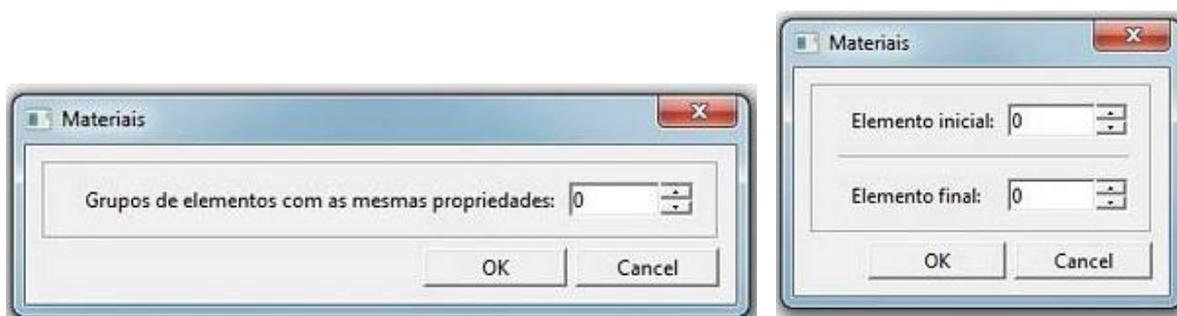
**Figura 3.28** Diálogo para definir as propriedades dos materiais

**Tabela 3.1** Propriedades dos materiais

Formulações	Propriedades
SOF-1, SOF-2	Módulo de elasticidade
SOF-3	Módulo de elasticidade Coeficiente de Poisson
PHF-1, AAF-1	Módulo de elasticidade Tensão de escoamento
PHF-2, AAF-2	Módulo de elasticidade Tensão de escoamento Tensão residual

Os elementos com propriedades de materiais idênticas são agrupados. Para cada grupo, o número de cada elemento que o constitui deve ser fornecido. Uma vez definido o

grupo, caso a numeração dos elementos obedeça a uma sequência, é possível, informando o elemento inicial e final desse grupo, obter os demais elementos intermediários. Caso não haja sequência, cada um dos elementos deve ser informado individualmente. Nesse caso, o número do elemento inicial coincidirá com o do elemento final. Os diálogos para definir o número de grupos e os elementos desses grupos são exibidos na Figura 3.29.



(a) Grupos de elementos

(b) Elemento do grupo

**Figura 3.29** Geração dos grupos de elementos com mesmo material

#### 4. Submenu *Seções*

As propriedades geométricas da seção transversal dos membros estruturais são fornecidas acessando o comando *Seções*. Para uma análise linear, a área,  $A$ , e o momento de inércia em relação ao centro de gravidade da seção transversal,  $I$ , devem ser informados. Se a análise for não linear, as propriedades necessárias dependem da formulação. A Tabela 3.2 indica as propriedades para cada formulação de elementos finitos disponível no CS-ASA. Nessa tabela,  $W$  representa o módulo elástico de resistência à flexão e  $Z$ , o módulo plástico. Ainda observando essa tabela, para as formulações PHF-2 e AAF-2, que são desenvolvidas para perfis do tipo I ou H,  $d$  é a altura,  $t_w$ , a espessura da alma,  $b_f$ , a largura, e  $t_f$  é a espessura da mesa do perfil.

A geração das propriedades das seções transversais é feita de forma semelhante à dos materiais mostrada anteriormente. Após definir o número de diferentes seções (Figura 3.30a), o diálogo semelhante ao da Figura 3.30b é aberto para que as propriedades de cada seção sejam fornecidas. Os elementos finitos com mesma seção podem também ser agrupados, e o número de grupos é informado no diálogo indicado na Figura 3.30c. Portanto, para cada um desses grupos, os elementos que o constituem devem ser indicados (Figura 3.30d). Se a numeração dos elementos estiver em sequência, basta informar o elemento inicial e final desse grupo para obter os elementos intermediários. Caso contrário,

cada um dos elementos deve ser informado. Nesse caso, o número do elemento inicial deverá ser igual ao do elemento final.

**Tabela 3.2** Propriedades das seções transversais

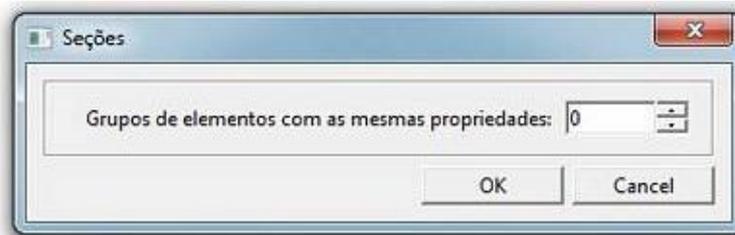
Formulações	Propriedades
SOF-1, SOF-2, SOF-3	A, I
PHF-1, AAF-1	A, I, W, Z
PHF-2, AAF-2	A, I, W, Z, d, $t_w$ , $b_f$ , $t_f$



(a) Número de diferentes seções



(b) Propriedades da seção



(c) Grupos de elementos

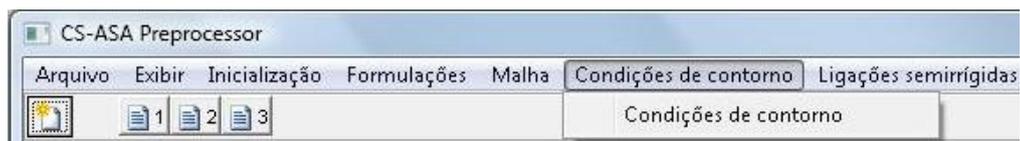


(d) Elemento do grupo

**Figura 3.30** Geração das propriedades das seções transversais

### 3.3.6 Menu *Condições de Contorno*

A Figura 3.31 destaca o menu *Condições de contorno*, cujo objetivo é atribuir restrições às componentes de deslocamentos dos pontos nodais. O usuário definirá se os deslocamentos nas direções  $X$  e  $Y$  e a rotação em torno do eixo  $Z$  estão impedidos ou não. Seis tipos de condições de apoio são representados graficamente na Tabela 3.3. Nessa tabela, fixo(a) e livre indicam, respectivamente, se a componente de deslocamento está impedida ou não.

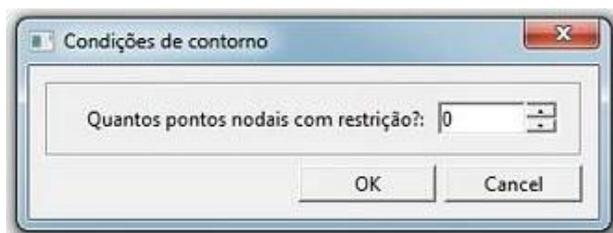


**Figura 3.31** Menu *Condições de contorno*

Apenas os pontos nodais com alguma componente de deslocamento impedida deverão ser informados. Inicialmente, o usuário definirá o número de nós com restrição através do diálogo ilustrado na Figura 3.32a. Depois, para cada um desses nós, responderá aos diálogos da Figura 3.32b informando, como já mencionado, se suas componentes de deslocamento nas direções  $X$  e  $Y$  e a rotação em torno do eixo  $Z$  estão liberadas (Livre) ou não (Fixo). Usando a opção ângulo, que deve ser fornecido em graus, é possível girar o apoio e adequar a sua posição. A posição *default* está representada na Tabela 3.3.

**Tabela 3.3** Representação gráfica dos apoios e tipos de restrições

Representação do apoio	Componentes de deslocamento		
	Direção X	Direção Y	Rotação
	Fixo	Fixo	Fixa
	Fixo	Fixo	Livre
	Livre	Fixo	Livre
	Fixo	Livre	Livre
	Livre	Livre	Fixa
	Livre	Fixo	Fixa
	Fixo	Livre	Fixa



(a) Número de pontos com restrição



(b) Tipo de restrição

**Figura 3.32** Diálogos para impor restrições aos pontos nodais

### 3.3.7 Menu *Ligações Semirrígidas*

Usando o menu *Ligações semirrígidas* (Figura 3.33), os parâmetros necessários para se modelar o comportamento da ligação semirrígida entre os membros estruturais são informados. Esse menu só será habilitado se, no menu *Inicialização* e no comando *Ligações semirrígidas*, a opção *Sim* estiver habilitada (Figura 3.6e). Além disso, a formulação (menu *Formulações*) deve ter sido definida.



**Figura 3.33** Menu *Ligações semirrígidas*

O comportamento de uma ligação semirrígida é simulado aqui através de curvas momento-rotação usando, em geral, modelos analíticos. Estão disponíveis na literatura o modelo linear e os não lineares (Silva, 2009). A Figura 3.34a mostra o comportamento não linear típico de uma ligação semirrígida quando submetida a cargas monotônicas, e a aproximação usada com o modelo linear. Nesse último modelo apenas um parâmetro é necessário para descrever a curva momento-rotação. Esse parâmetro é a rigidez inicial da

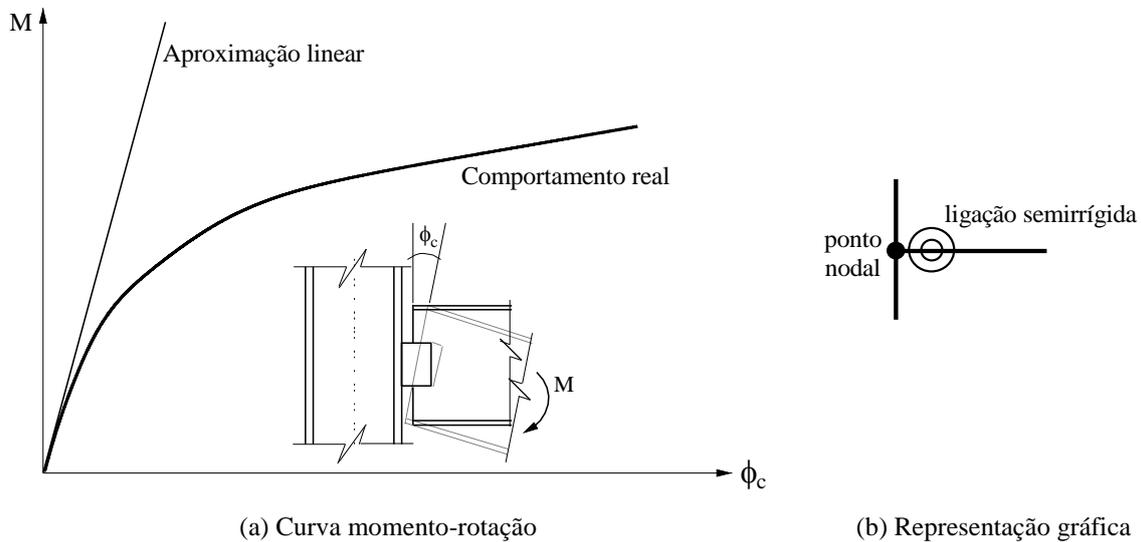
ligação, que, matematicamente, representa a inclinação da reta tangente à curva momento-rotação. A expressão para a relação momento-rotação pode, nesse caso, ser escrita como:

$$M = S_{cini} \phi_c \quad (3.4)$$

onde  $M$  é o valor do momento na ligação, e  $\phi_c$  é a sua deformação rotacional. O parâmetro  $S_{cini}$  é a rigidez inicial da ligação, que pode ser expressa em função da rigidez à flexão da viga, e de um coeficiente de rigidez proposto para indicar o grau da flexibilidade da ligação. Esse coeficiente é o fator de rigidez,  $\gamma$ , dos nós do elemento de viga-coluna com ligações semirrígidas. O fator de rigidez varia de 0 ( $S_{cini} = 0$ ) para ligações idealmente rotuladas, a 1 ( $S_{cini} \rightarrow \infty$ ) para ligações perfeitamente rígidas. A rigidez inicial da ligação, em função desses parâmetros é definida como:

$$S_{cini} = \frac{\gamma}{1-\gamma} \frac{3EI}{L} \quad (3.5)$$

na qual  $EI$  e  $L$  são a rigidez à flexão e o comprimento da viga, respectivamente. O programa de análise CS-ASA usa essa expressão para calcular a rigidez da ligação se o modelo linear for escolhido.



**Figura 3.34** Ligação semirrígida: comportamento e representação gráfica

Uma melhor aproximação do verdadeiro comportamento da ligação é obtida com os modelos não lineares que simulam a perda de rigidez da ligação durante o histórico de

carregamento da estrutura. Para tais modelos, ao contrário do linear, mais de um parâmetro é necessário. Quatro modelos estão disponíveis no CS-ASA: o exponencial (Lui e Chen, 1986), o modelo exponencial modificado (Kishi e Chen, 1987), o modelo de potências com quatro parâmetros (Richard e Abbott, 1975) e o multilinear. No pré-processador gráfico desenvolvido neste trabalho, o modelo exponencial modificado não foi implementado e, por esse motivo, não será descrito aqui.

No modelo exponencial, a expressão matemática para a curva momento-rotação é dada por:

$$M = M_0 + \sum_{m=1}^n C_m \left[ 1 - \exp\left(\frac{-|\phi_c|}{2m\alpha}\right) \right] + R_{kf} |\phi_c| \quad (3.6)$$

em que  $M_0$  é o momento inicial,  $R_{kf}$  é a rigidez devido ao encruamento da ligação,  $\alpha$  é um fator de escala,  $n$  é o número de termos considerados no ajuste e  $C_m$ , para  $m=1, 2, \dots, n$ , são coeficientes de ajustamento da curva.

O modelo de representação do comportamento de ligações semirrígidas proposto por Richard-Abbott (1975), modelo de potências, descreve a relação momento-rotação como:

$$M = \frac{(S_{cini} - R_p) |\phi_c|}{\left[ 1 + \left| \frac{(S_{cini} - R_p) |\phi_c|}{M_0} \right|^n \right]^{1/n}} + R_p |\phi_c| \quad (3.7)$$

onde  $R_p$  é a rigidez devido ao encruamento da ligação quando  $\phi_c$  tende a infinito,  $n$  é um parâmetro que define a forma da curva e  $M_0$  é um momento de referência.

Por fim, para se utilizar uma curva momento-rotação obtida experimentalmente ou, ainda, para contornar as dificuldades de não se ter um modelo específico para certo tipo de ligação, pode-se utilizar o modelo multilinear. Nesse modelo, a curva momento-rotação é aproximada por segmentos de reta. São definidos, então,  $m$  pares ordenados  $(\phi_c, M)$  e, através de um processo simples de interpolação linear, obtém-se a rigidez da ligação correspondente a um determinado nível de carregamento.

Cabe ressaltar que a representação gráfica do nó com ligação semirrígida é feita usando a simbologia ilustrada na Figura 3.34b. Na área de desenho da Figura 3.1 está representado um pórtico de dois andares no qual as ligações viga-coluna são consideradas semirrígidas. Observe que os nós 2, 3, 4 e 5 estão com esse tipo de representação.

Confirmada então a presença de ligações semirrígidas, definido o tipo de análise e, escolhida a formulação, uma das caixas de diálogo ilustradas na Figura 3.35 será apresentada ao acessar o menu *Ligações semirrígidas*. Na Figura 3.35a mostra-se o aviso se a análise for linear. Para esse tipo de análise, apenas a rigidez inicial da ligação é necessária e, por isso, o modelo linear é usado. A Figura 3.35b exibe as opções de escolha para o caso de uma análise não linear. Pode-se optar em aproximar o comportamento da ligação através do modelo linear ou usando um dos três modelos não lineares mencionados nos parágrafos anteriores.



(a) Análise linear

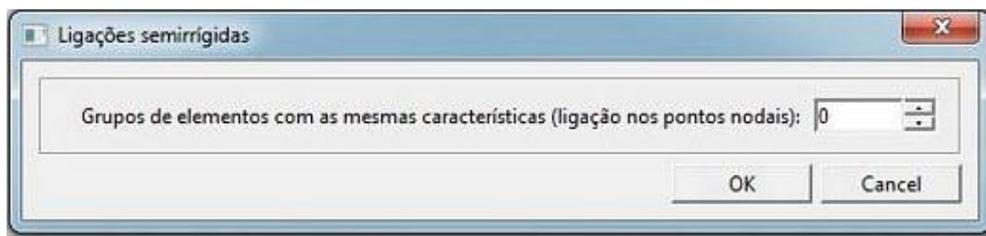


(b) Análise não linear

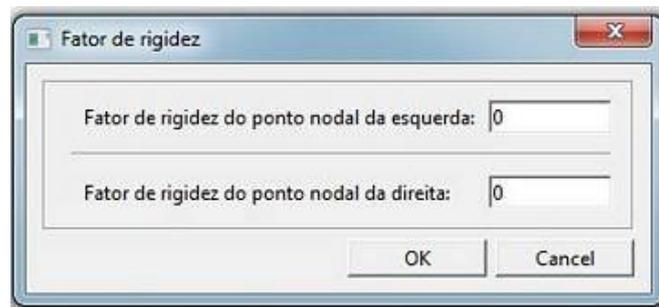
**Figura 3.35** Aviso e diálogo para definir o comportamento da ligação

Seguindo a mesma ideia estabelecida para os materiais e seções transversais apresentada na Subseção 3.3.5, os elementos cujos pontos nodais apresentem ligações semirrígidas com mesmo comportamento são agrupados. Com isso, numa análise linear, após o aviso da Figura 3.35a, ou em uma análise não linear, se o comportamento momento-rotação linear for admitido (Figura 3.35b), o diálogo da Figura 3.36a é apresentado ao usuário para estabelecer então o número de grupos de elementos cujas ligações nas duas extremidades sejam iguais. Para cada um desses grupos, os fatores de rigidez  $\gamma$  (Equação 3.5) das ligações das extremidades esquerda e direita devem ser informados como mostra a

Figura 3.36b. Apenas numa análise elástica, na qual a formulação SRF-3 é usada para incorporar o efeito da semirrigidez da ligação, a excentricidade da ligação deve também ser fornecida (Figura 3.37). Para que os elementos dos grupos supracitados não precisem ser fornecidos individualmente, é possível agrupá-los caso haja uma sequência numérica entre eles. Como já comentado, caso não haja sequência, cada um dos elementos deve ser informado. Nesse caso, o número do elemento inicial coincidirá com o do elemento final. Os diálogos para definir o número de grupos e os elementos desses grupos são exibidos nas Figuras 3.36c-d.



(a) Elementos com mesma ligação



(b) Fator de rigidez



(c) Grupos de elementos



(d) Elemento do grupo

**Figura 3.36** Modelando a ligação semirrígida numa análise linear



**Figura 3.37** Excentricidade da ligação

Em uma análise não linear, caso a opção seja admitir o comportamento não linear da ligação, deve-se informar o número de modelos matemáticos a serem usados no diálogo da Figura 3.38a. O objetivo de cada desses modelos é acompanhar a variação da rigidez da ligação durante a análise. Para determinado tipo de ligação e modelo usado, os parâmetros adimensionais que o descreve são encontrados na literatura com valores que fornecem a rigidez da ligação em um determinado sistema de unidades. Se tal sistema for diferente daquele que está sendo adotado em toda a modelagem, pode-se usar um fator de transformação, que fará, ao final do cálculo, as modificações no valor obtido para a rigidez da ligação. Esse valor é pedido logo após definir o número de modelos matemáticos como mostra a Figura 3.38b. Definido o valor do fator, cujo *default* é 1.0, o usuário definirá o modelo matemático a ser usado. Os modelos matemáticos disponíveis para modelagem são exponencial, de potências com quatro parâmetros, multilinear e linear, como já discutido. Essas opções são indicadas na Figura 3.39.



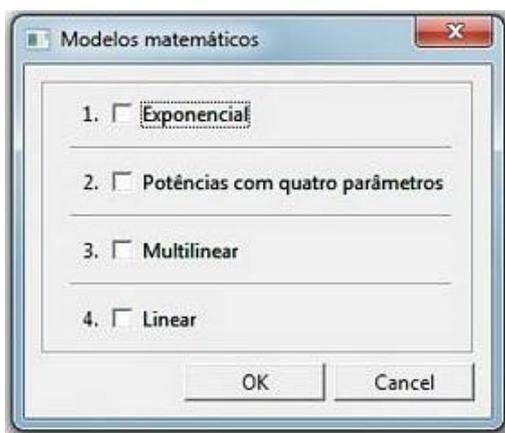
(a) Quantidade de modelos

(b) Transformação de unidades

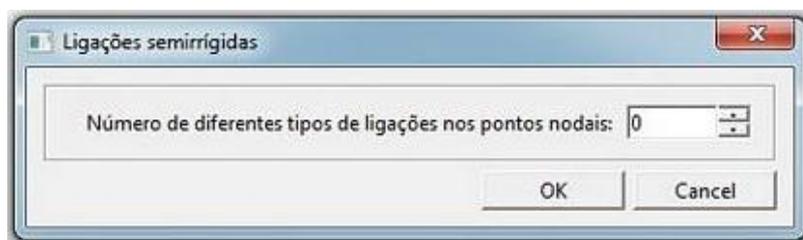
**Figura 3.38** Modelando a ligação semirrígida numa análise linear

Os diferentes tipos de ligação, cujos comportamentos serão simulados usando um dos modelos não lineares escolhido, são agrupados para que os respectivos parâmetros desses modelos sejam fornecidos uma única vez. Sendo assim, o usuário deverá responder

ao diálogo da Figura 3.40. Caso o modelo escolhido seja o exponencial, descrito pela Equação (3.6) mostrada anteriormente, os parâmetros  $R_{kf}$ ,  $\alpha$ , e os coeficientes de ajuste de curva  $C$  encontram-se disponíveis para quatro tipos de ligações: cantoneira de alma simples, de topo e assento, chapa de topo e chapa de topo estendida. Caso opte-se por uma dessas ligações (Figura 3.41a), as caixas de diálogo das Figuras 3.41b-e serão mostradas preenchidas com os valores indicados na Tabela 3.4. A opção de descrever outro tipo de ligação com esse mesmo modelo é também possível.



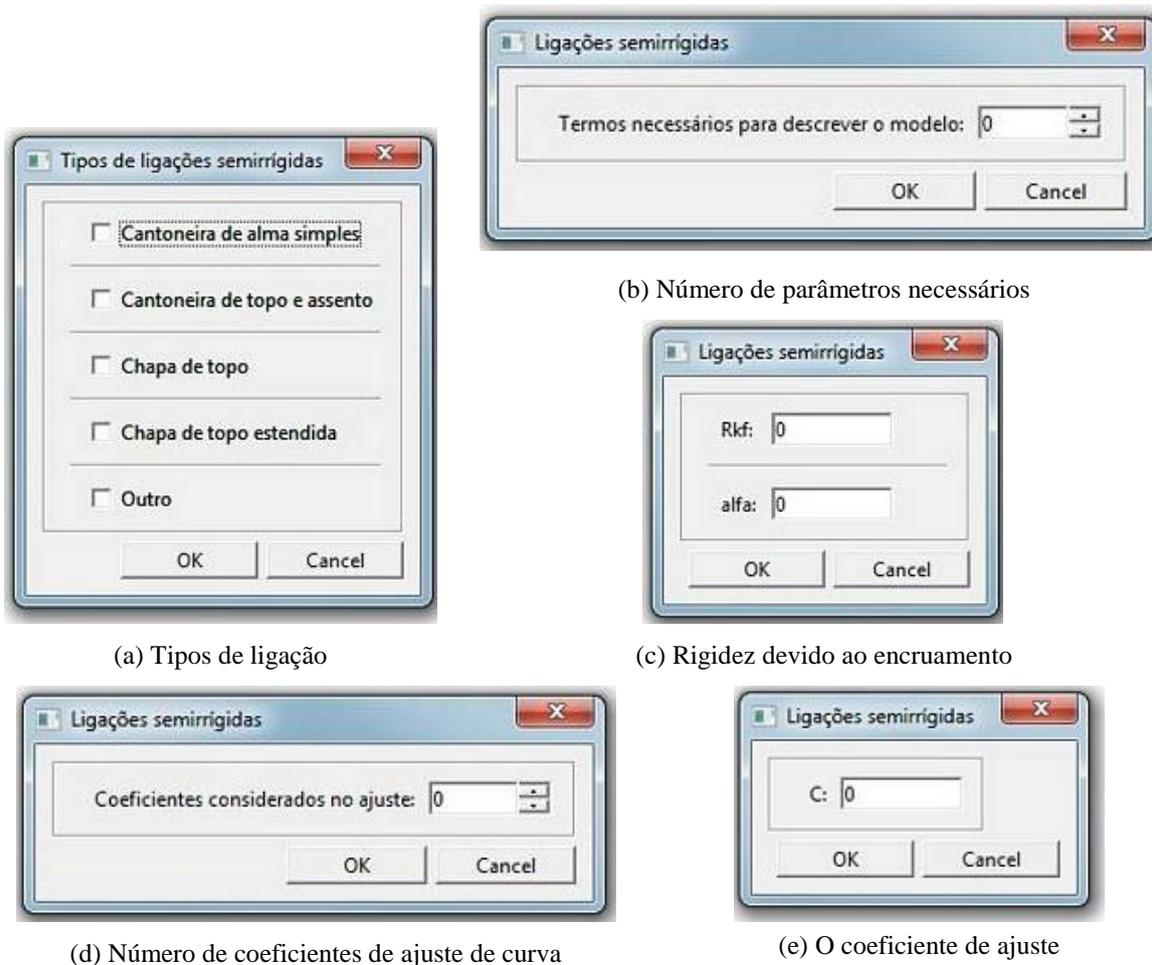
**Figura 3.39** Modelos matemáticos para descrever o comportamento da ligação



**Figura 3.40** Número de diferentes tipos de ligação

Ao escolher o modelo de potências na Figura 3.39, os parâmetros que o usuário deve fornecer são a rigidez inicial da ligação,  $S_{cini}$ , a rigidez devido ao encruamento,  $R_p$ , o momento de referência,  $M_0$ , e o fator que define a forma da curva,  $n$ , como mostra a Figura 3.42.

Os pares rotação-momento devem ser dados através dos diálogos da Figura 3.43 caso a escolha seja pelo modelo multilinear. Mais uma vez, destaca-se que a unidade de medida das grandezas pode ser qualquer.



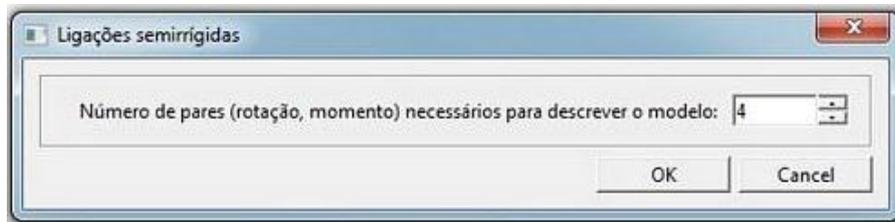
**Figura 3.41** Modelo exponencial

**Tabela 3.4** Parâmetros do modelo exponencial para quatro tipos de ligações (Silva, 2009)

Parâmetros	Cantoneira de alma simples (A)	Cantoneira de topo e assento (B)	Chapa de topo (C)	Chapa de topo estendida (D)
$M_o$ (kip.in)	0	0	0	0
$R_{kf}$ (kip/rad)	$0,47104 \times 10^2$	$0,43169 \times 10^2$	$0,96415 \times 10^3$	$0,41193 \times 10^3$
$\alpha$	$0,51167 \times 10^{-3}$	$0,31425 \times 10^{-3}$	$0,31783 \times 10^{-3}$	$0,67083 \times 10^{-3}$
$C_1$	$-0,43300 \times 10^2$	$-0,34515 \times 10^3$	$-0,25038 \times 10^3$	$-0,67824 \times 10^3$
$C_2$	$0,12139 \times 10^4$	$0,52345 \times 10^4$	$0,50736 \times 10^4$	$0,27084 \times 10^4$
$C_3$	$-0,58583 \times 10^4$	$-0,26762 \times 10^5$	$-0,30396 \times 10^5$	$-0,21389 \times 10^5$
$C_4$	$0,12971 \times 10^5$	$0,61920 \times 10^5$	$0,75338 \times 10^5$	$0,78563 \times 10^5$
$C_5$	$-0,13374 \times 10^5$	$-0,65114 \times 10^5$	$-0,82873 \times 10^5$	$-0,99740 \times 10^5$
$C_6$	$0,52224 \times 10^4$	$0,25506 \times 10^5$	$0,33927 \times 10^5$	$0,43042 \times 10^5$
$S_{cini}$ (kip in/rad)	$0,48000 \times 10^5$	$0,95219 \times 10^5$	$0,11000 \times 10^6$	$0,30800 \times 10^6$



**Figura 3.42** Modelo de potências



(a) Numero de pontos para definir a curva momento-rotação

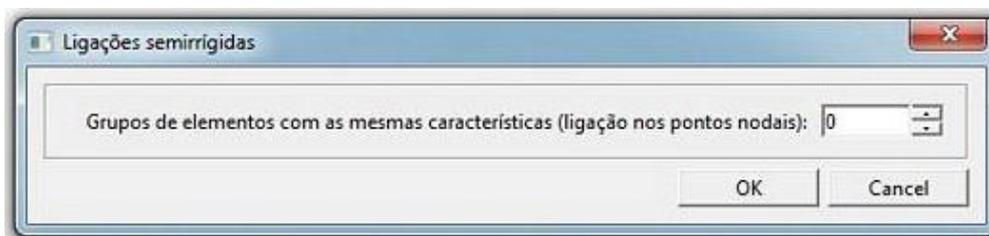


(b) Valores da rotação e do momento

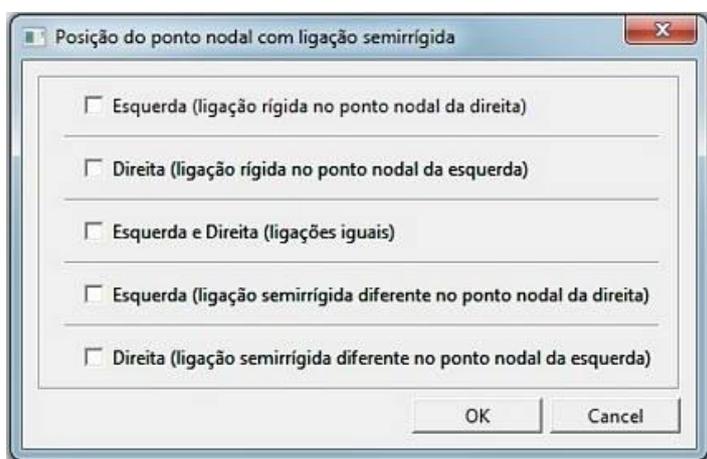
**Figura 3.43** Modelo multilinear

Os elementos que apresentarem ligação semirrígida de mesmo comportamento são agrupados para acelerar a entrada de dados. Destaca-se que o comportamento é simulado usando o modelo escolhido no diálogo da Figura 3.39. Para cada grupo, em função da posição da ligação semirrígida no elemento (Figura 3.44b), novos conjuntos de elementos são formados. Para cada um desses conjuntos, o número dos elementos que o constituem deve ser fornecido. Caso a numeração dos elementos obedeça a uma sequência, é possível, informando o elemento inicial e final desse grupo, obter os demais elementos intermediários. Caso não haja sequência, cada um dos elementos deve ser informado

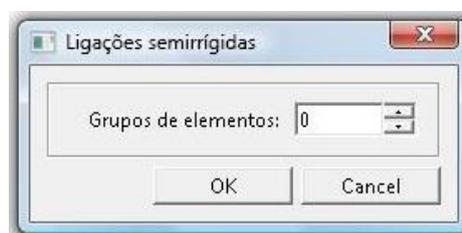
individualmente. Nesse caso, o número do elemento inicial coincidirá com o do elemento final. Os diálogos para definir o número de grupos e os elementos desses grupos são exibidos na Figura 3.44c-d.



