ANÁLISE ESTÁTICA NÃO-LINEAR DE ESTRUTURAS

MARÍTIMAS ESTAIADAS EM MICROCOMPUTADORES

Allan Chamecki Brik

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (M.Sc.) EM ENGENHARIA CIVIL.

Aprovada por:

Prof. NELSON FRANCISCO FAVILLA EBECKEN
(Presidente)

Prof. EDISON CASTRO PRATES DE LIMA

Prof. LUIZ LANDAU

Prof. ALVARO MAIA DA COSTA

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JUNHO DE 1988

BRIK, Allan Chamecki

Análise Estática Não-Linear de Estruturas Marítimas Estaiadas em Microcomputadores (Rio de Janeiro) 1988.

viii, 181 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Civil, 1988).

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

1. Análise Não-Linear I. COPPE/UFRJ

II. Título (série)

"Education is what survives
when what has been learnt
has been forgotten."

B.F. SKINNER 1904

A meus pais,
Maurício e Clarissa.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Nelson Francisco Favilla Ebecken, pela sua amizade e orientação.

Aos amigos José Alves, Alvaro Coutinho e Breno pelo constante incentivo e ajuda nas horas difíceis desta tese.

Ao Marcio Mourelle e Adilson Benjamin que me auxiliaram em pontos fundamentais no trabalho e ao Gilberto B. Ellwanger por todo seu apoio.

Aos meus colegas Ramiro, Paulo e Lúcia que compartilharam comigo estes 2 anos de mestrado.

A meus tios e primos que me ajudaram muito assim que cheguei no Rio.

A meus pais e irmãos, cujo apoio e incentivo a tudo que faço, representa uma fonte inesgotável de motivação.

A todo pessoal que conheci na COPPE e no CENPES, cujo convívio diário tem me proporcionado constante engrandecimento humano e profissional.

Ao CNPq e CAPES pela ajuda financeira.

Ao Gilberto Luziê e Sueli Braga pelo acabamento deste trabalho.

Ao pessoal do laboratório de dinâmica: Ney, Dudu e Magluta.

Ao Padilha, pelo Apêndice A.

RESUMO DA TESE APRESENTADA À COPPE/UFRJ COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (M.Sc.)

ANÁLISE ESTÁTICA NÃO LINEAR DE ESTRUTURAS MARÍTIMAS ESTAIADAS EM MICROCOMPUTADORES

Allan Chamecki Brik

JUNHO DE 1988

Orientador: Prof. Nelson Francisco Favilla Ebecken
Programa: Engenharia Civil

RESUMO

Implementou-se no presente trabalho um programa, em microcomputador, para análise estática não-linear de estruturas constituídas por elementos de pórtico, treliça e cabos.

A análise de treliças utiliza uma formulação Lagrangeana atualizada permitindo a representação de grandes deslocamentos. No caso de pórtico espacial pode-se considerar não-linearidade física e geométrica. A não-linearidade física é considerada através de uma matriz de rigidez elasto-plástica explícita, baseada na teoria plástica de vigas e em um critério de escoamento nodal.

A rigidez dos cabos é determinada com base nas equações da catenária.

Foram também adicionadas rotinas para o cálculo da ação hidrodinâmica. As características de onda são calculadas pela teoria linear de Airy, a corrente é interpolada linearmente e as forças induzidas nos elementos devido à onda e corrente são calculadas pela fórmula de Morison.

O programa desenvolvido encontra aplicação em torres de transmissão de energia elétrica e em estruturas comumente encontradas na engenharia offshore.

ABSTRACT OF THESIS PRESENTED TO COPPE/UFRJ AS PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE (M.Sc.)

NONLINEAR STATIC ANALYSIS OF OFFSHORE GUYED STRUCTURES ON MICROCOMPUTERS

Allan Chamecki Brik

June, 1988

Chairman: Prof. Nelson Francisco Favilla Ebecken
Department: Civil Engineering

ABSTRACT

This work describes a microcomputer program developed for static, non-linear analysis of guyed structures.

The program may consider geometrically non- linear space truss elements, using an updated Lagrangean formulation for large displacement analysis. Geometrical and material non-linearities may also be considered for space frame elements. The material non-linearity is due to an explicit elastic-plastic stiffness matrix, which is based on the plastic theory of beams and on a nodal yelding criteria.

Catenary equations are used to predict the cable stiffnesses.

Routines for hydrodinamic forces were also added. Linear Airy theory is used to compute wave velocity and acceleration. Induced loads on members due to waver and current action are evaluated by Morison Equation.

The program is very versatile and performs very well on the analysis of transmission lines with cross rope structures and structures commonly found on offshore engineering.

ÍNDICE

		Página
I	- INTRODUÇÃO	1
	I.1 - Revisão e Motivação	1
	I.2 - Descrição do Texto	2
II	- MODELOS E MÉTODOS DE ANÁLISE	7
	II.1 - Elementos de Cabo	7
	II.2 - Ação Hidrodinâmica	18
	II.2.1 - Parâmetros de onda	18
	II.2.2 - Seleção da teoria adequada	21
	II.2.3 - Teoria linear de Airy	21
	II.2.4 - Cargas de corrente	25
	II.2.5 - Cálculo das solicitações	25
	II.2.6 - Fórmula de Morison para elementos de pórtico espacial	27
	II.2.7 - Fórmula de Morison para cabos..	31
	II.3 - Rigidez Elastoplástica para Elementos de Pórtico	37
	II.4 - Análise Incremental - Iterativa	44
III	- DESCRIÇÃO DO SISTEMA IMPLEMENTADO	49
	III.1 - Introdução	49
	III.2 - Entrada e Geração dos Dados	53
	III.3 - Características Gerais	66
	III.3.1 - Análise elastoplástica	66
	III.3.2 - Solução do sistema de equações.	73

IV ANÁLISE DE RESULTADOS E PERFORMANCE 82

IV.1 - Torre de Transmissão de Energia Elétrica do Tipo "Chainette" 82

IV.2 - Análise Não-Linear de Torre de Transmis - são de Energia Elétrica do Tipo "V" Estaiada 91

IV.3 - Análise Elasto-Plástica de Pórtico 105

IV.4 - Análise do Tempo de Execução de uma Plataforma Marítima Fixa em Microcomputador 116

IV.5 - Análise Estática Não-Linear de Plataforma Estaiada para Águas Profundas 127

V - CONCLUSÕES 143

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 148

APÊNDICE A - FLUXOGRAMA 153

APÊNDICE B - ROTINAS DO PROGRAMA CABO/micro 164

APÊNDICE C - CONTEÚDO DOS ARQUIVOS SECUNDÁRIOS 176

APÊNDICE D - CONTEÚDO DOS VETORES DE TRABALHO $\underset{\sim}{IA}$ e $\underset{\sim}{A}$ NO PROCEDIMENTO INCREMENTAL-ITERATIVO ... 179

CAPÍTULO I

I.1 - Revisão e Motivação

A computação é uma ciência que tem apresentado desenvolvimento vertiginoso. Pouco tempo se passou desde seus primórdios ao estado-de-arte que se encontra atualmente.

Os primeiros computadores estavam habilitados a efetuar somente algumas dezenas de operações por segundo. Atualmente, o recente advento de poderosos microcomputadores com diversos co-processadores, tem possibilitado performances de até bilhões de operações por segundo.

Todo este desenvolvimento a nível de armazenamento de memória e velocidade de processamento, tem viabilizado, em microcomputadores, a execução de cálculos complicados que anteriormente só podiam ser executados em computadores de grande porte.

Neste trabalho procurou-se implementar em microcomputador um programa bastante abrangente para análise estática não-linear de estruturas marítimas constituídas por cabos. O programa baseia-se no programa **CABO** implementado no sistema BURROUGHS B6700 da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

O principal motivo nesta implementação foi realizar um estudo de viabilidade quanto ao cálculo de estruturas reais em microcomputadores. Ao programa original **CABO** foram adiciona-

das rotinas para a consideração de forças de onda, corrente e empuxo em elementos de cabo e pórtico espacial.

Além da consideração de forças devido a ação do mar, foi implementada uma rotina para consideração de rigidez elastoplástica explícita para elementos de pórtico espacial.

O programa em microcomputador ficou bastante amplo, podendo calcular estruturas complexas comumente encontradas na engenharia offshore.

As não-linearidades encontradas nestes problemas, resultam em um procedimento iterativo relativamente oneroso. Entretanto, a precisão dos resultados mostrou-se satisfatória.

O programa permite a consideração de estruturas constituídas por cabos, elementos de pórtico espacial não linear físico e geométrico e elementos de treliça não-linear geométrica com formulação Lagrangeana.

I.2 - Descrição do Texto

No capítulo II são apresentados os modelos e métodos de análise adotados. O item II.1 apresenta a formulação de um elemento curvo para cabo, baseado nas equações da catenária. Este elemento foi proposto inicialmente por Peyrot e Goulois baseados em trabalhos anteriores realizados por O'Brien.Através de um procedimento iterativo determinam-se as forças nas extremidades do cabo a partir de: projeções vertical e horizontal, carga

uniformemente distribuída e características físicas e geométricas. A partir das forças nas extremidades, equações da catenária e relações obtidas por integração das deformações ao longo do cabo, pode-se determinar a matriz de rigidez.

O item II.2 apresenta a consideração de forças hidrodinâmicas. É apresentado neste item a ação de ondas, empuxo e corrente sobre um elemento de pórtico espacial, inclinado em relação ao plano de ondas, e sobre um elemento de cabo. O cálculo das velocidades e acelerações devido às ondas utiliza a teoria linear de Airy. A corrente é interpolada linearmente entre as velocidades de corrente na superfície e no fundo. As velocidades de onda e corrente são somadas vetorialmente. As forças nos elementos estruturais, devido à onda e corrente, são calculadas pelas fórmulas de Morison onde os coeficientes de inércia e arraste são determinados globalmente ou elemento por elemento.

O item II.3 apresenta a formulação de não-linearidade física para elementos de pórtico espacial. Esta formulação baseia-se na teoria plástica de vigas e em um critério de escoamento, função de esforços internos. Este enfoque foi adotado por Owen, Hinton (1980), Orbison, McGuire e Abel (1982) e por Creus, Torres e Grochs (1984).

O item II.4 apresenta o método de análise incremental-iterativo de Newton-Raphson, adotado no presente trabalho. Torna-se imprescindível a consideração de métodos iterativos, pois a análise de estruturas marítimas com cabos é essencialmente um problema não-linear.

O capítulo III descreve o sistema implementado - programa **CABO-micro.**

O item III.1 diz respeito ao programa original, características gerais do programa **CABO-micro** e dados gerais como módulos na linkedição, número de overlays e memória central ocupada na versão final.

O item III.2 é sobre a entrada e geração dos dados do programa. É feita uma descrição resumida dos comandos admissíveis. Ainda neste item são comentados dois exemplos ilustrativos com a finalidade de demonstrar a potencialidade do arquivo de dados sem formato fixo. Os exemplos, uma torre para transmissão de energia elétrica e um "riser", foram escolhidos pois os principais comandos aparecem nos seus respectivos arquivos de dados.

O item III.3 apresenta as características gerais do programa. Este item está subdividido em dois subitens: III.3.1 que apresenta a consideração em detalhes de matriz elasto-plástica de pórticos com fluxogramas das rotinas **PLASTIC** e **PBLOCK** e III.3.2 que apresenta a solução do sistema de equações, tecendo considerações sobre o armazenamento em vetor das alturas efetivas das colunas e partição por blocos.

No capítulo IV é analisada a performance do programa mediante resultados de casos comparativos. O primeiro caso tem como propósito aferir o programa mediante resultados obtidos por Peyrot. Neste exemplo é efetuada uma análise completa

de uma torre do tipo "Chainette" para transmissão de energia elétrica. Diversos casos de carregamento, ruptura de estais a recalque nas fundações são considerados. São apresentados gráficos com o histórico de convergência.

No segundo problema apresentado é efetuada a análise de uma torre do tipo "V" estaiada. É considerada uma formulação Lagrangeana para elementos de treliça não-linear geométrica. As rotinas para consideração de não-linearidade física dos elementos de pórtico espacial são testadas no terceiro caso. Realiza-se uma análise elasto-plástica do pórtico estudado por Yura e Lu [16]. Presta-se especial atenção na formação de rótulas plásticas até a carga limite de ruptura (formação de um mecanismo).

A capacidade do programa, em termos de memória disponível e tempo de execução em microcomputador, de um problema real encontrado na engenharia offshore [18],é aferida no quarto caso apresentado. É feita uma análise de uma jaqueta com 111 nós e 406 elementos. A estrutura é submetida a um carregamento incremental, com estudo de plastificação nodal e consequente colapso local. O tempo de execução do mesmo problema em diversos microcomputadores é apresentado.

A última análise é o estudo da estrutura estaiada e submersa encontrada na referência [19].

O capítulo V apresenta as conclusões e propostas para futuras pesquisas. É definida a aplicabilidade do elemento catenária para cabos. Constata-se no programa **CABO**-micro, apresentado neste trabalho, generalidade e flexibilidade para realizar análises semelhantes a outros programas como o **ADEP/ANCAB** implementado na **PETROBRÁS** e outros.

CAPÍTULO II

MODELOS E MÉTODOS DE ANÁLISE

II.1 - Elementos de Cabo

A formulação utilizada no programa **CABO**-micro para o cálculo de estruturas constituídas por cabos baseia-se nas equações da catenária, propostas inicialmente por PEYROT e GOULOIS [2] e posteriormente por JAYARAMAN [1].

As não-linearidades decorrentes de problemas envolvendo cabos, acarretam uma dependência intrínseca entre a matriz de rigidez e a posição do cabo (projeções horizontal e vertical). Consequentemente,deve-se prever a adoção de um procedimento iterativo para a correta determinação de matriz de rigidez.

Para determinado carregamento distribuído e posição das extremidades do cabo, determina-se facilmente a geometria, forças nas extremidades e rigidez tangente.

A figura (II.1) mostra um elemento de cabo quando sujeito a um carregamento de resultante w_ℓ. As seguintes variáveis caracterizam suas propriedades geométricas e físicas:

F_1, F_2, F_3, F_4 - componentes das forças externas T_I e T_j nas direções x_ℓ e y_ℓ

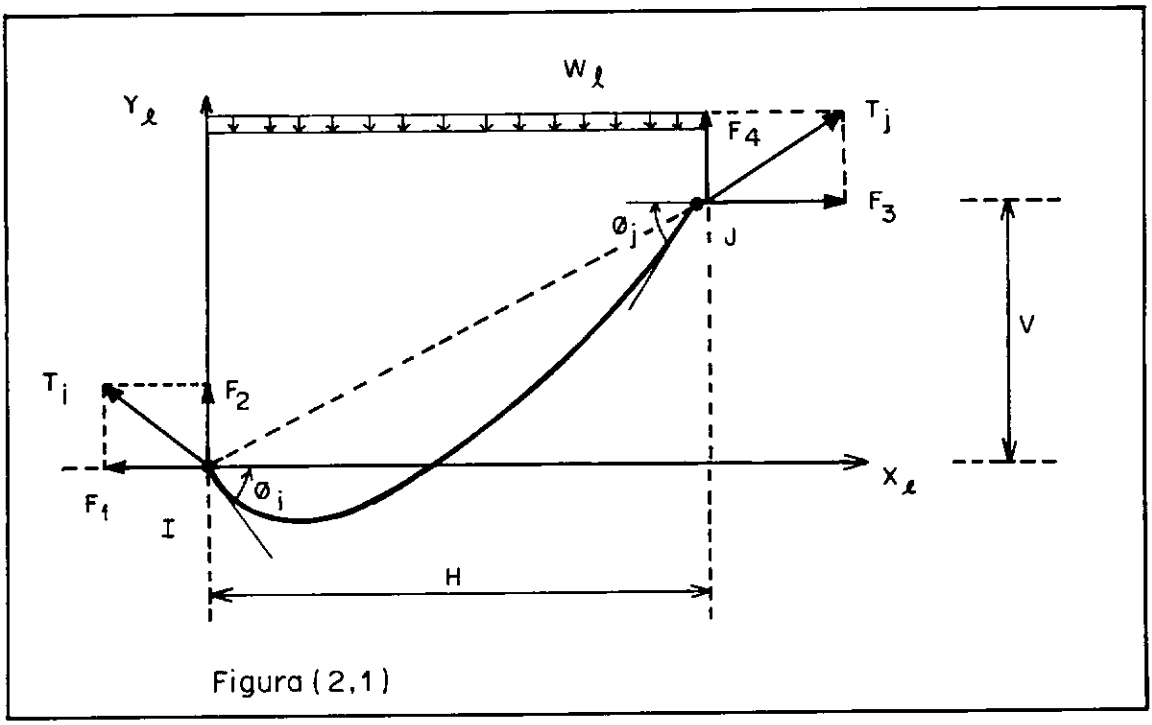


Figura (2,1)

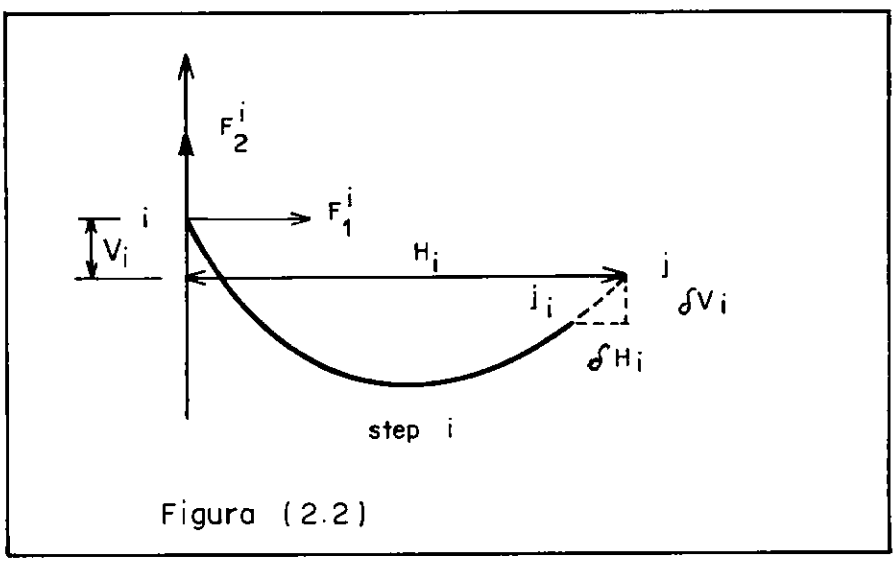


Figura (2.2)

T_I , T_j - forças resultantes nas extremidades do cabo

L - comprimento deformado atual do cabo na temperatura T

L_U - comprimento indeformado atual do cabo na temperatura T

L_{UO} - comprimento indeformado na temperatura 0^0C

H,V - componentes do vetor IJ nas direções dos eixos locais x_ℓ e y_ℓ

w_ℓ - carga resultante por comprimento

E,A - módulo, de elasticidade tangente e área de seção transversal.