(a) Grupos de elementos com mesmo tipo de ligação



(b) Posição da ligação semirrígida no elemento



(c) Ligação na mesma posição

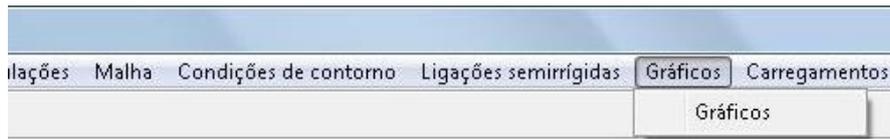


(d) Elementos do grupo

**Figura 3.44** Grupos de elementos cujas ligações nas extremidades são iguais

### 3.3.8 Menu *Gráficos*

Os resultados gerados pelo programa CS-ASA são armazenados em diferentes arquivos de forma a se obter trajetórias carga-deslocamento, diagramas de esforços solicitantes, grau de plastificação dos membros, modos e frequências de vibração, comportamento histerético da ligação viga-coluna e da seção transversal, históricos de deslocamentos, forças internas em cada membro, entre outros. Sendo assim, no menu *Gráficos* (Figura 3.45) é estabelecida a leitura dos parâmetros para geração desses resultados, que poderão ser representados graficamente posteriormente.



**Figura 3.45** Menu *Gráficos*

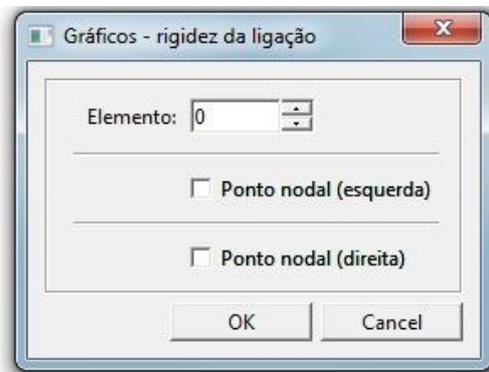
Para uma análise estática não linear ou dinâmica nas quais são traçadas, respectivamente, curvas carga-deslocamento e histórico de deslocamentos, os diálogos das Figuras 3.46a-b são apresentados ao usuário para definir os pontos nodais para controle da carga e do deslocamento.



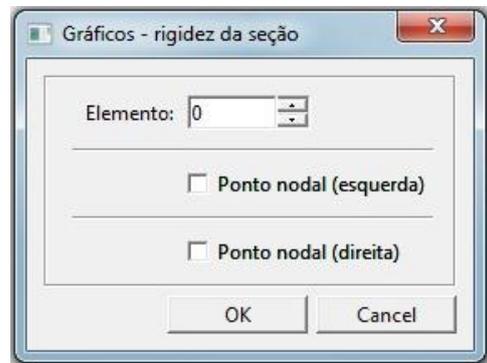
(a) Controle do deslocamento



(b) Controle do carregamento



(c) Controle da rigidez da ligação



(d) Controle da rigidez da seção



(e) Controle das forças internas



(f) Fator de amplificação

**Figura 3.46** Parâmetros para construção de gráficos

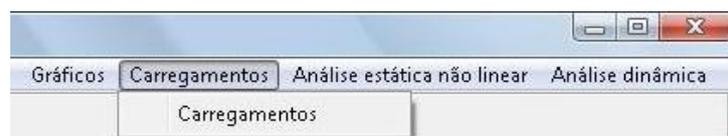
Se houver ligações semirrígidas e seu comportamento for admitido não linear, o processo de degradação da rigidez da ligação pode ser acompanhado. Nesse caso, indica-se o elemento e a posição da ligação, esquerda ou direita, nesse elemento.

Numa análise inelástica, os diálogos das Figuras 3.46d-e são usados para definir o elemento cuja rigidez da seção e forças internas serão observadas.

Por fim, se a análise for dinâmica, um coeficiente para amplificação dos modos de vibração deve também ser fornecido (Figura 3.46f). O objetivo com esse fator é melhorar a visualização desses resultados.

### 3.3.9 Menu *Carregamentos*

Através do menu *Carregamentos* (Figura 3.47) é possível acionar os diálogos para aplicar cargas à estrutura. Carga permanente (peso próprio da estrutura, por exemplo) e carga variável podem ser consideradas. Podem ser atribuídas cargas uniformemente distribuídas nos elementos e concentradas nos nós. A representação gráfica e a convenção de sinal adotada para forças e momentos em cada um desses casos são exibidas nas Tabelas 3.5 e 3.6. É importante esclarecer que apenas cargas uniformemente distribuídas aplicadas sobre elementos dispostos nas direções  $X$  ou  $Y$  (Figura 3.1) podem ser geradas usando o CS-ASA Preprocessor. Nos demais casos, pode-se transformá-las em cargas nodais equivalentes e considerá-las concentradas nos nós. As forças horizontal e vertical são consideradas positivas quando tiverem o mesmo sentido do eixo coordenado. Já o momento fletor é positivo quando estiver no sentido anti-horário.



**Figura 3.47** Menu *Carregamentos*

O tipo e a forma de aplicação das cargas são indicados através dos diálogos apresentados na Figura 3.48. Selecionando a opção *Pontos nodais* na Figura 3.48b, cargas concentradas serão atribuídas aos nós. Nesse caso, deve-se informar o número de pontos nodais com algum tipo de carga (Figura 3.49a). Para cada ponto, a intensidade da carga nas direções  $X$  e  $Y$ ,  $F_x$  e  $F_y$ , respectivamente, e o momento fletor em torno do eixo  $z$ ,  $M_z$ , devem ser fornecidos como ilustra a Figura 3.49b.

**Tabela 3.5** Convenção de sinais para cargas concentradas e momentos

Sinal	Representação gráfica		
	Força horizontal	Força vertical	Momento fletor
Negativo			
Positivo			

**Tabela 3.6** Convenção de sinais para cargas uniformemente distribuídas

Representação gráfica			
Força horizontal		Força vertical	
Sinal positivo	Sinal negativo	Sinal positivo	Sinal negativo

Para a aplicação de cargas uniformemente distribuídas, o usuário deverá fornecer, inicialmente, o número total de elementos com carga. Para isso, após selecionar a opção *Elementos* na Figura 3.48b, é apresentado o diálogo da Figura 3.50a. Em seguida, para cada elemento, define-se a intensidade da carga,  $q$ , e a posição do carregamento no elemento como indicado na Figura 3.50b.



(a) Tipo de carregamento



(b) Forma de aplicação

**Figura 3.48** Tipo e forma de aplicação da carga



(a) Número de pontos com carga

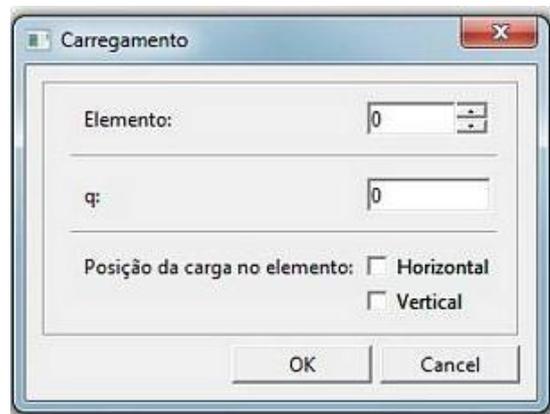


(b) Posição e intensidade da carga

**Figura 3.49** Carga concentrada



(a) Número de elementos com carregamento

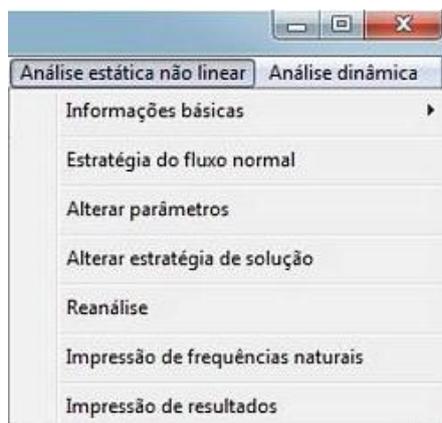


(b) Atribuição das cargas

**Figura 3.50** Carga uniformemente distribuída

### 3.3.10 Menu *Análise Estática Não Linear*

Os menus detalhados anteriormente produzem informações que são gravadas no Arquivo Neutro 1. Entretanto, caso a análise definida no menu *Inicialização* seja estática não linear, é necessário definir alguns parâmetros de controle usados na obtenção da solução do problema estrutural. O programa CS-ASA adota uma metodologia incremental-iterativa cujos parâmetros de controle estão agrupados no menu *Análise estática não linear* mostrado na Figura 3.51. Como pode ser visualizado, têm-se sete opções que serão discutidas a seguir. Com as informações repassadas pelo usuário ao acessar cada uma dessas opções, é gerado o Arquivo Neutro 2, que será abordado no próximo capítulo.



**Figura 3.51** Menu *Análise estática não linear*

### 1. Submenu *Informações básicas*

O programa CS-ASA dispõe de uma metodologia eficiente de solução do problema estático não linear, capaz de traçar toda a trajetória de equilíbrio do sistema estrutural em análise, identificando e passando pelos pontos singulares ou críticos que possam existir. A técnica usada baseia-se no esquema iterativo de Newton-Raphson ao qual são acoplados métodos de continuação. A ideia desses métodos é tratar o parâmetro de carga como uma variável, e adicionar uma restrição ao sistema de equações que descreve o equilíbrio estrutural para que tal parâmetro possa ser determinado. A descrição completa da metodologia de solução utilizada pelo CS-ASA é encontrada em Silva (2009).

Através do submenu *Informações básicas* geram-se os parâmetros que controlam o processo de solução não linear. A Figura 3.52 apresenta as opções desse submenu. É imprescindível que o usuário acione cada um desses comandos. São definidas, inicialmente, as estratégias de incremento de carga e iteração a serem adotadas. As estratégias disponíveis podem ser visualizadas na Figura 3.53. Pensando numa expansão do CS-ASA, tem-se como opção informar novas estratégias usando o comando *Outro*. Nesse caso, um número de identificação deve ser fornecido.

Na Figura 3.54 são exibidos os diálogos apresentados para as demais opções desse submenu, tais como o incremento inicial do parâmetro de carga (Figura 3.54a), o número total de incrementos de carga (Figura 3.54b) e o número máximo de iterações como mostra a Figura 3.54c. Como supracitado, o método de Newton-Raphson é utilizado. Entretanto, uma escolha entre a técnica padrão ou modificada deve ser feita como indica a Figura 3.54d. Sabe-se que, num processo iterativo, a solução obtida é satisfatória quando um determinado critério de convergência é obedecido. Os critérios disponíveis no CS-ASA são

baseados em forças e/ou deslocamentos como indicado na Figura 3.54e. Por fim, um valor de tolerância deve ser fornecido através do diálogo mostrado na Figura 3.54f.

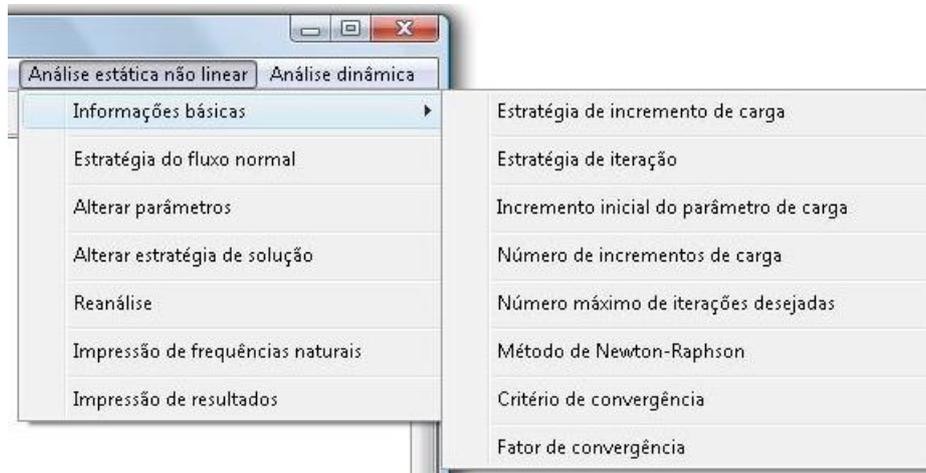
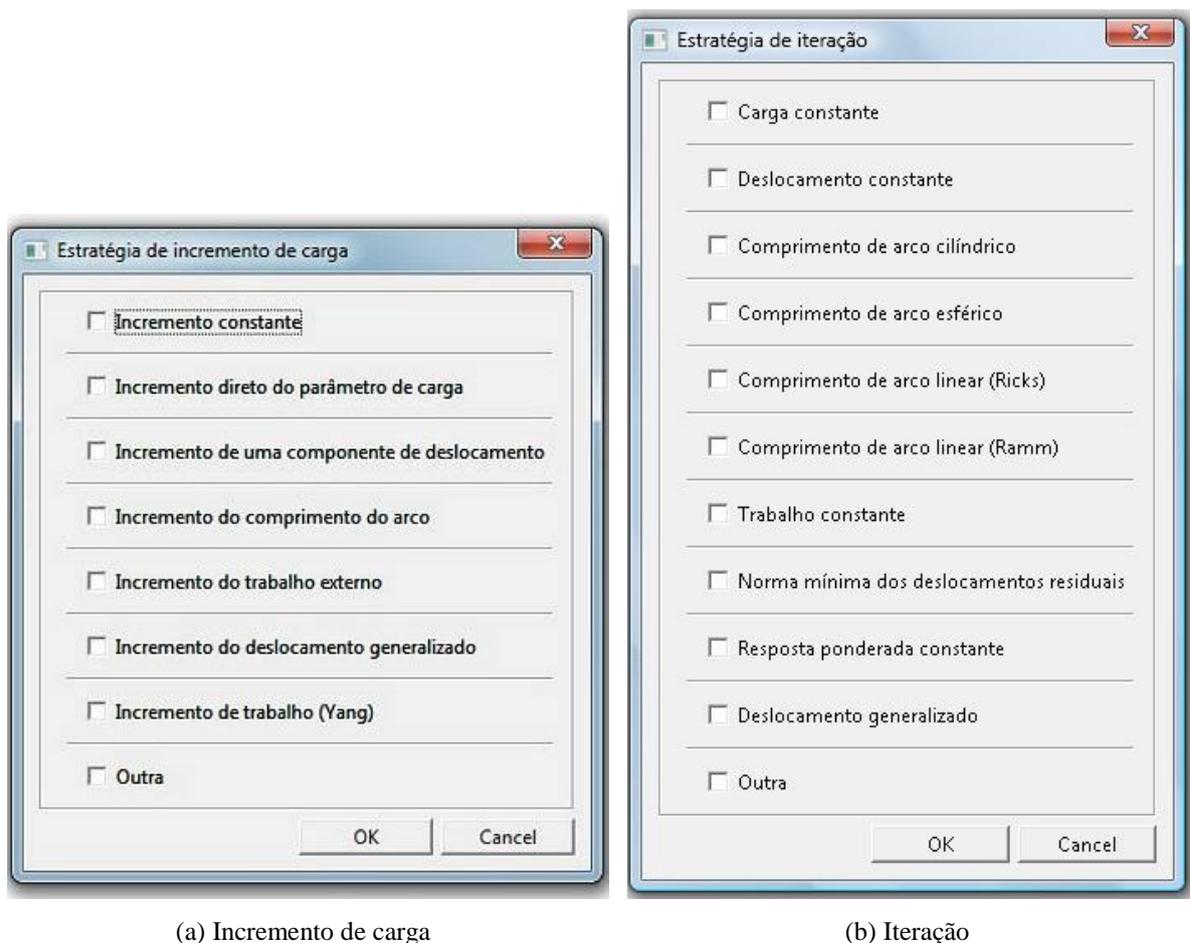


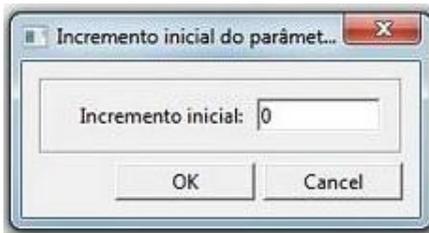
Figura 3.52 Submenu *Informações básicas*



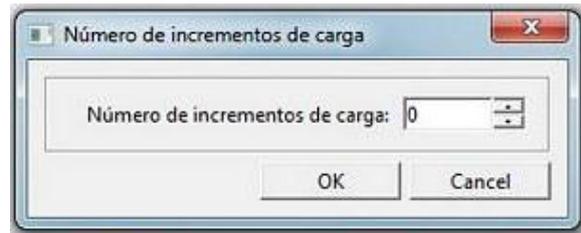
(a) Incremento de carga

(b) Iteração

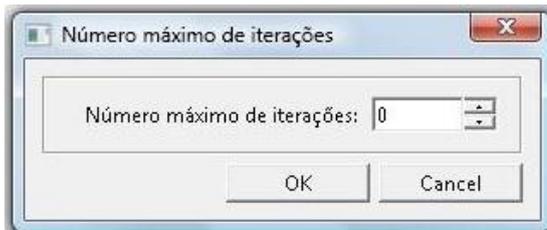
Figura 3.53 Estratégia de incremento de carga e de iteração



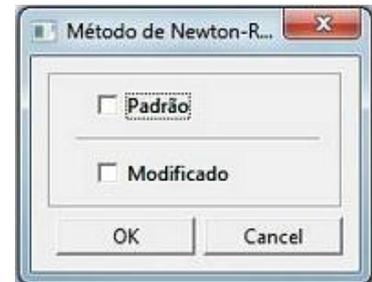
(a) Valor inicial do fator de carga



(b) Número total de incrementos de carga



(c) Número máximo de iterações



(d) Método de Newton-Raphson



(e) Critério de convergência



(f) Tolerância

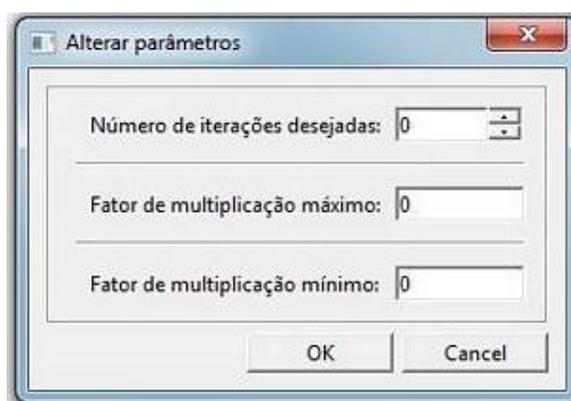
**Figura 3.54** Opções do submenu *Informações básicas*

## 2. Submenu *Estratégia do fluxo normal*

Através desse submenu decide-se sobre o uso da estratégia do fluxo normal. Como destacado em Maximiano *et al.* (2011), a técnica do fluxo normal trata-se basicamente de uma modificação estabelecida no esquema iterativo de Newton-Raphson na tentativa de acelerar o processo de solução e/ou contornar problemas de convergência. Caso opte-se pelo fluxo normal, uma caixa de diálogo será apresentada ao usuário para que seu uso seja confirmado. Destaca-se que a opção de usar a técnica do fluxo normal é opcional, e o *default* é não usar tal técnica.

### 3. Submenu *Alterar parâmetros*

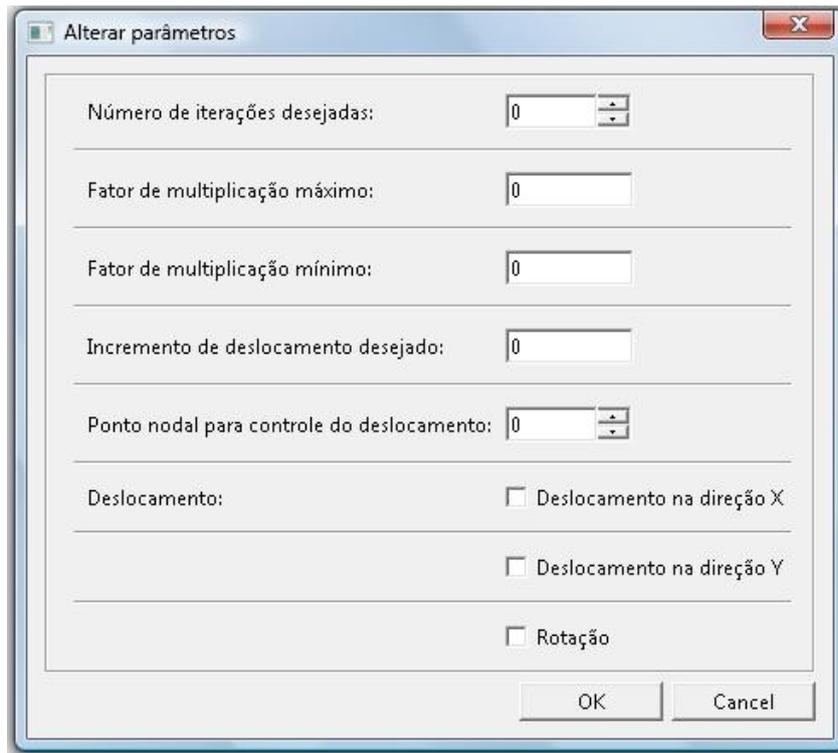
A opção *Alterar parâmetros* é também opcional, e quando acionada pelo usuário, dependendo da estratégia de incremento de carga, possibilita a modificação de alguns valores *default* assumidos pelo programa de análise. Para o incremento direto do parâmetro de carga (Figura 3.55), o usuário poderá modificar o número de iterações desejadas, e os fatores de multiplicação máximo e mínimo, cujos valores *default* são, respectivamente, 10, 5.0 e 0.1. Cabe esclarecer que os fatores de multiplicação limitam a intensidade das variáveis que definem automaticamente os incrementos de carga, tais como, o comprimento de arco e uma componente de deslocamento. Para a estratégia de incremento de carga baseada no comprimento de arco, além desses parâmetros, o comprimento de arco desejado deve ser fornecido como mostra a Figura 3.56. Nos diálogos das Figuras 3.57 e 3.58 indicam-se os parâmetros que podem ser alterados caso sejam utilizadas as estratégias do controle de deslocamento e do trabalho, respectivamente.



**Figura 3.55** Alterar parâmetros para incremento direto do parâmetro de carga



**Figura 3.56** Alterar parâmetros para incremento do comprimento do arco



**Figura 3.57** Alterar parâmetros para incremento de uma componente de deslocamento



**Figura 3.58** Alterar parâmetros para incremento de trabalho

#### 4. Submenu *Alterar estratégia de solução*

A opção *Alterar estratégia de solução* permite que o usuário mude da estratégia de incremento de carga baseada em carga constante para comprimento de arco quando a não linearidade do problema, refletida na variação do parâmetro de rigidez corrente CSP (Bergan *et al.* 1978), for acentuada. Crisfield (1991) faz essa alteração quando o CSP atinge o valor 0.3.

A Figura 3.59 ilustra os diálogos apresentados para fazer a referida alteração. Destaca-se também que esse submenu é opcional, e o *default* é usar as estratégias definidas no submenu *Informações básicas* durante toda a análise.



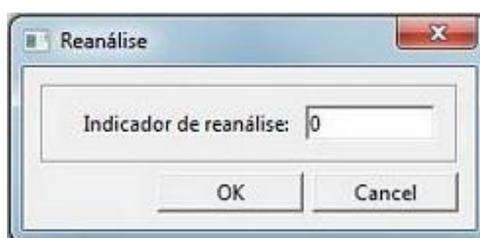
(a)

(b)

**Figura 3.59** Alternar entre estratégias de incremento de carga

### 5. Submenu *Reanálise*

Se houver a necessidade de interromper a análise e recomeçar em outro momento, pode-se usar o comando *Reanálise*. Para usar essa opção, basta digitar o número 1 no diálogo mostrado na Figura 3.60. O valor *default* é zero; esse submenu é, também, opcional.

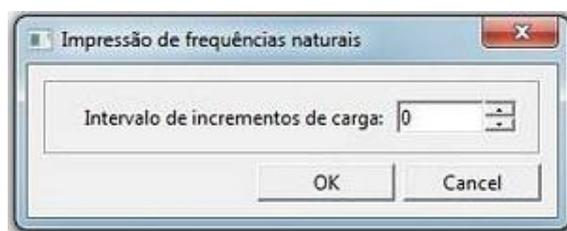


**Figura 3.60** Diálogo para definição do indicador de reanálise

### 6. Submenu *Impressão de frequências naturais*

A Figura 3.61 apresenta o diálogo para definir o intervalo de incrementos de carga para cálculo das frequências naturais e modos de vibração. Esse submenu somente será habilitado se a análise escolhida for dinâmica e, além disso, se o objetivo for avaliar a vibração da estrutura pré-carregada. Nesse tipo de estudo tem-se interesse na influência do pré-carregamento estático nos modos e frequências de vibração de um sistema estrutural.

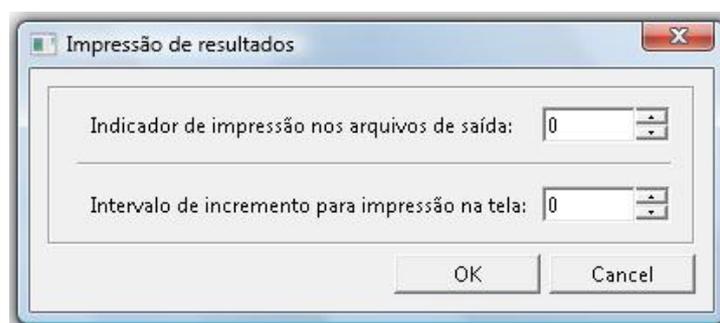
Sendo assim, antes de determinar as frequências naturais é preciso conhecer a configuração de equilíbrio estático desse sistema para um determinado nível de carregamento.



**Figura 3.61** Intervalo de incrementos de carga

### 7. Submenu *Impressão de resultados*

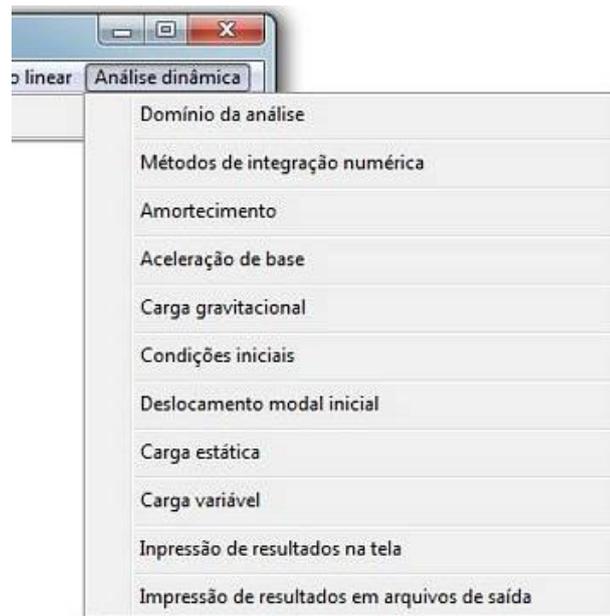
O processo incremental pode ser acompanhado na tela à medida que os resultados da análise são obtidos. Além disso, as variáveis envolvidas podem ter seus valores impressos durante o processo iterativo para posterior análise. Para isso, através do diálogo da Figura 3.62, o usuário define o indicador de impressão das variáveis no arquivo de saída (extensão “.s”). O valor 4 deve ser usado para imprimir variáveis durante o processo iterativo, e o valor 0, caso contrário. O intervalo de passos de carga para impressão na tela, de forças e deslocamentos dos nós selecionados no menu *Gráficos*, deve também ser informado.



**Figura 3.62** Indicador de impressão nos arquivos de saída e na tela

### 3.3.11 Menu *Análise Dinâmica*

Através do menu *Análise Dinâmica* é feita a geração do Arquivo Neutro 3. Há necessidade de acionar esse menu apenas quando o *Tipo de problema* selecionado no diálogo da Figura 3.7 for análise transiente. As opções disponíveis nesse menu são mostradas na Figura 3.63, e cada uma delas será detalhada a seguir.



**Figura 3.63** Menu *Análise dinâmica*

### 1. Submenu *Domínio da análise*

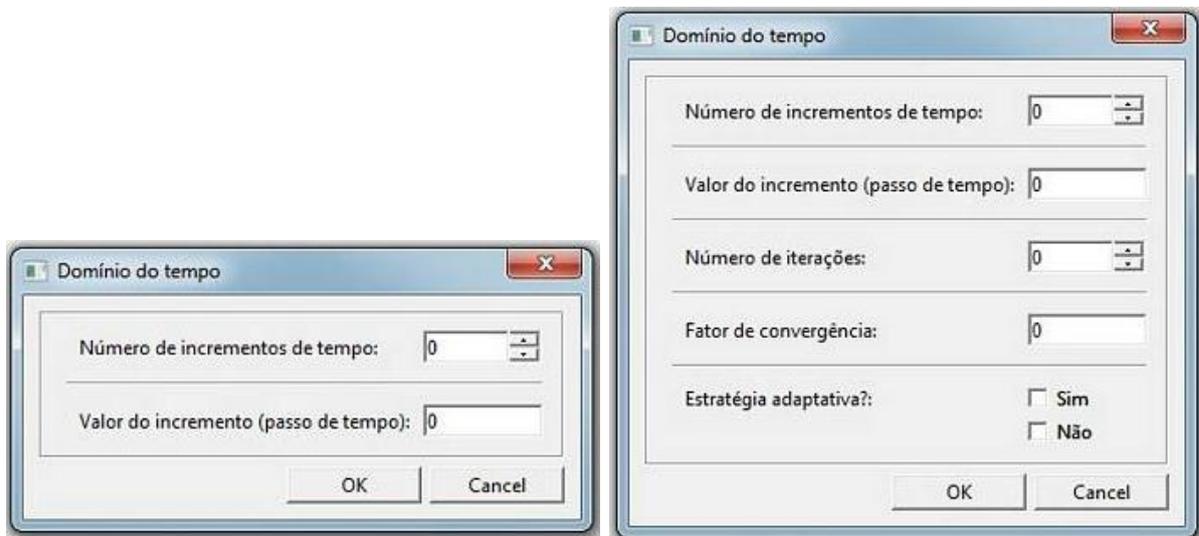
Com o programa CS-ASA, o analista poderá optar em resolver as equações diferenciais de movimento no domínio do tempo ou da frequência. Essa escolha é feita no submenu *Domínio da análise*, cujo diálogo é mostrado na Figura 3.64.

Na análise no domínio do tempo usam-se métodos de integração numérica, cujo processo de solução é passo a passo. A equação que descreve o equilíbrio dinâmico é satisfeita em cada instante de tempo. Destaca-se que a maioria dos métodos usa intervalos de tempo iguais,  $\Delta t$ ,  $2\Delta t$ ,  $3\Delta t$ , ...,  $N\Delta t$ . O processo de solução, em geral, começa no tempo  $t = 0$ , para o qual as condições iniciais para deslocamento, velocidade e aceleração são conhecidas. Sendo assim, o número  $N$  de passos de tempo e o tamanho do passo ou incremento de tempo,  $\Delta t$ , devem ser fornecidos usando os diálogos da Figura 3.65. Se a análise for não linear, o procedimento incremental e iterativo que combina o método implícito clássico de Newmark (Newmark, 1959) com a técnica de Newton-Raphson são adotados na solução do problema transiente. Nesse caso, além do número de incrementos e do valor do incremento, informam-se o número máximo de iterações e o fator de convergência como indica a Figura 3.65b. Outra opção numa análise não linear é utilizar a estratégia adaptativa para cálculo automático do incremento de tempo. Mais detalhes a respeito dessa estratégia pode ser encontrada em Silva (2009).