$FV = |F_2| = |F_4|$ - forças verticais

$FH = |F_1| = |F_3|$ - forças horizontais

Os algoritmos usados na determinação das forças de extremidade dos cabos são propostos por O'Brien [31] e seguem uma formulação iterativa. As relações da catenária abaixo são utilizadas:

$$L^2 = V^2 + \frac{H^2 \sinh [\lambda]}{\lambda^2} \qquad \text{(II.1)}$$

$$F_2 = \frac{w_\ell}{2} \cdot \left(- V \frac{\cosh [\lambda]}{\sinh [\lambda]} + L \right) \qquad \text{(II.2)}$$

onde:

$$\lambda = \frac{w_\ell \cdot |H|}{2 F_H} \qquad \text{(II.3)}$$

As relações a seguir, obtidas através da integração ao longo do comprimento do cabo, também são utilizadas:

$$H = - F_1 \cdot \left[\frac{L_U}{EA} + \frac{1}{w_\ell} \cdot \ell n \frac{F_4 + T_j}{T_j - F_2} \right] \qquad \text{(II.4)}$$

$$V = \frac{1}{2 EA w_\ell} \cdot (T_j^2 - T_i^2) + \frac{T_j - T_i}{w_\ell} \qquad \text{(II.5)}$$

$$L = L_U + \frac{1}{2 EA w_\ell} \left(F_4 \cdot T_j + F_2 \cdot T_i + F_1^2 \cdot \ell n \frac{F_4 + T_j}{T_i - F_2} \right) \qquad \text{(II.6)}$$

Levando-se em conta as equações de equilíbrio estático do cabo:

$$\begin{aligned} F_4 &= - F_2 + w_\ell \cdot L_U \\ F_3 &= - F_1 \\ T_i &= (F_1^2 + F_2^2)^{1/2} \\ T_j &= (F_3^2 + F_4^2)^{1/2} \end{aligned} \qquad \text{(II.7)}$$

As expressões para H,V,L nas equações (II.4) a (II.6) podem ser escritas somente em função de F_1 e F_2:

$$H = f_h\ [F_1, F_2]$$
$$V = f_v\ [F_1, F_2] \qquad \text{(II.8)}$$
$$L = f_\ell\ [F_1, F_2]$$

Escrevendo **H** e **V** (fórmulas II.4 e II.5) em função de F_1 e F_2, tem-se:

$$H = -F_1 \cdot \left[\frac{L_U}{EA} + \frac{1}{w_\ell} \cdot \ell n \frac{-F_2 + w_\ell\ L_U + \sqrt{F_1^2 + (-F_2 + w_\ell \cdot L_U)^2}}{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 - F_2}} \right] \qquad \text{(II.9)}$$

$$V = \frac{1}{2\ EA\ w_\ell} \cdot (-2\ F_2\ w_\ell\ L_U + w_\ell^2\ L_U) + \frac{\sqrt{F_1^2 + (-F_2 + w_\ell \cdot L_U)^2}}{w_\ell} - \frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2}}{w_\ell} \qquad \text{(II.10)}$$

Pequenas variações nos valores de H e V podem ser expressas pelas suas derivadas primeiras:

$$\delta H^i = \left(\frac{\partial H}{\partial F_1} \right)_i \delta F_1^i + \left(\frac{\partial H}{\partial F_2} \right)_i \delta F_2^i \qquad \text{(II.11)}$$

$$\delta V^i = \left(\frac{\partial V}{\partial F_1} \right)_i \delta F_1^i + \left(\frac{\partial V}{\partial F_2} \right)_i \delta F_2^i \qquad \text{(II.12)}$$

onde o índice i refere-se a iteração de passo i. Para o elemento de cabo da figura (II.2), tem-se F_1^i e F_2^i as forças no passo i para o nó inicial e H^i e V^i as correspondentes projeções determinadas pelas equações (II.9) e (II.10). Se o vetor jj^i exceder uma determinada tolerância, o processo é repetido para novas forças F_1^{i+1} e F_2^{i+1} de modo que:

$$F_1^{i+1} = F_1^i + \alpha_1^i \, \delta H^i + \alpha_2^i \, \delta V^i \qquad \text{(II.13)}$$

$$F_2^{i+1} = F_2^i + \alpha_3^i \, \delta H^i + \alpha_4^i \, \delta V^i \qquad \text{(II.14)}$$

ou na forma matricial:

$$\begin{Bmatrix} F_1^{i+1} - F_1^i \\ F_2^{i+1} - F_2^i \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \delta F_1^i \\ \delta F_2^i \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1^i & \alpha_2^i \\ \alpha_3^i & \alpha_4^i \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta H^i \\ \delta V^i \end{Bmatrix}$$

Nos quais α_1^i, α_2^i, α_3^i e α_4^i são fatores corretivos. Invertendo a parte corretiva das equações (II.13) e (II.14), tem-se:

$$\begin{Bmatrix} \delta H^i \\ \delta V^i \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1^i & \alpha_2^i \\ \alpha_3^i & \alpha_4^i \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} \delta F_1^i \\ \delta F_2^i \end{Bmatrix} \qquad \text{(II.15)}$$

chamando:

$$\begin{bmatrix} \alpha_1^i & \alpha_2^i \\ \alpha_3^i & \alpha_4^i \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} \xi_1^i & \xi_2^i \\ \xi_3^i & \xi_4^i \end{bmatrix}$$

obtem-se:

$$\begin{Bmatrix} \delta H^i \\ \delta V^i \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \xi_1^i & \xi_2^i \\ \xi_3^i & \xi_4^i \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \delta F_1^i \\ \delta F_2^i \end{Bmatrix} \qquad \text{(II.16)}$$

ou

$$\begin{aligned} \delta H^i &= \xi_1^i \ \delta F_1^i + \xi_2^i \ \delta F_2^i \\ \delta V^i &= \xi_3^i \ \delta F_1^i + \xi_4^i \ \delta F_2^i \end{aligned} \qquad \text{(II.17)}$$

Comparando as equações (II.17) com (II.11) e (II.12), fica:

$$\xi_1^i = \left(\frac{\partial H}{\partial F_1} \right)_i = \frac{H^i}{F_1^i} + \frac{1}{w_\ell} \left[\frac{F_4^i}{T_j{}^i} + \frac{F_2^i}{T_i{}^i} \right] \qquad \text{(II.18)}$$

$$\xi_2^i = \left(\frac{\partial H}{\partial F_2} \right)_i = \frac{F_1{}^i}{w_\ell} \cdot \left[\frac{1}{T_j{}^i} - \frac{1}{T_i{}^i} \right] \qquad \text{(II.19)}$$

$$\xi_3^i = \left(\frac{\partial V}{\partial F_1} \right)_i = \frac{F_1{}^i}{w_\ell} \cdot \left[\frac{1}{T_j{}^i} - \frac{1}{T_i{}^i} \right] \qquad \text{(II.20)}$$

$$\xi_4^i = \left(\frac{\partial V}{\partial F_2} \right)_i = - \frac{L_U}{EA} - \frac{1}{w_\ell} \left[\frac{F_4{}^i}{T_j{}^i} + \frac{F_2{}^i}{T_i{}^i} \right] \qquad \text{(II.21)}$$

os α_1^i, α_2^i, α_3^i e α_4^i estão relacionados com ξ_1^i, ξ_2^i, ξ_3^i e ξ_4^i da seguinte forma:

$$\alpha_1^i = \xi_4^i/DET \qquad \text{(II.22)}$$

$$\alpha_2^i = -\xi_3^i/DET \qquad \text{(II.23)}$$

$$\alpha_3^i = -\xi_2^i/DET \qquad \text{(II.24)}$$

$$\alpha_4^i = \xi_1^i/DET \qquad \text{(II.25)}$$

onde

$$DET = \xi_1^i \cdot \xi_4^i - \xi_2^i \cdot \xi_3^i \qquad \text{(II.26)}$$

Um excelente valor inicial para F_1, pode ser obtido substituindo o comprimento deformado da equação (II.1) pelo comprimento indeformado L_U e mantendo-se somente o primeiro termo da série expandida de $\sinh^2[\lambda]/\lambda$. Deve-se notar que o sinal de F_1^0 é sempre contrário ao de H. Com isto obtém-se:

$$F_1^0 = \frac{-w_\ell \cdot H}{2\lambda^0} \qquad \text{(II.27)}$$

onde:

$$\lambda^0 = \left[6 \cdot \left(\frac{L_U^2 - V^2}{H^2} - 1 \right) \right]^{1/2} \qquad \text{(II.28)}$$

Nos casos em que a equação (II.28) não pode ser resolvida pois o comprimento indeformado L_U é menor que a distância da corda ($L_U < \sqrt{H^2 + V^2}$), assume-se $\lambda^0 = 0.2$. Para os cabos verticais adota-se $\lambda^0 = 10^6$.

Deve-se tomar cuidado na escolha de um valor inicial para F_2, pois nos cabos quase horizontais, o valor de F_2 é muito pequeno podendo tornar insignificantes os termos corretivos nas equações (II.13) e (II.14).

Para assegurar a convergência no processo iterativo, nos casos em que o nó inicial i é mais baixo que o nó j ($V<0$), deve-se inverter a nomenclatura dos nós e após atingida a convergência, adotar a nomenclatura original. Com o nó i mais alto que o nó j, V será sempre positivo, podendo-se usar a equação (II.29) abaixo para obter um valor inicial positivo de F_2:

$$F_2^0 = -\frac{w\ell}{2} \cdot \left(\frac{\cosh [\lambda^0]}{\text{senh } [\lambda^0]} + L_U \right) \qquad \text{(II.29)}$$

Após a convergência de F_1 e F_2, isto é, o vetor erro jj^i menor que determinada tolerância, pode-se obter F_3, F_4, T_i e T_j usando as equações (II.7). Com H, V, F_1, F_2, F_3, F_4, T_i e

T_j obtém-se os "ξ^i" e finalmente, através das fórmulas (II.22) - (II.25), os "α^i" que são os coeficientes da matriz de rigidez dos cabos no sistema local.

A figura (II.3) mostra a convergência no processo iterativo.

A matriz de rigidez do elemento de cabo no sistema de referência local será:

$$\underset{\sim}{K} = \begin{bmatrix} -\alpha_1 & -\alpha_2 & 0 & \alpha_1 & \alpha_2 & 0 \\ & -\alpha_4 & 0 & \alpha_2 & \alpha_4 & 0 \\ & & \alpha_5 & 0 & 0 & \alpha_5 \\ & & & -\alpha_1 & -\alpha_2 & 0 \\ & \underset{\sim}{sim} & & & -\alpha_4 & 0 \\ & & & & & \alpha_5 \end{bmatrix}$$

Sendo que o valor da rigidez no plano perpendicular ao plano do cabo (α_5) é igual a:

$$\alpha_5 = \begin{cases} -F_1/H & \text{para} \quad H \neq 0 \\ 1.0 & \text{para} \quad H = 0 \end{cases}$$

O plano do cabo é determinado pela linha que une os nós extremos e pelo plano de atuação da resultante da carga distribuído sobre o cabo.

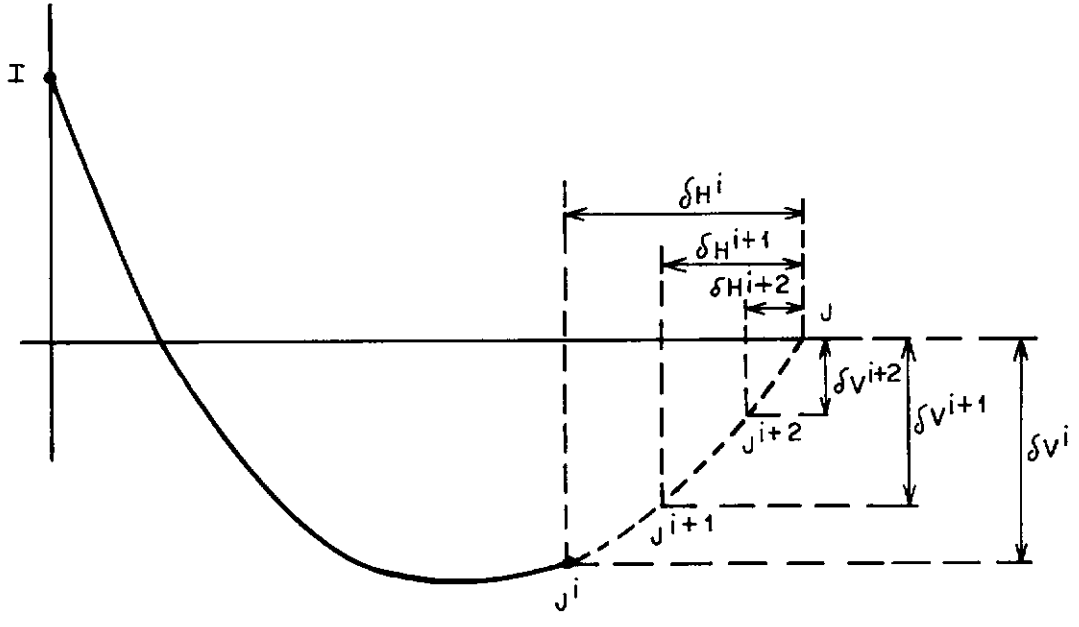


Figura 2.3 $jj^{i+2} < jj^{i+1} < jj^{i}$

II.2 - Ação Hidrodinâmica

II.2.1 - Parâmetros de onda

O estudo aprofundado e uma consideração detalhada do efeito das ondas em estruturas marítimas é fundamental, pois as cargas resultantes da ação das ondas produzem grandes esforços na estrutura e ocorrem de forma repetitiva.

Apesar de diversas teorias para a resolução das equações básicas da hidrodinâmica, adotam-se hipóteses simplificadoras que consideram o fluído irrotacional, incompressível e não viscoso.

Os parâmetros necessários para definir a onda de projeto são: período e altura da onda, nível de águas tranquilas, offset, ângulo de atuação da onda em relação ao eixo x-global, conforme figura II.4 e II.5.

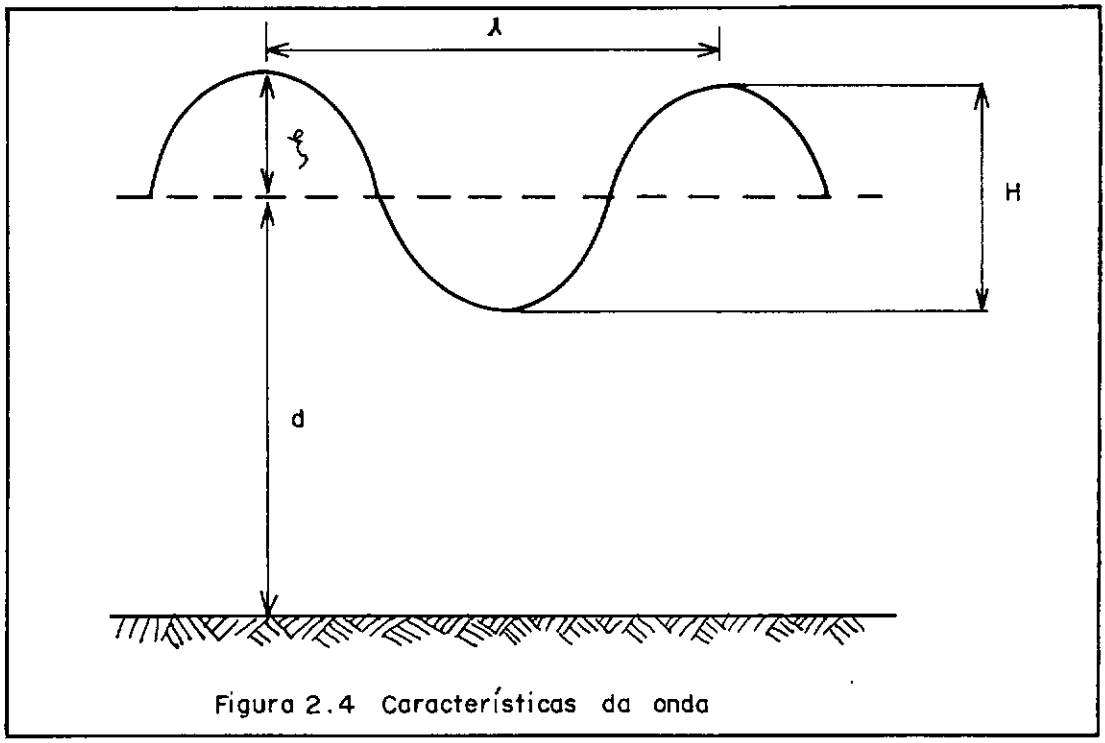


Figura 2.4 Características da onda

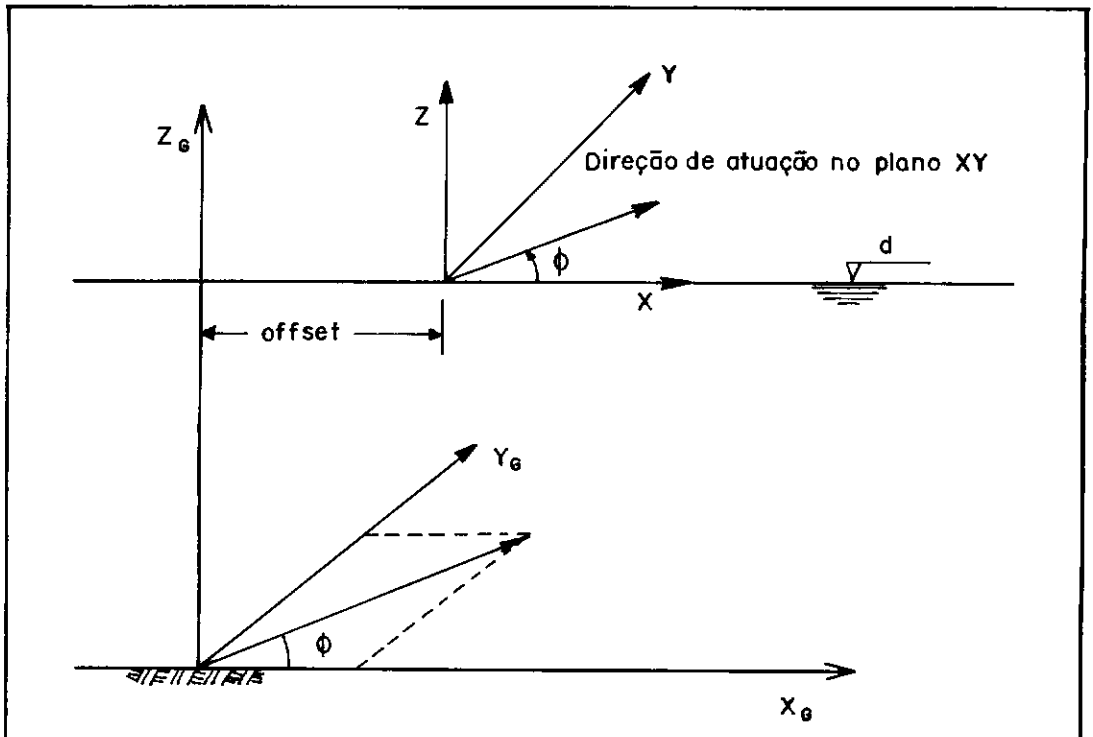


Figura 2.5 – Referencial das ondas

Os parâmetros das figuras anteriores são:

ξ : altura da crista

λ : comprimento da onda

H : altura da onda

d : nível de águas tranquilas.