Para a análise dinâmica linear no domínio da frequência, é utilizado o método da Superposição Modal (Wilson, 2002) e o cálculo numérico das transformadas discretas de Fourier via FFT (*Fast Fourier Transform*) para obtenção da resposta. A FFT (Humar e Xia, 1993) define que o número de pontos usados na discretização deve ser uma potência de 2, ou seja,  $N = 2^m$  sendo  $m$  um número inteiro. Desses  $N$  pontos, os  $N/2$  primeiros definirão a resposta do problema. Vale ressaltar que essa resposta é obtida considerando um intervalo de tempo,  $T_p$ , maior que o tempo de aplicação de carga. Esse intervalo de tempo é denominado período expandido. Essas informações são pedidas ao usuário e encontram-se no diálogo da Figura 3.66.



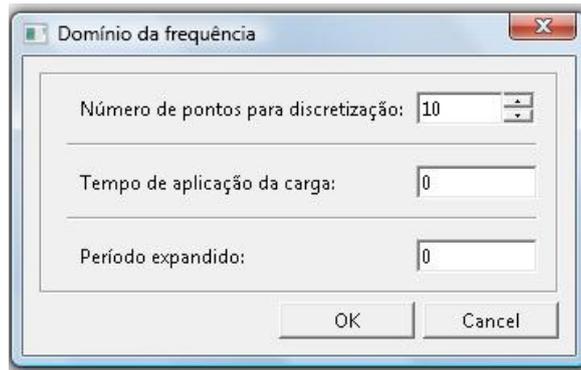
**Figura 3.64** Escolha entre a análise no domínio do tempo ou da frequência



(a) Análise linear

(b) Análise não linear

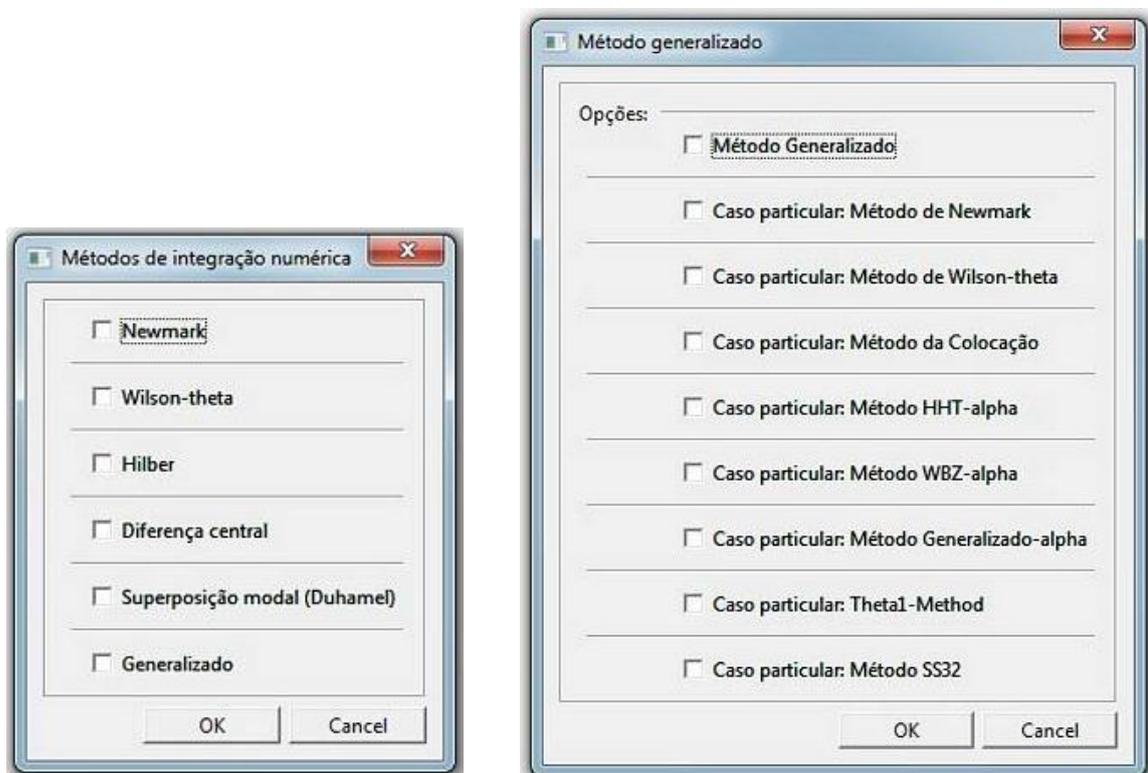
**Figura 3.65** Análise no domínio do tempo



**Figura 3.66** Análise no domínio da frequência

## 2. Submenu *Métodos de integração numérica*

Definida a análise no domínio do tempo, deve-se escolher o método de integração das equações que descrevem o equilíbrio dinâmico através do comando *Métodos de integração numérica*. Os métodos disponíveis podem ser visualizados no diálogo da Figura 3.67. Numa análise linear, todos os métodos listados estão habilitados. Já para a análise não linear, como mencionado anteriormente, usa-se o método de Newmark.



**Figura 3.67** Métodos de integração numérica e opções do método Generalizado

Um método de integração no domínio do tempo para resolver problemas lineares de dinâmica estrutural, denominado Generalizado, proposto por Modak e Sotelino (2002), está também implementado no CS-ASA (Silva, 2009). Como pode ser visto na Figura 3.67, métodos clássicos, entre eles, Newmark, Wilson- $\theta$ , Colocação, HHT- $\alpha$ , e Generalizado- $\alpha$  podem ser obtidos a partir da generalização proposta.

A Figura 3.68 exibe os diálogos para que os parâmetros característicos dos métodos de integração Newmark (Newmark, 1969), Wilson- $\theta$  (Subbaraj e Dokanish, 1989) e Hilber (Dokanish e Subbaraj, 1989) sejam fornecidos. Para o método da superposição modal, pede-se o número de modos de vibração a serem superpostos. Cabe esclarecer que, nesse método, as integrações numéricas das equações de movimento são realizadas usando a Integral de Duhamel (Clough e Penzien, 2003). Destaca-se, ainda, que para o método Diferença Central (Dokanish e Subbaraj, 1989), nenhum parâmetro adicional é necessário. Já na Figura 3.69 ilustram-se os diálogos para entrada dos parâmetros característicos do método Generalizado (Modak e Sotelino, 2002) e dos nove casos particulares.



(a) Newmark



(b) Wilson  $\theta$

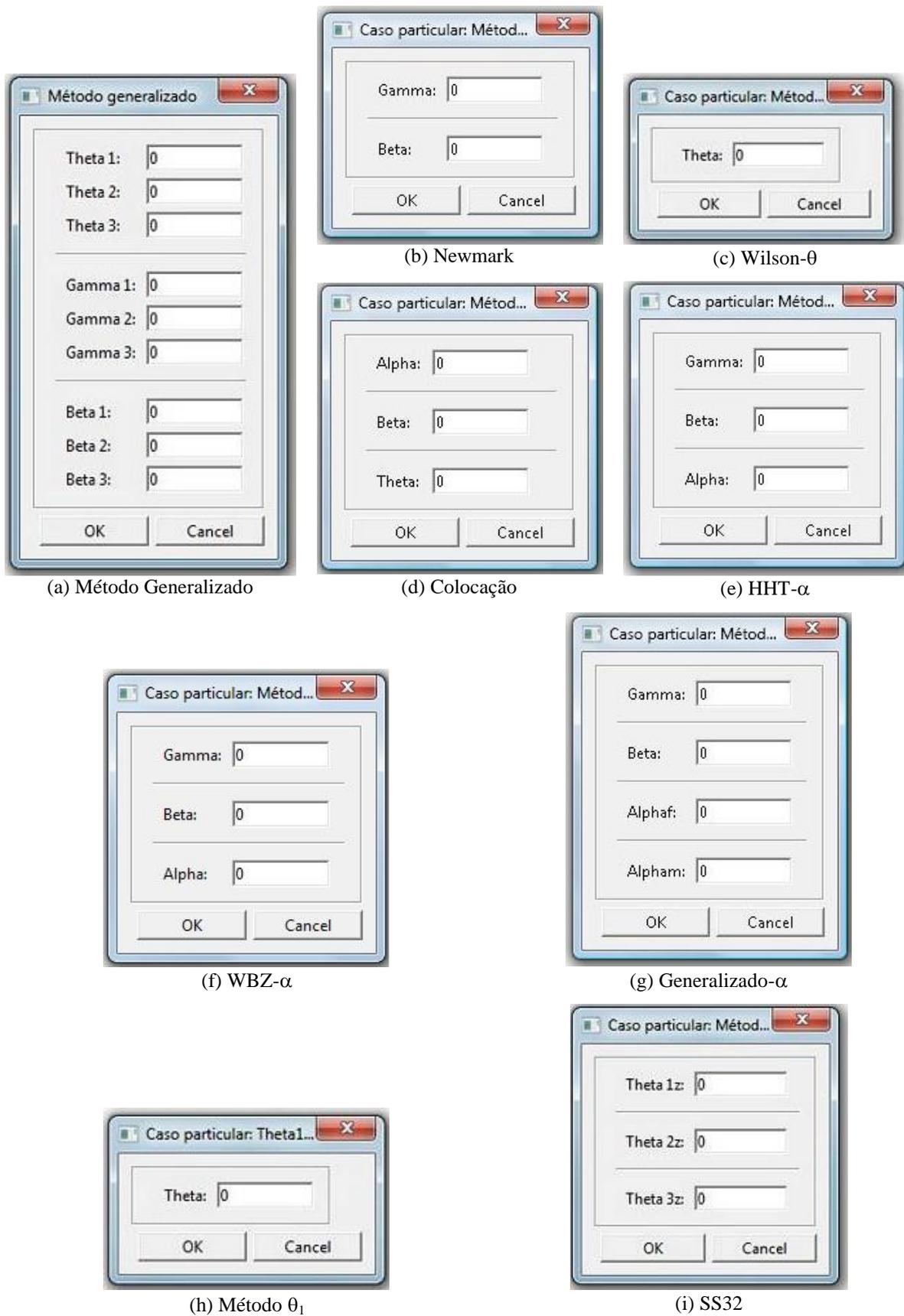


(c) Hilber



(d) Superposição modal

**Figura 3.68** Parâmetros característicos dos métodos de integração



**Figura 3.69** Casos particulares obtidos com o Método Generalizado

### 3. Submenu *Amortecimento*

No CS-ASA, considera-se o amortecimento viscoso de Rayleigh, no qual a matriz de amortecimento é considerada como sendo uma combinação linear das matrizes de massa e rigidez. Se os coeficientes de proporcionalidade de Rayleigh não forem conhecidos, pode-se obtê-los usando duas taxas de amortecimento referentes a duas frequências (modos) distintas, como mostrado em Silva (2009). Os diálogos apresentados ao usuário para defini-los são ilustrados na Figura 3.70. Se os coeficientes são conhecidos, o diálogo da Figura 3.70c deve ser respondido; caso contrário, as taxas de amortecimento e frequências correspondentes são necessárias (Figura 3.70b).

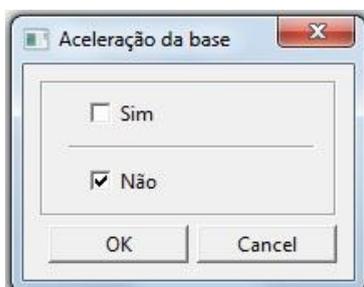


**Figura 3.70** Amortecimento proporcional

### 4. Submenu *Aceleração da base*

Um tipo de carregamento que pode ser considerado nas análises consiste na excitação do solo na base das estruturas. Trata-se de um problema bastante importante na análise dinâmica estrutural, pois permite simular os efeitos provocados por terremotos. A

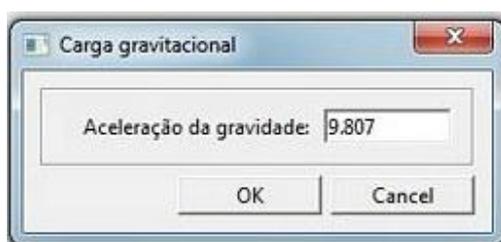
excitação, nesse caso, é fornecida através de uma função que retrata a variação da aceleração do solo com o tempo. O usuário deverá confirmar que a aceleração do solo será fornecida no diálogo da Figura 3.71. Esse submenu é opcional, e o *default* é não considerar esse tipo de excitação.



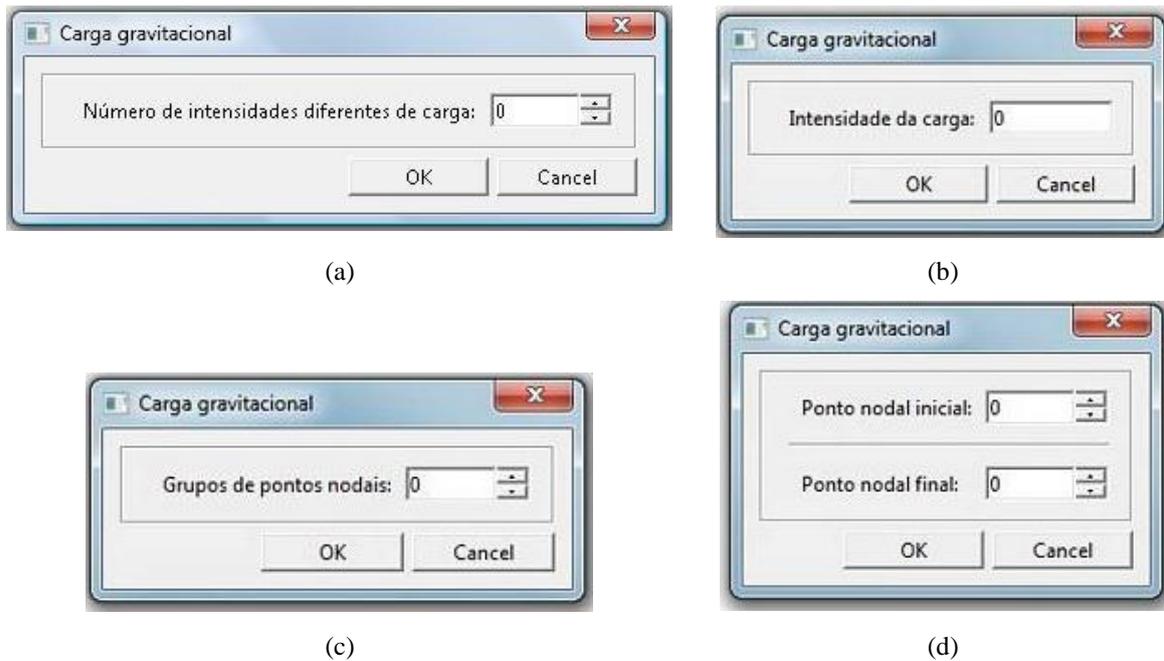
**Figura 3.71** Diálogo para definição do uso da aceleração da base

### 5. Submenu *Carga gravitacional*

As massas concentradas provenientes de carga gravitacional são modeladas através do submenu *Carga gravitacional*. Para isso, o usuário deve fornecer, inicialmente, a aceleração da gravidade, cujo valor *default* é  $9.807 \text{ m/s}^2$ , usando o diálogo da Figura 3.72. As cargas gravitacionais de mesma intensidade podem ser agrupadas e o número de grupos formados deve ser fornecido como mostra o diálogo da Figura 3.37a. Para cada uma dessas cargas, a intensidade deve ser indicada (Figura 3.73b), e os respectivos pontos de aplicação serão também agrupados. A geração desses pontos pertencentes a cada grupo pode ser feita automaticamente caso a numeração desses nós esteja em uma sequência. Se o usuário observar essa sequência, basta informar o primeiro e o último nó de cada uma delas usando o diálogo da Figura 3.73d. Cabe destacar que a geração automática dos pontos acelera o processo de geração das cargas. Entretanto, os pontos nodais podem ser fornecidos individualmente. Nesse caso, o ponto nodal inicial coincidirá com o ponto nodal final.



**Figura 3.72** Aceleração da gravidade



**Figura 3.73** Modelagem de cargas gravitacionais como massa concentrada

#### 6. Submenu *Condições iniciais*

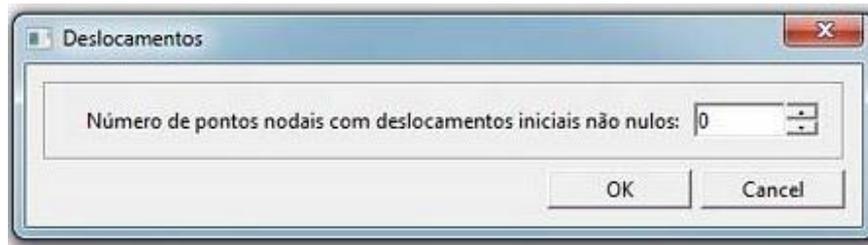
As condições iniciais para as componentes de deslocamentos, velocidades e acelerações nodais são atribuídas através dos diálogos das Figuras 3.74 e 3.75. Destaca-se que os diálogos para velocidades e acelerações são semelhantes aos da Figura 3.75.

#### 7. Submenu *Deslocamento modal*

Outra opção disponível na análise é a de excitar a estrutura com um determinado modo de vibração. Para isso impõe-se um campo inicial de deslocamentos igual à solução de algum modo de vibração considerando uma determinada amplitude. Essas informações são geradas no submenu *Deslocamento modal* através do diálogo ilustrado na Figura 3.76.



**Figura 3.74** Caixa de diálogo para escolha das condições iniciais



(a)



(b)

**Figura 3.75** Deslocamentos e rotação do ponto nodal



**Figura 3.76** Deslocamento inicial correspondente a um modo de vibração

## 8. Submenu *Carga estática*

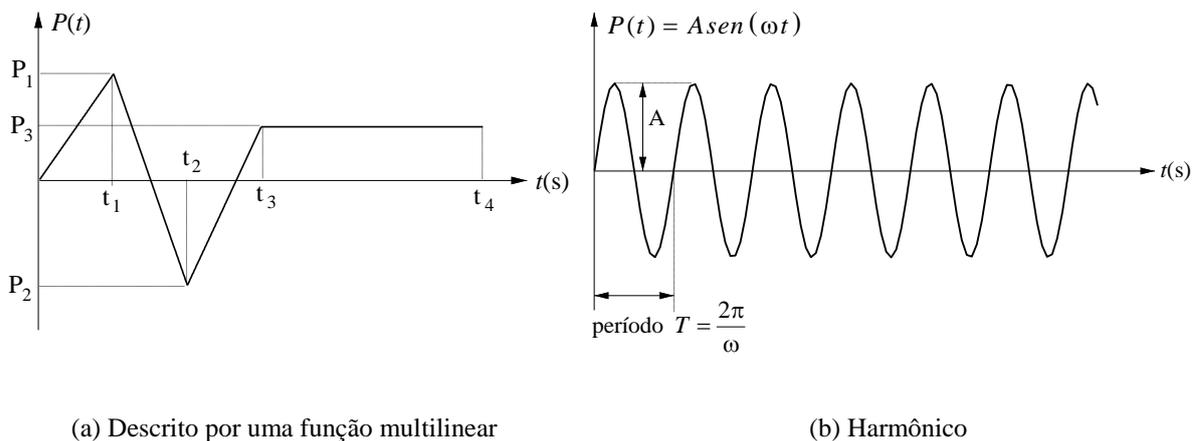
O objetivo desse submenu é modificar a intensidade e o sentido da carga permanente através um fator de multiplicação fornecido no diálogo da Figura 3.77. Vale ressaltar que a direção dessa carga é definida no menu *Carregamentos* e opção *Carga permanente*.



**Figura 3.77** Fator multiplicador da carga estática

### 9. Submenu *Carga variável*

A intensidade e o sentido do carregamento, cuja direção foi fornecida no menu *Carregamentos* e opção *Carga variável*, é definida usando o submenu *Carga variável*. É possível descrever qualquer histórico de carregamento fornecendo um conjunto de pontos que representam o instante de tempo e a intensidade do carregamento nesse instante. Esses pontos são unidos por segmentos de reta, e a intensidade da carga em um instante qualquer é obtida, pelo programa de análise, através de interpolação linear. Pode-se também descrever carregamentos harmônicos. Tem-se como opção aplicar o carregamento harmônico durante um intervalo de tempo e eliminá-lo após esse período. A Figura 3.78 ilustra esses tipos de carregamentos, e a Figura 3.79 exibe o diálogo usado para escolher um deles.



**Figura 3.78** Históricos de carregamento

Se o carregamento atuante for descrito usando segmentos de reta, é preciso responder ao diálogo da Figura 3.80a. Se houver mais de uma função descritiva do carregamento, o diálogo da Figura 3.80b é apresentado ao usuário. Outra informação importante diz

respeito ao número de pares ordenados  $(t_i, P_i)$  e seus valores como indicado nas Figura 3.80c-d.

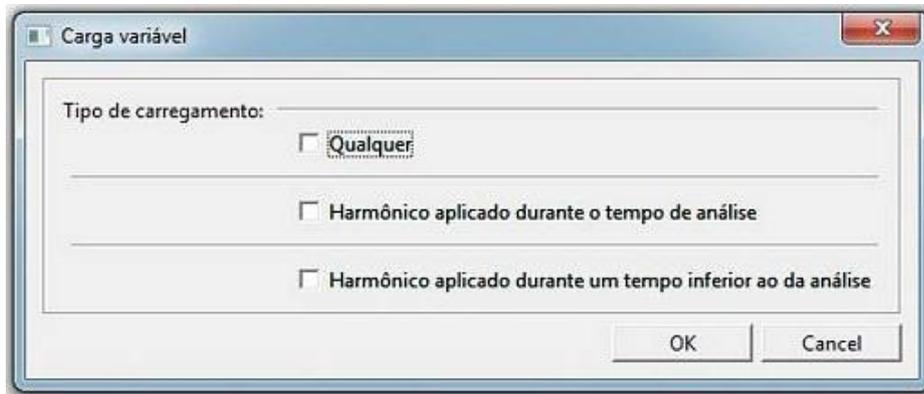
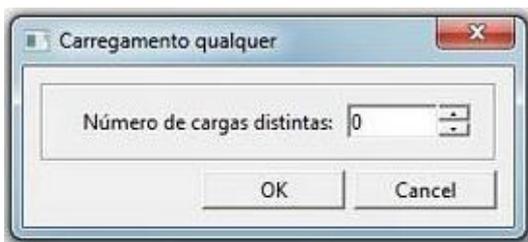
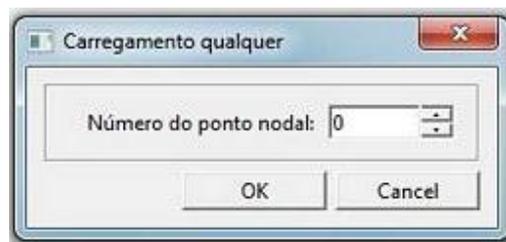


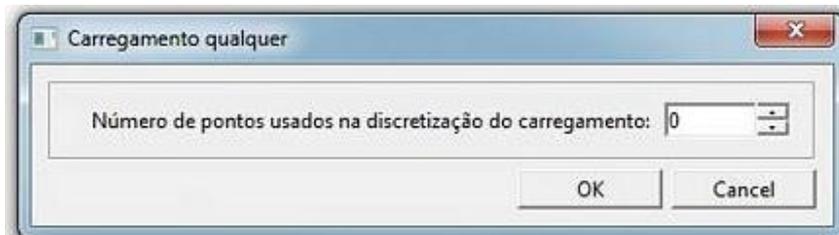
Figura 3.79 Tipos de carregamento



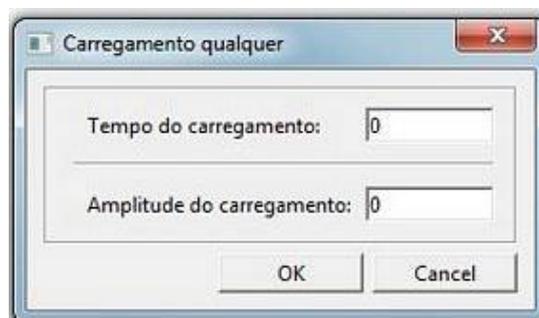
(a) Número de diferentes tipos de carga



(b) Ponto nodal



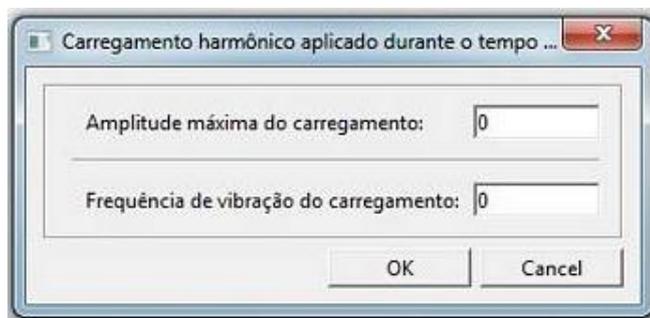
(c) Número de pares ordenados  $(t_i, P_i)$



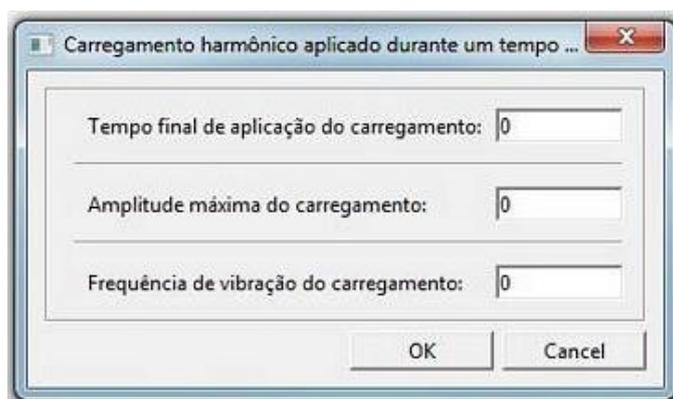
(d) Tempo de aplicação e intensidade da carga

Figura 3.80 Carregamento aproximado por segmentos de reta

De acordo com a Figura 3.78, para descrever o carregamento harmônico, o usuário definirá a amplitude máxima  $A$  e a frequência  $\omega$  do carregamento como indicam as Figuras 3.81 e 3.82. Caso o carregamento atue durante um tempo inferior ao tempo total da análise, esse instante de tempo deve também ser fornecido (Figura 3.82).



**Figura 3.81** Carregamento harmônico



**Figura 3.82** Especificando o tempo de atuação do carregamento harmônico

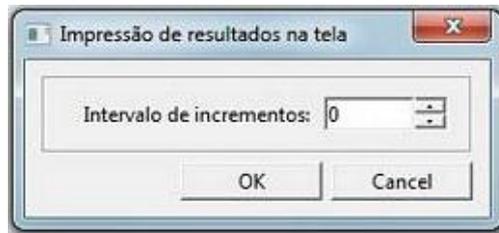
#### 10. Submenu *Impressão de resultados na tela*

Assim como na análise estática, o processo de análise pode ser acompanhado na tela à medida que os resultados da análise dinâmica são obtidos. O intervalo de passos de tempo para impressão na tela de forças e deslocamentos dos nós selecionados no menu *Gráficos* deve ser informado através do diálogo da Figura 3.83.

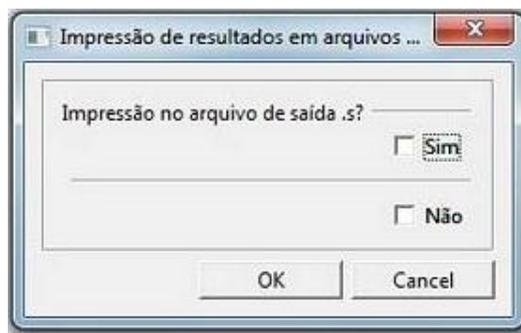
#### 11. Submenu *Impressão de resultados em arquivos de saída*

As variáveis envolvidas na análise podem ter seus valores impressos para posterior avaliação. Para isso, o usuário deverá confirmar a gravação das variáveis no arquivo de saída (extensão “.s”). Além disso, a gravação, no arquivo de resultados com extensão

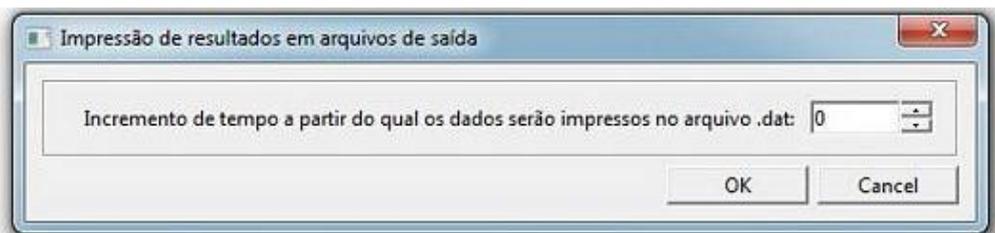
“.dat”, de forças e deslocamentos dos nós previamente selecionados no menu *Gráficos* pode ser realizada a partir de um determinado instante de tempo. Nesse caso, o usuário deve fornecer o incremento de tempo a partir do qual esses dados serão gravados, como indica a Figura 3.84b.



**Figura 3.83** Impressão de resultados na tela



(a)



(b)

**Figura 3.84** Impressão de resultados nos arquivos de saída

# Capítulo 4

## Os Arquivos Neutros

### 4.1 Introdução

Após apresentação detalhada dos recursos existentes no *CS-ASA Preprocessor*, faz-se agora uma explanação geral a cerca dos arquivos de dados gerados por esse programa, que são denominados aqui arquivos neutros.

O objetivo deste capítulo é então fornecer ao usuário do programa de análise CS-ASA informações detalhadas relativas à montagem e edição dos três arquivos neutros que podem ser gerados pelo pré-processador desenvolvido neste trabalho. Esses arquivos são organizados através de macro-comandos e blocos de informações que são gerados ao se escolher os menus e submenus apresentados no capítulo anterior.

A estrutura dos arquivos neutros será discutida nas seções seguintes. A Seção 4.2 traz uma visão geral da disposição e do significado das variáveis e macro-comandos pertencentes ao Arquivo Neutro 1. Em seguida, na Seção 4.3, são explicados os dados e os macros empregados na montagem do Arquivo Neutro 2. Finalmente, na Seção 4.4, são apresentadas todas as informações relacionadas com o Arquivo Neutro 3.

### 4.2 Arquivo Neutro 1

Este arquivo está organizado na forma de blocos ou seções de informações, que, em geral, são precedidos por macro-comandos. Essas informações, assim como seus macros, são armazenadas pelo programa em uma ordem específica que deve ser seguida.

A Figura 4.1 ilustra um exemplo de Arquivo Neutro 1, que foi gerado para a modelagem de um pórtico de dois pavimentos com ligações semirrígidas para uma análise estática não linear.

Observe que as seis primeiras linhas são associadas aos dados iniciais necessários para o estudo do pórtico de acordo com o modelo e tipo de análise adotados. Essas informações são geradas utilizando-se os menus *Inicialização* e *Formulações*, juntamente com suas caixas de diálogos (Seções 3.3.3 e 3.3.4). A Tabela 4.1 apresenta esses dados iniciais de forma mais completa, com todos os macros possíveis, independente do tipo de análise a ser realizada.

Uma vez concluída a geração dessas informações iniciais, parte-se então para a obtenção das outras partes do Arquivo Neutro 1. Na Tabela 4.2 estão apresentados os macro-comandos associados a essas outras partes do arquivo, e que serão descritos detalhadamente a seguir.

#### 1. Macro-comando *coor*

Após esse macro, registra-se, no arquivo, o modelo estrutural escolhido (pórtico ou arco; Figura 3.16), e na sequência as informações relacionadas às coordenadas de cada ponto nodal presente no modelo estrutural. Todas as informações associadas a esse macro-comando são obtidas por meio do menu *Malha*, opção *Coordenadas nodais* (Seção 3.3.5). Veja que, para o pórtico em estudo, após o macro *coor* aparece outro macro, *ppor*, que identifica a geração das coordenadas dos pontos nodais para vigas e pórticos. Nesse caso, grava-se, inicialmente, o número total de nós (*npoin*). Em seguida, escreve-se no arquivo o número de identificação de cada nó (*pto*) e suas respectivas coordenadas  $x$  e  $y$ , como ilustra a Tabela 4.3 (ver também Figura 3.18). Cabe aqui destacar que todos os nós do modelo são listados no arquivo e essa lista é encerrada com o último ponto nodal da malha.

No caso dos arcos, como já explicado no capítulo anterior, têm-se os macro-comandos *psin*, para a geração das coordenadas de um arco senoidal, *ppol*, para a geração das coordenadas de um arco polar ou circular e, por fim, *ppar*, para a geração das coordenadas de um arco parabólico. As variáveis pertencentes a cada um desses macro-comandos são listadas nas Tabelas 4.4, 4.5 e 4.6. No caso do macro *psin* (Tabela 4.4), estão indicados o número total de nós do modelo, o indicador de simetria (*isim*), o ponto nodal de referência 1 (*pto1*) e 2 (*pto2*) e suas coordenadas  $x$  e  $y$ . Vale lembrar que esses dados são gerados através das caixas de diálogo da Figura 3.21.

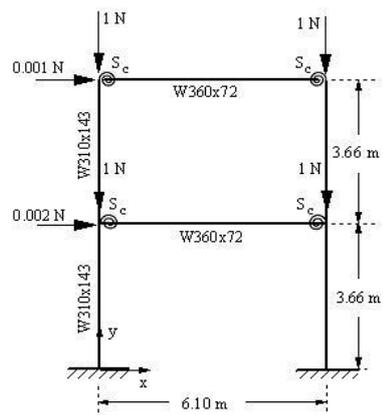
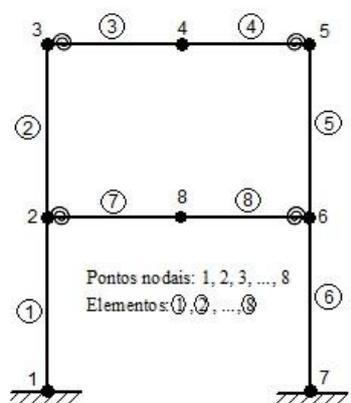
Pórtico de dois andares com ligações semirrígidas	<b>title</b>
estatica	<b>ntype</b>
por	<b>nmodel</b>
1	<b>nsol</b>
1	<b>semi</b>
8 8 2 2 3 1 1 2 2	<b>npoin, nelelem, nnode, ndime, ndofn, nmats,</b>
	<b>npmat, nsecs, npsec</b>
<b>coor</b>	<b>Macro-comando</b>
<b>ppor</b>	<b>Macro-comando</b>
8	<b>npoin</b>
1 0 0	<b>pto, x, y</b>
2 0 3.66	
3 0 7.32	
4 3.05 7.32	
5 6.10 7.32	
6 6.10 3.66	
7 6.10 0	
8 3.05 3.66	
<b>elem</b>	<b>Macro-comando</b>
8	<b>nelem</b>
1 1 2	<b>el, noi, noj</b>
2 2 3	
3 3 4	
4 4 5	
5 5 6	
6 6 7	
7 2 8	
8 8 6	
<b>boun</b>	<b>Macro-comando</b>
1 1 1 1	<b>pto, dx, dy, mz</b>
7 1 1 1	
8 0 0 0	
<b>mate</b>	<b>Macro-comando</b>
205.0E9	<b>prop (Módulo de elasticidade)</b>
1	<b>ngelm</b>
1 8	<b>e1, e2</b>

Figura 4.1 Arquivo Neutro 1 (Parte A)

seca				<b>Macro-comando</b>
20.21	836.073			<b>área, inércia</b>
2				<b>ngelm</b>
1	2			<b>el1, el2</b>
5	6			<b>el1, el2</b>
14.1	482.9			<b>área, inércia</b>
2				<b>ngelm</b>
3	4			<b>el1, el2</b>
7	8			<b>el1, el2</b>
stif				<b>Macro-comando</b>
2	2			<b>srf, nctype</b>
0.11	1.0			<b>stfi, stifj (ei, ej se srf = 3)</b>
2				<b>ngelm</b>
3	3			<b>el1, el2</b>
7	7			<b>el1, el2</b>
1.0	0.11			<b>stifi, stifj (ei, ej se srf = 3)</b>
2				<b>ngelm</b>
4	4			<b>el1, el2</b>
8	8			<b>el1, el2</b>
graf				<b>Macro-comando</b>
1	7			<b>v1, v2</b>
load				<b>Macro-comando</b>
1	0			<b>cargano, cargaelem</b>
2	0.002	-1.0	0	<b>pto, px, py, mz</b>
3	0.001	-1.0	0	
5	0	-1.0	0	
6	0	-1.0	0	
8	0	0	0	
end				<b>Macro-comando</b>

**Figura 4.1** Arquivo Neutro 1 (Parte B)

No bloco de variáveis após o macro *ppol* (Tabela 4.5), é necessário que sejam armazenados, logo após o número total de pontos nodais (*npoin*), as coordenadas *x* (*coordxc*) e *y* (*coordyc*) do centro do arco, o raio (*r*), o ângulo (*ang*) medido em graus ou radianos (*ind*) e o indicador de simetria (*isim*). As caixas de diálogo da Figura 3.23 orientam o usuário do programa na modelagem do arco circular.

Finalmente, após a definição do macro *ppar* devem ser indicados: o número total de nós (*npoin*); o comprimento do arco (*L*); sua altura (*h*); e o indicador de simetria (*isim*), como pode ser visto na Tabela 4.6 (a Figura 3.25 fornece as caixas de diálogo para geração desses dados).

**Tabela 4.1** Dados gerais

Variável	Descrição
1ª linha title	Título do problema a ser analisado (80 caracteres)
2ª linha ntype	Tipo de análise: estatica ou dinamica
3ª linha nmodel	Tipo de elemento ou modelo estrutural: por (pórticos)
4ª linha nsol	Tipo de solução: 0 (linear) 1 (não linear)
5ª linha typeprob	Tipo de problema: 0: variação livre (para soluções lineares) ou vibração da estrutura pré-carregada (para soluções não lineares) 1: análise transiente Somente se análise dinâmica
6ª linha semi	Identifica a presença ou não de ligações semirrígidas. Possibilidades: 0 (todas as ligações são rígidas) 1 (ligação semirrígida com comportamento momento-rotação linear) 2 (ligação semirrígida com comportamento momento-rotação não linear)
7ª linha npar	Número de termos necessários para descrever o modelo matemático não linear utilizado
8ª linha plast	Indicador da formulação inelástica. Define o tipo abordagem inelástica: 1 (análise elastoplástica) 2 (análise plástica refinada)
9ª linha norma criterio	Norma usada para definir o módulo tangente e critério usado para estabelecer a degradação da rigidez de seção Somente se formulações escolhidas forem PHF-1 ou AAF-1
10ª linha npoin	Número de pontos nodais da malha de elementos finitos
nelem	Número de elementos finitos da malha
nnode	Número de nós por elemento. Valor fixo de gravação: 2
ndime	Dimensão do problema. Possibilidade de gravação: 2 (plano)
ndofn	Número de graus de liberdade por nó. Possibilidade de gravação: 3 (pórtico plano)
nmats	Número de materiais
npmat	Número de propriedades de cada material
nsecs	Número de seções
npsec	Número de propriedades de cada seção

**Tabela 4.2** Macro-comandos do Arquivo Neutro 1

Macro-comando	Descrição
coor	Identificador das coordenadas nodais
elem	Identificador da conectividade dos elementos
boun	Identificador das condições de contorno
mate	Identificador das propriedades dos diferentes materiais
seca	Identificador das propriedades das seções
stif	Identificador das propriedades das ligações semirrígidas
graf	Identificador dos parâmetros para a montagem de gráficos
dead	Identificador do carregamento permanente
load	Identificador do carregamento variável
end	Identificador de encerramento da leitura dos dados

**Tabela 4.3** Macro-comando *ppor*

Variável	Descrição
npoin	Número total de pontos nodais da estrutura
pto	Número do ponto nodal
x, y	Coordenadas x e y

**Tabela 4.4** Macro-comando *psin*

Variável	Descrição
npoin	Total de pontos nodais
isim	Indicador de simetria: 0: metade do arco 1: arco completo
pto1	Ponto nodal inicial
coordx1, coordy1	Coordenadas x e y do ponto nodal inicial
pto2	Ponto nodal final
coordx2, coordy2	Coordenadas x e y do ponto nodal final

## 2. Macro-comando *elem*

Após a definição das informações referentes aos pontos nodais, parte-se para a geração dos dados relacionados à quantidade de elementos e suas conectividades na malha. Isso é feito através do menu *Malha*, submenu *Elementos* (Seção 3.3.5; Figuras 3.15 e 3.26) do programa desenvolvido. Como ilustrado na Figura 4.1, Parte A, após o

macro-comando *elem*, grava-se o número total de elementos (*nelem*) e, em seguida, uma lista em que cada linha informa o número do elemento finito (*el*) e a numeração dos nós inicial (*noi*) e final (*noj*); a última linha deve conter o elemento de maior numeração dentro da malha. A Tabela 4.7 fornece a lista de variáveis associadas ao macro-comando *elem*.

**Tabela 4.5** Macro-comando *ppol*

Variável	Descrição
coordxc, coordyc	Coordenadas x e y do centro do arco
r	Raio
ang	Ângulo
ind	Indicador do ângulo: 0: ângulo em graus 1: ângulo em radianos
isim	Indicador de simetria: 0: metade do arco 1: arco completo

**Tabela 4.6** Macro-comando *ppar*

Variável	Descrição
L	Comprimento do arco
h	Altura
isim	Indicador de simetria: 0: metade do arco 1: arco completo

**Tabela 4.7** Macro-comando *elem*

Variável	Descrição
nelem	Número total de elementos
el	Número do elemento
noi	Número do nó inicial
noj	Número do nó final

### 3. Macro-comando *boun*

Esse macro-comando, também presente na Figura 4.1 (Parte A), está relacionado com as condições de contorno impostas ao problema. Note que esse macro, assim como as variáveis associadas (Tabela 4.8), são gravados no arquivo neutro através do menu *Condições de contorno* apresentado na Seção 3.3.6 (Figuras 3.31 e 3.32). Após o macro *boun*, o formato padrão de gravação no arquivo neutro segue a ordem: número do nó (*pto*); impedimento de movimento na direção do eixo *X* (*dx*), eixo *Y* (*dy*) e rotação (*rot*) em torno do eixo *z* (0 para movimento livre; 1 para movimento impedido).

Nesse bloco, mesmo se o último ponto nodal do modelo não tiver qualquer restrição, o seu número deverá ser impresso na última linha, com todas as deslocabilidades livres (zeradas). Isso pode ser observado no arquivo de exemplo da Figura 4.1.

**Tabela 4.8** Macro-comando *boun*

Variável	Descrição
pto	Número do ponto nodal
dx	Deslocamento na direção x
dy	Deslocamento na direção y
rot	Rotação em torno do eixo z

### 4. Macro-comando *mate*

A partir desse macro, associa-se a cada elemento do modelo um determinado tipo de material, com suas propriedades características. No CS-ASA *Preprocessor*, essa tarefa é realizada através do submenu *Materiais* do menu *Malha* (Seção 3.3.5, item 3; Figuras 3.28 e 3.29). Na Figura 4.1 (Parte A), logo após o macro *mate*, são gravadas as propriedades físicas consideradas para cada tipo de material (*prop*; no caso,  $nmats = 1$  e  $npmat = 1$ ); na linha seguinte, armazena-se a quantidade de grupos de elementos com as mesmas propriedades (*ngelm*); e, logo abaixo, são gravados o elemento inicial (*el1*) e o elemento final (*el2*) de cada sequência de elementos finitos. Se os elementos não estiverem de forma sequencial, esses deverão ser informados individualmente, isto é,  $el2 = el1$ . A Tabela 4.9 apresenta as variáveis relacionadas a esse macro-comando.

**Tabela 4.9** Macro-comando *mate*

Variável	Descrição
prop	Propriedades do material considerado (Tabela 3.1)
ngelm	Número de grupos de elementos com o material considerado
el1	Primeiro elemento do grupo
el2	Último elemento do grupo

### 5. Macro-comando *seca*

Através do menu *Malha*, submenu *Seção*, consegue-se definir as características pertinentes à seção transversal de cada elemento finito (Seção 3.3.5, item 4; Figura 3.30). A lógica de geração desse bloco é mesma do item anterior. Como mostrado na Figura 4.1 (Parte B), na linha abaixo do macro *seca*, as propriedades para cada grupo são indicadas (*prop*); grava-se em seguida a quantidade de grupos de elementos com as mesmas propriedades (*ngelm*); por fim, nas linhas seguintes, define-se o elemento inicial (*el1*) e final (*el2*) de cada sequência de elementos finitos. Lembrando que, se os elementos não estiverem em sequência, esses deverão ser informados individualmente, isto é,  $el2 = el1$ .

**Tabela 4.10** Macro-comando *seca*

Variável	Descrição
prop	Propriedades da seção considerada (Tabela 3.2)
ngelm	Número de grupos de elementos com a seção considerada
el1	Primeiro elemento do grupo
el2	Último elemento do grupo

### 6. Macro-comando *stif*

Através do menu *Ligações semirrígidas*, Seção 3.3.7 do capítulo anterior, consegue-se definir e gravar no arquivo neutro todos os parâmetros necessários para se modelar uma ligação flexível entre os membros da estrutura. A gravação desses dados é necessária quando a variável *semi*, localizada na quinta linha do Arquivo Neutro 1 (Figura 4.1), for diferente de zero.

Como mostrado na Tabela 4.1, se a variável *semi* for igual a 1 ou 2 existe ligação semirrígida, e assim o macro *stif* é gravado no arquivo neutro. Quando  $semi = 1$ , a

ligação semirrígida apresenta comportamento momento-rotação linear; para  $semi = 2$ , a ligação semirrígida tem comportamento momento-rotação não linear (Figura 3.34a). Numa análise estrutural linear, entretanto, as possibilidades para a variável  $semi$  são 0 (ligação rígida) ou 1; já numa análise não linear as opções para  $semi$  são 0, 1 ou 2. A seguir serão apresentadas as variáveis associadas ao macro-comando *stif*.

Na Tabela 4.11 são apresentados os dados que precisam ser gerados logo após o macro *stif*, caso se admita para a ligação um comportamento momento-rotação linear. A primeira informação diz respeito à formulação do elemento finito semirrígido (*srfor*). Em seguida, grava-se o número de grupos de elementos cujos pontos nodais apresentam ligações semirrígidas com mesmo comportamento (*nctype*). Para cada grupo, os fatores de rigidez das ligações das extremidades esquerda (*stifi*) e direita (*stifj*) são armazenados, além da excentricidade ( $e_i$  e  $e_j$ ) da ligação, caso a formulação escolhida seja a SRF-3. Logo após, define-se o número de grupos de elementos com as mesmas características (*ngelm*), isto é, com os mesmos valores de *stifi*, *stifj*,  $e_i$  e  $e_j$ . Por fim, é armazenado o número do elemento inicial e final de cada grupo. Se os elementos não estiverem em sequência, esses deverão ser informados individualmente, como nos dois itens anteriores (materiais e seções). As Figuras 3.35, 3.36 e 3.37 apresentam as caixas de diálogo para realização dessa modelagem.

Caso o comportamento momento-rotação da ligação seja não linear, deve-se armazenar, após o macro *stif*, como indicado inicialmente na Tabela 4.12: a formulação do elemento adotada (*srfor*), se a análise for elástica; o número de modelos matemáticos a serem usados (*nmodel*); e o valor do fator de transformação de unidades (*coruni*). Na sequência, define-se a variável que identifica o modelo matemático escolhido (*ctype*). Caso o valor da variável *ctype* armazenada seja igual a 1 (modelo exponencial), os parâmetros necessários à representação desse modelo, são, por ordem de entrada: a rigidez devido ao encruamento da ligação,  $Rkf$ ; o fator de escala, *alfa*; e o número  $n$  de termos considerados no ajuste. Após esses dados, são gravados os respectivos coeficientes  $C_m$  de ajustamento da mesma curva, cuja quantidade é definida pelo valor de  $n$ . Os diálogos presentes nas Figuras 3.38-3.41 orientam o usuário do programa caso o modelo exponencial seja escolhido; já a Figura 4.13 fornece um exemplo do trecho do arquivo neutro gerado para esse modelo.

**Tabela 4.11** Macro-comando *stif*: relação momento-rotação linear

Variável	Descrição
srfor	Formulação
nctype	Número de grupos de elementos cujos nós possuem o mesmo tipo de ligação
stifi, stifj	Fatores de rigidez de ambos os nós do elemento. O fator de rigidez varia de zero, para o caso idealmente rotulado, a 1, para o caso perfeitamente rígido
ei, ej	Excentricidades de ambas as ligações no elemento de viga-coluna. Esses valores somente serão definidos e gravados caso <i>srfor</i> seja igual a 3
ngelm	Número de grupos de elementos com os mesmos valores de <i>stifi</i> , <i>stifj</i> , <i>ei</i> e <i>ej</i>
el1, el2	Sequência de elementos que possuem os mesmos parâmetros de modelagem

**Tabela 4.12** Macro-comando *stif*: relação momento-rotação não linear

Variável	Descrição
srfor	Formulação
nmodel	Número de modelos de representação da não linearidade das conexões semirrígidas utilizados na análise
coruni	Fator de transformação de unidades. Variável real (default: 1.0)
ctype	Tipo de modelo a ser empregado na análise: 1: modelo exponencial 3: modelo de potências com quatro parâmetros 4: modelo multilinear 5: modelo linear
ng	Número de diferentes tipos de ligações nos pontos nodais
nosr	Posição do ponto nodal com ligação semirrígida: 1: esquerda (ligação semirrígida no ponto nodal da direita) 2: direita (ligação semirrígida no ponto nodal da esquerda) 3: esquerda e direita (ligações iguais) 41: esquerda (ligação semirrígida diferente no ponto nodal da direita) 42: direita (ligação semirrígida diferente no ponto nodal da esquerda)
ngelm	Número de grupos de elementos com os mesmos valores de <i>stifi</i> , <i>stifj</i> , <i>ei</i> e <i>ej</i>
el1, el2	Sequência de elementos que possuem os mesmos parâmetros de modelagem

Caso o modelo escolhido seja o de potências,  $ctype = 3$ , e assim são gravados, pela ordem, os valores de  $S_{cini}$ ,  $R_p$ ,  $M_0$  e  $n$ , que indicam a rigidez inicial da ligação, a rigidez devido ao encruamento da ligação, o momento de referência e o parâmetro que

define a forma da curva. A Figura 4.3 apresenta a disposição dos dados caso se utilize o modelo de potências.

Se o modelo não linear utilizado for o multilinear, *ctype* é armazenado com o valor igual a 4 e serão gravados no arquivo os *m* pares ordenados (rotação, momento), como mostrado na Figura 4.4. Os diálogos apresentados na Figura 3.43 devem ser usados para geração desses dados. Para o caso do modelo linear da ligação, *ctype* = 5, a Figura 4.5 fornece um exemplo dos dados que são necessários para a realização dessa modelagem.

Após a gravação dos dados que caracterizam o modelo matemático escolhido para a ligação, é armazenado o número de diferentes tipos de ligações nos nós (*ng*) — na linha seguinte à variável *ctype* — e, para cada tipo de ligação definida, armazenam-se a posição do nó com ligação semirrígida (*nosr*), os grupos de elementos com as mesmas características (*ngelm*) e a sequência de elementos com os mesmos parâmetros de modelagem. Se os elementos não estiverem em sequência, estes deverão ser informados individualmente.

1	2	1.0	<b>srfor, nmodel, coruni, se análise elástica</b>
2	1.0		<b>nmodel, coruni, se análise inelástica</b>
1			<b>ctype</b>
1			<b>ng</b>
0.47104e2	0.51167e-3	6	<b>Rkf, alfa, n</b>
-0.43300e2			<b>C1</b>
0.12139e4			<b>C2</b>
-0.58583e4			<b>C3</b>
0.12971e5			<b>C4</b>
-0.13374e5			<b>C5</b>
0.52224e4			<b>C6</b>
2			<b>ngel</b>
2	1		<b>ngelm, nosr</b>
3	3		<b>el1, el2</b>
7	7		<b>el1, el2</b>
2	2		<b>ngelm, nosr</b>
4	4		<b>el1, el2</b>
8	8		<b>el1, el2</b>

**Figura 4.2** Dados gerados para o modelo exponencial

## 7. Macro-comando *graf*

Após esse macro são definidos os parâmetros necessários para a montagem dos arquivos de saída do CS-ASA, e consequente elaboração dos gráficos com os resultados do programa. Através do menu *Gráficos*, Seção 3.3.8, e caixas de diálogo apresentadas nas Figuras 3.45 e 3.46, o usuário do CS-ASA *Preprocessor* consegue definir esses parâmetros. A Tabela 4.13 fornece as variáveis associadas ao macro-comando *graf*.

Para uma análise estática não linear ou dinâmica (linear ou não linear) são gravados, na primeira linha após o macro *graf*, os pontos nodais para controle da carga (*v1*) e do deslocamento (*v2*).

Se houver ligações semirrígidas com comportamento não linear, grava-se o elemento (*v3*) e a posição da ligação nesse elemento (*v4*), esquerda ou direita, para controle da variação da rigidez da ligação.

Se forem escolhidas as formulações avançadas AAF-1 e AAF-2, ou mesmo as inelásticas PHF-1 ou PHF-2, grava-se, no arquivo, o elemento (*v5*), a posição no elemento para controle do parâmetro de resistência da seção (*v6*) e o elemento para avaliação das forças internas (*v7*). Finalmente, se a análise escolhida for a dinâmica, será definido e armazenado um fator de amplificação (*v8*).

2	1	1.0		<b>srfor, nmodel, coruni</b>
1				<b>nmodel</b>
3				<b>ctype</b>
1				<b>ng</b>
2e8	0.0	4.5e5	0.65	<b>Scini, Rp, M0, n</b>
2				<b>ngel</b>
2	1			<b>ngelm, nosr</b>
3	3			<b>el1, el2, ei, ej</b>
7	7			<b>el1, el2, ei, ej</b>
2	2			<b>ngelm, nosr</b>
4	4			<b>el1, el2, ei, ej</b>
8	8			<b>el1, el2</b>

**Figura 4.3** Dados gerados para o modelo de potências com quatro parâmetros

2	1	1.0	<b>srfor, nmodel, coruni</b>
1	1.0		<b>nmodel, coruni</b>
4			<b>ctype</b>
1			<b>ng</b>
0.0	0.0		<b>rotação, momento (ei, ej se srfor = 3)</b>
0.0010	11862.64		<b>rotação, momento (ei, ej se srfor = 3)</b>
0.0094	27441.0		
0.0190	35291.5		
0.0292	39068.9		
0.0391	42635.4		
0.0490	44938.4		
10.0	44938.5		
2			<b>ngel</b>
2	1		<b>ngelm, nosr</b>
3	3		<b>el1, el2, ei, ej</b>
7	7		<b>el1, el2, ei, ej</b>
2	2		<b>ngelm, nosr</b>
4	4		<b>el1, el2, ei, ej</b>
8	8		<b>el1, el2</b>

**Figura 4.4** Dados gerados para o modelo multilinear

2	1	1.0	<b>srfor, nmodel, coruni</b>
1	1.0		<b>nmodel, coruni</b>
5			<b>ctype</b>
2			<b>ngel</b>
0.11	1.0		<b>stifi, stifj</b>
1			<b>ngelm</b>
3	3		<b>el1, el2</b>
1.0	0.11		<b>stifi, stifj</b>
1			<b>ngelm</b>
6	6		<b>el1, el2</b>

**Figura 4.5** Dados gerados para o modelo linear

**Tabela 4.13** Macro-comando *graf*

Variável	Descrição
v1	Ponto nodal para avaliar os deslocamentos
v2	Ponto nodal para avaliar o parâmetro de carga
v3	Elemento com ligação semirrígida
v4	Ponto nodal para avaliação da rigidez da ligação (Apenas para ligação com comportamento não linear)
v5	Elemento para avaliar a plastificação
v6	Ponto nodal para avaliar o parâmetro de resistência da seção (Apenas para as formulações AAF-2 e PHF-2)
v7	Elemento para avaliar as forças internas (Apenas para as formulações AAF-1, AAF-2, PHF-1 e PHF-2)
v8	Fator de amplificação (Apenas se análise dinâmica)

#### 8. Macro-comandos *dead* e *load*

Através desses dois macros são geradas e armazenadas as informações relativas aos carregamentos aplicados ao sistema estrutural. Através do menu *Carregamentos* (Seção 3.3.9) e caixas de diálogo mostradas nas Figuras 3.48-3.50, o usuário consegue gravar no arquivo neutro os dados relacionados com o carregamento. O macro *dead* identifica as cargas permanentes atuantes, enquanto que o macro *load* representa as cargas variáveis. Tanto cargas uniformemente distribuídas nos elementos (*carga\_elem*) como as concentradas nos nós (*carga\_pto*) podem ser modeladas.

Para as cargas aplicadas nos pontos nodais, são informados: os nós com carregamento; e, para cada um deles, a intensidade da carga nas direções *X*, *Y* e o momento em torno do eixo *Z*, como mostrado na Tabela 4.14. Assim como no bloco de dados após o macro *boun*, mesmo que no último nó do modelo não exista cargas aplicadas, deve-se gravar, na última linha, o número desse nó com as intensidades zeradas, como pode ser observado no macro-comando mostrado na Figura 4.1.

A Tabela 4.15 fornece os parâmetros necessários para a modelagem da carga uniformemente distribuída aplicada no elemento finito.

#### 9. Macro-comando *end*

A gravação desse macro no arquivo neutro indica o término do Arquivo Neutro 1.

**Tabela 4.14** Carga aplicada nos pontos nodais

Variável	Descrição
carga_pto	Carga aplicada nos pontos nodais: 0: não 1: sim
carga_elem	Carga aplicada nos elementos: 0: não 1: sim
pto	Ponto nodal de aplicação da carga
px	Valor da carga horizontal aplicada no ponto nodal
py	Valor da carga vertical aplicada no ponto nodal
mz	Valor do momento fletor aplicado no ponto nodal

**Tabela 4.15** Carga aplicada nos elementos

Variável	Descrição
cargano	Carga aplicada nos pontos nodais
cargaelem	Carga aplicada nos elementos
nlc	Número de elementos carregados
iel	Número do elemento
2	Valor fixo que define que a carga é uniformemente distribuída
qi	Intensidade da carga no ponto nodal da esquerda
qj	Intensidade da carga no ponto nodal da direita
cosx	Cosseno do ângulo que a carga faz com o eixo X
cosy	Cosseno do ângulo que a carga faz com o eixo Y
ai	Posição relativa da carga no elemento
aj	Posição relativa da carga no elemento

### 4.3 Arquivo Neutro 2

Nos casos das análises estática não linear e vibração da estrutura pré-carregada, faz-se necessário a montagem do Arquivo Neutro 2. Para a obtenção desse arquivo, como já mostrado no capítulo anterior (Seção 3.3.10), o usuário do CS-ASA *Preprocessor* deve utilizar o menu *Análise estática não linear*. Os dados gerados com esse menu, através das caixas de diálogos dos seus submenus, vão desde a formulação não linear adotada, passando pela definição das estratégias de incremento de carga e iteração, até a gravação de parâmetros que controlam a impressão dos resultados numa análise não linear. A Figura 4.6 apresenta um exemplo geral e completo de um Arquivo Neutro 2.

2		<b>form</b>
%PRINCIPAL		<b>Macro-comando</b>
3	31 100.0 6000 21 2 1 0.001	<b>einc, eite, faci, ninc, nitmax, iterty, cconv, betok</b>
%NFLOW		<b>Macro-comando</b>
%CONTINC		<b>Macro-comando</b>
10	10.2 3.6	<b>ides, fmx, fmn</b>
%CHANGE		<b>Macro-comando</b>
0	0.3	<b>iswch, cstifs</b>
%REANAL		<b>Macro-comando</b>
0		<b>ires</b>
%RELATO		<b>Macro-comando</b>
0		<b>rel</b>
%SCREEN		<b>Macro-comando</b>
1000		<b>kwinc</b>
%END		<b>Macro-comando</b>

**Figura 4.6** Exemplo de um Arquivo Neutro 2

Esse arquivo também é organizado através de macros-comando e blocos de variáveis ou parâmetros associados. Veja que agora o caractere “%” antecede o nome de cada macro, cuja identificação segue o formato “%*MACRO\_COMANDO*”. Na Tabela 4.16 são apresentados os macro-comandos existentes no Arquivo Neutro 2, que serão explicados a seguir.

**Tabela 4.16** Declaração dos macro-comandos

<b>Macro-comando</b>	<b>Descrição</b>
%PRINCIPAL	Define as estratégias de carga e iteração
%NFLOW	Define o emprego da estratégia do fluxo normal
%CONTINC	Modifica alguns parâmetros das estratégias de incremento de carga
%CHANGE	Altera estratégia de incremento de carga constante para comprimento de arco
%REANAL	Indicador de reanálise
%CALFREQ	Impressão das frequências naturais
%RELATO	Controla a impressão de resultados no arquivo de saída
%SCREEN	Controla a impressão de resultados na tela
%END	Encerra a leitura dos dados

Vale comentar que a primeira linha do arquivo é destinada à definição da formulação (*form*) do elemento finito que incorpora os efeitos de segunda ordem. Na Tabela 4.17 são mostrados os possíveis valores para a variável *form*. Veja que as formulações disponíveis para o usuário do programa estão no menu *Formulações* e submenus, que foram apresentados no capítulo anterior, Seção 3.3.4 (Figuras 3.8-3.10).

**Tabela 4.17** Formulações de segunda ordem e valores da variável *form*

Formulação	Valor a ser gravado ( <i>form</i> )
SOF-1	2
SOF-2 (linearizada)	11
SOF-2 (ordem elevada)	12
SOF-3	3

### 1. Macro comando **%PRINCIPAL**

A escolha da estratégia de solução não linear do problema é feita através do submenu *Informações básicas* (ver Figuras 3.52-3.54). O bloco a ser gravado no Arquivo Neutro 2, terceira linha, logo após o macro **%PRINCIPAL**, segue a ordem: estratégia de incremento de carga (*einc*); estratégia de iteração (*eite*); valor do incremento inicial do parâmetro de carga (*faci*); número máximo de incrementos de carga (*ninc*); número máximo de iterações (*nitmax*); método de Newton-Raphson (*iterty*), padrão ou modificado; critério de convergência (*cconv*); e tolerância para convergência (*betok*). A Tabela 4.18 apresenta os possíveis valores que essas variáveis podem assumir.