OFFSET: distância da crista da onda à origem do referencial global.

ϕ : ângulo de atuação da onda em relação ao eixo X-global.

X_G, Y_G, Z_G - eixos globais

x,y,z - eixos locais

II.2.2 - Seleção da teoria adequada

R.G. DEAN [32] apresentou um critério determinando o campo de validade de algumas das teorias disponíveis: Airy, Cnoidal e Stokes V. A determinação da teoria se efetua com base em dois parâmetros: d/T^2 e H/T^2. De acordo com a figura (II.6), comprova-se que a teoria de Stokes V é mais apropriada à águas profundas, enquanto que a Cnoidal dá melhores resultados para águas pouco profundas. Opta-se comumente pela teoria linear de Airy,que foi usada no presente trabalho e será comentada a seguir:

No caso de grandes profundidades pode-se ainda calibrar o perfil de forças obtidas de forma a se produzir resultantes de mesmo valor de outras teorias mais apropriadas.

II.2.3 - Teoria linear de Airy

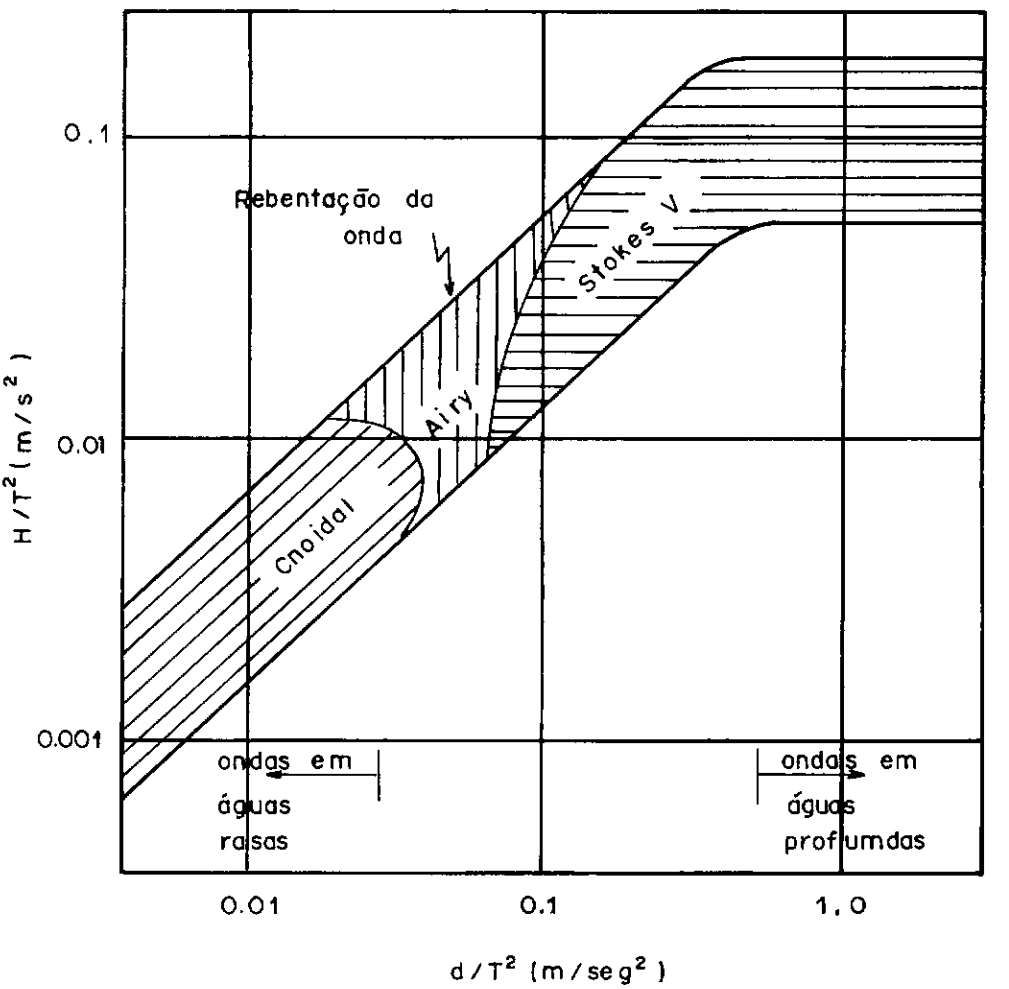
As equações de Airy resultam da equação básica de Laplace e de condições de contorno apropriadas, a saber:condição dinâmica do movimento de fluidos, condição cinemática e impermeabilidade do fundo do mar. Sendo a equação de Laplace na forma:

$$\nabla^2 \phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \qquad \text{(II.30)}$$

onde:

∇^2 = operador Laplaceano bidimensional

ϕ = função potencial de velocidades



H = Altura da onda (em metros)

d = Profundidade da lámina de água (em metros)

T = Período da onda (em segundos)

Figura 2.6
Faixas de validade da teoria de onda

A equação (II.30) representa o comportamento de um fluido incompressível e irrotacional em $\mathbb{R}^2$.

Resolvendo a equação (II.30) que rege o problema, com as condições de contorno, pode-se obter a função ϕ potencial de velocidades e o perfil ξ que descreve a crista. Estas equações são:

$$\phi(x,z,t) = \frac{0,5 \cdot Hg}{w} \cdot \frac{\cosh\,[k(z+d)] \cdot \operatorname{sen}\,(kx - wt)}{\cosh\,(kd)} \qquad \text{(II.31)}$$

$$\xi(x,t) = 0.5\ H \cos\,(kx - wt) \qquad \text{(II.32)}$$

onde:

w = frequência natural da onda

H = altura da onda

k = número da onda

d = nível de águas tranquilas

x,z = coordenadas do ponto

kx-wt = ângulo de fase da onda

A constante da onda, k, pode ser calculada por iterações sucessivas aplicadas à seguinte relação não-linear:

$$w^2 = k \cdot g \tanh\,(kd) \qquad \text{(II.33)}$$

As velocidades e acelerações no meio fluido são determinadas por derivação de (II.31), obtendo-se:

$$V_x = \frac{\partial \phi}{\partial x} = 0.5\ H\ w\ G_1\ (z)\ \cos\ (kx-wt) \qquad (II.34)$$

$$V_z = \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0.5\ H\ w\ G_2\ (z)\ \sin\ (kx-wt) \qquad (II.35)$$

$$a_x = \frac{\partial V_x}{\partial x} = 0.5\ H\ w^2\ G_1\ (z)\ \sin\ (kx-wt) \qquad (II.36)$$

$$a_z = \frac{\partial V_y}{\partial z} = 0.5\ H\ w^2\ G_2\ (z)\ \cos\ (kx-wt) \qquad (II.37)$$

onde a seguinte terminologia se aplica:

V_x = velocidade na direção x

V_z = velocidade na direção z

a_x = aceleração na direção x

a_z = aceleração na direção z

k = número da onda

$G_1(z)$ e $G_2(z)$ - funções exponenciais de decaimento, dependentes da profundidade e definidas por:

$$G_1(z) = \frac{\cosh k\ (z+d)}{\sinh\ kd} \qquad \text{(II.38)}$$

$$G_2(z) = \frac{\sinh k\ (z+d)}{\sinh kd} \qquad \text{(II.39)}$$

onde **z** é a coordenada vertical medida a partir da cota **d**, positiva para cima, sendo **d** a profundidade da lâmina d'água.

II.2.4 - Cargas de corrente

Para a consideração dos efeitos provenientes de correntes marítimas é necessário: velocidade de corrente na superfície, velocidade de corrente no fundo e ângulo de atuação em relação ao eixo x-global (ver figura II.7).

As velocidades de corrente são interpoladas linearmente entre VCSURF e VCBOTT e somadas vetorialmente às velocidades da onda.

II.2.5 - Cálculo das solicitações

Após calculadas as velocidades e acelerações do fluido em movimento, procede-se à etapa de cálculo que consiste em transformar este campo de velocidades e acelerações em forças atuantes sobre os membros estruturais.

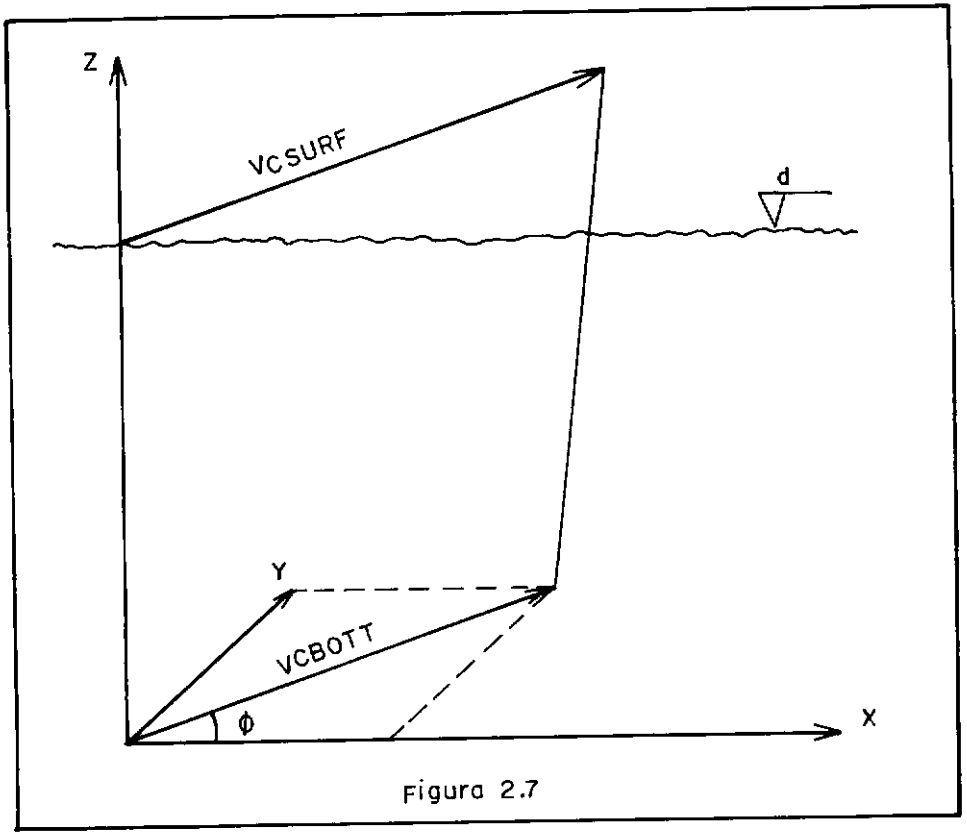


Figura 2.7

Considerou-se neste trabalho somente membros esbeltos ($\lambda/d > 5$), onde as características da onda incidente não são alteradas pelo elemento. Devido ao pressuposto anterior pode-se aplicar a formulação de Morison que é descrita a seguir.

II.2.6 - Fórmula de Morison para elementos de pórtico espacial

Para barras situadas em um plano arbitrário em relação ao plano da onda, as forças devem ser computadas considerando-se apenas as componentes da velocidade e aceleração perpendiculares ao eixo do elemento, desprezando-se as componentes tangenciais ao eixo.

A fórmula de Morison neste caso assume a seguinte forma:

$$\vec{F} = C_M \cdot \rho \cdot \frac{\pi D^2}{4} \vec{a}_n + C_D \cdot \rho \cdot \frac{D}{2} \cdot |\vec{v}_n| \vec{v}_n \qquad \text{(II.40)}$$

ou de forma mais genérica:

$$\begin{Bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{Bmatrix} = C_M \cdot \rho \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{4} \begin{bmatrix} a_x - C_{x.S} \\ a_y - C_{y.S} \\ a_z - C_{z.S} \end{bmatrix} +$$

$$+ C_D \cdot \rho \cdot \frac{D}{2} \cdot [v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 - R^2]^{1/2} \begin{bmatrix} v_x - C_{x.R} \\ v_y - C_{y.R} \\ v_z - C_{z.R} \end{bmatrix}$$

(II.41)

onde:

$\vec{F}$ - vetor de força por unidade de comprimento

C_M - coeficiente de inercia

C_D - coeficiente de arraste

ρ - densidade do fluido

D - diâmetro do elemento

$\vec{a}_n$ - vetor de componentes normais de aceleração

$\vec{v}_n$ - vetor de componentes normais de velocidade

$|\vec{v}_n|$ - módulo de $\vec{v}_n$

Na fórmula (II.41) temos (ver figura II.8):

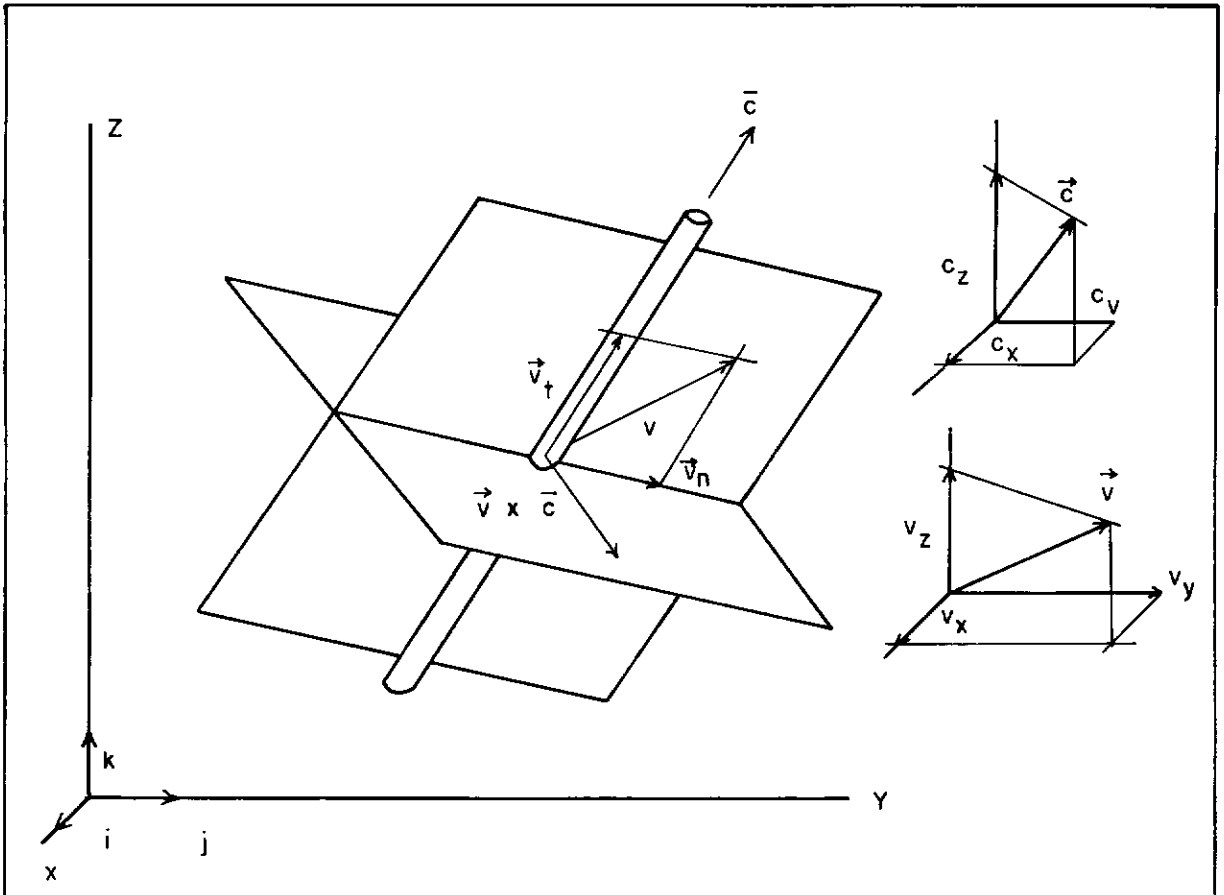


Figura 2.8
Relações geométricas entre $\vec{v}$ e $\vec{c}$

v_x, v_y, v_z - projeções do vetor velocidades

a_x, a_y, a_z - projeções do vetor acelerações

C_x, C_y, C_z - cossenos diretores

$$S = a_x \cdot C_x + a_y \cdot C_y + a_z \cdot C_z$$

$$R = v_x \cdot C_x + v_y \cdot C_y + v_z \cdot C_z$$

O primeiro termo da equação (II.40) é denominado força de inércia e é proporcional à aceleração das partículas fluídas. O segundo termo é denominado força de arraste e é proporcional ao quadrado da velocidade das partículas fluídas.

Os coeficientes $\mathbf{C_M}$ e $\mathbf{C_D}$ dependem diretamente do número de Reynolds (R_e).

$$R_e = \frac{\vec{v}_n \cdot D}{\nu} \qquad \text{(II.42)}$$

onde:

R_e = número de Reynolds

$\vec{v}_n$ = velocidade normal ao elemento

D = diâmetro do elemento

ν = viscosidade cinemática do fluido

Após a determinação das forças nos elementos estruturais pela fórmula de Morison, deve-se proceder como descrito resumidamente a seguir: (ver [26])

1º) Determinação do ponto de contato onda-elemento, podendo haver 3 casos: elemento molhado, seco ou parcialmente molhado.

2º) Rotação de forças globais para referencial local ficando determinados 2 planos de carga e uma distribuição axial (ver figura II.9)

3º) Consideração de uma distribuição parabólica entre os 3 pontos de cada elemento.