### 2. Macro comando **%NFLOW**

Através desse macro é possível o emprego da estratégia do fluxo normal (Tabela 4.19). Essa informação é disponibilizada para o analista através do submenu *Estratégia do fluxo normal*. Mais uma vez, cabe informar que o emprego dessa técnica é opcional (o default é não usá-la).

### 3. Macro comando **%CONTINC**

Esse macro, como o anterior, é opcional. Porém, quando usado, permite alterar alguns valores default assumidos no que refere às estratégias de incremento de carga. A Tabela 4.19, juntamente com as caixas de diálogo apresentadas nas Figuras 3.55-3.58 do

capítulo anterior (submenu *Alterar parâmetros*), esclarece que parâmetros ou variáveis são definidas para efetuar essas alterações.

**Tabela 4.18** Macro-comando *%PRINCIPAL*

<b>Variável</b>	<b>Descrição</b>
einc	Estratégia de escolha do incremento de carga: 0: incremento não automático (incremento constante) 1: incremento direto do parâmetro de carga 2: incremento de uma componente de deslocamento 3: incremento do comprimento do arco 4: incremento do trabalho externo 5: incremento do deslocamento generalizado 6: incremento de trabalho (Yang)
eite	Estratégia de iteração: 1: carga constante 2: deslocamento constante 31: comprimento do arco cilíndrico 32: comprimento do arco esférico 33: comprimento do arco linear (Riks) 34: comprimento do arco linear (Ramm) 4: trabalho constante 5: norma mínima dos deslocamentos residuais 7: resposta ponderada constante 8: deslocamento generalizado
faci	Incremento inicial do parâmetro de carga
ninc	Número de incrementos de carga
nitmax	Número máximo de iterações desejadas
iterty	Método de solução não linear: 1: Newton-Raphson padrão 2: Newton-Raphson modificado
cconv	Critério de convergência: 1: carga 2: deslocamento 3: ambos (carga e deslocamento)
betok	Fator de convergência

**Tabela 4.19** Macro-comando %CONTINC

Variável	Descrição
ides	Número de iterações desejadas
fmx	Fator de multiplicação máximo
fmn	Fator de multiplicação mínimo
dldes	Comprimento do arco desejado
ddes	Incremento de deslocamento desejado
nodes	Ponto nodal para controle do deslocamento
comsel	Componente de deslocamento do ponto nodal <b>nodes</b> a ser utilizada no controle do deslocamento: 1: deslocamento na direção X 2: deslocamento na direção Y 3: rotação em torno do eixo Z
wdes	Incremento de trabalho desejado

#### 4. Macro comando %CHANGE

Trata-se de mais um macro opcional. Através do submenu *Alterar estratégia de solução* (Figura 3.59 e Tabela 4.20) é possível, entretanto, trocar, ao longo do processo de solução não linear, as estratégias de incremento de carga e iteração. Ou seja, é possível começar a solução do problema com incremento constante do parâmetro de carga e estratégia iterativa usando apenas o método de Newton-Raphson (sem o acoplamento das técnicas de continuação) e modificar para a estratégia de comprimento de arco (incremento de carga e iteração) quando a variável *cstifs*, que avalia a rigidez corrente do sistema, atingir determinado valor definido pelo usuário.

De acordo com a Tabela 4.20, se a variável *iswch* for igual a 1, deverão ser definidos também, na linha seguinte, certos valores para as variáveis descritas da Tabela 4.21, que são: *dldes*, *fmx* e *fmn*. O valor para o parâmetro de rigidez corrente *cstifs* será gravado na mesma linha da variável *iswch*.

**Tabela 4.20** Macro-comando %CHANGE

Variável	Descrição
iswch	Define a troca de estratégia de solução não linear: 0: não altera 1: altera
cstifs	Parâmetro de rigidez corrente do sistema estrutural

**Tabela 4.21** Valores armazenados para a troca da estratégia

Variável	Descrição
dldes	Comprimento do arco desejado
fmx	Fator de multiplicação máximo
Fmn	Fator de multiplicação mínimo

#### 5. Macro comando %REANAL

Através do submenu *Reanálise* (Figura 3.60) define-se um indicador de reanálise (*ires*) do problema, isto é, com esse macro é possível recomençar uma análise interrompida. De acordo com a Tabela 4.22, a variável *ires* deve assumir o valor 1 se houver a necessidade de recomençar uma análise. Trata-se de um macro opcional.

#### 6. Macro comando %CALFREQ

Esse macro somente será gravado no arquivo se a análise escolhida for a dinâmica e, no caso, análise de vibração da estrutura pré-carregada. Após esse macro, a variável a ser armazenada pode ser vista na Tabela 4.23, com seu valor definido pelo usuário através do submenu *Impressão de frequências naturais* (Figura 3.61).

**Tabela 4.22** Macro-comando %REANAL

Variável	Descrição
ires	Indicador de reanálise. 0: não recomençar a análise (valor default) 1: recomençar a análise

**Tabela 4.23** Macro-comando %CALFREQ

Variável	Descrição
icfreq	Intervalo de incrementos de carga para cálculo das frequências naturais

#### 7. Macro comando %RELATO

Esse macro é usado para controlar a impressão dos resultados no arquivo de saída (.s), que é gerado na execução do programa CS-ASA. Como mostrado na Tabela 4.24,

através da variável *rel* é possível controlar essa impressão. Através da caixa de diálogo do submenu *Impressão de resultados* (Figura 3.62) o usuário estabelece o valor desse indicador de impressão.

**Tabela 4.24** Macro-comando *%RELATO*

Variável	Descrição
rel	Define a impressão de resultados em arquivos de saída: 4: imprime variáveis durante o processo iterativo 0: caso contrário

#### 8. Macro comando *%SCREEN*

Como no item anterior, o submenu *Impressão de resultados* (Figura 3.62) pode ser usado para definição da variável *kwinc*, que aparece na linha seguinte ao macro-comando *%SCREEN* (ver Tabela 4.25 e Figura 4.6). O objetivo aqui é informar o intervalo de passos de carga para impressão na tela de forças e deslocamentos dos nós selecionados no menu *Gráficos* (Arquivo Neutro 1).

**Tabela 4.25** Macro-comando *%SCREEN*

Variável	Descrição
kwinc	Intervalos de passos de carga para impressão de resultados na tela

#### 9. Macro comando *%END*

Esse macro indica o término do Arquivo Neutro 2.

### 4.4 Arquivo Neutro 3

Esse arquivo é gerado através do menu *Análise dinâmica* existente no CS-ASA *Preprocesssor* (capítulo anterior, Seção 3.3.11; Figura 3.63). Mais uma vez, cabe ressaltar que esse menu é acionado quando o *tipo de problema* selecionado na caixa de diálogo da Figura 3.7 for *análise transiente*. Dentre as principais informações gravadas neste arquivo estão: a formulação de segunda ordem adotada; o domínio da análise; as

condições iniciais para deslocamento, velocidade e aceleração; e os carregamentos atuantes (estático e variável).

2					<b>form</b>
%DTEMPONL					<b>Macro-comando</b>
5000	5.5	15	1.4	0	<b>nt, Δt, nite, toler, strat</b>
%AMORTP					<b>Macro-comando</b>
1					<b>typedata</b>
0.1	1	0.1		2	<b>ξ<sub>1</sub>, ω<sub>1</sub>, ξ<sub>2</sub>, ω<sub>2</sub></b>
%NEWMAR					<b>Macro-comando</b>
0.25	0.50				<b>α, β</b>
%ACEBAS					<b>Macro-comando</b>
%LOADMS					<b>Macro-comando</b>
9.807					<b>acel.gravidade</b>
2					<b>ngcargas</b>
60000	1				<b>carga, ngpontos</b>
1	1				<b>no_inicial, no_final</b>
80000	3				<b>carga, ngpontos</b>
2	2				<b>no_inicial, no_final</b>
4	4				<b>no_inicial, no_final</b>
8	8				<b>no_inicial, no_final</b>
%DESINI					<b>Macro-comando</b>
3	-5.0	0.0	6.0		<b>p_nodal, desl.x, desl.y, rotacao</b>
5	0.24	3.8	0.0		<b>p_nodal, desl.x, desl.y, rotação</b>
8	0.0	0.0	0.0		<b>p_nodal, desl.x, desl.y, rotacao</b>
%FATHAR					<b>Macro-comando</b>
1.5	124.3				<b>A, ω</b>
%IMPTEL					<b>Macro-comando</b>
1000					<b>nwinc</b>
%RELATO					<b>Macro-comando</b>
0	250000				<b>rel, relg</b>
%ENDDIN					<b>Macro-comando</b>

**Figura 4.7** Arquivo Neutro 3

A organização das informações presentes nesse Arquivo Neutro 3 segue o mesmo esquema dos outros dois discutidos nas seções anteriores, ou seja, são usados macros e blocos de dados relacionados. A Figura 4.7 fornece um exemplo desse arquivo; já a

Tabela 4.26 apresenta uma lista completa dos macros que podem ser usados pelo usuário do CS-ASA *Preprocessor* para geração desse arquivo.

A seguir serão descritas as funções desses macros e as variáveis associadas.

**Tabela 4.26** Declaração dos macro-comandos do Arquivo Neutro 3

Macro-comando	Descrição
%DTEMPO	Análise no domínio do tempo
%DTEMPONL	Análise no domínio do tempo
%DFREQU	Análise no domínio da frequência
%AMORTP	Amortecimento
%NEWMAR	Método de Newmark
%WILSON	Método de Wilson- $\theta$
%HILBER	Método de Hilber
%DCENTR	Método da Diferença Central
%GENERA	Método Generalizado
%SMDUHA	Método Superposição Modal (Duhamel)
%ACEBAS	Aceleração da base
%LOADMS	Carga gravitacional
%DESINI	Condições iniciais para deslocamentos nodais
%VELINI	Condições iniciais para velocidades nodais
%ACELIN	Condições iniciais para acelerações nodais
%DESMOD	Deslocamentos iniciais modais
%FATEST	Presença de carga estática
%FATCAR	Carregamentos
%FATSEN	
%FATHAR	
%IMPTEL	Impressão dos resultados na tela
%RELATO	Impressão dos resultados nos arquivos de saída
%ENDDIN	Encerra a leitura dos dados

### 1. Macro-comandos **%DTEMPO** e **%DTEMPONL**

Esses dois macros caracterizam a análise no domínio do tempo. Essa escolha pode ser feita no submenu *Domínio da análise* (Figura 3.64). Para uma análise dinâmica linear, o macro correspondente é o **%DTEMPO**, e as variáveis salvas no arquivo são o número de passos (incrementos de tempo;  $nt$ ) e o valor do incremento ( $\Delta t$ ), como apresentado na Tabela 4.27. Já para uma análise dinâmica não linear (**%DTEMPONL**), são definidos, além dois valores citados, o número de iterações ( $nite$ ), o fator de convergência ( $toler$ ) e a variável que armazena a escolha entre utilizar ou não a estratégia adaptativa (0, não; 1,

sim), como mostrado na Tabela 4.30. A Figura 3.65 fornece os diálogos no programa desenvolvido relacionados com esses macros.

**Tabela 4.27** Macro-comando *%DTEMPO*

Variável	Descrição
nt	Número de incrementos de tempo
$\Delta t$	Valor do incremento de tempo

**Tabela 4.28** Macro-comando *%DTEMPONL*

Variável	Descrição
nt	Número de incrementos de tempo
$\Delta t$	Valor do incremento
nite	Número de iterações
toler	Fator de convergência
estrat	Estratégia adaptativa (variação de $\Delta t$ e reavaliação da rigidez): 0: não 1: sim

## 2. Macro-comando *%DFREQU*

Caso a análise seja caracterizada no domínio da frequência, após esse macro, as seguintes informações deverão ser geradas: número de pontos para discretização (*mdis*); o tempo de aplicação da carga (*t\_carga*); e o seu valor expandido (*Tp*), o qual será superior a *t\_carga*. (Tabela 4.29). Esse macro deverá apenas ser usado na análise dinâmica linear. O quadro de diálogo correspondente está na Figura 3.66.

**Tabela 4.29** Macro-comando *%DFREQU*

Variável	Descrição
mdis	Número de pontos para discretização (valor default: 10)
t_carga	Tempo de aplicação da carga
Tp	Período expandido

### 3. Macro-comando %AMORTP

Na Tabela 4.30 estão ilustradas as variáveis associadas a esse macro. Através do submenu *Amortecimento*, cujos diálogos estão na Figura 3.70, o usuário define se os coeficientes de proporcionalidade de Rayleigh são conhecidos. Em caso afirmativo, serão definidos, logo após esse macro, os valores dos coeficientes proporcionais às matrizes de rigidez ( $\mu_1$ ) e de massa ( $\mu_2$ ), respectivamente. Caso contrário, quando se deseja calcular esses coeficientes, são gravadas as taxas de amortecimento ( $\xi_1$ ,  $\xi_2$ ) e os indicadores de frequência ( $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ).

**Tabela 4.30** Macro-comando %AMORTP

Variável	Descrição
typedata	Identificador do amortecimento: 0: coeficientes de proporcionalidade conhecidos 1: calcular coeficientes
$\mu_1$ , $\mu_2$	Coefficiente proporcional à matriz de rigidez e de massa. Se typedata = 0
$\xi_1$ , $\xi_2$	Taxas de amortecimento. Se typedata = 1
$\omega_1$ , $\omega_2$	Indicador de frequências (modos) correspondentes às taxas $\xi_1$ e $\xi_2$ . Se typedata = 1

### 4. Macro-comandos %NEWMAR, %WILSON, %HILBER, %DCENTR, %SMDUHA e %GENERA

Cada um desses macro-comandos caracteriza um dos métodos de integração numérica, que podem ser escolhidos através do submenu *Métodos de integração numérica*, com os quadros de diálogo mostrados na Figura 3.67. Só é possível a escolha de um método de integração e apenas para a análise no domínio do tempo, seja ela linear ou não linear. No caso da análise dinâmica linear, todos os métodos apresentados no diálogo da Figura 3.67 estão disponíveis para o usuário do CS-ASA; já para a análise dinâmica não linear, apenas o método de Newmark está disponível. Nas Tabelas 4.31-4.35 estão indicadas as variáveis que devem aparecer após esses macros que definem o método de integração. As Figuras 3.68 e 3.69 auxiliam o usuário do CS-ASA *Preprocessor* na montagem desses blocos de dados. No caso do macro %DCENTR, que define o emprego do Método da Diferença Central, não é necessário a gravação de nenhum parâmetro.

**Tabela 4.31** Macro-comando %*NEWMAR*

Variável	Descrição
$\alpha$	Valor default $\alpha = 0.25$
$\beta$	Valor default $\beta = 0.50$

**Tabela 4.32** Macro-comando %*WILSON*

Variável	Descrição
$\theta$	Variável

**Tabela 4.33** Macro-comando %*HILBER*

Variável	Descrição
$\alpha$	Valor default $\alpha = 0.25$
$\beta$	Valor default $\beta = 0.50$
$\gamma$	Variável

**Tabela 4.34** Macro-comando %*SMDUHA*

Variável	Descrição
nmodos	Número de modos a serem superpostos

**Tabela 4.35** Macro-comando %*GENERA*

Variável	Descrição
option	Define a escolha do método Generalizado
$\theta_1, \theta_2, \theta_3$ $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ $\beta_1, \beta_2, \beta_3$	Se option = 0: método Generalizado
$\gamma, \beta$	Se option = 1: método de Newmark
$\theta$	Se option = 2: método de Wilson- $\theta$
$\alpha, \beta, \theta$	Se option = 3: método da Colocação
$\gamma, \beta, \alpha$	Se option = 4: método HHT- $\alpha$
$\gamma, \beta, \alpha$	Se option = 5: método WBZ- $\alpha$
$\gamma, \beta, \alpha_f, \alpha_m$	Se option = 6: método Generalizado- $\alpha$
$\theta$	Se option = 7: $\theta_1$ -Method
$\theta_{1z}, \theta_{2z}, \theta_{3z}$	Se option = 8: método SS32

### 5. Macro-comando %ACELBAS

Esse macro deve ser usado apenas para confirmação de que o sistema estrutural, na sua base, será submetido a uma excitação do solo (Figura 3.71).

### 6. Macro-comando %LOADMS

As massas concentradas provenientes da carga gravitacional são modeladas através do submenu *Carga gravitacional*. As caixas de diálogo apresentadas nas Figuras 3.74 e 3.75 devem ser usadas para esse fim; já a Tabela 4.36, mostrada a seguir, fornece os dados gerados através dessas caixas. Na primeira linha após o macro é armazenado o valor da aceleração da gravidade (*acel.gravidade*). Como as cargas de mesma intensidade podem ser agrupadas, define-se o número de diferentes valores de carga (*ncargas*). Na sequência, para cada uma dessas cargas é gravada a intensidade da carga (*carga*), o número de grupos de nós (*ngpontos*) com essa mesma carga e, por fim, o ponto nodal inicial e final de cada grupo (*no\_inicial*, *no\_final*).

**Tabela 4.36** Macro-comando %LOADMS

Variável	Descrição
acel.gravidade	Aceleração da gravidade (valor default: 9.807)
ncargas	Número de diferentes valores de carga
carga	Intensidade da carga
ngpontos	Número de grupos de pontos nodais
no_inicial	Ponto nodal inicial
no_final	Ponto nodal final

### 7. Macro-comandos %DESINI, %VELINI% e ACELIN

As condições iniciais para as componentes de deslocamento, velocidades e acelerações são atribuídas por meio do submenu *Condições iniciais* e caixas de diálogo apresentadas nas Figuras 3.74 e 3.75 do capítulo anterior. As Tabelas 4.37-4.39 fornecem os blocos de dados que são gerados e gravados após os macros %DESINI, %VELINI, %ACEINI.

### 8. Macro-comando %DESMOD

Para o cálculo dos deslocamentos nodais iniciais que correspondem a algum modo de vibração, o usuário deverá usar a caixa de diálogo presente na Figura 3.76, submenu

*Deslocamento modal*, que pede: o número do modo de vibração (*ind\_modo*) e a amplitude do deslocamento (*ampl\_modo*). A Tabela 4.40 traz as variáveis associadas.

**Tabela 4.37** Macro-comando %*DESINI*

Variável	Descrição
p_nodal	Ponto nodal (condições iniciais)
desl.x	Deslocamento na direção X
desl.y	Deslocamento na direção Y
rotacao	Rotação em torno do eixo Z

**Tabela 4.38** Macro-comando %*VELINI*

Variável	Descrição
p_nodal	Ponto nodal (condições iniciais)
vel.x	Velocidade na direção X
vel.y	Velocidade na direção Y
vel.rot	Velocidade angular em torno do eixo Z

**Tabela 4.39** Macro-comando %*ACELIN*

Variável	Descrição
p_nodal	Ponto nodal (condições iniciais)
acel.x	Aceleração na direção X
acel.y	Aceleração na direção Y
acel.rot	Aceleração angular em torno do eixo Z

**Tabela 4.40** Macro-comando %*DESMOD*

Variável	Descrição
ind_modo	Modo de vibração escolhido
ampl_modo	Amplitude do deslocamento

### 9. Macro-comando %*FATEST*

Através do submenu *Carga estática* (Figura 3.77) é possível estabelecer um valor para o fator de multiplicação (*f\_dead*; Tabela 4.41), que é responsável pela modificação da

intensidade da carga permanente. Esse fator é definido por meio do submenu *Carga estática*.

**Tabela 4.41** Macro-comando *%FATEST*

Variável	Descrição
f_dead	Fator multiplicador do carregamento estático

#### 10. Macro-comandos *%FATSEN*, *%FATHAR* e *%FATCAR*

O bloco de dados relacionado com o carregamento transiente aplicado ao sistema estrutural é definido pelo submenu *Carga variável*, e caixas de diálogo apresentadas pelas Figuras 3.79-3.83. Caso se realize um estudo com carregamento harmônico aplicado num período inferior ao da análise (*%FATSEN*), as informações que serão geradas estão presentes na Tabela 4.42; se esse carregamento harmônico for aplicado durante todo o tempo de duração da análise (*%FATHAR*), é necessário definir as variáveis que aparecem na Tabela 4.43; por fim, é possível definir um histórico de carregamento qualquer (*%FATCAR*) através dos dados apresentados na Tabela 4.44 (Figura 3.80).

**Tabela 4.42** Macro-comando *%FATSEN*

Variável	Descrição
$t_f$	Tempo final de aplicação do carregamento
A	Amplitude máxima do carregamento
$\omega$	Frequência de vibração

**Tabela 4.43** Macro-comando *%FATHAR*

Variável	Descrição
A	Amplitude máxima do carregamento
$\omega$	Frequência de vibração

### 11. Macro-comando %IMPTEL

O analista pode acompanhar o processo de análise transiente na tela do computador, ou seja, ver o que acontece com os deslocamentos e forças dos nós selecionados no menu *Gráficos*. Para isso, é necessária a definição, no submenu *Impressão de resultados na tela* (Figura 3.38), do valor do intervalo de incrementos de tempo que o usuário deseja que esses resultados sejam impressos na tela. A Tabela 4.45 traz a variável que armazena esse valor.

**Tabela 4.44** Macro-comando %FATCAR

Variável	Descrição
ncarga	Número de cargas distintas
p_nodal	Número do ponto nodal
np_interp	Número de pontos para discretização
t <sub>i</sub> e P <sub>i</sub>	Tempo de aplicação e intensidade da carga

**Tabela 4.45** Macro-comando %IMPTEL

Variável	Descrição
nwinc	Intervalo de incrementos

### 12. Macro-comando %RELATO

Para a impressão dos resultados da análise dinâmica num determinado arquivo, o usuário deve utilizar o submenu *Impressão de resultados em arquivos de saída* (Figura 3.84). Inicialmente, deve-se confirmar a gravação nesse arquivo gerado pelo CS-ASA (extensão .s). Em seguida, deve-se fornecer o valor do incremento de tempo a partir do qual esses dados serão gravados. Na Tabela 4.46 estão descritas as variáveis relacionadas com o macro %RELATO.

### 13. Macro-comando %ENDDIN

Esse macro indica a conclusão do Arquivo Neutro 3.

**Tabela 4.46** Macro-comando %*RELATO*

<b>Variável</b>	<b>Descrição</b>
rel	Indicador de impressão no arquivo de saída (.s): 0: não 1: sim
relg	Incremento de tempo a partir do qual os resultados são impressos no arquivo de saída (.s)

# Capítulo 5

## Exemplos de Aplicação do *CS-ASA Preprocessor*

### 5.1 Introdução

Este capítulo apresenta exemplos de aplicação do programa *CS-ASA Preprocessor*. Esses exemplos têm como objetivo principal esclarecer o usuário do CS-ASA sobre a montagem e geração dos Arquivos Neutros 1, 2 e 3. Procura-se, assim, abranger a maior parte das funcionalidades oferecidas pelo sistema computacional desenvolvido.

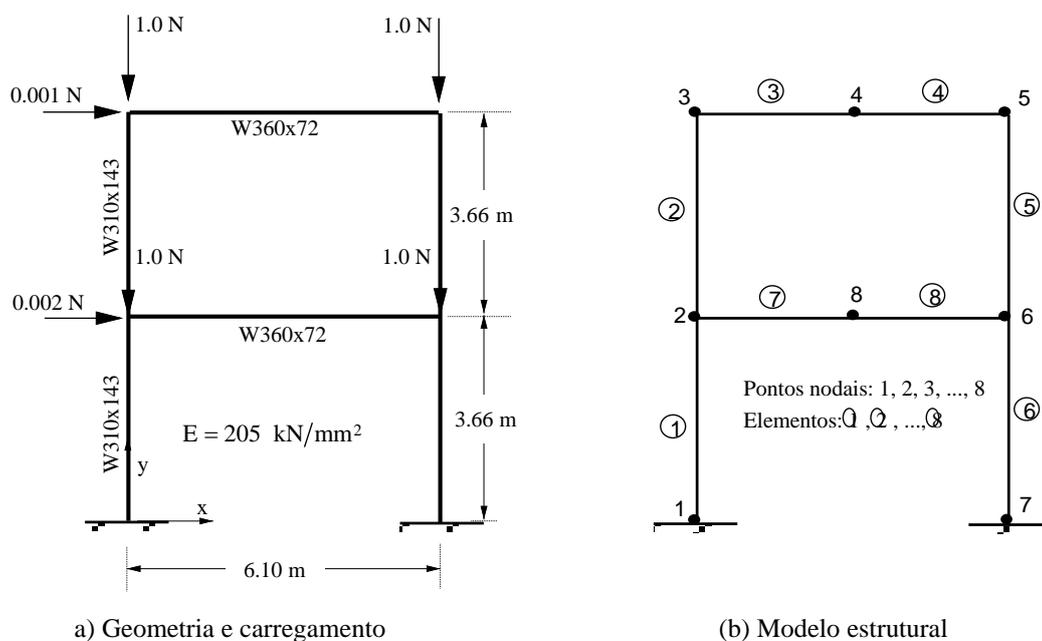
Na próxima seção serão ilustrados os passos básicos necessários à modelagem de um pórtico plano de aço com ligações rígidas para uma análise estática linear. Com as informações repassadas pelo usuário, será gerado, ao final da definição do tipo de análise e construção do modelo estrutural, o Arquivo Neutro 1.

Na Seção 5.3 são definidas as informações complementares requeridas para uma análise estática geometricamente não linear, e a consequente montagem do Arquivo Neutro 2. Ainda nesta seção serão introduzidos os dados para modelagem de uma estrutura com ligações semirrígidas e consideração do comportamento inelástico do aço. Por fim, serão considerados conjuntamente os três efeitos acoplados, a saber, não linearidade geométrica, flexibilidade das ligações e inelasticidade do material. Ao final de cada exemplo, serão obtidos os arquivos de dados correspondentes.

Na última parte deste capítulo, Seção 5.4, serão explicados os passos básicos necessários para a geração do Arquivo Neutro 3, caso se realize uma análise transiente linear ou não linear através do CS-ASA.

## 5.2 Exemplo 1: Análise Estática Linear

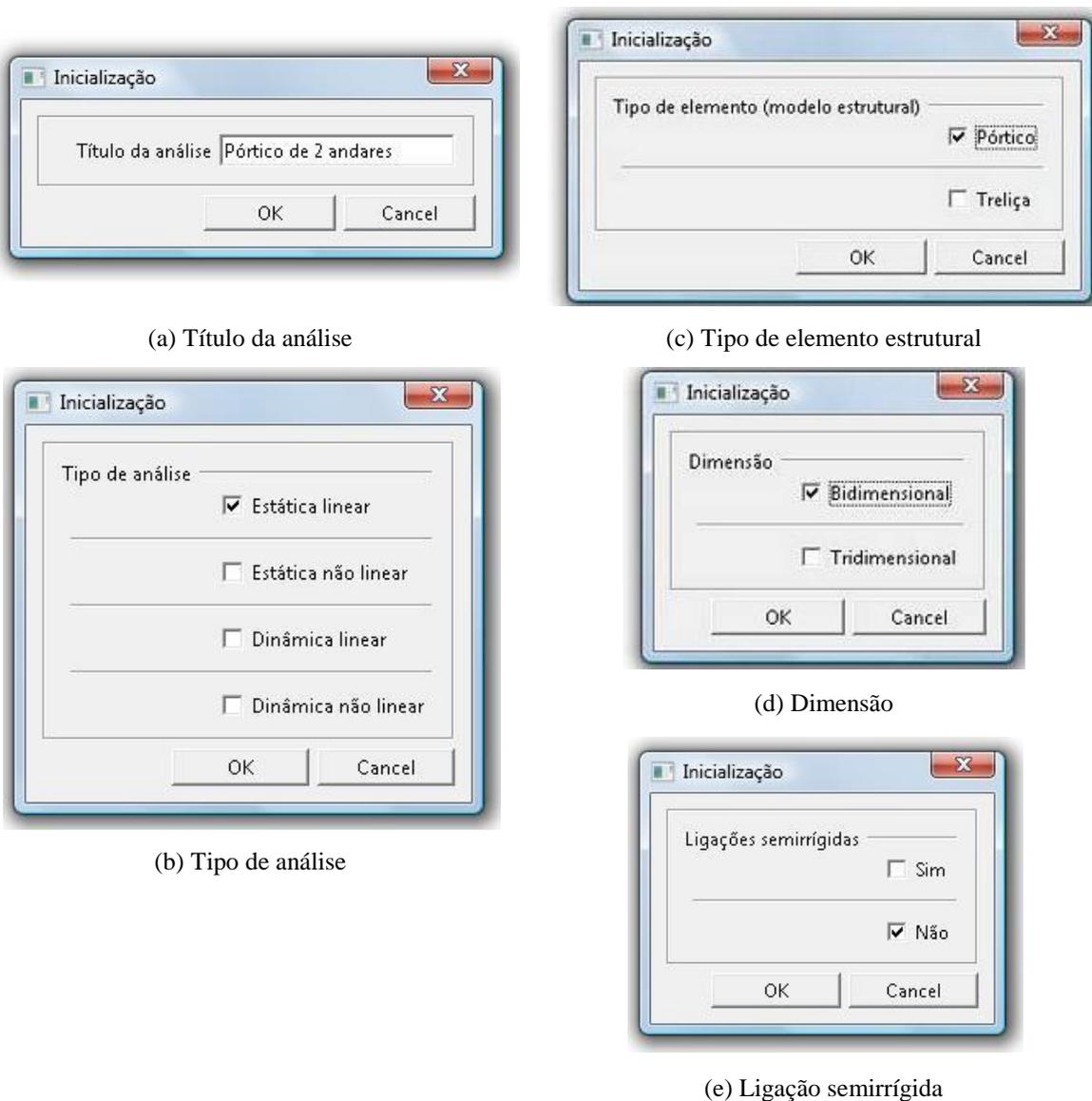
Para ilustrar o uso do programa na modelagem e geração de informações para uma análise estática linear considere o modelo estrutural apresentado na Figura 5.1. Trata-se de um pórtico de dois pavimentos, discretizado com oito elementos, interligados por oito pontos nodais, onde atuam carregamentos concentrados em quatro nós e apoios engastados nos pontos 1 e 7. A Figura 5.1a mostra essas cargas nodais e também a condição de contorno ao qual a estrutura está imposta. As dimensões do modelo e as propriedades físicas e geométricas dos seus elementos (vigas e colunas) encontram-se na Figura 5.1a. Cada uma das vigas é discretizada por dois elementos finitos e cada coluna, com um elemento apenas. O módulo de elasticidade,  $E$ , é considerado igual a  $205 \text{ kN/mm}^2$ . O sistema de coordenadas  $X, Y$  está indicado na Figura 5.1a.