4º) Determinação de ações de engastamento perfeito nos nós extremos.

II.2.7 - Fórmula de Morison para cabos

Em sua forma vetorial a fórmula de Morison para cargas distribuídas em elementos de cabos será:

$$\begin{Bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{Bmatrix} = C_M \cdot \rho_w \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \begin{Bmatrix} a_{nx} \\ a_{ny} \\ a_{nz} \end{Bmatrix} +$$

$$+ \frac{1}{2} \cdot C_N \cdot \rho_w \cdot D \cdot |v_n| \begin{Bmatrix} v_{nx} \\ v_{nx} \\ v_{nz} \end{Bmatrix} +$$

$$+ \frac{1}{2} \cdot C_T \cdot \rho_w \cdot D \, |v_t| \begin{Bmatrix} v_{tx} \\ v_{ty} \\ v_{tz} \end{Bmatrix} \qquad \text{(II.43)}$$

onde:

C_M - coeficiente de inércia

C_N - coeficiente de arraste na direção normal

C_T - coeficiente de arraste na direção tangencial

ρ_w - densidade do fluido

D - diâmetro do cabo

$\underset{\sim}{a}_n$ - vetor de acelerações de partículas fluidas normais aos elementos

$\underset{\sim}{v}_n$ - vetor velocidade relativa fluido-estrutura na direção normal ao elemento

$|v_n|$ - módulo de $\underset{\sim}{v}_n$

$\underset{\sim}{v}_t$ - vetor velocidade relativa fluido-estrutura na direção tangencial ao elemento

$|v_t|$ - módulo de $\underset{\sim}{v}_t$

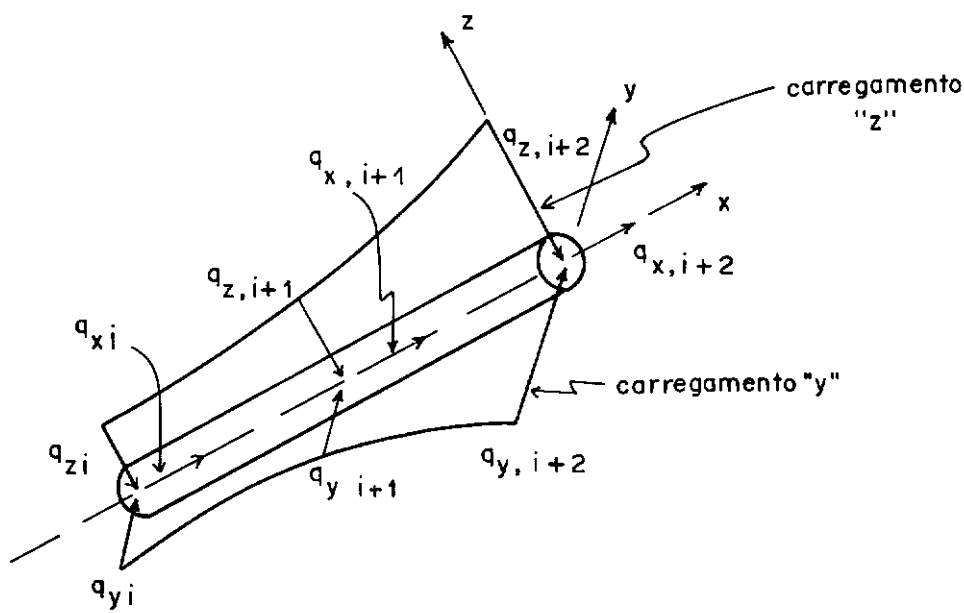


Figura 2.9 Planos de carregamento nas coordenadas locais

Ao aplicar a fórmula de Morison a cabos, deve-se levar em conta uma parcela de inércia tangencial.

Os coeficientes normal e tangencial (C_N e C_T respectivamente) podem ser fornecidos pelo usuário ou calculados pelo programa em função do número de Reynolds.

A carga distribuída atuando sobre o elemento de cabo deve ser constante e é obtida pela média aritmética entre os valores nodais em cada direção. Assim:

$$\begin{Bmatrix} w_x \\ w_y \\ w_z \end{Bmatrix} = 0.5 \begin{bmatrix} f_{xi} + f_{xj} \\ f_{yi} + f_{yj} \\ f_{zi} + f_{zj} \end{bmatrix} \qquad \text{(II.44)}$$

f_{xi} - força na direção global x. nó inicial

f_{xj} - força na direção global x. nó final

f_{yi} - força na direção global y. nó inicial

f_{yj} - força na direção global y. nó final

f_{zi} - força na direção global z. nó inicial

f_{zj} - força na direção global z. nó final

Para elementos de cabo parcialmente molhados, a carga uniformemente distribuída é igual a carga calculada no nó molhado vezes um fator corretivo:

$$\begin{Bmatrix} w_x \\ w_y \\ w_z \end{Bmatrix} = C^* \begin{Bmatrix} f_{NM\ x} \\ f_{NM\ y} \\ f_{NM\ z} \end{Bmatrix} \qquad \text{(II.45)}$$

onde:

$f_{NM\ x}$ = força no nó molhado na direção global X.

$f_{NM\ y}$ = força no nó molhado na direção global Y.

$f_{NM\ z}$ = força no nó molhado na direção global Z.

C = fator corretivo igual a $\ell m/\ell$.

ℓm = comprimento molhado.

ℓ = comprimento seco.

Devido a simplificação que ocorre quando se considera o comprimento molhado do elemento de cabo na corda que une os nós extremos (ℓ_{m_1} na figura II.10) ao invés do comprimento molhado real (ℓ_{m_2}), deve-se prever uma discretização mais refinada na zona de contato fluido-estrutura (ver figura II.11), visando minimizar os erros.

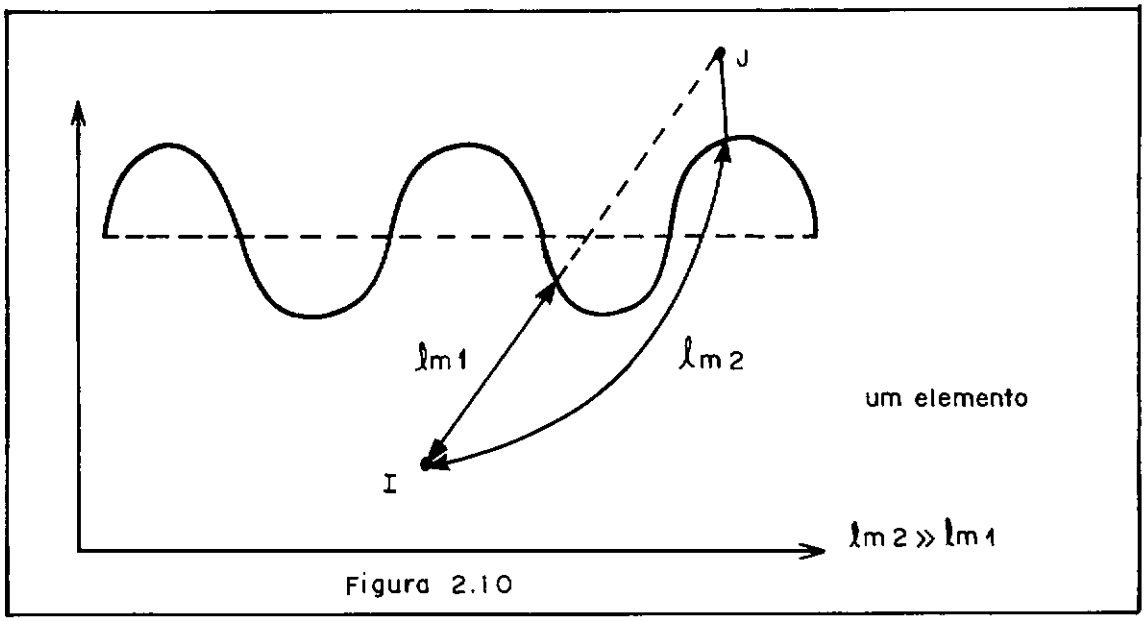


Figura 2.10

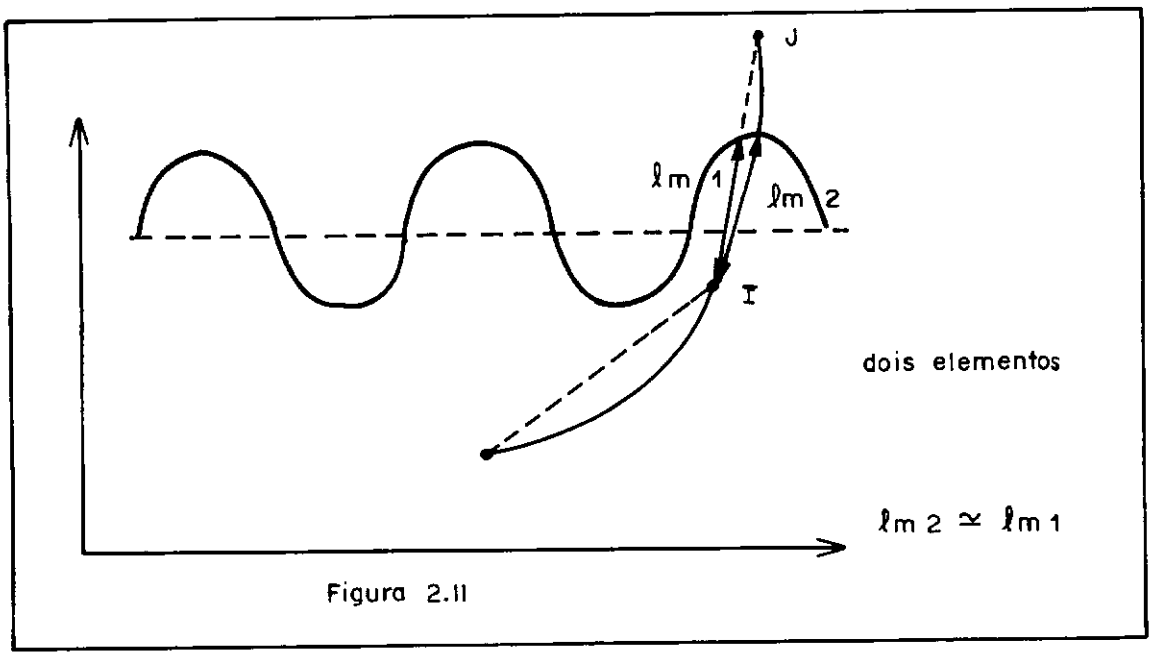


Figura 2.11

II.3 - Rigidez Elastoplástica para Elementos de Pórtico

Foi implementado no presente trabalho um elemento finito de pórtico com rigidez elasto-plástica [22]. Sua formulação baseia-se na teoria plástica de vigas e em um critério de escoamento nodal dependente de esforços internos.

Dentre as hipóteses básicas adotadas nesta formulação, deve-se ressaltar:

1º) Não há cargas aplicadas entre os nós do elemento.

2º) Pode ocorrer plastificação apenas nos nós extremos.

3º) Critério de escoamento da seção é função apenas de esforços internos como momentos fletores e esforço normal.

O procedimento para determinação da matriz de rigidez elasto-plástica de elementos de pórtico espacial pode ser sumarizada da seguinte forma:

a) Determinação dos esforços não nulos atuantes no nó. (Considerar apenas força normal e momentos fletores).

b) Determinação da função de escoamento inicial do nó (f_o), segundo a tabela a seguir:

VALORES DA FUNÇÃO f_o

ESFORÇOS NÃO NULOS ATUANTES NO NÓ	f_o
N	0.8
M_y	S_y/Z_y
M_z	S_z/Z_z
N e M_y	S_y/Z_y
N e M_z	S_z/Z_z
M_y e M_z	$0.5^* \left(\frac{S_y}{Z_y} + \frac{S_z}{Z_z} \right)$
N, M_y e M_z	$0.5^* \left(\frac{S_y}{Z_y} + \frac{S_z}{Z_z} \right)$

onde:

S_y - módulo elástico da seção em relação ao eixo y

S_z - módulo elástico da seção em relação ao eixo z

Z_y - módulo plástico da seção em relação ao eixo y

Z_z - módulo plástico da seção em relação ao eixo z

c) Determinação do critério de escoamento do nó inicial e final (f_{ei} e f_{ej}) de determinado elemento.

$$f_{ei} = \frac{N}{N_p} + \frac{(M_y)_i}{M_{py}} + \frac{(M_z)_i}{M_{pz}} \qquad \text{(II.46)}$$

$$f_{ej} = \frac{N}{N_p} + \frac{(M_y)_j}{M_{py}} + \frac{(M_z)_j}{M_{pz}} \qquad \text{(II.47)}$$

onde:

f_{ei} - função de escoamento do nó inicial

f_{ej} - função de escoamento do nó final

N - esforço normal na barra (valor absoluto)

M_{py} - momento fletor de plastificação em relação ao eixo y

M_{pz} - momento fletor de plastificação em relação ao eixo z

N_p - força axial de plastificação

M_y - momento fletor em relação ao eixo y (valor absoluto) no nó "i" ou nó "j".

M_z - momento fletor em relação ao eixo z (valor absoluto) no nó "i" ou nó "j".

Os valores de plastificação N_p, M_{py} e M_{pz} são calculados da seguinte forma:

$$N_p = A.\ \sigma_e$$

$$M_{py} = Z_y.\sigma_e \qquad \text{(II.48)}$$

$$M_{pz} = Z_z.\sigma_e$$

onde:

σ_e = tensão de escoamento do material

d) Determinação dos parâmetros α e β:

$$\alpha = \begin{cases} 0 & \text{para } f_{ei} < f_{oi} \\ \dfrac{(f_{ei}-f_{oi})}{(1\ -f_{oi})} & \text{para } f_{oi} \leq f_{ei} \leq 1 \\ 1 & \text{para } f_{ei} > 1 \end{cases} \qquad \text{(II.49)}$$

$$\beta = \begin{cases} 0 & \text{para } f_{ej} < f_{oj} \\ \dfrac{(f_{ej}-f_{oj})}{(1\ -f_{oj})} & \text{para } f_{oj} \leq f_{ej} \leq 1 \\ 1 & \text{para } f_{ej} > 1 \end{cases} \qquad \text{(II.50)}$$

e) Determinação do módulo de elasticidade variável (E_V) para considerar mudanças na rigidez axial no caso de plastificação de um dos nós.

$$E_V = (1 - \alpha - \beta + \alpha \cdot \beta)\ E + (\alpha + \beta - \alpha\beta)\ E_T \qquad \text{(II.51)}$$

onde:

E = módulo de elasticidade longitudinal

E_T = módulo de endurecimento

$0 \leqslant \alpha \leqslant 1$

$0 \leqslant \beta \leqslant 1$

f) Determinação dos parâmetros "f".

$$f_1 = 16 - 8\alpha - 8\beta + 3\alpha\beta$$

$$f_2 = 2\ (8 - 7\alpha - 7\beta + 6\alpha\beta)$$

$$f_3 = 2\ (8 - 8\alpha - 6\beta + 6\alpha\beta)$$

$$f_4 = 2\ (8 - 6\alpha - 8\beta + 6\alpha\beta) \qquad \text{(II.52)}$$

$$f_5 = 2\ (8 - 8\alpha - 5\beta + 5\alpha\beta)$$

$$f_6 = 2\ (8 - 5\alpha - 8\beta + 5\alpha\beta)$$

$$f_7 = 16\ (1 - \alpha - \beta + \alpha\beta)$$

g) Determinação dos parâmetros "C".

$$C_1 = \frac{f_2}{f_1} \quad ; \quad C_2 = \frac{f_3}{f_1} \quad ; \quad C_3 = \frac{f_4}{f_1}$$

$$C_4 = \frac{f_5}{f_1} \quad ; \quad C_5 = \frac{f_6}{f_1} \quad ; \quad C_6 = \frac{f_7}{f_1} \qquad \text{(II.53)}$$

h) Determinação da rigidez elastoplástica $\underset{\sim}{KP}$.

$$\underset{\sim}{KP} = \begin{bmatrix}
K_{11} & & & & & & K_{17} & & & & & \\
 & K_{22} & & & K_{26} & K_{28} & & & & & K_{2,12} \\
 & & K_{33} & K_{35} & & & K_{39} & & K_{3,11} & & \\
 & & & K_{44} & & & & K_{4,10} & & & \\
 & & & & K_{55} & & K_{59} & & K_{5,11} & & \\
 & & & & & K_{66} & K_{68} & & & & K_{6,12} \\
 & & & & & & K_{77} & & & & \\
 & \underset{\sim}{sim} & & & & & K_{88} & & & & K_{8,12} \\
 & & & & & & & K_{99} & K_{9,11} & & \\
 & & & & & & & & K_{10,10} & & \\
 & & & & & & & & & K_{11,11} & \\
 & & & & & & & & & & K_{12,12}
\end{bmatrix}$$

onde:

$$K_{11} = \frac{E_V \cdot A_x}{L}$$

$$K_{77} = \frac{E_V \cdot A_x}{L}$$

$$K_{22} = \frac{12 \cdot EI_z}{L^3} \cdot C_1$$

$$K_{88} = \frac{12 \cdot EI_z}{L^3} \cdot C_1$$

$$K_{33} = \frac{12 \cdot EI_y}{L^3} \cdot C_1$$

$$K_{99} = \frac{12 \cdot EI_y}{L^3} \cdot C_1$$

$$K_{44} = \frac{G \cdot I_x}{L}$$

$$K_{10,10} = \frac{G \cdot I_x}{L}$$

$$K_{55} = \frac{4\ EI_y}{L} \cdot C_4$$

$$K_{11,11} = \frac{4\ EI_y}{L} \cdot C_5$$

$$K_{66} = \frac{4\ EI_z}{L} \cdot C_4$$

$$K_{12,12} = \frac{4\ EI_z}{L} \cdot C_5$$

$$K_{17} = \frac{-E_V \cdot A_x}{L}$$

$$K_{4,10} = \frac{-G \cdot I_x}{L}$$

$$K_{26} = \frac{6\ EI_z}{L^2} \cdot C_2$$

$$K_{5,9} = \frac{6\ EI_y}{L^2} \cdot C_2$$

$$K_{28} = \frac{-12\ EI_z}{L^3} \cdot C_1$$

$$K_{5,11} = \frac{2\ EI_y}{L} \cdot C_6$$

$$K_{2,12} = \frac{6\ EI_z}{L^2} \cdot C_3$$

$$K_{6,12} = \frac{2\ EI_z}{L} \cdot C_6$$

$$K_{35} = \frac{-6\,EI_y}{L^2} \cdot C_2 \qquad K_{8,12} = \frac{-6\,EI_z}{L^2} \cdot C_3$$

$$K_{39} = \frac{-12\,EI_y}{L^3} \cdot C_1 \qquad K_{9,11} = \frac{6\,EI_y}{L^2} \cdot C_3$$

$$K_{3,11} = \frac{-6\,EI_y}{L^2} \cdot C_3$$

sendo:

I_x = constante torcional do elemento ($I_y + I_z$)

I_y = momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo y

I_z = momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo z

A_x = área da seção transversal

L = comprimento do elemento

G = módulo de elasticidade transversal

$C_1,\ldots,C_6$ = parâmetros corretivos para a consideração de não linearidade física:

1º) Elemento totalmente elástico → $C_1,\ldots,C_6 = 1$

2º) Elemento em escoamento → $0 < C_1,\ldots,C_6 \leq 1$

3º) Elemento totalmente plástico → $C_1,\ldots,C_6 \cong 0$

II.4 - Análise Incremental-Iterativa

Devido aos grandes deslocamentos que ocorrem em estruturas constituídas por cabos, resultando em não-linearidades geométricas, é indispensável a consideração de um procedimen

to incremental-iterativo na resolução do sistema de equações. O método utilizado no presente trabalho e abaixo descrito foi o de Newton-Raphson.