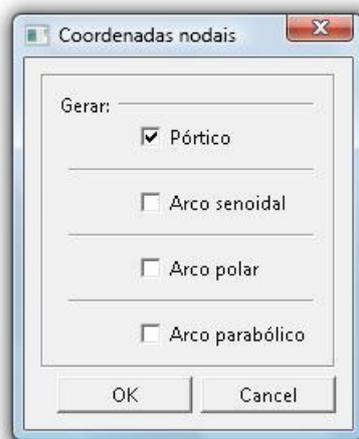
**Figura 5.1** Pórtico com ligações rígidas

Após a apresentação do modelo estrutural, a primeira tarefa do usuário, utilizando o pré-processador, é informar os dados iniciais do problema. A Figura 5.2 mostra as cinco opções do menu *Inicialização* responsáveis pelo fornecimento dessas informações. A partir daí, inicia-se a geração da geometria do modelo estrutural, realizada por meio do menu *Malha*. Aqui o usuário determina, após selecionar a opção *Pórtico* da Figura 5.3, o número de nós necessários para a construção do modelo (Figura 5.4a), que neste caso é igual a 8 e, em seguida, fornece o número e as coordenadas de cada ponto chave. A Figura 5.4b mostra

o diálogo com os dados nodais do nó 1, o primeiro ponto chave. As Figuras 5.4c-f ilustram as informações de entrada dos demais pontos utilizados no exemplo. Como mencionado no Capítulo 3, a geração das coordenadas dos pontos nodais pode ser realizada automaticamente, através da definição, neste exemplo, dos pontos que definem as extremidades das vigas e colunas que constituem o modelo estrutural, denominados de pontos chave. Sendo assim, para a geração automática das coordenadas dos nós do pórtico da Figura 5.1, foi necessário definir cinco pontos chave, que são os nós 1, 3, 5, 7 e 8. A Figura 5.5 ilustra o processo de entrada das coordenadas desses pontos e a visualização correspondente na tela do programa.



**Figura 5.2** Diálogos do menu *Inicialização*



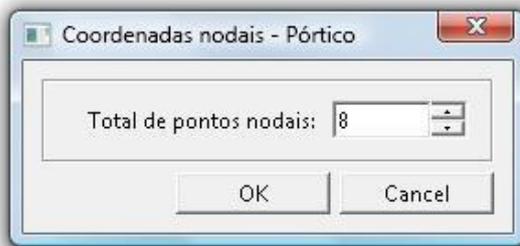
**Figura 5.3** Diálogo com a escolha do modelo estrutural

Após a entrada das coordenadas do primeiro ponto chave, nó 1 (Figura 5.5a), é aberto o diálogo para fornecer o número e as coordenadas do segundo ponto chave, nesse caso, o nó 3. A partir da numeração usada para os pontos 1 e 3, é gerado, de forma automática, o ponto nodal correspondente ao nó 2, do membro (coluna) delimitado por esses pontos de referência, como mostra a Figura 5.5b, e assim por diante até atingir o último ponto chave, nó 8, como mostra as Figuras 5.5c-e. A Figura 5.5f mostra os nós gerados e a numeração correspondente (que é habilitada no menu *Exibir*, opção *Número nos pontos nodais*).

Na sequência, pode-se gerar os elementos finitos, através da opção *Elementos* do menu *Malha*. Inicialmente, a caixa de diálogo da Figura 5.6a é apresentada ao usuário para que o número total de elementos, igual a 8 neste exemplo, seja informado. O próximo passo é definir a conectividade de cada um desses elementos. A Figura 5.6b mostra o diálogo responsável pela entrada dos dados para o elemento de número 1, onde os pontos nodais das extremidades esquerda e direita são, respectivamente, os nós 1 e 2. As informações de entrada para a geração automática dos elementos de número 6, 7 e 8 estão indicadas nas Figuras 5.6c-e.

Como explicado no Capítulo 3, a geração dos elementos também pode ser realizada automaticamente, caso o número de cada um dos elementos existentes no modelo e suas conectividades (ponto nodal da esquerda e da direita) respeitem uma mesma sequência. A Figura 5.7 ilustra o processo de geração automática dos elementos do modelo em estudo, que tem início com a entrada e geração do elemento de número 1 (Figura 5.7a) e termina com o elemento de número 6 (Figura 5.7b), uma vez que existe uma sequência entre os nós

desses elementos. Os elementos de número 7 e 8, como não respeitam a sequência dos nós, são fornecidos um por vez, como ilustram as Figuras 5.7c-d. Finalizada a execução do processo de geração automática dos nós e elementos do pórtico, o ambiente mostra a malha até aqui gerada, conforme a Figura 5.7e.



(a) Número total de pontos nodais do pórtico



(b) Coordenadas do primeiro ponto chave



(c) Coordenadas do segundo ponto chave



(d) Coordenadas do terceiro ponto chave

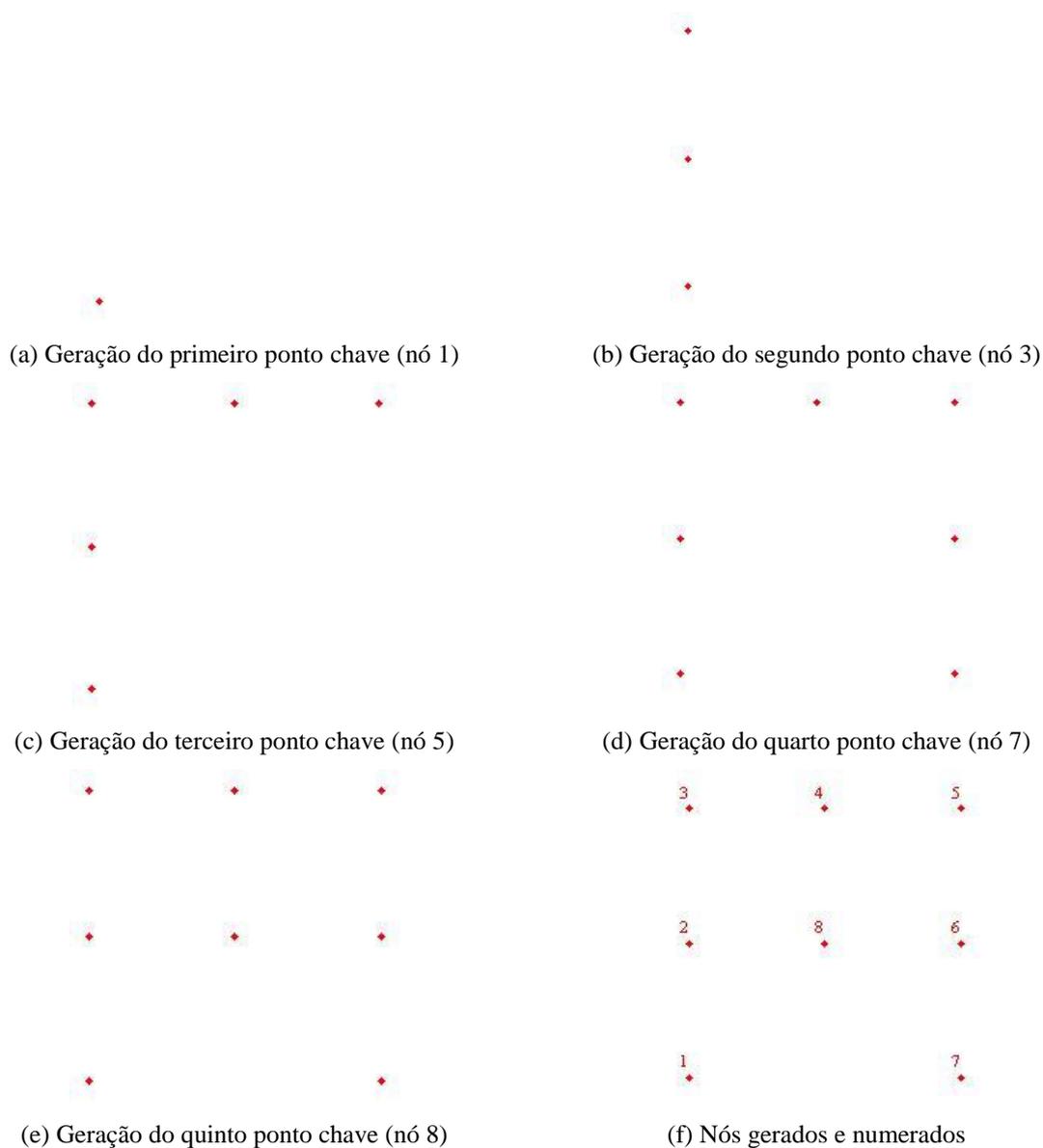


(e) Coordenadas do quarto ponto chave



(f) Coordenadas do quinto ponto chave

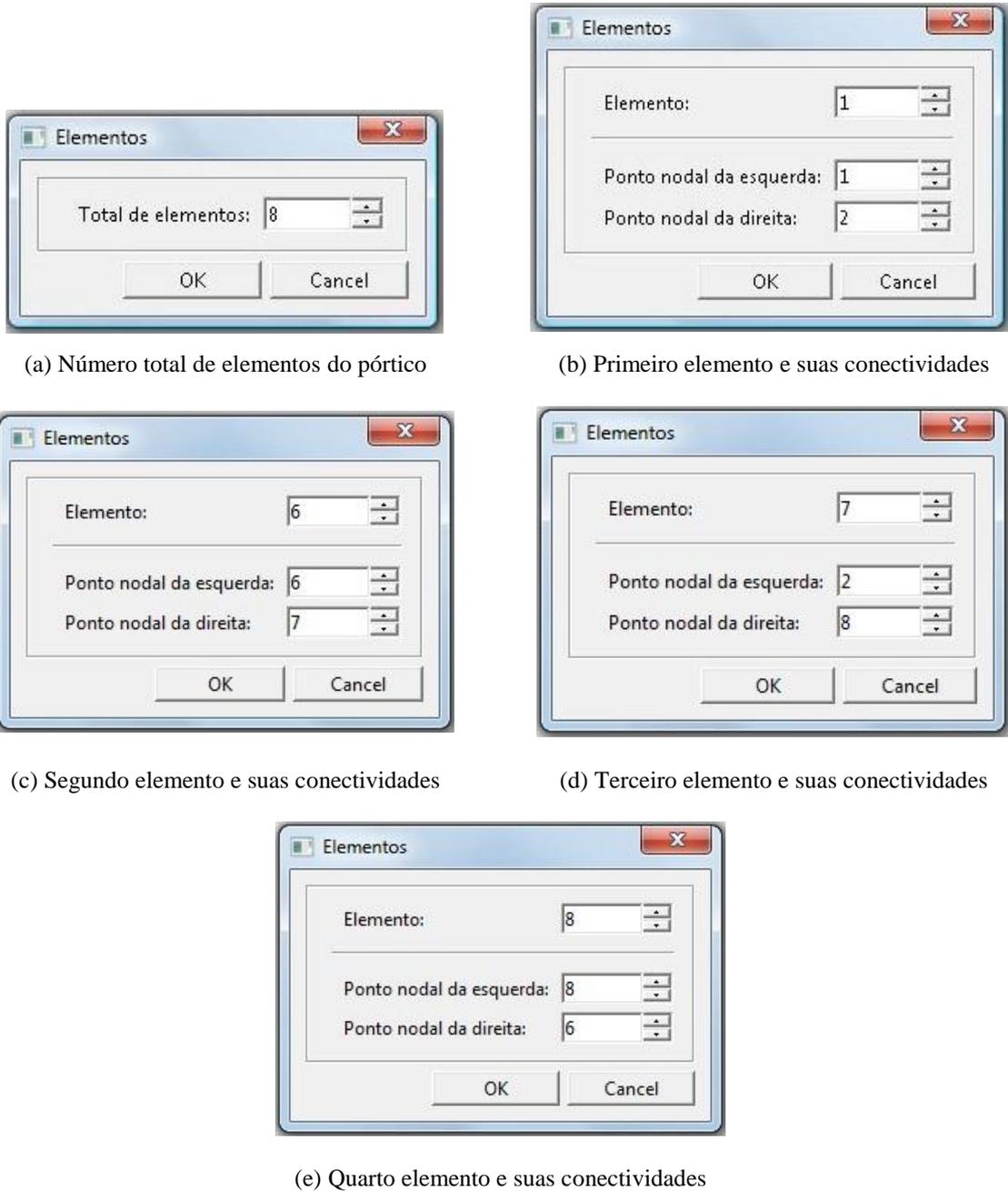
**Figura 5.4** Coordenadas dos pontos nodais



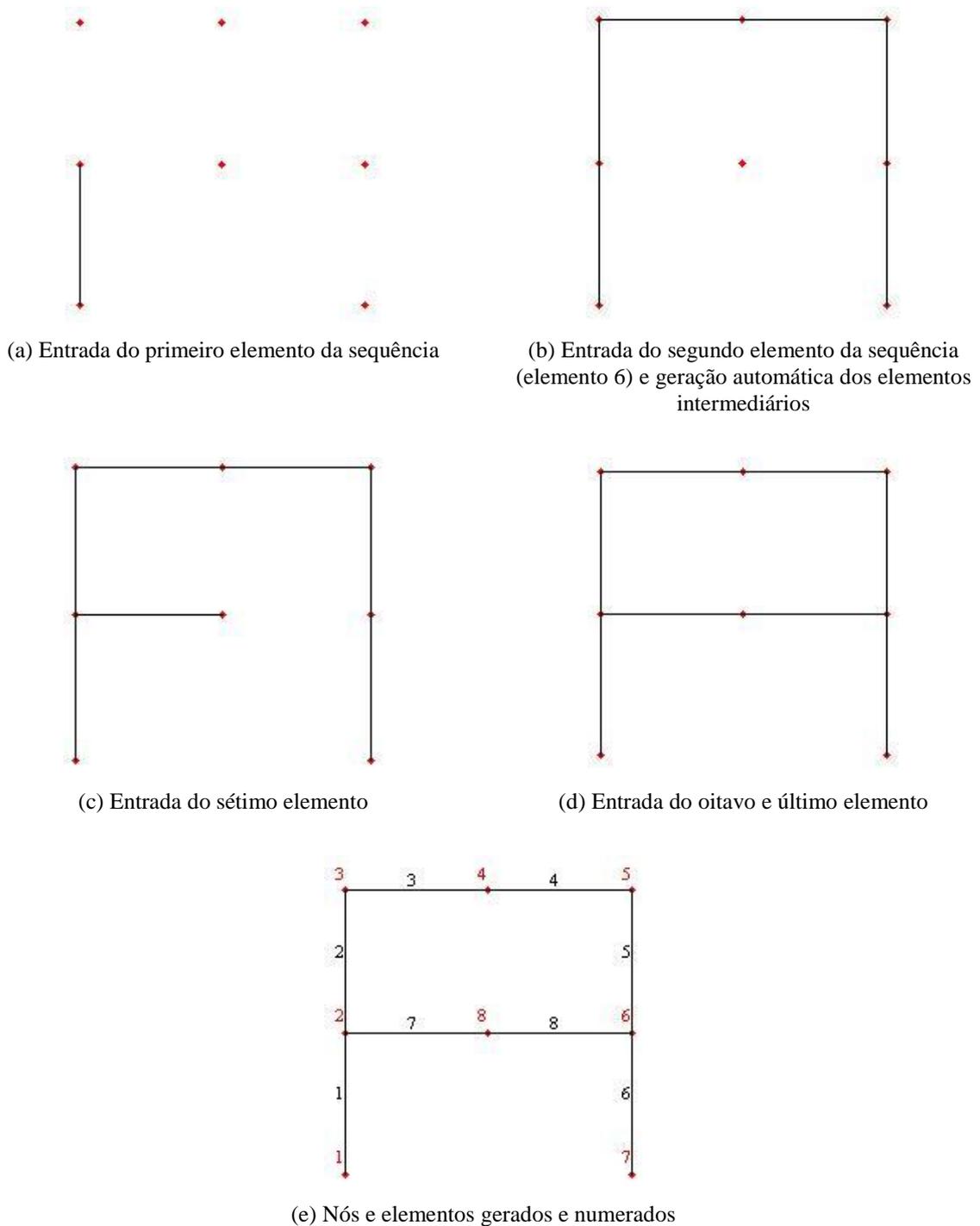
**Figura 5.5** Geração automática dos pontos nodais

A partir desse ponto, deverão ser informados os dados referentes às propriedades dos diferentes materiais com o qual a estrutura será construída, através da opção *Materiais* do menu *Malha*. Para introduzir esses dados, inicialmente, é aberto o diálogo da Figura 5.8a na qual é possível estabelecer o número de materiais, para o caso da estrutura ser constituída por elementos de diferentes materiais. Foi utilizado apenas um tipo de material e, nesse caso, basta o usuário indicar o número 1 e clicar no botão *OK*. Na sequência é aberta a janela da Figura 5.8b, para indicação das propriedades desse material. Para uma análise estática linear somente o valor do módulo de elasticidade  $E$  é necessário e seu valor, como indica a Figura 5.1a, é  $205 \text{ kN/mm}^2$ . No exemplo, todos os elementos apresentam propriedades idênticas, sendo assim, o número de grupos de elementos com as

mesmas características é igual a 1 (Figura 5.8c). O elemento inicial desse grupo corresponde ao nó 1 e o final ao nó 8, uma vez que a numeração dos elementos segue uma sequência.



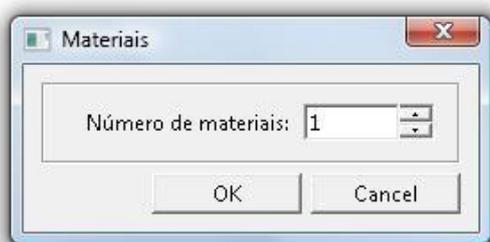
**Figura 5.6** Conectividades dos elementos do pórtico



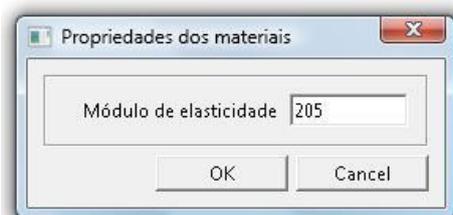
**Figura 5.7** Geração automática dos elementos

As propriedades geométricas das seções transversais que compõem o modelo estrutural podem agora ser fornecidas. Para isso, inicia-se a sequência de opções mostrada na Figura 5.9, onde, inicialmente, acessando o menu *Malha* opção *Seções*, o usuário define o número de diferentes seções (Figura 5.9a). Nesse exemplo, as propriedades geométricas das colunas são de valores diferentes às das vigas, sendo assim, o número de seções é igual

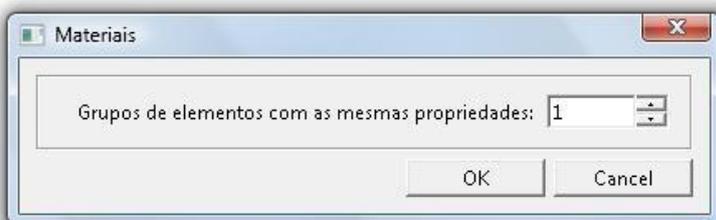
a 2. Logo após, para a primeira seção (colunas do modelo), é aberto o diálogo da Figura 5.9b, onde são fornecidas as propriedades geométricas, área e momento de inércia, do perfil W310x143. Em seguida, é aberta a janela da Figura 5.9c onde os elementos com propriedades idênticas podem ser agrupados. Assim, define-se como 2 o número de grupos de elementos com as mesmas características. Os elementos 1 e 2 representam o elemento inicial e final do primeiro grupo (Figura 5.9d) e os elementos 5 e 6 os do segundo grupo (Figura 5.9e).



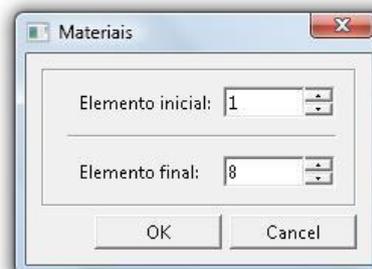
(a) Número de materiais utilizados



(b) Propriedades para a análise estática linear



(c) Grupos de elementos



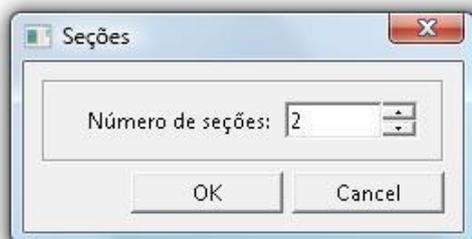
(d) Elementos inicial e final

**Figura 5.8** Propriedades do material

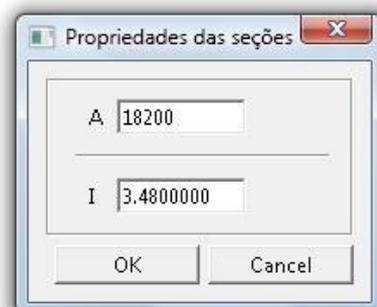
Para a segunda seção deve-se fornecer a área e inércia do perfil W360x72 usado nas vigas. O número de grupos de elementos também será 2 e os elementos do primeiro grupo são o 3 e o 4 e os do segundo grupo, os elementos 7 e 8, todos correspondentes às vigas existentes no pórtico. Detalhes sobre esse processo de geração das seções foi mostrado no Capítulo 3.

Após a construção da malha de elementos finitos, precisam-se prescrever as condições de contorno, que nesse exemplo, se localizam nos nós 1 e 7. Nesse caso, o número de nós com restrição é igual a 2, como indica a Figura 5.10a, e foi determinado que os deslocamentos nas direções  $X$ ,  $Y$  e a rotação em torno do eixo  $z$  estão impedidos ou fixos, ou seja, os nós estão engastados. A Figura 5.10b mostra a caixa de diálogo para

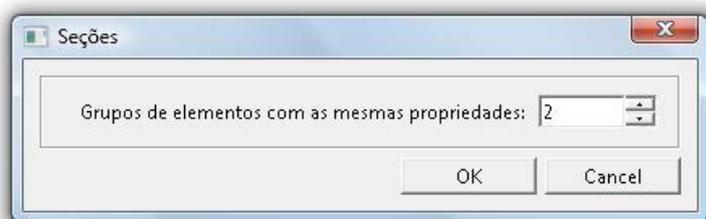
definição dessas informações para o nó 1, primeiro ponto com restrição. Encerrado o processo de modelagem das condições de contorno, obtém-se, na tela do programa o desenho da estrutura, como mostra a Figura 5.11.



(a) Número de diferentes seções



(b) Propriedades da seção



(c) Grupos de elementos



(d) Elementos do primeiro grupo

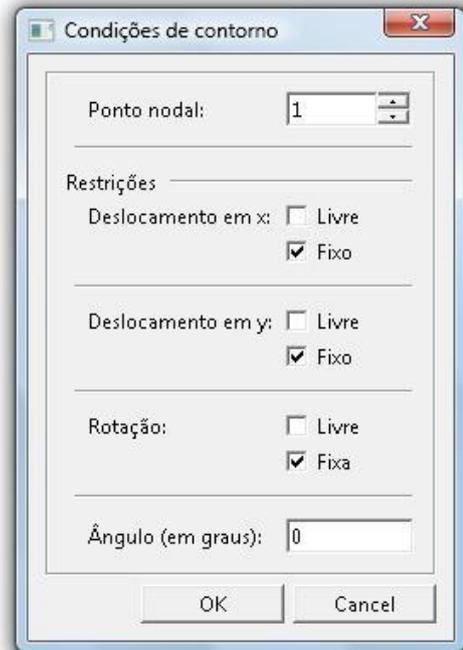


(e) Elementos do segundo grupo

**Figura 5.9** Propriedades da seção transversal

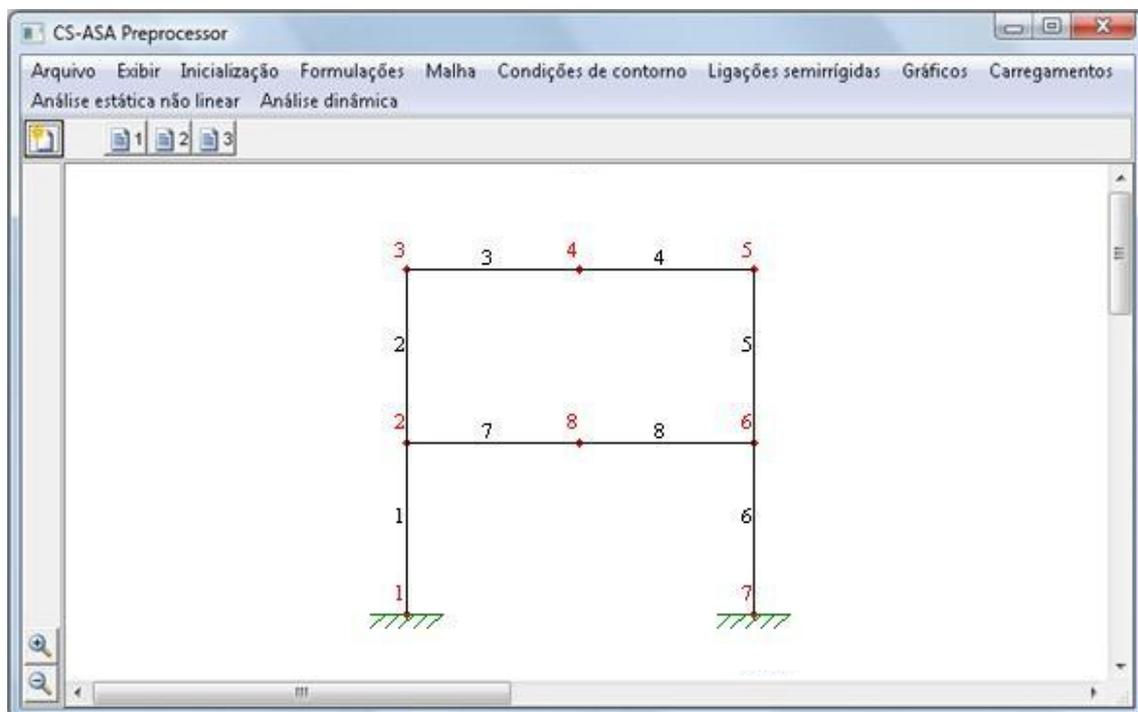


(a) Número de pontos com restrição



(b) Tipo de restrição do nó 1

**Figura 5.10** Condições de contorno



**Figura 5.11** Malha gerada

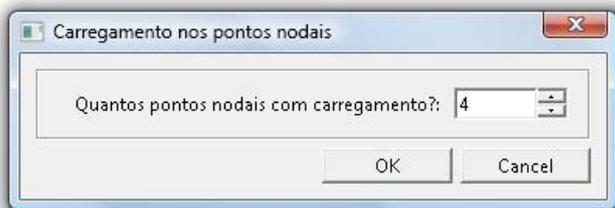
Em relação ao carregamento atuante, como no exemplo existem somente cargas aplicadas nos pontos nodais (Figura 5.12b), o usuário deverá informar, após a escolha do tipo de carregamento, carga variável nesse exemplo (Figura 5.12a), o número de nós com algum tipo de carga, que aqui é igual a 4 (Figura 5.12c). Por fim, além de informar o número do nó, deverão ser definidos também os valores das cargas em questão. A Figura 5.12d apresenta os dados do carregamento aplicado ao nó 2. Todas essas informações são obtidas por meio do menu *Carregamentos*.



(a) Tipo de carregamento



(b) Forma de aplicação



(c) Número de pontos com carga



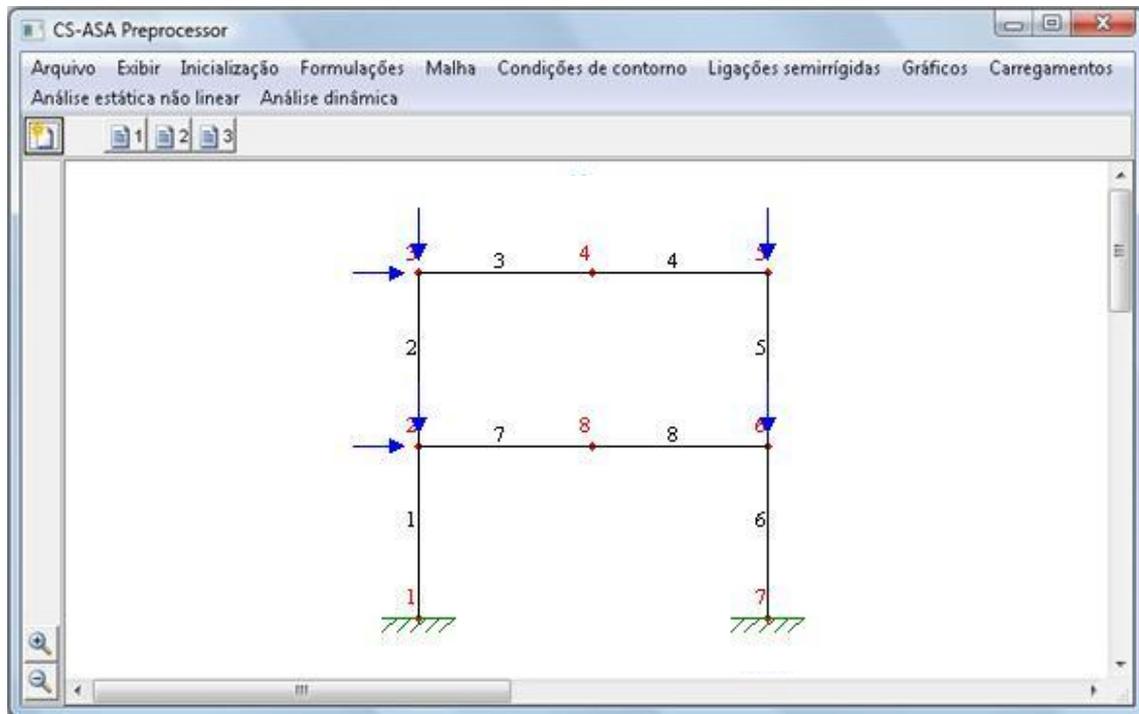
(d) Posição e intensidade da carga para o nó 2

**Figura 5.12** Diálogos para aplicação da carga concentrada

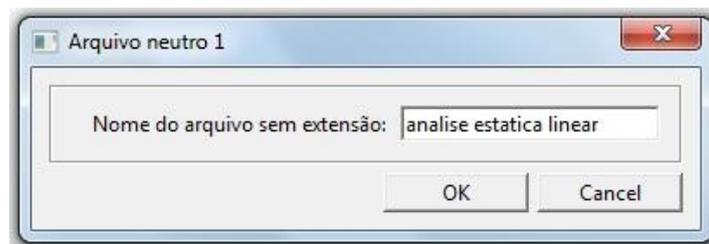
O modelo estrutural discretizado, onde a numeração dos nós e elementos, condições de contorno e carregamentos pode ser visualizada, é mostrada na Figura 5.13.

Fornecidos todos os parâmetros citados anteriormente, pode-se acionar a opção *Gerar arquivo neutro 1* (Figura 5.14) do menu *Exibir*, que salva o primeiro arquivo de

dados gerado pelo programa, mostrado na Figura 5.15. Esse arquivo é imprescindível para qualquer tipo de análise estrutural que o usuário pretenda realizar.



**Figura 5.13** Malha gerada: carregamentos aplicados



**Figura 5.14** Título do Arquivo Neutro 1

### 5.3 Exemplo 2: Análise Estática Não Linear

O objetivo, nesta seção, é modelar o pórtico da Figura 5.1, para que seja efetuada uma análise estática não linear. Nesse tipo de análise, o Arquivo Neutro 2 deve ser gerado. Algumas modificações serão feitas no Arquivo Neutro 1 e serão discutidas também.

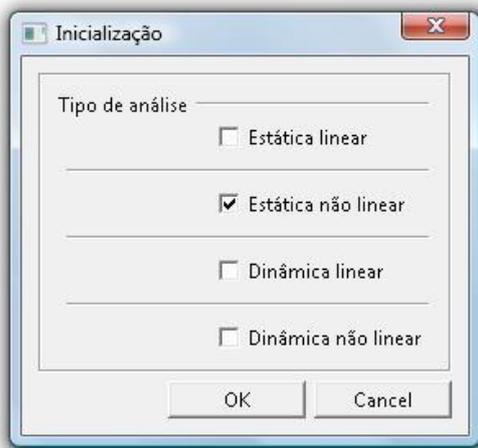
Serão considerados, inicialmente, na estrutura a ser analisada, os efeitos da não linearidade geométrica. Em seguida, os efeitos da semirrigidez da ligação e da inelasticidade do material. Finalizando, considera-se a simulação desses três efeitos.

Pórtico de 2 andares				
estatica				
por				
0				
0				
8	8	2	2	3
1	1	2	2	
coord				
ppor				
8				
1		0		0
2		0		3.66
3		0		7.32
4		3.05		7.32
5		6.1		7.32
6		6.1		3.66
7		6.1		0
8		3.05		3.66
elem				
8				
1		1		2
2		2		3
3		3		4
4		4		5
5		5		6
6		6		7
7		2		8
8		8		6
boun				
1		1		1
7		1		1
8		0		0
mate				
205				
1				
1		8		
seca				
18200		3.48		
2				
1		2		
5		6		
9100		2.01		
2				
3		4		
7		8		
load				
1		0		
2		0.002		-1.0
3		0.001		-1.0
5		0		-1.0
6		0		-1.0
8		0		0
end				

**Figura 5.15** Arquivo Neutro 1: análise estática linear

### 5.3.1 Não linearidade geométrica

Após a definição do tipo de análise (Figura 5.16a), por meio do menu *Inicialização*, é necessário definir a formulação não linear utilizada. Para simular os efeitos da não linearidade geométrica em uma análise estática não linear, têm-se as três formulações SOF-1, 2, 3, ilustradas na Figura 5.16b. Nesse exemplo, foi escolhida a formulação SOF-1.



(a) Escolha do tipo de análise



(b) Escolha da formulação não linear

**Figura 5.16** Tipo de análise e formulação

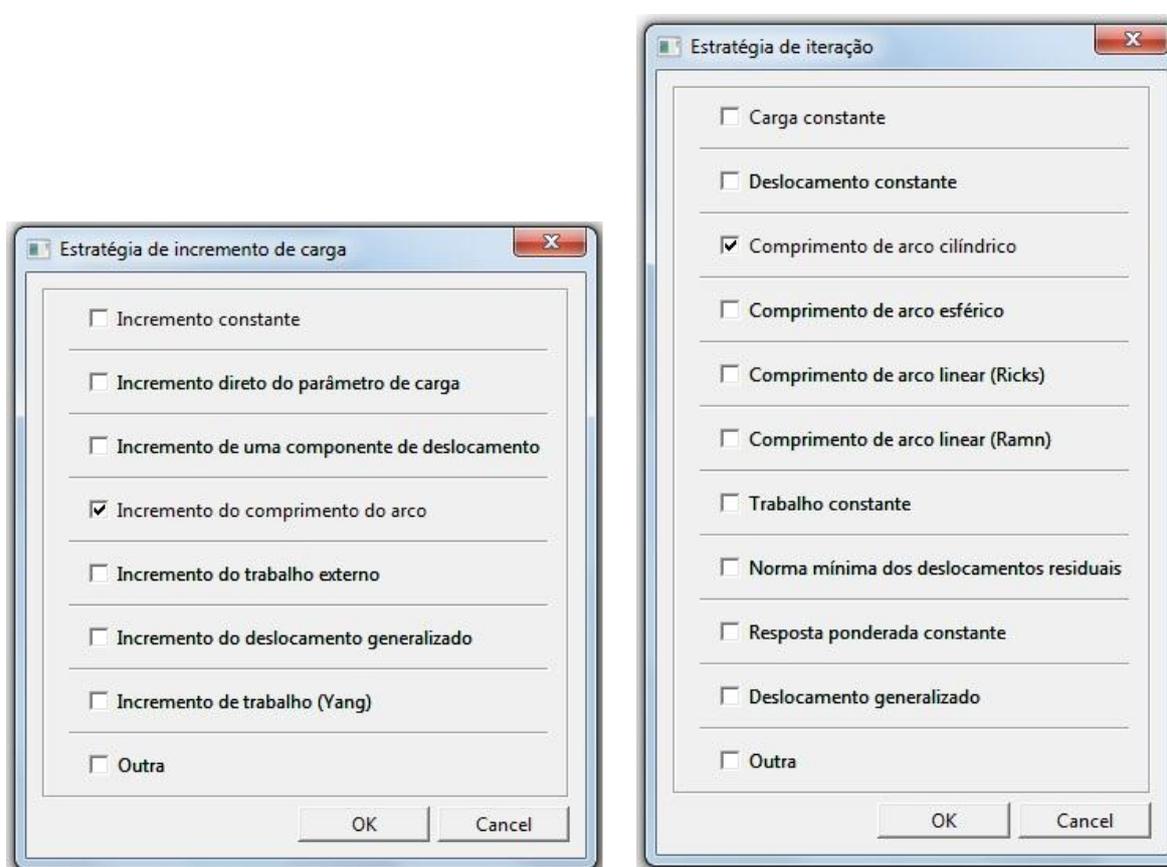
Utilizando os mesmos dados relativos aos pontos nodais, elementos, condições de contorno e carregamentos, utilizados no exemplo da Seção 5.2, a Figura 5.17 mostra as seis primeiras linhas Arquivo Neutro 1 gerado. Observe que na quarta linha está indicado, agora, o uso da análise estática não linear por meio da gravação do valor 1.

Pórtico de 2 andares									
estatica									
por									
1									
0									
8	8	2	2	3	1	1	2	2	

**Figura 5.17** Parte inicial do Arquivo Neutro 1: análise estática não linear

Gerado o primeiro arquivo neutro, os parâmetros de controle usados na obtenção da solução não linear do problema estrutural da Figura 5.1, agrupados no menu *Análise estática não linear*, devem ser informados. Após essas informações terem sido fornecidas, é gerado o segundo arquivo de dados do programa, o Arquivo Neutro 2.

Inicialmente, através do submenu *Informações básicas* geram-se os parâmetros que controlam o processo de solução não linear, onde são definidas, inicialmente, as estratégias de incremento de carga e iteração. Para obter a trajetória de equilíbrio completa da estrutura analisada selecionaram-se, nesse exemplo, as estratégias do incremento do comprimento do arco e do comprimento do arco cilíndrico, como mostra a Figura 5.18.



(a) Incremento de carga

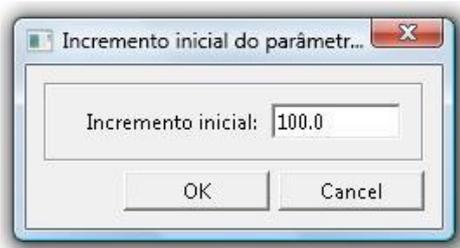
(b) Iteração

**Figura 5.18** Diálogos para escolha das estratégias de solução não linear

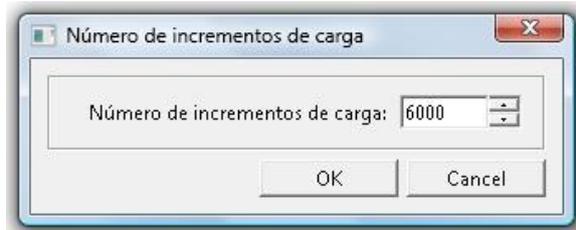
Outras opções desse submenu, como o valor do incremento inicial do parâmetro de carga (Figura 5.19a), o número total de incrementos de carga (Figura 5.19b) e o número máximo de iterações (Figura 5.19c) são também informadas. O método de Newton-Raphson padrão é utilizado nesse exemplo (Figura 5.19d). Para a convergência, o critério

baseado em carga e deslocamento é escolhido, como mostra a Figura 5.19e. Ao final, o valor de tolerância é informado (Figura 5.19f).

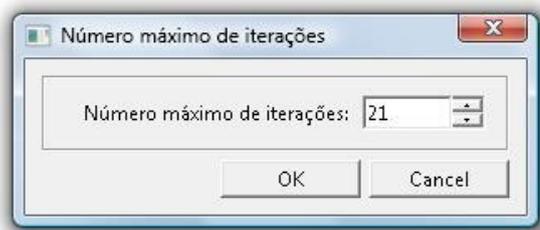
Para se gerar o Arquivo Neutro 2, em sua estrutura mínima nesse exemplo, outras duas informações são necessárias, e dizem respeito à impressão dos resultados da análise realizada pelo CS-ASA. Para isso, o usuário define o indicador de impressão das variáveis e o valor do intervalo de passos de carga para impressão na tela, como mostra a Figura 5.20.



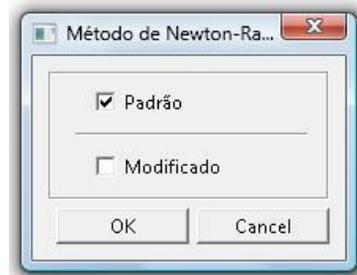
(a) Valor inicial do fator de carga



(b) Número total de incrementos de carga



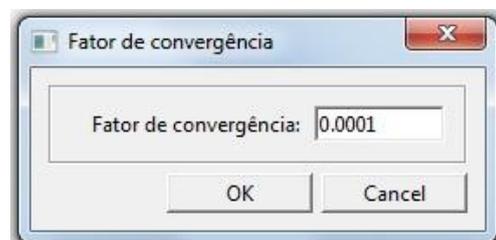
(c) Número máximo de iterações



(d) Método de Newton-Raphson

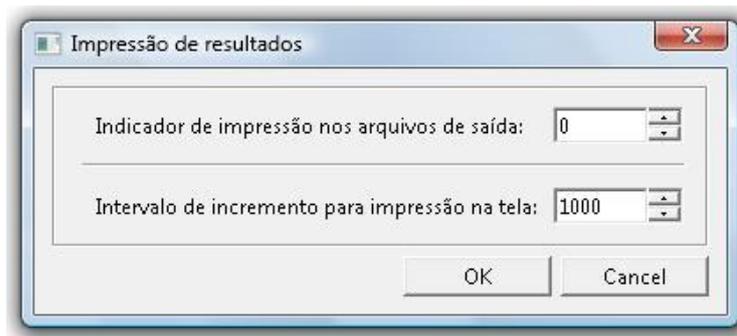


(e) Critério de convergência



(f) Tolerância

**Figura 5.19** Opções do submenu *Inicialização*



**Figura 5.20** Impressão dos resultados

Definidos todos os dados, pode-se acionar a opção *Gerar arquivo neutro 2* no menu *Exibir*, que disponibilizará ao usuário o segundo arquivo neutro (Figura 5.21).

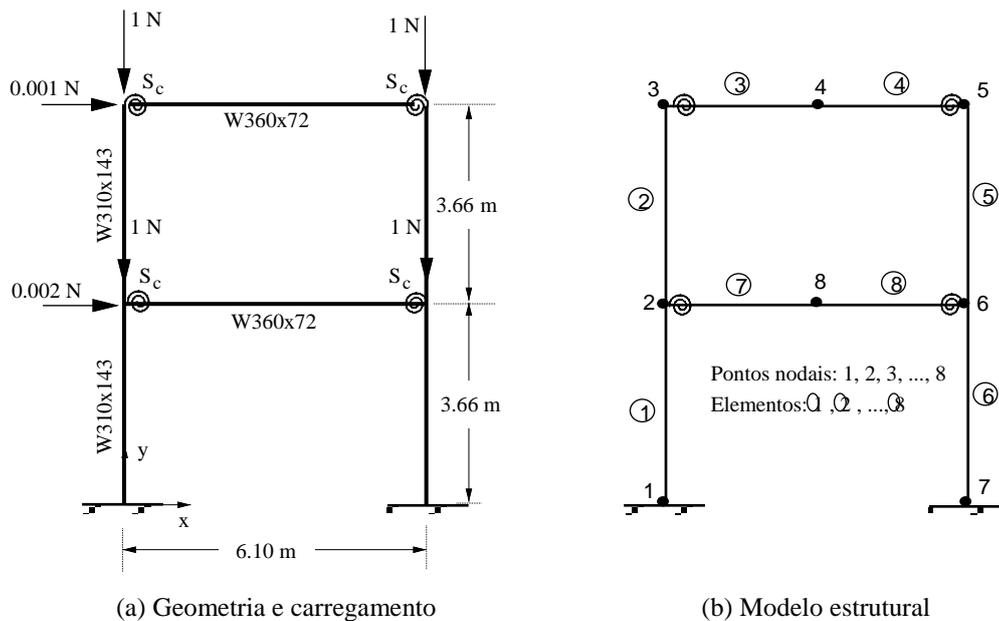
```
2
%PRINCIPAL
0 2 100.0 6000 21 1 3 1.0
%RELATO
0
%SCREEN
1000
%END
```

**Figura 5.21** Arquivo Neutro 2: análise estática não linear

### 5.3.2 Ligações semirrígidas

Analisa-se aqui o mesmo pórtico de dois pavimentos ilustrado na Figura 5.1, porém, agora com ligações viga-coluna semirrígidas de comportamento não linear (Figura 5.22).

Iniciando a modelagem, o usuário define a formulação, obtida através do menu *Formulações*. A não linearidade geométrica foi considerada, nesse exemplo, através da escolha da formulação SOF-2 linearizada (Figura 5.23a). Já a formulação escolhida para a simulação da semirrigidez das ligações foi a SRF-2 (Figura 5.23b).



**Figura 5.22** Pórtico com ligações semirrígidas: análise estática não linear

Confirmada então a presença de ligações semirrígidas no modelo, definido o tipo de análise e escolhida a formulação, as caixas de diálogo da Figura 5.24 são apresentadas, uma por vez, ao usuário, por meio do menu *Ligações semirrígidas*. Por meio desse menu, descrito no Capítulo 3, são informados os parâmetros necessários para se modelar o comportamento das ligações. É definido, inicialmente, o número de modelos matemáticos a serem usados, nesse caso igual a 1 (Figura 5.24a) e, em seguida, o fator de transformação, cujo valor default é utilizado (Figura 5.24b). Logo após, o usuário define qual o modelo matemático será usado (Figura 5.24c). Nesse exemplo foi escolhido o modelo exponencial para modelar o comportamento não linear das ligações.

Logo após, define-se a quantidade de tipos diferentes de ligações utilizadas (Figura 5.25), que nesse exemplo é igual a 1 (cantoneira de alma simples).

Como o modelo escolhido foi o exponencial, seguido ao diálogo da Figura 5.26a, responsável pela definição do tipo de ligação, os parâmetros  $Rkf$ ,  $\alpha$  e os coeficientes de ajuste de curva  $C$  são apresentados ao usuário para confirmação de seus dados (Figura 5.26b).

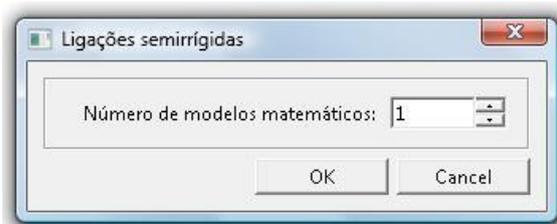


(a) Formulação não linear

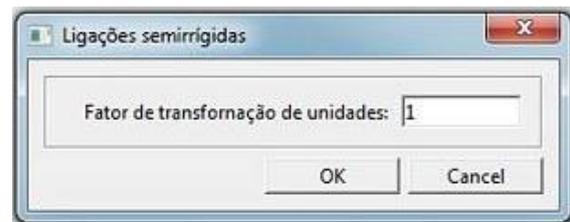


(b) Formulação para considerar a flexibilidade da ligação

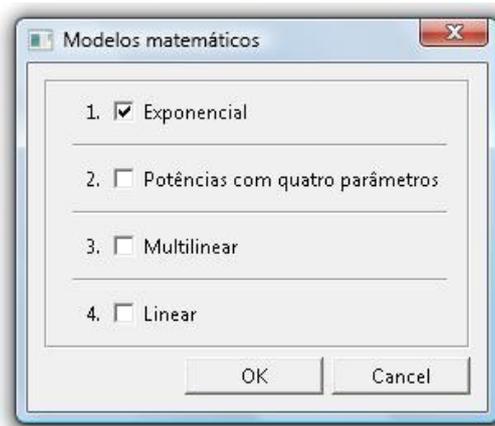
**Figura 5.23** Formulações utilizadas



(a) Quantidade de modelos utilizados

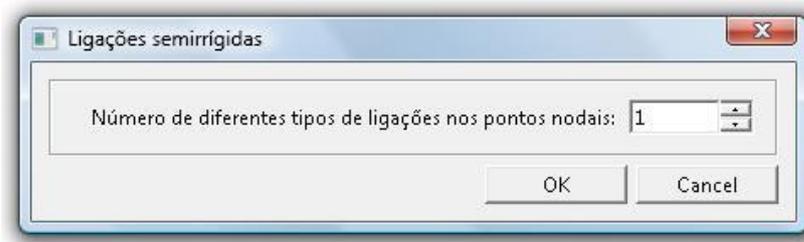


(b) Transformação de unidades

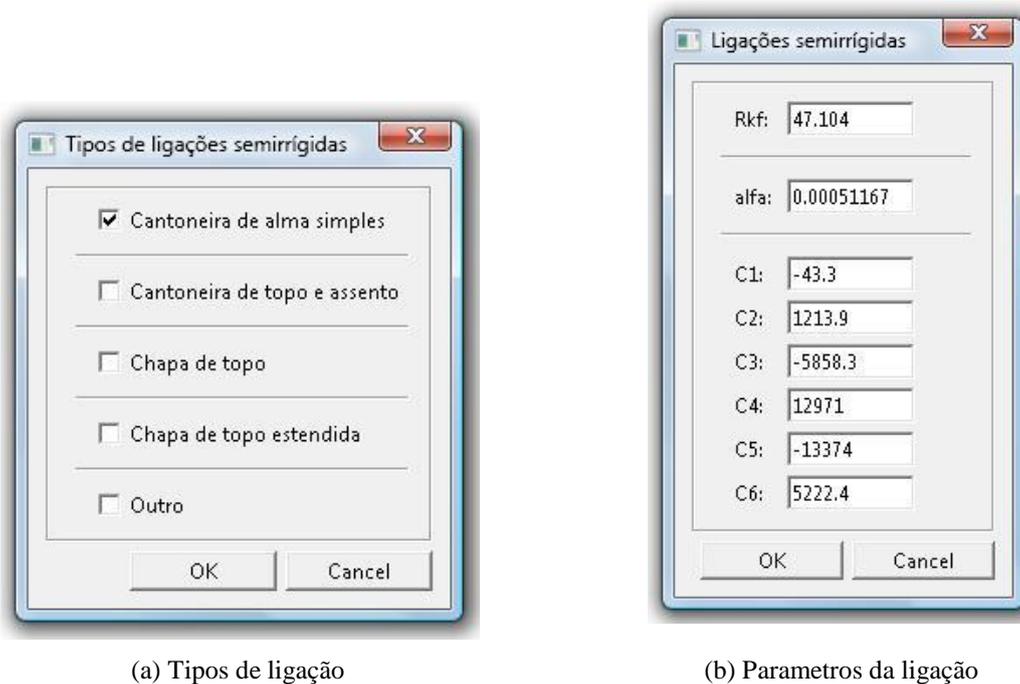


(c) Escolha do modelo matemático

**Figura 5.24** Dados iniciais para a modelagem das ligações



**Figura 5.25** Quantidade de ligações



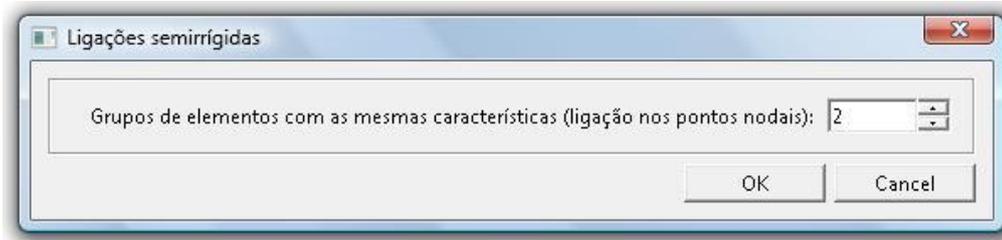
(a) Tipos de ligação

(b) Parametros da ligação

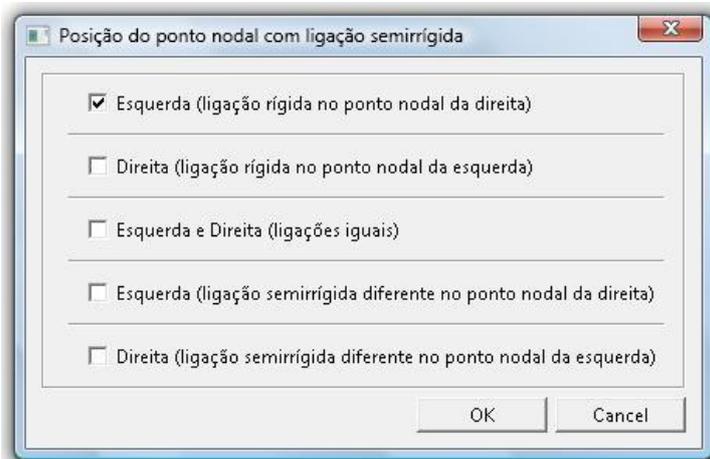
**Figura 5.26** Tipo de ligação

O próximo passo é agrupar os elementos que apresentam ligação semirrígida de mesmo comportamento (Figura 5.27a). Para esse exemplo foram definidos 2 grupos. Logo após, para cada grupo, é definida a posição do ponto nodal com ligação semirrígida (esquerda, nesse caso), como mostra a Figura 5.27b, e, em seguida, novos conjuntos de elementos são formados (Figura 5.27c). Para cada um, o número dos elementos que o constituem deve ser fornecido. Como a numeração dos elementos 3 e 7, desse grupo, não obedece a uma sequência, deve-se informar cada um deles individualmente. A Figura 5.27d apresenta a caixa de diálogo para o fornecimento dos elementos do primeiro grupo. O modelo estrutural obtido após essa modelagem é exibido na Figura 5.28.

A Figura 5.29 ilustra o Arquivo Neutro 1 gerado para a modelagem dessa estrutura. Após a geração do primeiro arquivo é realizada a entrada de dados para o segundo arquivo neutro do programa, o Arquivo Neutro 2.



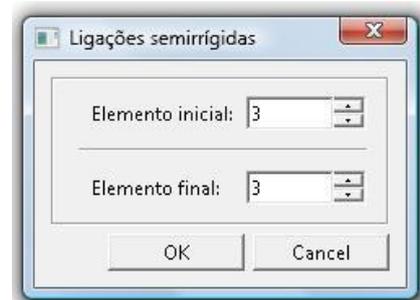
(a) Grupos de elementos com mesmo tipo de ligação



(b) Posição da ligação semirrígida no elemento



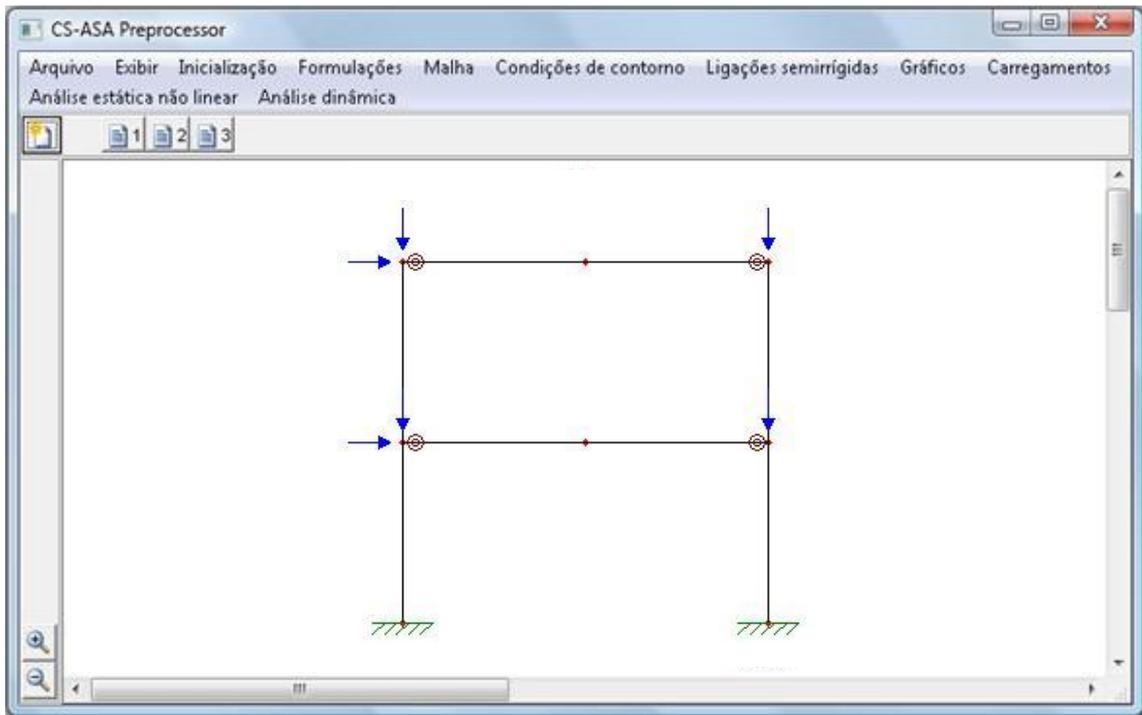
(c) Ligação na mesma posição



(d) Elemento 3 do grupo

**Figura 5.27** Modelagem das ligações

Utilizando-se do menu *Gráficos* é possível estabelecer a leitura dos parâmetros para a geração dos resultados gerados pelo CS-ASA, que poderão, como explicado no Capítulo 3, ser representados graficamente. Como nesse exemplo a análise é a estática não linear e as ligações semirrígidas representadas através do seu comportamento momento-rotação não linear, o usuário irá definir os pontos nodais para controle da carga e do deslocamento, nós 1 e 7, além da indicação do elemento (3) e a posição da ligação, esquerda, nesse elemento. Esses dados são gravados no Arquivo Neutro 1, macro-comando graf.



**Figura 5.28** Malha de elementos finitos

Pórtico de 2 andares								
estatica								
por								
1								
2								
8								
8	8	2	2	3	1	1	2	2
coord								
ppor								
8								
1		0			0			
2		0			3.66			
3		0			7.32			
4		3.05			7.32			
5		6.1			7.32			
6		6.1			3.66			
7		6.1			0			
8		3.05			3.66			
elem								
8								
1		1			2			
2		2			3			
3		3			4			
4		4			5			
5		5			6			
6		6			7			
7		2			8			
8		8			6			

**Figura 5.29** Arquivo Neutro 1: ligações com comportamento não linear (Parte A)

```

boun
1      1      1      1
7      1      1      1
8      0      0      0
mate
2.05
1
1      8
seca
18200  3.48
2
1      2
5      6
9100   2.01
2
3      4
7      8
stif
1      1      1.0
1
1
47.104 0.00051167 6
-43.3
1213.9
-5858.3
12971
-13374
5222.4
2
2      1
3      3
7      7
2      2
4      4
8      8
graf
1      7
3      1
load
1      0
2      0.002  -1.0  0
3      0.001  -1.0  0
5      0      -1.0  0
6      0      -1.0  0
8      0      0      0
end

```

**Figura 5.29** Arquivo Neutro 1: ligações com comportamento não linear (Parte B)

Os parâmetros necessários para a construção desse arquivo encontram-se no menu *Análise estática não linear*. Foi adotada a estratégia do incremento direto do parâmetro de carga, com iteração a carga constante. O incremento inicial do parâmetro de carga foi

assumido igual a  $10^{-3}$ . O número total de incrementos de carga vale 500 enquanto que o número máximo de iterações é igual a 10. O método de Newton-Raphson modificado é utilizado nesse exemplo. Para a convergência, o critério baseado em carga foi escolhido e, por último, o valor de tolerância é informado com valor igual a 1. O Arquivo Neutro 2 correspondente, gerado para este exemplo encontra-se na Figura 5.30.

```
2
%PRINCIPAL
1 1 0.001 500 10 2 1 1
%RELATO
0
%SCREEN
1000
%END
```

**Figura 5.30** Arquivo Neutro 2 gerado para esse exemplo

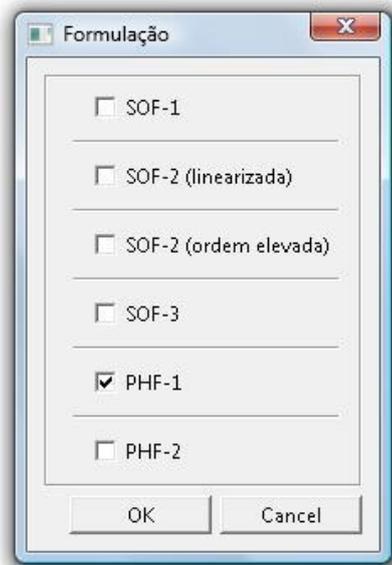
### 5.3.3 Inelasticidade do aço

O exemplo, aqui mencionado, tem como objetivo utilizar formulações que simulam os efeitos da inelasticidade do material, caracterizando, assim, uma análise inelástica, na qual o método da rótula plástica será utilizado.

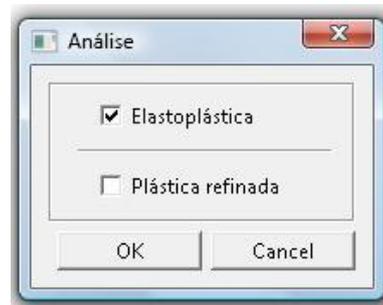
A abordagem escolhida foi a elastoplástica (Figura 5.31b), definida após a escolha da formulação PHF-1 (menu *Formulações*), como mostra o diálogo da Figura 5.31a. Os dados do pórtico da Figura 5.1 foram utilizados para a modelagem nesse exemplo.

Como a formulação indicada foi a PHF-1, o usuário deverá informar também a norma e o critério, mostrados na Figura 5.32. A norma, usada para definir o módulo tangente, foi a LRFD-AISC e o critério usado para estabelecer a degradação da rigidez da ligação foi o parabólico com início de escoamento em  $\alpha = 0.5$ .

Para a geração do primeiro arquivo neutro essas informações são necessárias para indicar os efeitos da inelasticidade do material. Na Figura 5.33 está um exemplo das primeiras linhas do Arquivo Neutro 1, utilizado na análise inelástica de segunda ordem do pórtico com ligações rígidas não lineares (Figura 5.1). Observe que a sexta linha define o indicador da formulação inelástica e na sétima, a norma e o critério.