O problema não linear é resolvido considerando-se trechos lineares onde as equações de equilíbrio são escritas de forma incremental: (ver figura II.12).

$$\underset{\sim}{K} \cdot \Delta\underset{\sim}{U} = \Delta\underset{\sim}{R} \qquad \text{(II.54)}$$

onde:

$\underset{\sim}{K}$ - matriz de rigidez tangente, função dos deslocamentos.

$\Delta\underset{\sim}{U}$ - deslocamento incremental obtido em cada trecho considerado.

$\Delta\underset{\sim}{R}$ - vetor de desequilíbrio. Diferença entre as forças externas aplicadas e as forças internas resistentes devido ao estado de tensões nos elementos.

No equilíbrio, $\Delta\underset{\sim}{R}$ deve ser nulo pois assim as cargas externas aplicadas, somadas às forças internas resistentes igualam zero.

Se a soma $\Delta\underset{\sim}{R}$ não é nula, isto significa que ainda não foi alcançado o equilíbrio naquele incremento e haverá um campo de deslocamentos $\Delta\underset{\sim}{U}$ produzido por este desequilíbrio. Este campo de deslocamentos $\Delta\underset{\sim}{U}$ será calculado pela fórmula (II.54). Como os termos $\underset{\sim}{K}$ e $\Delta\underset{\sim}{R}$ são funções do campo de deslocamentos totais atualizados $\underset{\sim}{U}$ é necessário o emprego de uma formulação iterativa da forma:

$$\underset{\sim}{K}^{i}_{t+\Delta t} \quad \Delta\underset{\sim}{U}^{i+1} = \underset{\sim}{P}^{t+\Delta t} - \underset{\sim}{F}^{i}_{t+\Delta t} \tag{II.55}$$

onde na fórmula acima temos uma formulação incremental-iterativa pois o equilíbrio é alcançado para cada incremento de carga $t+\Delta t$ (ver figura II.13). $\underset{\sim}{K}^{i}$ e $\underset{\sim}{F}^{i}$ são funções de $\underset{\sim}{U}^{i}$. O termo $\underset{\sim}{P}^{t+\Delta t}$ é o vetor de cargas externas aplicadas. O termo $\underset{\sim}{F}^{i}_{t+\Delta t}$ deve ser recalculado em cada nova iteração i, da seguinte forma:

$$\underset{\sim}{F}^{i} = \sum_{1}^{n^{o}\,elem.} \underset{\sim e\ell}{K}^{i}_{e\ell} \; (\underset{\sim}{U}) \; \underset{\sim e\ell}{U}^{i}_{e\ell} \tag{II.56}$$

onde:

$\underset{\sim e\ell}{K}^{i}_{e\ell}$ - matriz de rigidez de elemento, função dos deslocamentos $\underset{\sim}{U}^{i}$

$\underset{\sim e\ell}{U}^{i}_{e\ell}$ - deslocamentos nodais da iteração i. É um subvetor do campo de deslocamentos totais atualizados $\underset{\sim}{U}$ que contém os deslocamentos dos nós do elemento.

O procedimento incremental-iterativo pode ser descrito da seguinte forma:

a) Para IT = 1,N° de INCREMENTOS DE CARGA

b) ITER=0

c) Calculo do vetor de forças internas resistentes $\underset{\sim}{F}_{i}$

d) Reavaliação e montagem da matriz de rigidez global

e) Triangularização do sistema de equações simultâneas

f) Montagem do vetor de desequilíbrio $\underset{\sim}{R}$

g) Resolução do sistema de equações $\underset{\sim}{K} \cdot \Delta\underset{\sim}{U} = \underset{\sim}{R}$ em $\Delta\underset{\sim}{U}$.

h) ITER=ITER+1

i) Atualização do vetor de deslocamentos:

$$\underset{\sim}{U}^{i+1} = \underset{\sim}{U}^{i} + \Delta\underset{\sim}{U}$$

j) Teste de convergência: Se $\left\| \dfrac{\sqrt{\overline{\Delta U^2}}}{\sqrt{\overline{U^2}}} \right\| <$ TOLERANCIA

falso vá para o item c).

k) Imprime deslocamentos, tensões e reações para o nível de carga IT

ℓ) fim do loop IT

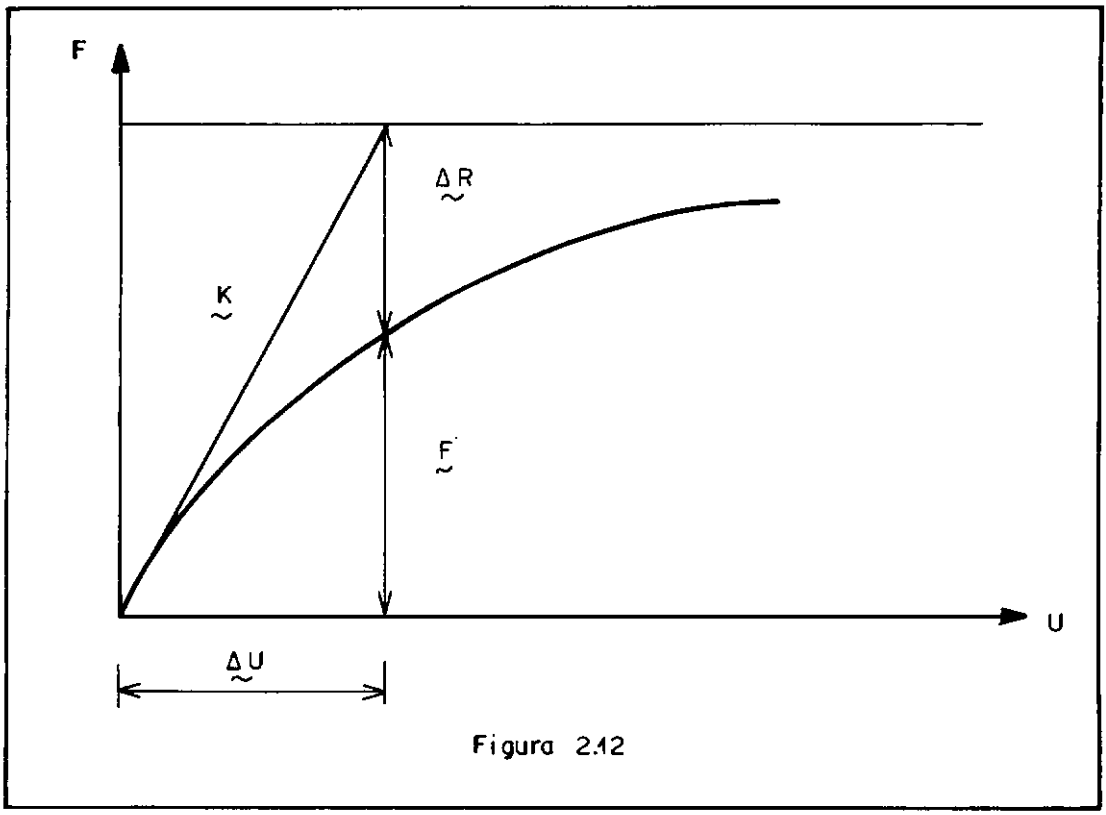


Figura 2.12

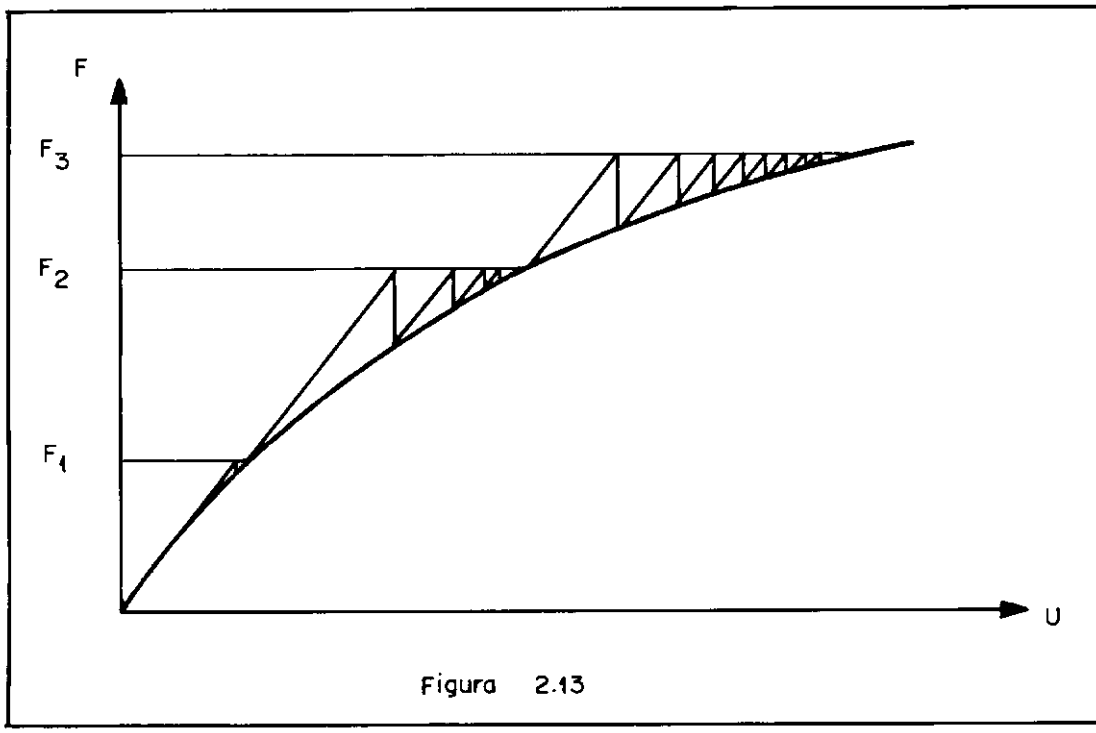


Figura 2.13

CAPÍTULO III

DESCRIÇÃO DO SISTEMA IMPLEMENTADO

III.1 - Introdução

O programa **CABO**-micro, implementado em microcomputadores compatíveis com o IBM-PC, foi desenvolvido a partir de um programa já existente no Burroughs B6700 da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Diversas modificações foram necessárias, principalmente no que tange à manipulação de arquivos e variáveis alfanuméricas.

Ao programa original foram adicionadas rotinas para a consideração de forças hidrodinâmicas e não linearidade física de elementos de pórtico espacial.

Durante a fase inicial do trabalho, procurou-se manter inalterada a estrutura original do programa, entretanto isto se mostrou inviável pois em sua versão final o **CABO**-micro ficou ocupando muita memória principal, tornando imprescindível o uso constante de memória secundária. Para reduzir área de memória central, é feito "overlay". Considerações mais detalhadas sobre o problema de restrição de memória são tecidas no capítulo de conclusões.

As rotinas são escritas em FORTRAN 77, sendo que o programa ocupa 728 KBytes e são feitos 6 níveis de "overlay".

Os módulos são:

a) **MAIN** - programa gerenciador

b) **P1.....P13** - rotinas de entrada, geração de dados, ação hidrodinâmica e criação de arquivos para o plotter.

c) **C1.....C7** - rotinas de cálculo. Análise não linear incremental-iterativa.

Para formar o programa executável, deve-se realizar o acoplamento dos módulos da seguinte forma:

```
LINK MAIN+P1+P2+P3+P4+(P5)+(P6+P7+P8+P9)+P10+(P11+P12+P13)+
     +C1+C2+C3+(C4)+C5+C6+C7.
```

Os módulos sem parênteses são denominados raízes. Os demais compartilham área de memória e são carregados na memória central somente quando necessário.

Dentre as principais características do programa, pode-se enumerar:

1º) O programa é constituído por 124 rotinas, (ver apêndice A), sendo que a parte de entrada e geração dos dados é gerenciada pela rotina **INPUT**, enquanto que os cálculos e a resolução do sistema de equações simultâneas, pela rotina **CALCUL**.

2º) A entrada dos dados é em arquivo de formato livre sendo que os dados são estruturados em blocos.

3º) Pode-se aproveitar a simetria da estrutura para gerar os dados geométricos através de comandos especiais.

4º) As cargas nodais ou nos elementos podem ser aplicados de uma só vez, ou através de incrementos segundo uma função dada.

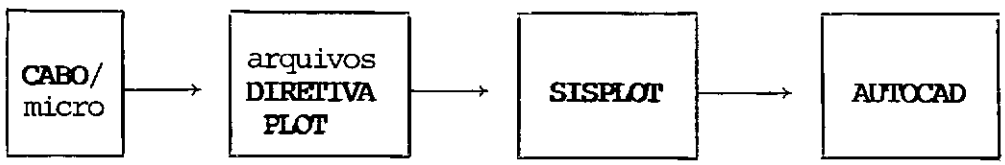
5º) Os dados são verificados para impedir processamentos inválidos. Mensagens de erro são devidamente impressas permitindo ao usuário uma rápida correção nos dados.

6º) A presença de não linearidades, devido aos grandes deslocamentos que ocorrem em estruturas constituídas por cabos, torna indispensável a utilização de algoritmos iterativos. O programa usa o algoritmo de Newton - Raphson com a matriz de rigidez tangente sendo reavaliada a cada iteração, a cada incremento de carga ou "sem reavaliação". Em cada incremento de carga, serão impressos os deslocamentos nodais, os esforços nos elementos e as reações nos apoios, sempre que atingida a norma para convergência. Além disto, em cada incremento, pode-se atualizar um arquivo com os esforços axiais máximos e mínimos em cada elemento.

7º) O número máximo de nós, barras, cabos, molas e carregamentos é determinado automaticamente de acordo com o tamanho do vetor de trabalho $\underset{\sim}{A}$, especificado na rotina **MAIN**. Esta alocação dinâmica de variáveis na memória faz com que os limites máximos do programa sejam bastante flexíveis.

8º) O sistema de equações é resolvido com o auxílio de memória secundária pois utiliza a técnica de altura de colunas efetivas ("skyline") com subdivisão automática em blocos particionados sempre que a memória central for insuficiente. Uma descrição mais detalhada do processo é feita no item III.3.2.

9º) Os desenhos de vistas e perspectivas, da geometria dada ou da geometria deformada, devido à aplicação das cargas, são feitos por dois programas pós-processadores (**SISPLOT** e **AUTOCAD**), com base nos dados que o programa CABO grava em 2 arquivos sequenciais denominados: **DIRETIVA** e **PLOT**:



III.2 - Entrada e Geração dos Dados

Os dados estão organizados de forma que pode-se analisar a mesma estrutura submetida a diversos casos de carregamento. As etapas básicas em cada análise com o programa **CABO-micro** são (ver figura III.1):

a) Formação do modelo geométrico

b) Consideração dos carregamentos

c) Análise não-linear

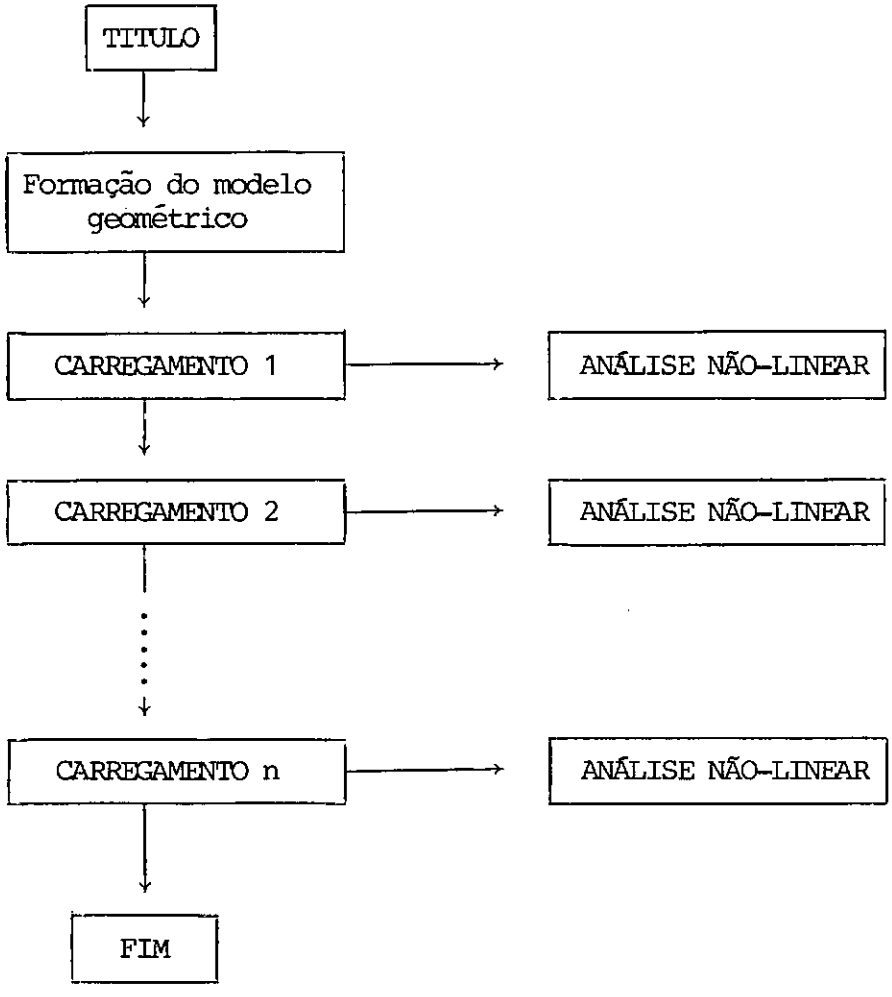


Figura III.1 - Estrutura básica

Os comandos do programa são em forma de bloco, sendo que cada bloco pode ter uma ou mais linhas. Os comandos devem sempre começar com o nome e terminar com um delimitador (/ ou W) quando tiver mais de uma linha.

Os principais comandos com uma breve explanação são apresentados a seguir. Entre parênteses estão códigos cujo significado é:

b: comando é um **bloco**, isto é, possue mais que uma linha.

ℓ: **linha**. Comandos que dispensam delimitadores.

m: pertence à fase de formação do modelo geométrico.

c: pertence à um carregamento.

Para uma descrição mais detalhada dos comandos, reportar-se ao manual apropriado [27].

1) **TÍTULO** - título da análise (ℓ,m)

2) **NOS** - coordenadas dos nós e lista de nós suprimi - dos (b,m)

3) **REN**Umeração-numeração dos nós para otimizar as alturas das colunas efetivas (b,m)

4) **LIBE**rações - condição de contorno dos nós (b,m)

5) **TEMP**eratura-variação de temperatura em elementos de cabo (ℓ,m)

6) **GRAV**idade - aceleração da gravidade (ℓ,m)
Default g=1.0

7) **ELE**Mentos - propriedades e incidências dos elementos (b,m)

8) **MOLA**s - apoios elásticos ou elementos de mola (b,m)

9) **GEOM**etria - alterar o modelo geométrico com a soma dos deslocamentos às coordenadas e/ou eliminação de nós e barras (b,m)

10) **CARR**egamento - inicia um carregamento (ℓ,c)

11) **ANAL**ise - especificação dos parâmetros para análise não-linear (ℓ,m,c)

12) **PESO** - multiplica o peso próprio por um coeficiente (ℓ,c)

13) **VENT**o - pressões de vento nas barras e nos cabos (ℓ,c)

14) **BARR**as - forças e momentos aplicados nas barras(b,c)

15) **FTEM**po - funções para carregamentos incrementais (b,c)

16) **DEFA**sagens - lista de defasagens (b,c)

17) **NODA**is - cargas concentradas nodais (b,c)

18) **ENVO**ltorias-inicialização, atualização e impressão dos arquivos de envoltórias com os esforços máximos e mínimos nos elementos (ℓ,c,m)

19) **IMPR**ima - opções sobre os resultados a serem impressos (ℓ,m,c)

20) **PLOT** - opções para gravar os arquivos DIRETIVA e PLOT que serão utilizados pelos pós-processadores para "plottar" as saídas gráficas (ℓ,m,c)

21) **CALC**ulo - encerra um carregamento e inicia a análise não-linear

22) **CONS**istencia - encerra o modelo geométrico ou carregamento sem iniciar os cálculos (ℓ,m,c)

23) **ONDA** - consideração de forças devido a ondas, corrente, peso próprio e empuxo (b,m)

A seguir são comentados dois exemplos que possuem os principais comandos acima descritos. O primeiro exemplo é uma torre "CHAINETTE" para transmissão de energia elétrica [10]. O segundo exemplo é um "riser" submetido a ação de onda e corrente.

1º EXEMPLO DEMONSTRATIVO DOS COMANDOS BÁSICOS DO PROGRAMA

O arquivo de dados para o cálculo da estrutura da figura III.2 será:

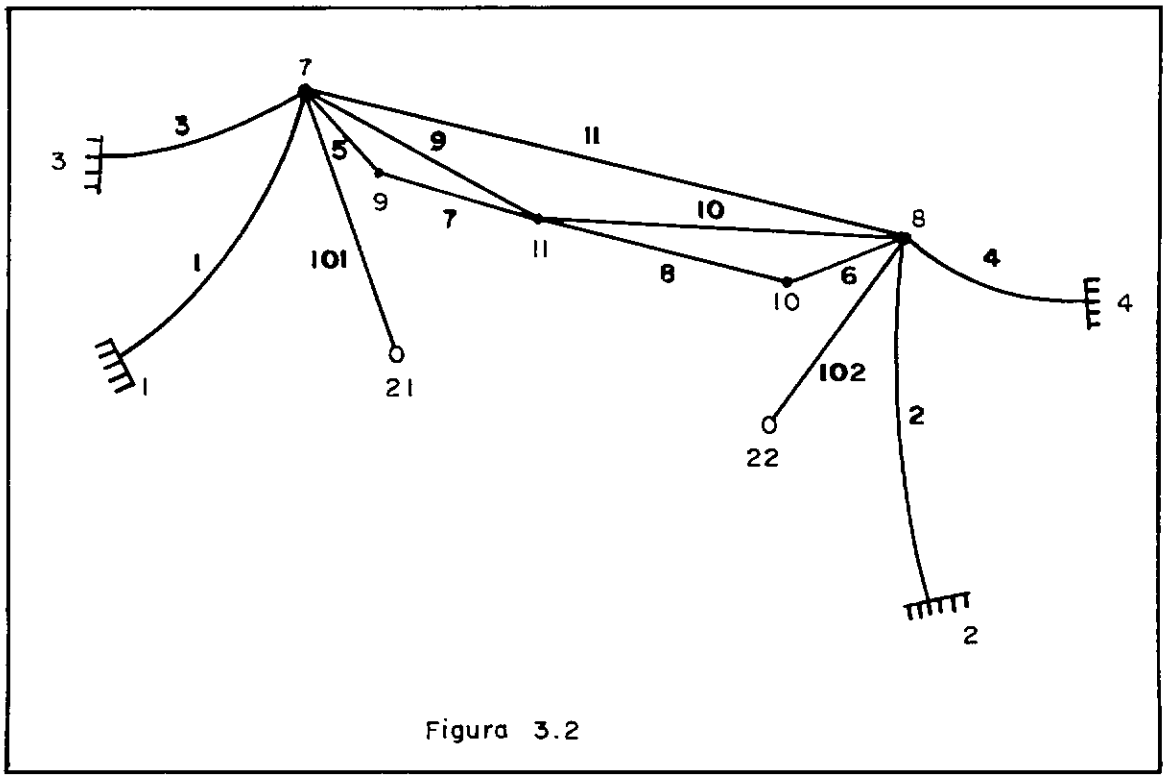


Figura 3.2

Torre "chainette" para linha de transmissão

```
TORRE CHAINETTE PARA LINHA DE TRANSMISSÃO
*
*  EXEMPLO N.1                                          comentários
*
NOS
  1        -3124.2      -1783.08        0.        4       s
 21        -1021.08       0.0           0.        2       s
  7        -1371.6        0.0        3505.2       2
  9        - 792.48       0.0        2987.04      2
 11           0.0         0.0        2987.04
W
```

→ a

→ b

```
LIBE        L          T
  21        TO         22        MX        MY        MZ
W
   9        10         11
W
```

→ c

```
ELEMENTOS
  1  2100000.        0.3       0.
W
  1  37.   0.    0.       100000.       165000.      165000.
W
101     21    7      1       1       1
W
  1  1500000.     0.00785
W
  1   4.137
  2   2.327
W
  1    1     7     1     1     1     7991.
  3    3     7     1     1     1     7991.
  5    7     9     1     2     1     5238.
  7    9    11     1     2     0     3885.
  8   10    11     1     2     0     3885.
  9    7    11     1     2     0     4972.
 10    8    11     1     2     0     4972.
 11    7     8     1     1     0       86.3
W
```

→ d

```
CARREGAMENTO 6
NODAIS
   7     TO      8       Ø.       Ø.      -1271.
  10     TO     11       Ø.       Ø.      -2767.
   9                     Ø.     6713.       Ø.
W
IMPRIMA TUDO
PLOT   XY    XZ    P    30.    0.    30.    XZ
```

→ e

```
CALCULO
```

→ f

```
/*
```

delimitador final

O arquivo de dados apresenta 6 blocos distintos a saber:

a) título da análise

b) coordenadas nodais, cuja sintaxe é:

NUMERO DO NÓ	COORD. X	COORD. Y	COORD. Z	CODIGO SIMETRIA	S

onde:

CODIGO **SIMETRIA** = 1 simetria em relação ao eixo x (um nó gerado)

CODIGO **SIMETRIA** = 2 simetria em relação ao eixo y (um nó gerado)

CODIGO **SIMETRIA** = 4 simetria em relação aos eixos x e y (3 nós gerados)

S - indica que o nó é apoio com todos os graus de liberdade restringidos

c) Condições de contorno, cuja sintaxe é:

TABELA COM AS LIBERAÇÕES DOS NÓS

LISTA DE NÓS QUE TEM OS GRAUS DE LIBERDADE ROTACIONAIS RESTRINGIDOS

d) Formação do modelo geométrico, módulo subdividido em:

- PROPRIEDADES DOS MATERIAIS DAS BARRAS
- PROPRIEDADES DAS SEÇÕES DAS BARRAS
- INCIDÊNCIAS DAS BARRAS
- PROPRIEDADES DOS MATERIAIS DOS CABOS
- PROPRIEDADES DAS SEÇÕES DOS CABOS
- INCIDÊNCIAS DOS CABOS

e) Cargas nodais aplicadas.

f) Análise não-linear.

2º EXEMPLO DEMONSTRATIVO DOS COMANDOS BÁSICOS DO PROGRAMA

Neste exemplo apresenta-se o arquivo de dados para o cálculo do "riser" mostrado na figura III.3, dando especial ênfase ao modo de considerar forças hidrodinâmicas usando o comando **ONDA**.

```
RISER DA TLP - MODELO PETROBRÁS
*
*     EXEMPLO N.2
*
ONDA
 1.Ø25       Ø.Ø       629.32       Ø.7       Ø.Ø       1.Ø       1
W
 1     11.5        14.2          Ø.Ø       Ø.Ø
W                                                                  → a
 1      2.Ø         Ø.Ø           Ø.Ø
W
NOS
   1     0.0         0.0           0.0         S
   .
   .
   .
   .
  35     0.0         0.0         600.0         S
W
LIBE  L
   1                                  MY
   2     TO     35     FX     FZ     MY
W
```

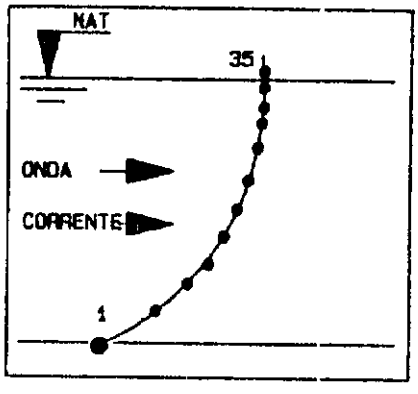


Fig. 3.3 - Riser

```
ELEMENTOS
  1    2.1 E 7      0.3      7.85
W
  1    0.06     0.  0.       5.73E-4    2.865E-4    2.865E-4    0.2764
W
  1     1     2     1     1
  2     2     3     1     1
  :
  :
  :
 34    34    35     1     1
W
W
CARREGAMENTO 1
```

```
ANALISE    3    100     0.001     G
FTEMPO     1.0E15
  Ø    Ø.    10       0.5       120       1.0
W                                                    → b.1
FTEMPO     1.Ø
  Ø    Ø.     1       1.Ø       120       1.0
W
```

```
NODAIS                                                        b.2
                                                              ↑
  35       67.885    Ø.      Ø.      Ø.      Ø.      Ø.      | 1 |
  35         Ø.      Ø.    843.75    Ø.      Ø.      Ø.      | 2 |
W
IMPRIMA TUDO
CALCULO
/*
```

Na listagem anterior foram destacados 2 módulos, a saber:

a) ONDA - **Consideração de forças hidrostáticas cuja sintaxe é:**

ONDA						
ρH_2O	ν_{H_2O}	SWL	CM	TIME	SFT	IBUOY
W						
IWAVE	T	AMP	OFST	TET1		
W						
ICORR	VCSURF		VCBOTT	GAM1		
W						

onde:

ρH_2O - densidade da água

ν_{H_2O} - viscosidade cinemática da água. Usada no cálculo do número de Reynolds

SWL - nível de águas tranquilas

CM - coeficiente de inércia usado na fórmula de Morison

TIME - tempo usado nas fórmulas de cálculo de velocidades e acelerações de Airy. Para análises estáticas TIME=0

SFT - Em análises incrementais são os valores percentuais da carga total distribuída sobre elementos. Para carregamentos efetuados de uma só vez: SFT=1.Ø

IBUOY - indicador para a consideração ou não de peso próprio e empuxo.

IBUOY=0 não considera

IBUOY=1 considera

IWAVE - indicador para a consideração de ondas no cálculo.

IWAVE=0 não considera

IWAVE=1 considera

Caso IWAVE=0 não são necessários os valores de T, AMP, OFST, TET1.

T - período da onda

AMP - amplitude da onda

OFST - offset da onda

TET1 - ângulo de ataque da onda

ICORR - indicador para a consideração ou não de corrente

VCSURF - velocidade de corrente na superfície

VCBOTT - velocidade de corrente no fundo

GAM1 - ângulo de ataque de corrente.

b.1) Consideração de carregamento incremental.

ANALISE	**NT**	**NMIT**	**TOLL**	**G**	**P**	**PL**	
FTEMPO	fator						
t_1	$f(t_1)$	t_2	$f(t_2)$	.....	t_m	$f(t_m)$	
W							
FTEMPO	fator						
t_1	$f(t_1)$	t_2	$f(t_2)$	.....	t_m	$f(t_m)$	
W							

onde:

ANÁLISE - implica na leitura dos parâmetros relevantes para a análise:

NT - número de incrementos de carga (deve ser sempre maior ou igual ao número de pares de valores nas funções tempo)

NMIT - número máximo de iterações no processo iterativo

TOLL - tolerância para convergência

G - consideração de não-linearidade geométrica para elementos de pórtico

P - consideração do 3º dispositivo de Peyrot em cabos

PL - consideração de não-linearidade física para elementos de pórtico.

PTEMPO - São funções que descrevem o carregamento incremental, de modo que as abcissas são números inteiros representando o incremento $(t_1, t_2, t_3, \ldots, t_m)$ e as ordenadas $(f(t_1), f(t_2), f(t_3), \ldots, f(t_m))$ são frações da carga total naquele incremento. O primeiro valor da abcissa deve ser sempre nulo. São permitidas até 9 funções tempo que devem estar contíguas no arquivo de dados. As cargas são associadas às funções tempo através de um número (ver listagem anterior b.2).

III.3 - Características Gerais

III.3.1 - Análise elastoplástica

Dentro do procedimento incremental-iterativo as únicas etapas modificadas para a consideração de não-linearidades físicas de elementos de pórtico espacial, são:

1º) Cálculo de forças internas - **NOVAK2** e **PBLOCK**

2º) Norma de convergência - **UNORMA**

As forças internas são acumuladas durante o procedimento incremental-iterativo e os deslocamentos não precisam ser atualizados, isto é,

$$\underset{\sim}{F}_i^N = \underset{\sim}{F}_{i-1}^N + \underset{\sim}{KP} * \underset{\sim}{\Delta U}_i$$

onde:

$\underset{\sim}{F}_i^N$ - forças internas da iteração i e incremento de carga N

$\underset{\sim}{F}_{i-1}^N$ - forças internas da iteração i-1 e incremento de carga N

$\underset{\sim}{KP}$ - matriz de rigidez elasto-plástica

$\underset{\sim}{\Delta U}_i$ - deslocamentos incrementais da iteração i.

Outro aspecto importante é que devido ao fato da matriz de rigidez elasto-plástica ser dependente dos deslocamentos incrementais, deve-se adotar uma norma de convergência mais rígida que nos problemas onde não ocorrem não-linearidades físicas, caso contrário, os erros são acumulados e a solução pode convergir para valores errados.

O critério de convergência adotado foi a norma euclidiana dos deslocamentos incrementais sobre o deslocamento incremental da primeira iteração, de modo que:

$$\left\| \frac{\sqrt{\overline{\Delta U}^{\,2}}}{\sqrt{\Delta U_{1iter}^{\,2}}} \right\| \leq \text{TOLERÂNCIA}$$

Se for adotado uma norma de deslocamentos incrementais sobre deslocamentos atualizados, deve-se diminuir a tolerância ou adotar também um critério de forças.

A matriz de rigidez elasto-plástica do elemento, $\underset{\sim}{KP}(12 \times 12)$, é calculada na rotina **PLASTIC**.

A seguir é descrita a sequência básica de operações para o cálculo de forças internas e matriz elasto - plástica de pórticos. As rotinas onde são efetuadas tais operações também são apresentadas.

SUBROTINA PLASTIC

a) Para II=1, NBAR ..... loop nos elementos

b) Leitura da matriz de rigidez elastoplástica, $\underset{\sim}{KP}_1$, de cada elemento.

- arquivo : 2
- acesso : direto
- registro: II

c) Cálculo do produto: $\underset{\sim}{KP}_1 * \underset{\sim}{\Delta U}$, onde $\underset{\sim}{\Delta U}$ são deslocamentos incrementais no referencial global, da barra II.

d) Leitura das forças $\underset{\sim}{f}_G^{i-1}$ da iteração anterior, para cada elemento

- arquivo : 21
- acesso : direto
- registro: II

e) Acumulo de forças: $\underset{\sim}{f}_{TG}^{i} = \underset{\sim}{f}_G^{i-1} + \underset{\sim}{KP}_1 * \underset{\sim}{\Delta U}$ onde: $\underset{\sim}{f}_{TG}^{i}$ = forças temporárias no referencial global e iteração i.

f) Rotação das forças $\underset{\sim}{f}_{TG}^{i}$ para o referencial local: $\underset{\sim}{f}_{T\ell}^{i}$

g) K = 1

l) Para I = 1,2 ..... loop nó inicial e final

i) $AUX1 = f_{T\ell}^{i}(K) \ldots\ldots\ldots\rightarrow$ N

$AUX2 = f_{T\ell}^{i}(K+4) \ldots\ldots\ldots\rightarrow$ My

$AUX3 = f_{T\ell}^{i}(K+5) \ldots\ldots\ldots\rightarrow$ Mz

j) Cálculo de $\mathbf{f_o}$ (escoamento inicial) - dependente dos valores não nulos de N, My e Mz atuantes no nó.

k) Cálculo de $\mathbf{N_p}$, $\mathbf{M_{py}}$ e $\mathbf{M_{pz}}$

l) Cálculo do critério de escoamento nodal:

$$\mathbf{fe(I)} = \frac{f^i_{T\ell}(K)}{N_p} + \frac{f^i_{T\ell}(K+4)}{M_{py}} + \frac{f^i_{T\ell}(K+5)}{M_{pz}}$$

m) K=K+6

n) fim do loop em I

o) Cálculo de: $\alpha \rightarrow$ função de fe(1)

$\beta \rightarrow$ função de fe(2)

p) Cálculo de $\mathbf{f_1}$, ... , $\mathbf{f_7}$

q) Cálculo de $\mathbf{C_1}$, ... , $\mathbf{C_6}$

r) Determinação da matriz de rigidez atualizada, $\underset{\sim}{\mathbf{KP}}_2$ a ser usada em PBLOC.

s) Gravação de $\underset{\sim}{\mathbf{KP}}_2$

- arquivo : 2
- acesso : direto
- registro: II

t) fim do loop em II

SUBROTINA PBLOCK

a) Para I1=1, NBAR ..... loop nos elementos

b) Leitura da matriz de rigidez elastoplástica atualizada, $\underset{\sim}{KP}_2$, no sistema de referência global,de cada elemento.