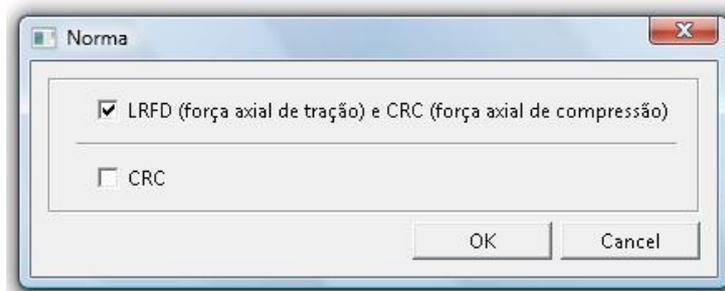


(a) Formulação escolhida

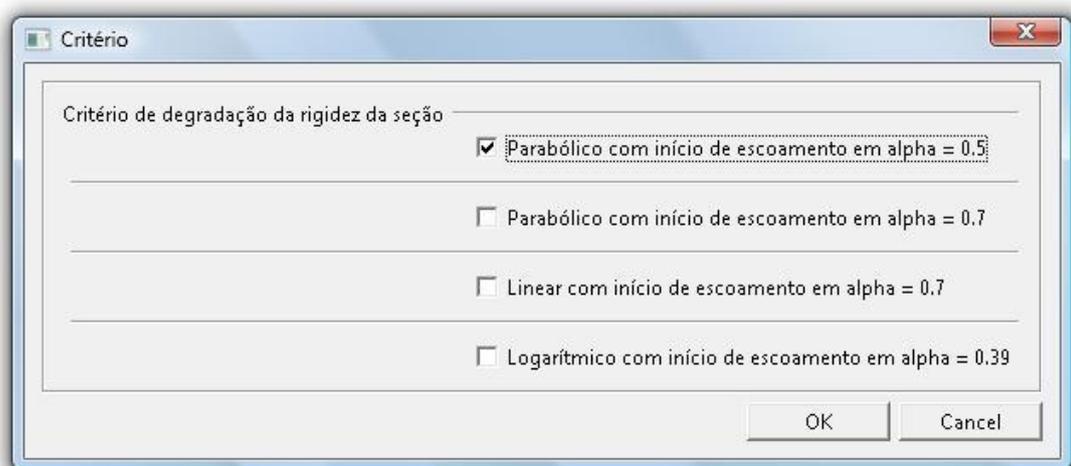


(b) Estratégia escolhida

**Figura 5.31** Formulação para simulação dos efeitos da inelasticidade do aço



(a) Norma



(b) Critério

**Figura 5.32** Diálogos dos parâmetros para definir a formulação PHF-1

```

Pórtico de 2 andares
estática
por
0
0
1
1 1

```

**Figura 5.33** Arquivo Neutro 1 numa análise inelástica

Em relação aos parâmetros da análise estática não linear, obtidos por meio do menu *Análise estática não linear*, utilizou-se a estratégia do comprimento de arco, com iteração a carga constante. O Arquivo Neutro 2 correspondente pode ser visualizado na Figura 5.34.

```

31
%PRINCIPAL
3 1 0.01 22500 161 1 1 1
%RELATO
0
%SCREEN
500
%END

```

**Figura 5.34** Arquivo Neutro 2

### 5.3.4 Acoplamento dos três efeitos

O objetivo agora é simular conjuntamente os efeitos de segunda ordem, da inelasticidade do aço e da flexibilidade da ligação, na qual o método da rótula plástica será utilizado. Para isso, foi escolhida a formulação AAF-2, indicada na Figura 5.35.

Foram consideradas, também, as mesmas ligações viga-coluna da Subseção 5.3.2. Fornecidos todos esses dados, pode-se acionar a opção *Gerar arquivo neutro 1* (menu *Exibir*), que disponibiliza o Arquivo Neutro 1, gerado para este exemplo. A Figura 5.36 ilustra as primeiras linhas desse arquivo.

Para os parâmetros da análise estática não linear, o método de Newton-Raphson padrão e a estratégia do incremento direto do parâmetro de carga com iteração a carga constante foram utilizados. A Figura 5.37 apresenta um exemplo do Arquivo Neutro 2 que utiliza a formulação PHF na definição do elemento finito.



**Figura 5.35** Formulação para a simulação conjunta dos três efeitos não lineares

```
Pórtico de 2 andares
estática
por
1
2
8
1
```

**Figura 5.36** Arquivo Neutro 1: acoplamento dos três efeitos

```
2
%PRINCIPAL
1 1 0.01 22500 161 1 1 1
%RELATO
0
%SCREEN
500
%END
```

**Figura 5.37** Arquivo Neutro 2: acoplamento dos três efeitos

## 5.4 Exemplo 3: Análise Dinâmica Não Linear

Nesta seção, serão demonstrados os passos necessários para a geração do Arquivo Neutro 3, modelado para uma análise dinâmica não linear, considerando as formulações que simulam os efeitos não lineares decorrentes desse tipo de análise, começado com os efeitos

conjuntos da não linearidade geométrica e da flexibilidade da ligação e, finalizando com simulação da inelasticidade do material. Este último, definido sem a presença de ligações semirrígidas no modelo.

#### **5.4.1 Ligações semirrígidas e não linearidade geométrica**

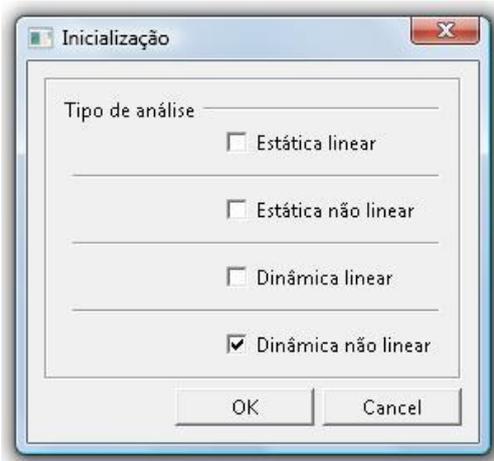
Iniciando a modelagem, após a escolha do tipo de análise, dinâmica não linear (Figura 5.38a), o passo seguinte é a escolha do tipo de problema (Figura 5.38b), análise transiente. Em seguida, define-se a formulação utilizada. No exemplo, os efeitos da não linearidade geométrica são considerados através da formulação SOF-1 (Figura 5.38c) e para simular os efeitos da flexibilidade da ligação têm-se a formulação SRF-2 (Figura 5.38d).

Logo em seguida, tem início a entrada dos dados relativos à modelagem das ligações semirrígidas. Para esse exemplo, o tipo de ligação utilizada foi a cantoneira de alma simples e o comportamento momento-rotação não linear das ligações é representado através do modelo exponencial.

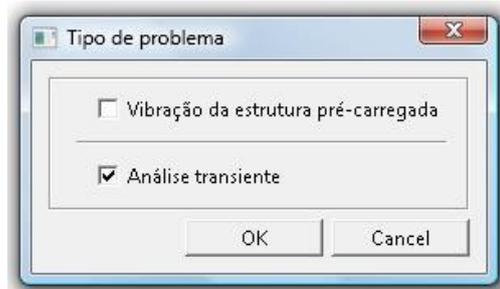
Na Figura 5.39 é possível visualizar as seis primeiras linhas do Arquivo Neutro 1, gerado, após a definição de todos os dados citados anteriormente, para a análise dinâmica não linear, onde foram considerados os efeitos da não linearidade geométrica e da flexibilidade da ligação. Na sexta linha é possível observar a indicação do tipo de problema.

Os parâmetros relacionados à análise dinâmica, responsáveis pela geração do Arquivo Neutro 3, são acionados através do menu *Análise dinâmica*, porém, essas informações somente são disponibilizadas ao usuário quando o tipo de problema selecionado for análise transiente.

Através do submenu *Domínio da análise* o usuário tem a opção de escolha em resolver as equações diferenciais de movimento no domínio do tempo ou da frequência. Para o exemplo foi definida a análise no domínio do tempo, como mostra a Figura 5.40a. Como se trata de uma análise dinâmica não linear, além do número de incrementos e do valor do incremento, será definido, também, o número máximo de iterações e o fator de convergência, como mostra a Figura 5.40b. Por fim, a Figura 5.40b ilustra também a opção para se utilizar ou não a estratégia adaptativa para cálculo automático do incremento de tempo.



(a) Tipo de análise



(b) Tipo de problema



(c) Formulação para análise dinâmica não linear



(d) Formulação para a simulação da flexibilidade da ligação

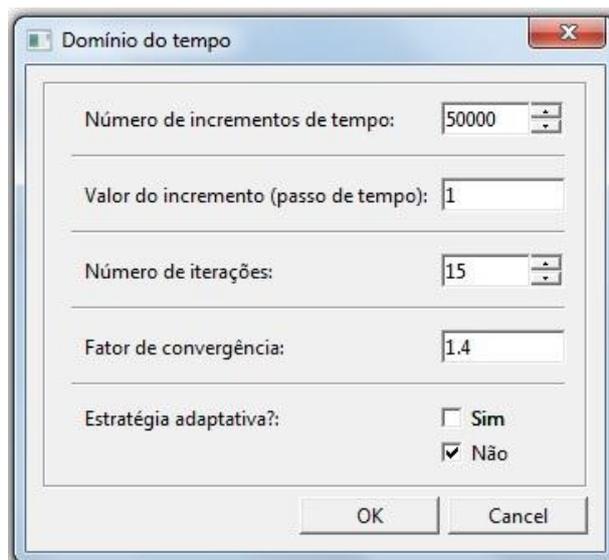
**Figura 5.38** Dados iniciais do problema

Pórtico de 2 andares  
dinamica  
por  
1  
1  
2

**Figura 5.39** Arquivo Neutro 1: análise dinâmica não linear



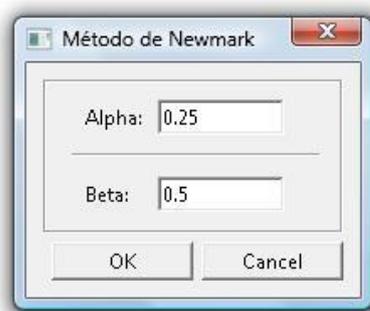
(a) Domínio da análise



(b) Parâmetros do domínio do tempo

**Figura 5.40** Análise no domínio do tempo não linear

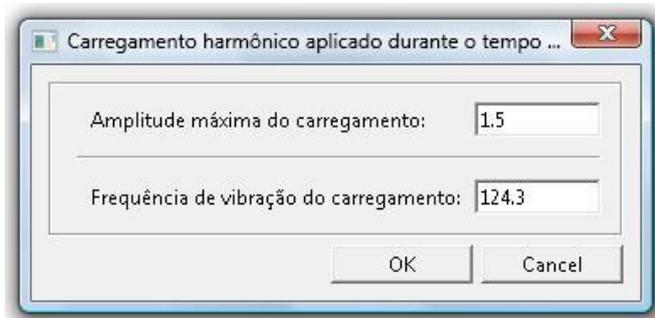
Escolhida a análise no domínio do tempo e definidos todos os seus dados, indica-se o método de integração numérica a ser utilizado, através da opção *Métodos de integração numérica*. Para uma análise dinâmica não linear apenas o método de Newmark é disponibilizado ao usuário. Os parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$ , característicos desse método, foram considerados iguais a 0.5 e 0.25, respectivamente, como mostra a Figura 5.41.



**Figura 5.41** Parâmetros do método de Newmark

Em seguida, através do submenu *Carga variável*, é definida a intensidade da carga, onde se decidiu aplicar o carregamento harmônico aplicado durante o tempo de análise. Para descrever esse carregamento, foram definidos os valores da amplitude máxima e da frequência do carregamento, 1.5 e 124.3, respectivamente. A Figura 5.42 indica o diálogo para entrada desses dados.

Após o fornecimento de todas as informações necessárias, o usuário pode salvar o terceiro arquivo de dados, através da opção *Gerar arquivo neutro 3* no menu *Exibir*. A Figura 5.43 ilustra esse arquivo gerado em sua estrutura mínima.



**Figura 5.42** Parâmetros do carregamento harmônico aplicado durante o tempo de análise

```

2
%DTEMPONL
50000    1    15    1.4    0
%NEWMAR
0.25    0.5
%FATHAR
1.5    124.3
%ENDDIN

```

**Figura 5.43** Arquivo Neutro 3 em sua estrutura mínima

## 5.4.2 Inelasticidade do aço

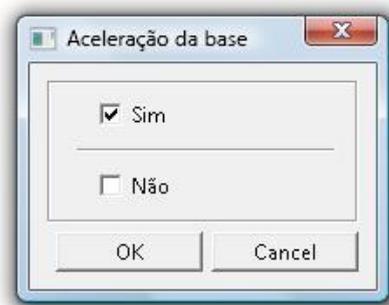
Nesta subseção, será realizada uma análise dinâmica em uma estrutura com ligações rígidas. Nesse tipo de análise, o efeito da inelasticidade do aço será considerado através da escolha da formulação PHF-2, como mostra a Figura 5.44.

Inicia-se, agora, a entrada dos parâmetros relativos à análise dinâmica (menu *Análise dinâmica*). Para isso, define-se, inicialmente, a análise no domínio do tempo. Logo após, são informados os parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$ , característicos do método de Newmark, que foram considerados iguais a 0.5 e 0.25, respectivamente, através do submenu *Métodos de integração numérica*.

Em seguida, o tipo de carregamento que considera a excitação do solo na base das estruturas é definido. Para isso, o usuário deve confirmar que a aceleração da base será utilizada, através do submenu *Aceleração da base*, como mostra a Figura 5.45.



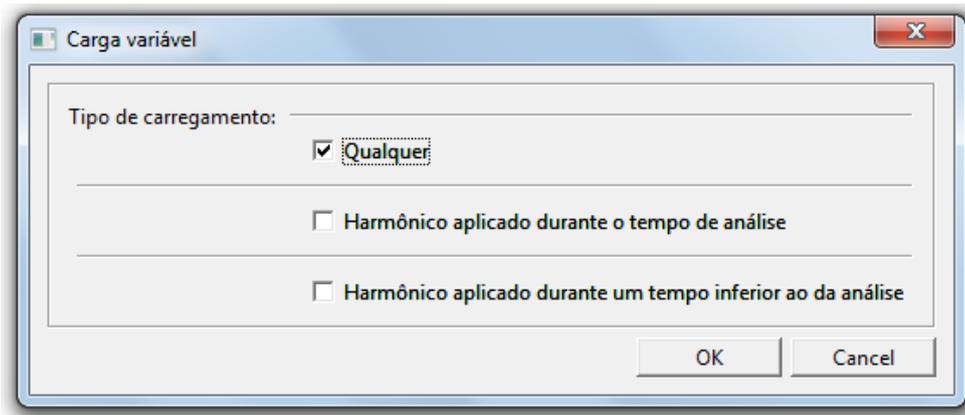
**Figura 5.44** Formulação não linear



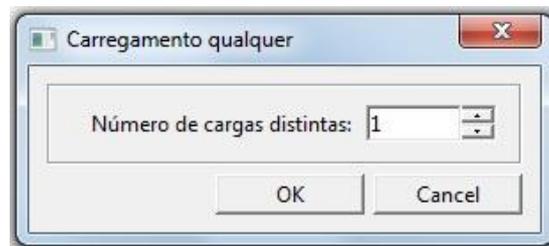
**Figura 5.45** Aceleração da base

É fornecida também a intensidade do carregamento (submenu *Carga variável*), como mostra a Figura 5.46a. Como nesse caso o carregamento atuante é descrito usando segmentos de reta, inicialmente, o usuário define o número de cargas distintas (Figura 5.46b). Outras informações importantes dizem respeito ao número de pares ordenados ( $t_i$ ,  $P_i$ ) e seus valores, como indica as Figuras 5.46c-d.

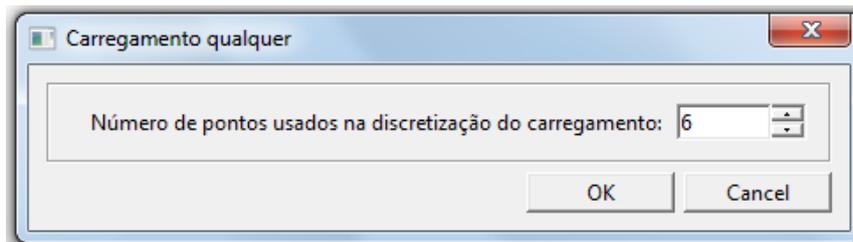
Definidos todos os dados citados acima, pode-se acionar a opção *Gerar arquivo neutro 3* do menu *Exibir*, que disponibiliza ao usuário esse arquivo (Figura 5.47).



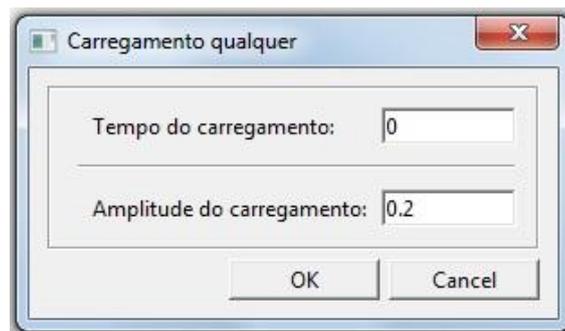
(a) Número de diferentes tipos de carga



(b) Número de diferentes tipos de carga



(c) Número de pares ordenados  $(t_i, P_i)$



(d) Valores do par tempo e intensidade da carga para o primeiro ponto

**Figura 5.46** Definindo o carregamento externo

```
2
%DTEMPONL
10000    0.01    15    1.5    1
%NEWMAR
0.25    0.5
%ACELBAS
%FATCAR
1
6
0.0      0.2
1.0      0.2
1.0001   0.4
3.0      0.4
3.0001   0.0
10000.0  0.0
%ENDDIN
```

**Figura 5.47** Arquivo Neutro 3: análise dinâmica não linear

# Capítulo 6

## Considerações Finais

### 6.1 Introdução

Este último capítulo apresenta algumas conclusões desta dissertação, e também indica sugestões para desenvolvimentos computacionais futuros.

Tratou-se aqui da implementação de um programa gráfico interativo de pré-processamento estrutural denominado *CS-ASA Preprocessor*, que foi escrito em linguagem de programação C. No contexto do método dos elementos finitos, foram implementadas rotinas necessárias para realização de uma modelagem estrutural (ou seja, definição da malha, condições de contorno, carregamentos, ligações semirrígidas, estratégias de solução não linear, parâmetros para uma análise dinâmica, etc.) e consequente geração de arquivos, denominados aqui *Arquivos Neutros*. Destaca-se, entre as tecnologias empregadas, o sistema de interface IUP e a biblioteca gráfica bidimensional CD, ambos desenvolvidos pelo TecGraf da PUC-Rio.

O principal objetivo do programa desenvolvido nesta dissertação é auxiliar o analista no emprego do sistema computacional CS-ASA (Silva, 2009). Como mostrado nos capítulos anteriores, ele possibilita a geração de até três arquivos para serem usados na execução do CS-ASA. Vale lembrar que o *Arquivo Neutro 1* deve ser sempre gerado, independente do tipo de análise estrutural; o *Arquivo Neutro 2* é indispensável no caso das análises estáticas não lineares e vibração da estrutura carregada; o último arquivo, o *Arquivo Neutro 3*, é usado nas análises transientes lineares e não lineares.

## 6.2 Conclusões

Esta dissertação pode ser considerada a primeira tentativa de desenvolvimento de um pré-processador gráfico para o CS-ASA. Portanto, o início de sua implementação foi marcado pela exploração do grande número de tecnologias gráficas disponíveis, familiarização com as mais indicadas, utilização experimental dessas, seleção e adoção das mais apropriadas.

Obteve-se, como consequência dessa exploração e consequente implementações, uma ferramenta gráfica interativa ainda em fase de aprimoramento, principalmente no que diz respeito à geração da malha de elementos finitos, condições de carregamento e emprego de recursos gráficos mais avançados. Porém, o CS-ASA *Preprocessor* traz inovações no que diz respeito à modelagem das ligações semirrígidas e definição dos parâmetros relativos às análises estáticas e dinâmicas não lineares.

Além disso, com a utilização do pré-processador desenvolvido pode-se garantir qualidade e precisão ao modelo estrutural a ser gerado, pois ele permite um maior controle dos dados a serem usados no CS-ASA. Erros que frequentemente ocorrem durante a definição da malha de elementos finitos, das propriedades físicas e geométricas, das condições de contorno e carregamento, e modelagem das ligações semirrígidas, podem ser reduzidos quando se utiliza os recursos gráficos interativos aqui implementados.

O projeto da interface gráfica, com seus menus, submenus e caixas de diálogo, foi idealizado visando proporcionar ao usuário uma interação simples e intuitiva, agregando, com isso, agilidade no preenchimento dos dados de entrada exigidos pelo CS-ASA. Além disso, o sistema computacional oferece facilidades na criação e edição do modelo estrutural, proporcionando, assim, um aumento de produtividade na montagem e geração dos arquivos de dados.

Confirmando esse fato, todas as etapas envolvidas numa pré-análise estrutural, com a consequente geração dos arquivos neutros necessários, foram ilustradas no capítulo anterior através de alguns exemplos. Assim, diante dos bons resultados obtidos, pode-se concluir que o CS-ASA *Preprocessor* alcançou o seu principal objetivo.

Entretanto, mesmo com resultados preliminares bastante satisfatórios, sabe-se que o programa gráfico desenvolvido pode ser melhorado com a incorporação de novos recursos que visam orientar e facilitar o trabalho do analista. Destaca-se, mais uma vez, que o programa desenvolvido é o primeiro passo na obtenção de um pré-processador com recursos gráficos avançados. Apesar da necessidade de alguns ajustes e melhorias na atual

versão, os recursos disponíveis no momento são de extrema utilidade para o usuário do CS-ASA.

Inserida no contexto da linha de pesquisa Mecânica Computacional do PROPEC/UFOP, esta dissertação procurou aplicar a computação gráfica interativa à área da análise estrutural.

Finalizando, enfatiza-se que este trabalho de pesquisa pode ser considerado peça fundamental na obtenção de um sistema computacional que consiga reunir, no futuro, todas as fases que envolvem uma análise estrutural: pré-processamento, análise numérica e pós-processamento.

São sugeridos a seguir desenvolvimentos futuros relacionados com esta dissertação.

### 6.3 Sugestões para Trabalhos Futuros

Espera-se que alunos e pesquisadores venham a se interessar pelo tema abordado nesta dissertação e possam dar continuidade ao desenvolvimento do CS-ASA *Preprocessor*. A inclusão de novos recursos gráficos e o aprimoramento dos existentes são fundamentais. Algumas sugestões para futuras pesquisas são apresentadas abaixo:

- Melhorias da interface gráfica interativa são indispensáveis; por exemplo, a introdução dos mecanismos de *undo* e *redo*, que permitem desfazer as operações realizadas sobre o modelo ou recuperar a última operação desfeita;
- A inclusão de recursos que permitam abrir arquivos neutros já existentes para reedição dos dados armazenados;
- Possibilidade de visualização de estruturas reticuladas planas a partir de arquivos já criados;
- A inclusão de módulos para desenho de pórticos tridimensionais (3D);
- Adicionar também a possibilidade de modelagem de outros tipos de elementos;
- Desenvolvimento de comandos que permitam novas posições ao carregamento uniformemente distribuído, bem como outros tipos de carregamentos não-uniformes, como os triangulares e trapezoidais;
- Ainda no módulo de cargas, futuras implementações devem permitir que o usuário defina o carregamento nos elementos e pontos nodais no sistema local ou global de coordenadas;
- Melhorias das funções de zoom, para ajuste do modelo na tela;

- Sugere-se o desenvolvimento de módulos gráficos interativos, ou mesmo um outro programa gráfico, de pós-processamento de modelos bidimensionais (ou tridimensionais); o objetivo aqui é facilitar a visualização dos resultados (configurações deformadas, tensões resultantes, trajetórias de equilíbrio, resposta transiente, modos de flambagem, modos de vibração, etc.) do CS-ASA;
- Por fim, deve-se trabalhar na direção de um sistema computacional integrado (pré-processador, análise e pós-processador) para análises avançadas estáticas e dinâmicas de estruturas.

# Referências Bibliográficas

Abaqus, 2005. *Theory Manual*. Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc, version 6.2.

AISC, 1986. *Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings*. 1st edn., American Institute of Steel Construction, AISC, Chicago, IL.

Ansys, 2003. *Swanson Analysis Systems Inc.*, P.O. Box 65. Johnson Road, Houston, PA, 15342-0065, version 10, Basic analysis procedures, 2nd edn.

Azevedo, E., e Conci, A., 2005. *Computação Gráfica – Teoria e Prática*. Campus, Rio de Janeiro.

Bergan, P.G., Horrigmoe, G., Krakeland, B., e Soreide, T., 1978. Solution techniques for non-linear finite element problems. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 12, pp. 1677-1696.

Brebbia, C.A., e Ferrante, A.J., 1986. *Computational Methods for the Solution of Engineering Problem*. John Wiley and Sons Ltd.

BS5950, 1990. *Structural Use of Steelwork in Buildings. Part 1*. British Standards Institution, London, England.

Chan, S.L., e Chui, P.P.T., 2000. *Non-linear Static and Cyclic Analysis of Steel Frames with Semi-Rigid Connections*. Elsevier, Oxford.

Chapman, S.J., 2003a. *Fortran 90/95 for Scientists and Engineers*. McGraw-Hill, 2nd edn.

Chapman, S.J., 2003b. *Programação Matlab para Engenheiros*. Thomson. Rio de Janeiro, RJ.

- Chui, P.P.T., e Chan, S.L., 1996. Transient response of moment-resistant steel frames with flexible and hysteretic joints frames. *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 39(3), pp. 221-243.
- Clough, R.W., e Penzien, J., 2003. *Dynamics of Structures*. 3rd edn, Mc-Graw-Hill, New York.
- Cypecad, 1997. *Manual do Usuário*. São Paulo: Multiplus S/C.
- Deitel, H.M., e Deitel, P.W., 2005. *Java como Programar*. 6ª edição, Pearson/Prentice Hall.
- Del Savio, A.A., Martha, L.F., Andrade, S.A.L., Vellasco, G.S., 2005. *Um Sistema Não Linear para Análise de Pórticos Planos Semi-rígidos*, in Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural, Passo Fundo, vol.2, n.1, p.97-125, jan./abr.
- Dieguez, A.B., e Costa, F.O., 2004. *Apostila para Utilização passo a passo do SAP 2000, versão 8.3.5 para Projetos de Edifícios de Concreto Armado*. Trabalho da disciplina Concreto Armado II da Unicamp, Campinas, Brasil.
- Dokanish, M.A., e Subbaraj, K., 1989. A survey of direct time-integration methods in computational structural dynamics – I. Explicit methods. *Computers & Structures*, vol. 32(6), pp. 1371-1386.
- Dokanish, M.A., e Subbaraj, K., 1989. A survey of direct time-integration methods in computational structural dynamics – I. Explicit Methods, *Computer & Structures*, vol. 32(6), pp. 1371-1386.
- Ferreira, R.L., 2008. *Pré-Processador para Modelos Reticulados e Planos do Método dos Elementos Finitos*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil.
- Ferro, N.C.P., 2001. *Um Aplicativo Acadêmico para Análise de Estruturas Reticulares Espaciais*, in XXIX Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia - COBEMGE, Porto Alegre, Rio Grande do Sul.
- Fonseca, F.T., e Pitangueira, R.L.S., 2007. *Insane: uma Plataforma para Computação Científica*. X Encontro de Modelagem Computacional.

- Galambos, T.V., 1998. *Guide to Stability Design Criteria for metal structures*. Structural Stability Research Council, 4th edn., John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Galvão, A.S., 2000. *Formulações Não-lineares de Elementos Finitos para Análise de Sistemas Estruturais Metálicos Reticulados Planos*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Deciv/EM/UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil.
- Galvão, A.S., 2001. *Análise Linear de Estruturas Reticuladas Planas e Espaciais*. Trabalho da disciplina Estudo Orientado do Programa de Pós-Graduação da PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil.
- Galvão, A.S., 2004. *Instabilidade Estática e Dinâmica de Pórticos Planos com Ligações Semi-rígidas*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil.
- Hearn D., e Baker M.P., 2003. *Computer Graphics with OpenGL*. 3rd edn. Prentice Hall.
- Humar, J.L., e Xia, H., 1993. Dynamic response analysis in the frequency domain. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics Structures*, vol. 22, pp. 1-12.
- Kishi, N., e Chen, W.F., 1987. *Moment-rotation Relation of Semi-rigid Connections*. Structural Engineering Report No. CE-STR-87-29, School of Civil Engineering, Purdue Univ., West Lafayette, IN.
- Lui, E.M., e Chen, W.F., 1986. Analysis and behavior of flexible-jointed frames. *Engineering Structures*, vol. 8(2), pp. 107-118.
- Lusas, 1995. *Finite Element System*. McGraw-Hill.
- Machado, F.C.S., 2005. *Análise Inelástica de Segunda-ordem de Sistemas Estruturais Metálicos*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Deciv/EM/UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil.
- Martha, L.F., 1999. *FTOOL: A Structural Analysis Educational Interactive Tool*. Proceedings of the Workshop in Multimedia Computer Techniques in Engineering Education, Technical University of Graz, Austria, p. 51-65.

- Maximiano, D.P., Silva, A.R.D., e Silveira R.A.M., A técnica do fluxo normal aplicada à análise não linear de arcos esbeltos. *Anais do 32º CILAMCE*, Ouro Preto, MG, Brasil, vol. 1, pp. 1–19.
- Metcalf, M., Reid, J., e Cohen, M., 2004. *Fortran 95/2003 Explained*. Oxford University Press, USA, 3rd edn.
- Modak, S., e Sotelino, E.D., 2002. The generalized method for structural dynamics applications. *Advances in Engineering Software*, vol. 33, pp. 565–575.
- Newmark, N.M., 1959. A method of computation for structural dynamics. *Journal of Engineering Mechanics Division*, vol. 85, pp. 67-94.
- Pinheiro, L., 2003. *Análises Não-lineares de Sistemas Estruturais Metálicos Rotulados e Semi-rígidos*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Deciv/EM/UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil.
- Pravia, Z.M.C., e Kripka, M., 1999. *Proposta Metodológica para o Uso e Desenvolvimento de Ferramentas Computacionais no Ensino de Estruturas*, in *Anais do XXVII Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia*, Natal, RN.
- Rangel Netto, J.L.M., Cerqueira, R.F.G. e Celes Filho, W, 2004. *Introdução a Estrutura de Dados: com Técnicas de Programação em C*. Editora Campus, Rio de Janeiro.
- Richard, R.M., e Abbott, B.J., 1975. Versatile elastic-plastic stress-strain formula. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, vol. 101(4), pp. 511-515.
- Rocha, G., 2000. *Estratégias Numéricas para Análise de Elementos Estruturais Esbeltos Metálicos*. Dissertação de Mestrado, Deciv/EM/UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil.
- Rocha, P.A.S., 2006. *Análise inelástica de Segunda Ordem de Estruturas Metálicas com Ligações Semi-rígidas*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Deciv/EM/UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil.
- Santos, M.N., 2007. *Emprego de Elemento Finito Híbrido na Análise Não-linear de Estruturas Metálicas*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Deciv/EM/UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil.
- Santos, W.W.F., 2010. *Interfaces gráficas para análise de estruturas de treliças planas*, in *Anais do XIX Encontro Anual de Iniciação Científica*, Guarapuava, PR.

- Schildt, H., 1995. *C Completo e Total*, 3ª edição. McGraw Hill, 1995.
- Silva, A.R.D., 2009. *Sistema Computacional para Análise Avançada Estática e Dinâmica de Estruturas Metálicas*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Deciv/EM/UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil.
- Silveira, R.A.M., 1995. *Análise de Elementos Estruturais Esbeltos com Restrições Unilaterais de Contato*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil/PUC-Rio, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.
- Subbaraj, K., e Dokanish, M.A, 1989. A survey of direct time-integration methods in computational structural dynamics – II. Implicit Methods, *Computer & Structures*, vol. 32(6), pp. 1387-1401.
- Viera, L.C.L.M, 2004. *Estudo de Algoritmos de Integração Elemento por Elemento para Análise Dinâmica Não-linear de Estruturas*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, Alagoas, Brasil.
- Wilson, L.E., 2002. Three-Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures. *Computers & Structures*, Inc., 3rd edn., Berkeley, Califórnia, USA.
- Yang, Y.B., e Kuo, S.B., 1994. *Theory & Analysis of Nonlinear Framed Structures*. Prentice Hall.
- Ziemian, R.D., e McGuire, W., 2006. *Mastan2 V3.0.7*. New York: John Wiley and Sons.