- arquivo : 2
- acesso : direto
- registro: I1

c) Leitura das forças $\underset{\sim}{f}_G^{i-1}$ da iteração anterior, para cada elemento.

- arquivo : 21
- acesso : direto
- registro: I1

d) Acúmulo de forças: $\underset{\sim}{f}_{FG}^{i} = \underset{\sim}{f}_G^{i-1} + \underset{\sim}{KP}_2 * \underset{\sim}{\Delta U}$ onde: $\underset{\sim}{f}_{FG}^{i}$ = forças finais no referencial global e iteração i.

e) Rotação das forças $\underset{\sim}{f}_{FG}^{i}$ para o referencial local: $\underset{\sim}{f}_{F\ell}^{i}$

f) K=1

g) ISUM=∅

h) Para I=1,2 ..... loop nó inicial e final

i) AUX1 = $f_{F\ell}^{i}(K\ )$ ..... N
AUX2 = $f_{F\ell}^{i}(K+4)$ ..... My
AUX3 = $f_{F\ell}^{i}(K+5)$ ..... Mz

j) Cálculo do critério de escoamento nodal:

$$FE = \frac{DABS(AUX1)}{N_p} + \frac{DABS(AUX2)}{M_{py}} + \frac{DABS(AUX3)}{M_{pz}}$$

k) Se FE $\leq$ 1 vá para item n (não faz o controle de forças)

l) Controle de forças para respeitar o critério de escoamento.

$$f^i_{F\ell}(K) = f^i_{F\ell}(K)/FE$$

$$f^i_{F\ell}(K+4) = f^i_{F\ell}(K+4)/FE$$

$$f^i_{F\ell}(K+5) = f^i_{F\ell}(K+5)/FE$$

m) ISUM = ISUM + 1

n) K = K+6

o) fim do loop em I

Neste ponto é feito a compatibilização dos esforços locais da barra, caso tenha sido realizado o controle de forças em algum dos nós. Faz-se o equilíbrio estático da barra. ISUM é um indicador, tal que:

ISUM = 0 .....→	sem controle
ISUM = 1 .....→	controle nó inicial
ISUM = 2 .....→	controle nó final
ISUM = 3 .....→	controle nos 2 nós extremos

p) Se ISUM=3 - colapso barra I1 - stop

Se ISUM=0 vá para o item r

Se ISUM=1 então: $f^i_{F\ell}(7) = - f^i_{F\ell}(1)$ .....→ $\Sigma H=0$

Se ISUM=2 então: $f^i_{F\ell}(1) = - f^i_{F\ell}(7)$ .....→ $\Sigma H=0$

q) $$f^i_{F\ell}(3) = \frac{\text{DABS}\,[f^i_{F\ell}(5) + f^i_{F\ell}(11)]}{L}$$ .....→ ΣM nó final=0 eixo y

$$f^i_{F\ell}(9) = - f^i_{F\ell}(3)$$ .....→ $\Sigma V_y = 0$

$$f^i_{F\ell}(2) = \frac{\text{DABS}\,[f^i_{F\ell}(6) + f^i_{F\ell}(12)]}{L}$$ .....→ ΣM nó final=0 eixo z

$$f^i_{F\ell}(8) = - f^i_{F\ell}(2)$$ .....→ $\Sigma V_z = 0$

r) Roda $\underset{\sim}{f}^i_{F\ell}$ para o referencial global: $\underset{\sim}{f}^i_{FG}$

s) Grava $\underset{\sim}{f}^i_{FG}$

- arquivo : 21
- acesso : direto
- registro: I1

t) fim do loop I1

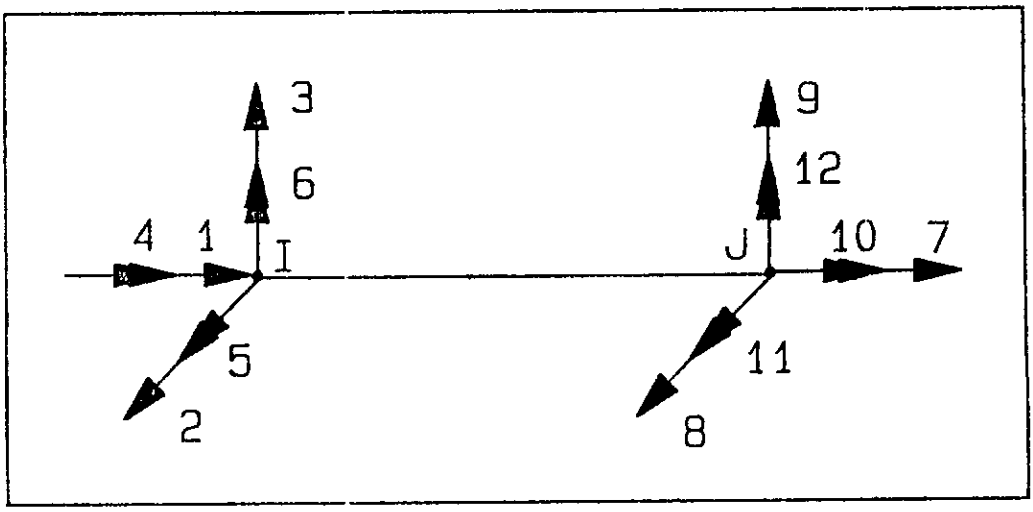


Fig. 3.4 - Forças f^i_{F1}

III.3.2 - Solução do sistema de equações

Em problemas estruturais é de grande importância o esforço computacional envolvido na análise de sistemas complexos, como ocorre com estruturas offshore. Boa parte deste tempo é consumido na fase de solução do sistema de equações algébricas.

Para problemas não-lineares esta fase de solução de equações se torna ainda mais importante devido a necessidade de reavaliar a matriz de rigidez da estrutura a cada incremento de carga ou mesmo a cada iteração. A fase de solução do sistema de equações pode representar até 80% do tempo total de execução.

Como a maior restrição em microcomputadores é a disponibilidade de memória central suficiente para armazenar to-

da a matriz de coeficientes de grandes estruturas, optou-se por um esquema de armazenamento de banda variável ou "skyline" e solução "out-of-core", isto é, usando memória periférica.

Apresenta-se a seguir uma breve explanação do sistema implementado.

ESQUEMA DE ARMAZENAMENTO DE BANDA VARIÁVEL OU "SKYLINE"

Este esquema é extremamente eficiente pois armazena em um vetor de trabalho $\underset{\sim}{A}$, os elementos de cada coluna, da diagonal principal até o último elemento não nulo da coluna:

$$\underset{\sim}{K} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \emptyset & K_{14} & \emptyset & \emptyset & \emptyset & \emptyset \\ & K_{22} & K_{23} & K_{24} & \emptyset & \emptyset & \emptyset & \emptyset \\ & & K_{33} & K_{34} & \emptyset & K_{36} & \emptyset & \emptyset \\ & & & K_{44} & K_{45} & K_{46} & \emptyset & \emptyset \\ \text{sim} & & & & K_{55} & K_{56} & \emptyset & K_{58} \\ & & & & & K_{66} & K_{67} & \emptyset \\ & & & & & & K_{77} & \emptyset \\ & & & & & & & K_{88} \end{bmatrix}$$

$$A=[K_{11}\ K_{22}\ K_{12}\ K_{33}\ K_{23}\ K_{44}\ K_{34}\ K_{24}\ K_{14}\ K_{55}\ K_{45}\ K_{66}\ K_{56}\ K_{46}\ K_{36}\ K_{77}\ K_{67}\ K_{88}\ \emptyset\ \emptyset\ K_{58}]$$

Para localização dos termos da diagonal dentro do vetor de trabalho $\underset{\sim}{A}$ é montado um vetor auxiliar **MAXA** de modo que para a matriz $\underset{\sim}{K}$ anterior, tem-se:

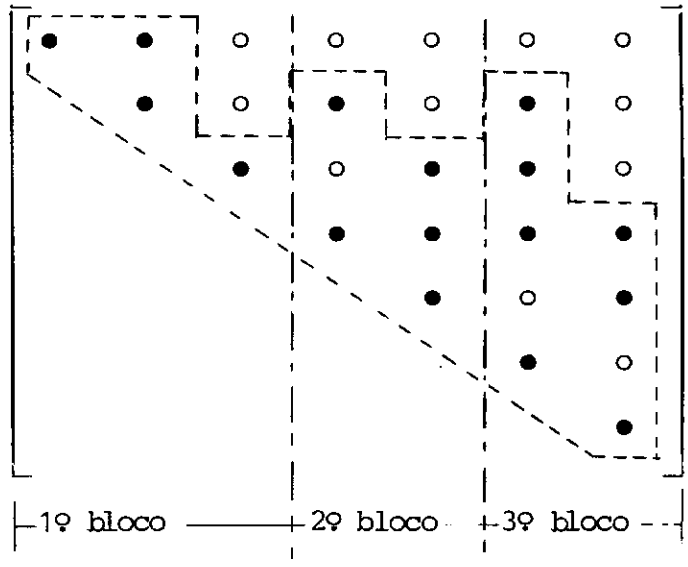
MAXA= [1 2 4 6 10 12 16 18]

O cálculo de **MAXA** depende da determinação prévia das alturas efetivas das colunas, cálculo este feito a partir do vetor **LM** de cada elemento. LM contém os números das equações correspondentes aos graus de liberdade de cada elemento do sistema estrutural.

Deve-se ressaltar que por limitação de memória central, as vezes é necessário particionar a matriz global da estrutura em grupos de colunas. Tais grupos são denominados blocos. Para definir o tamanho de cada bloco são utilizadas 2 variáveis:

NEQL e **NEQR**

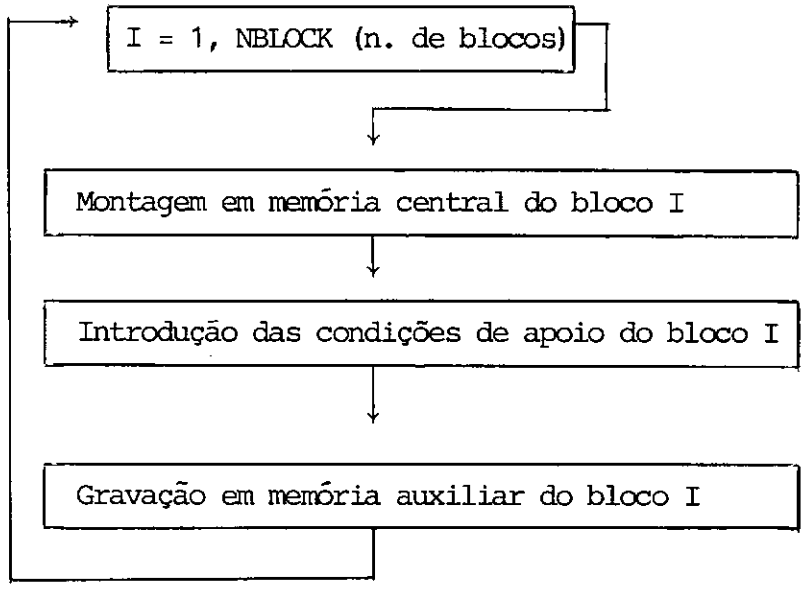
$\underset{\sim}{K}$ =



Na montagem da matriz de rigidez em forma particionada, um elemento estrutural pode contribuir em um ou mais blocos desta partição. Além disso, nesta fase é suficiente que se mantenha em memória central apenas um bloco de cada vez.

Para cada bloco percorre-se a numeração de todos os elementos estruturais, procurando-se os graus de liberdade que dizem respeito ao bloco em questão.

Assim a lógica básica para a montagem da matriz de rigidez global em um esquema de armazenamento do tipo "skyline" com partição em blocos é:



A montagem da matriz de rigidez da estrutura segundo esquema de armazenamento anteriormente descrito é efetuada pelas seguintes rotinas:

ALTCOL - leitura do vetor LM de cada elemento e chamada da rotina COLHT.

COLHT - Calcula as alturas efetivas das colunas da matriz de rigidez total.

ADDOU - Recebe as alturas das colunas já calculadas e determina os endereços dos termos diagonais (vetor MAXA), bem como o número de elementos na matriz de rigidez total.

ADDBOU - Espalha os coeficientes da matriz de rigidez de cada elemento na matriz de rigidez total da estrutura utilizando o vetor MAXA.

MAKOU - Gerenciador na montagem da matriz de rigidez total da estrutura. Chama a subrotina ADDBOU.

RESOLUÇÃO DO SISTEMA DE EQUAÇÕES UTILIZANDO MEMÓRIA AUXILIAR (OUT-OF-CORE)

A seguir apresentam-se fluxogramas simplificados com a lógica das etapas de triangularização e retrosubstituição implementadas no programa:

1) TRIANGULARIZAÇÃO

a) Para I=1, NBLOCK (nº de blocos)

b) Leitura em arquivo de memória auxiliar do bloco I, se este já não estiver na memória central.

c) Triangularização do sub-bloco principal $S_{I,I}$, isto é, a parte do bloco I que não apresenta acoplamento com blocos anteriores.

d) Se I=NBLOCK vá para item ℓ.

e) Para I1=(I+1), NBLOCK

f) Se não existe acoplamento entre os blocos I e I1 vá para o item j.

g) Leitura em arquivos de memória auxiliar do bloco I1 se NBLOCK > 2.

h) Triangularização do sub-bloco secundário $S_{I,I1}$.

i) Gravação em arquivo de memória auxiliar do bloco I1 se existir mais do que um sub-bloco secundário acoplado a I e se NBLOCK > 2.

j) fim do loop I1

k) Gravação em arquivo de memória auxiliar (arquivo 10) do bloco I.

l) Para J=1,NCAR (nº de carregamentos).

m) Modificação do vetor de desequilíbrio para os NCAR casos de carregamento.

n) fim do loop J.

o) fim do loop I.

2) RETROSUBSTITUIÇÃO

a) Para I=NBLOCK, 1 (decrementos de 1)

b) Leitura em arquivo de memória auxiliar do bloco I, se I for diferente de NBLOCK.

c) Para J=1, NCAR.

d) Cálculo da retrosubstituição relativamente às colunas do bloco I para os NCAR casos de carregamento.

e) fim do loop J

f) fim do loop I

De acordo com a lógica de triangularização anterior, deve-se transferir o bloco de ordem I da memória auxiliar para a memória central. Esta transferência só será efetuada se o número de blocos (NBLOCK) for superior a 2 (pois caso contrário o bloco I já se encontra na memória central) ou se, para uma fase intermediária, o bloco I tenha ficado em memória central como sub-bloco secundário do bloco anterior.

Faz-se então a triangularização no bloco I de seu sub-bloco principal, isto é, o sub-bloco que não está acoplado com outros sub-blocos.

A seguir pesquisa-se a existência de blocos subsequentes I1 que tenham sub-blocos secundários acoplados ao bloco I. Este acoplamento é feito através do vetor **ICOPL**. Em caso

afirmativo, procede-se à transferência deste bloco I1 do arquivo de memória auxiliar para a memória central. Procede-se então, às operações de triangularização do sub-bloco secundário I1 associado com I e finalmente grava-se o bloco modificado I1 para o arquivo de memória auxiliar (caso NBLOCK > 2). Caso o número de sub-blocos secundários subseqüentes, associados a I, seja apenas 1, não é necessária a gravação em memória auxiliar pois o mesmo pode ser aproveitado para a próxima triangularização do sub-bloco principal (agora pertencente ao bloco I+1).

Uma vez concluída a modificação de triangularização em todos os sub-blocos secundários dos blocos acoplados ao bloco I, faz-se a gravação em memória auxiliar do bloco I.

Desta forma o bloco I não só teve sua triangularização efetuada de forma completa, como também se efetuou o cômputo de sua influência na triangularização dos blocos que lhe seguem.

Procede-se, então, a modificação do vetor de desequilíbrio contido no bloco I, correspondente à etapa de substituição para frente.

A seguir, incrementa-se a variável I, repetindo-se as etapas descritas anteriormente, até que todos os blocos tenham sido triangularizados.

Finalmente, para resolução completa do sistema, resta a etapa de retrosubstituição. Como os vetores independentes estão em forma completa e em memória central, basta reter em memória central um bloco de cada vez e em ordem decrescente. A retrosubstituição realiza-se através de um procedimento que trabalha separadamente por colunas, apresentando uma grande vantagem para o particionamento do perfil em grupos de colunas.

No programa implementado, a rotina **COLSOU** efetua tanto a triangularização como retrosubstituição. Na primeira fase, a matriz de rigidez é decomposta na forma $\underset{\sim}{\mathbf{K}} = \underset{\sim}{\mathbf{LT}}\ \underset{\sim}{\mathbf{D}}\ \underset{\sim}{\mathbf{L}}$. Na segunda fase, para um determinado vetor de cargas, calcula-se o vetor de deslocamentos utilizando o resultado da decomposição feita na fase anterior.

CAPÍTULO IV

ANÁLISE DE RESULTADOS E PERFORMANCE

Neste capítulo são estudados cinco aplicações escolhidas de modo a testar várias potencialidades do programa **CABOS-micro**.

IV.1 - Torre de transmissão de energia elétrica do tipo "Chainette"

Este estudo visa aferir o programa implementado em microcomputador,com os resultados obtidos por PEYROT et alli [10].

Foram efetuadas diversas análises em uma torre "Chainette" e os resultados comparados com os obtidos na referência acima. Apresentam-se também gráficos com o histórico de convergência de algumas análises.

A figura IV.1 a,b e c apresenta uma vista em perspectiva da estrutura, projeção XY e XZ respectivamente. A torre em questão foi proposta para transmissão em redes de 500 kV. A estrutura é formada por 11 cabos e 2 elementos de pórtico, rotulados nos apoios. Todos os elementos estruturais estão sujeitos somente a esforços normais sendo que os cabos estão tracionados e os elementos de pórtico comprimidos. A torre é projetada para suportar uma linha tri-fásica. Devido ao fato de que a estrutura é composta quase que exclusivamente por

Figura 4.1— Torre "Chainette"

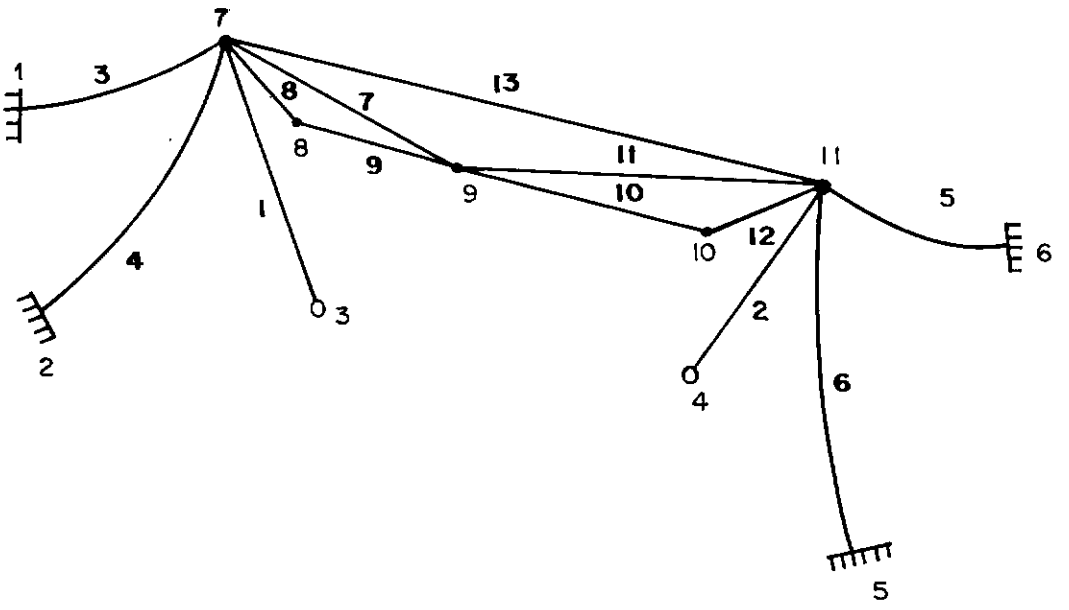


Figura 4.1 – b (mm)

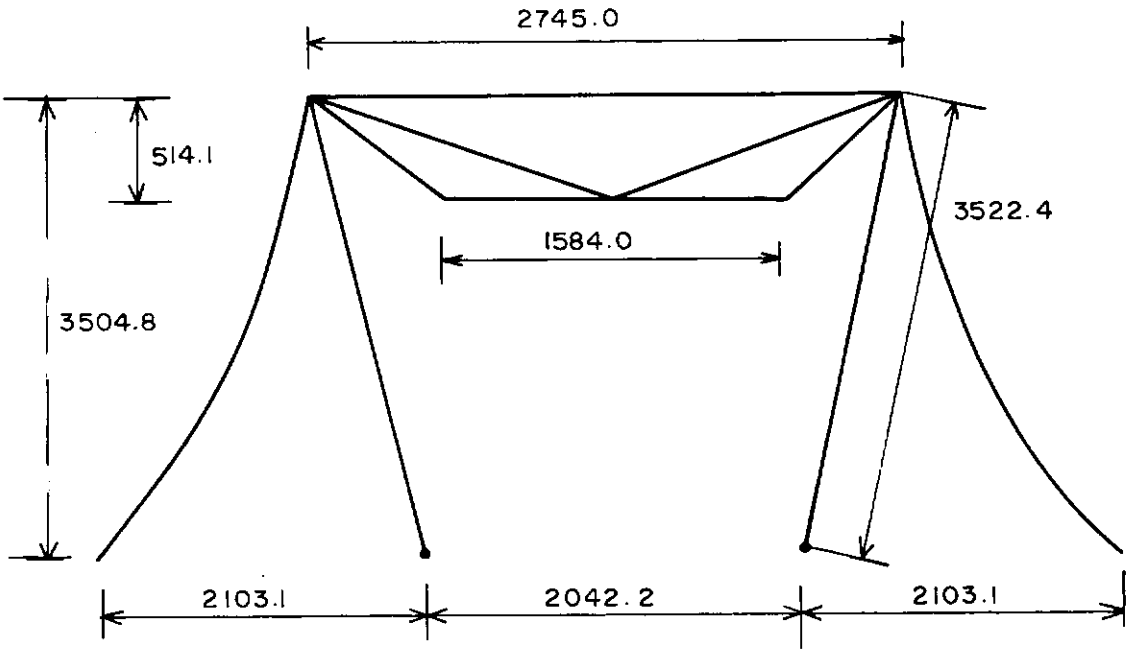
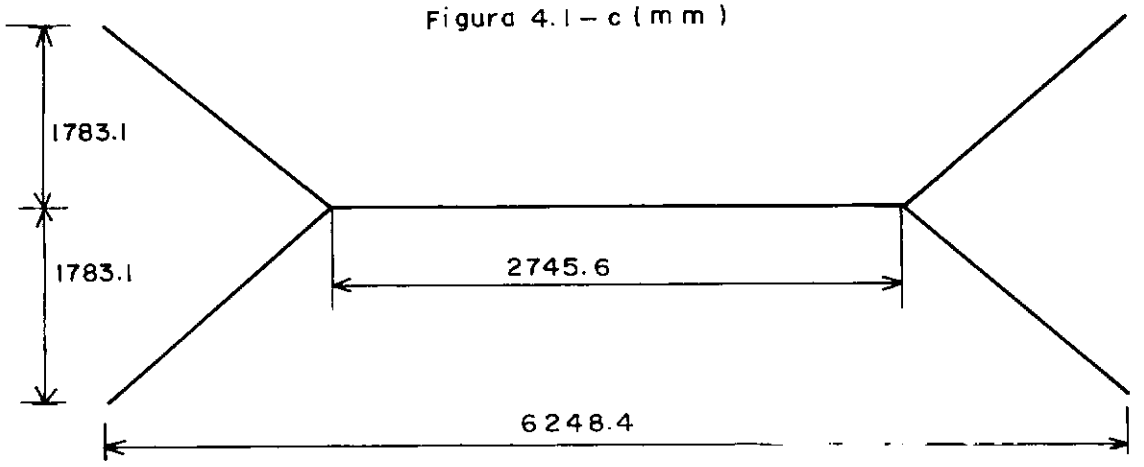


Figura 4.1 – c (mm)



cabos, o efeito de rompimento dos mesmos é de fundamental importância.

A torre em questão é uma estrutura estaticamente indeterminada, apesar de que os elementos isolados (cabos, mastros) são determinados. A indeterminação ocorre nos nós 7 e 11 (ver figura IV.1) onde ligam-se os estais e o cabo de manutenção. Para uma certa configuração nodal, existem infinitas combinações de comprimentos iniciais para os estais e o cabo de manutenção que satisfazem o equilíbrio dos mastros, fazendo com que as soluções não sejam únicas. Para as análises a seguir foi adotado um comprimento inicial de 95' (2922.76cm) para o cabo de manutenção.

A primeira análise é com o carregamento de peso próprio apenas. A posição de equilíbrio da estrutura será usada como ponto de partida para os casos onde serão estudados rompimento de estais e assentamento da fundação. Os resultados obtidos por Peyrot encontram-se na tabela 3 sob a coluna PP, enquanto que os resultados do programa **CABOS-micro** estão na tabela 4. Constata-se que os resultados são bastante satisfatórios, sendo que **CABOS-micro** fornece resultados a favor da segurança.

Na segunda análise submeteu-se a torre "Chainette" a diversos carregamentos ambientais (vento, gelo, etc) e rompimento do condutor. Os resultados encontram-se nas tabelas 3 e 4 sob as colunas CA1, CA2, CA3, CA4, CA5, CA6, CA7, onde CA1 significa carga ambiental número 1 e assim sucessivamente. As cargas aplicadas estão resumidas na tabela 1 a seguir, enquanto que, as propriedades dos elementos e seções encontram-se na tabela 2.

Na terceira análise eliminou-se o cabo 7 do arquivo de dados para simular o seu rompimento. As forças nos elementos estruturais decorrentes deste estudo encontram-se sob as colunas RE7. Foi usada a configuração de equilíbrio sob peso próprio como ponto inicial.

Da mesma forma o rompimento do cabo 8 foi estudado na quarta análise (RE8). Os resultados encontram-se nas tabelas 3 e 4 e a configuração deformada na figura IV.2.

Na quinta e última análise estuda-se um assentamento de 1' do nó 3, simulando um recalque na fundação. Os resultados são apresentados nas tabelas 3 e 4 sob a coluna RF3 (Recalque na fundação - nó 3). Deve-se observar que a estrutura deforma-se pouco, apesar de um considerável recalque na fundação.

Nas figuras a seguir (IV.4 e IV.5), apresentam-se gráficos com o histórico de convergência para os casos de rompimento dos cabos 7 e 8, respectivamente.

Deve-se observar que no caso de rompimento do cabo 7, obtém-se a convergência bastante rápido e, em contrapartida, no caso de rompimento do cabo 8 a convergência é muito instável visto que a configuração final é muito diferente da configuração de peso próprio.

Apresenta-se na tabela 5 os tempos de execução deste caso em dois microcomputadores diferentes.

Tabela 1

Cargas ambientais Aplicadas à Torre

CARREGAMENTO	PONTO DE APLICAÇÃO DAS FORÇAS								
	NÓS 8 - 9 - 10			LIGAÇÃO CABOS-MASTRO (NÓS 7 e 11)			FORÇAS NO MASTRO TRANSFER.AO TOPO		
	V*	T*	L*	Y*	T*	L*	V*	T*	L*
PP	6.1	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0
CA1	6.1	8.0	0.0	0.8	1.0	0.0	2.0	4.13	0.0
CA2	15.2	7.4	0.0	3.1	2.1	0.0	2.0	0.66	0.0
CA3	18.2	6.5	0.0	3.4	1.6	0.0	2.0	1.33	0.0
CA4	28.2	0.0	0.0	6.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0
CA5	12.3	6.3	0.0	1.7	1.2	0.0	2.0	1.65	0.0
CA6	6.1	0.0	14.8	0.8	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0
CA7	18.2	0.0	0.0	2.1	0.0	8.1	2.0	0.0	0.0

* Em KIPS (454 Kg)

V - vertical
T - transversal
L - longitudinal

Tabela 2

Propriedades dos Elementos e Seções

BARRAS - PÓRTICO						
NÚMERO	E(kgf/mm^2)	POISSON	Ax (mm^2)	Iy (mm^4)	Iz (mm^4)	ELEMENTOS
1	2.1 E6	0.3	37.0	1.65 E5	1.65 E5	1 e 2

CABOS				
NÚMERO	E(kgf/mm^2)	COEF. EXP. TÉRMICA	Ax (mm^2)	ELEMENTOS
1	1968595.0	8.0 E-6	4.137	3, 4, 5, 6 e 13
2	1968595.0	8.0 E-6	2.327	7, 8, 9, 10, 11 e 12

Tabela 3
Resultados Obtidos por PEYROT
forças axiais nos elementos

ELEMENTO	PP	CA_1	CA_2	CA_3	CA_4	CA_5	CA_6	CA_7	RE_7	RE_8	RF_3
1	16057.98	33290.00	48269.28	53435.35	62865.83	40154.48	16578.26	41644.51	14462.62	18845.99	14749.55
2	16221.42	4157.73	23543.08	30877.45	62767.32	18349.32	17199.34	42054.93	14707.78	20245.68	14813.57
3	6505.82	15841.42	20461.78	22437.58	24421.57	17288.77	13652.68	21114.63	5527.45	8616.46	5704.51
4	6505.82	15841.42	20461.78	22437.58	24421.57	17288.77	1084.15	12243.47	5527.45	8616.46	5704.51
5	6505.82	241.98	7826.05	10843.79	24372.54	6061.35	9065.47	16615.49	5497.94	8471.18	5599.18
6	6505.82	241.98	7826.05	10843.79	24372.54	6061.35	5434.76	16535.58	5497.94	8471.18	5599.18
7	3978.40	10575.93	13680.38	14356.63	13263.18	11456.69	61.29	9483.15	-	9424.13	3201.61
8	4178.16	4596.29	10230.44	12266.63	19102.05	8292.76	9643.42	12369.23	7114.18	-	4171.35
9	3110.35	222.46	4017.44	5841.16	13406.16	3198.03	7845.57	8832.11	5985.99	2783.47	3009.56
10	3110.35	6410.02	10807.93	11805.82	13407.53	8930.18	3309.66	8833.93	2912.41	3109.90	2954.63
11	3978.16	64.02	2677.24	4676.20	13629.98	2120.64	4601.29	9491.78	3242.92	6116.28	3290.59
12	4178.16	3675.13	10373.90	12394.2	19068.00	8376.75	4184.06	12335.64	4164.08	4191.78	4168.63
13	45.85	55.38	44.04	43.13	41.76	44.49	45.85	43.13	55.84	54.03	41.77

Tabela 4
Resultados Obtidos com o Programa **CABOS-micro**

ELEMENTO	PP	CA_1	CA_2	CA_3	CA_4	CA_5	CA_6	CA_7	RE_7	RE_8	RF_3
1	16346.22	33463.77	49701.88	55016.05	64812.64	41457.56	15122.90	43861.84	14545.26	18920.48	16424.04
2	16346.22	4238.09	25227.55	32695.69	64812.64	19909.65	16378.67	43596.03	14789.56	20270.68	16401.93
3	6568.62	15931.51	21343.35	23400.93	25578.45	18082.38	13372.76	21778.99	5564.03	8643.92	6616.28
4	6568.62	15931.51	21343.35	23400.93	25578.45	18082.38	905.92	13071.24	5564.03	8643.92	6616.28
5	6568.62	285.74	8761.74	11860.53	25578.45	6919.23	8802.15	17500.03	5533.68	8475.37	6601.91
6	6568.62	285.74	8761.74	11860.53	25578.45	6919.23	5146.54	17409.84	5533.68	8475.37	6601.91
7	4003.66	10653.97	14310.86	15076.98	14538.76	12033.22	48.13	10301.53	-	9444.55	4030.43
8	4175.63	4597.96	10335.98	12362.64	19151.63	8386.29	9063.21	12401.22	7125.62	-	4175.72
9	3111.89	25.82	4220.95	6056.18	13637.76	3324.76	7585.87	9004.66	6000.26	2870.02	3115.85
10	3111.89	6481.59	10897.31	11927.17	13637.76	8999.59	3358.15	9004.57	2914.51	3106.54	3115.85
11	4003.65	83.81	3494.54	5543.99	14538.76	2858.78	4155.34	10301.66	3254.97	6115.46	4030.43
12	4175.63	3677.31	10364.45	12413.09	19151.63	8383.76	4156.57	12401.22	4162.98	4186.86	4175.72
13	86.91	97.53	82.31	81.26	78.33	83.41	87.06	81.32	87.43	85.38	86.45

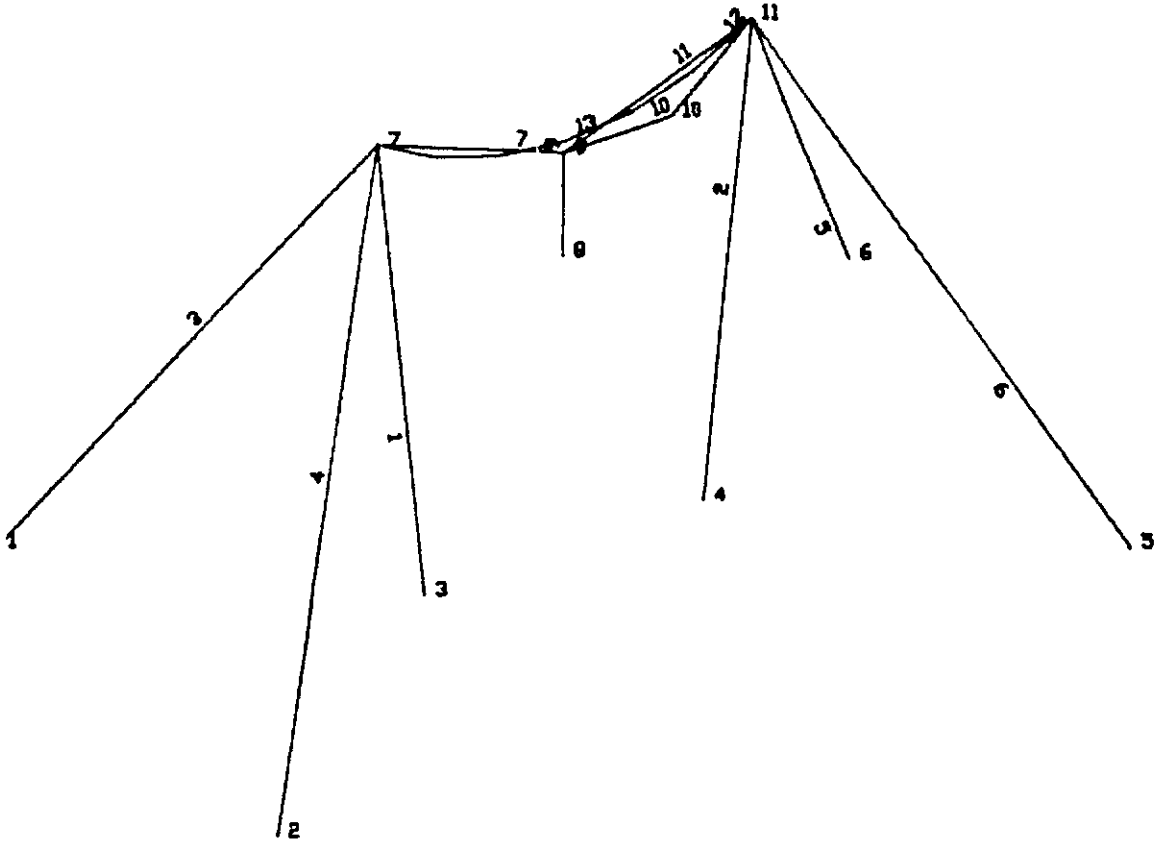

11
11
10
10
7
7
8
9
6
5
4
3
2
1
TORRE CHAINETTE -CARREGAMENTO BCR - ELIMINA ELEMENTO 8

Figura 4.2

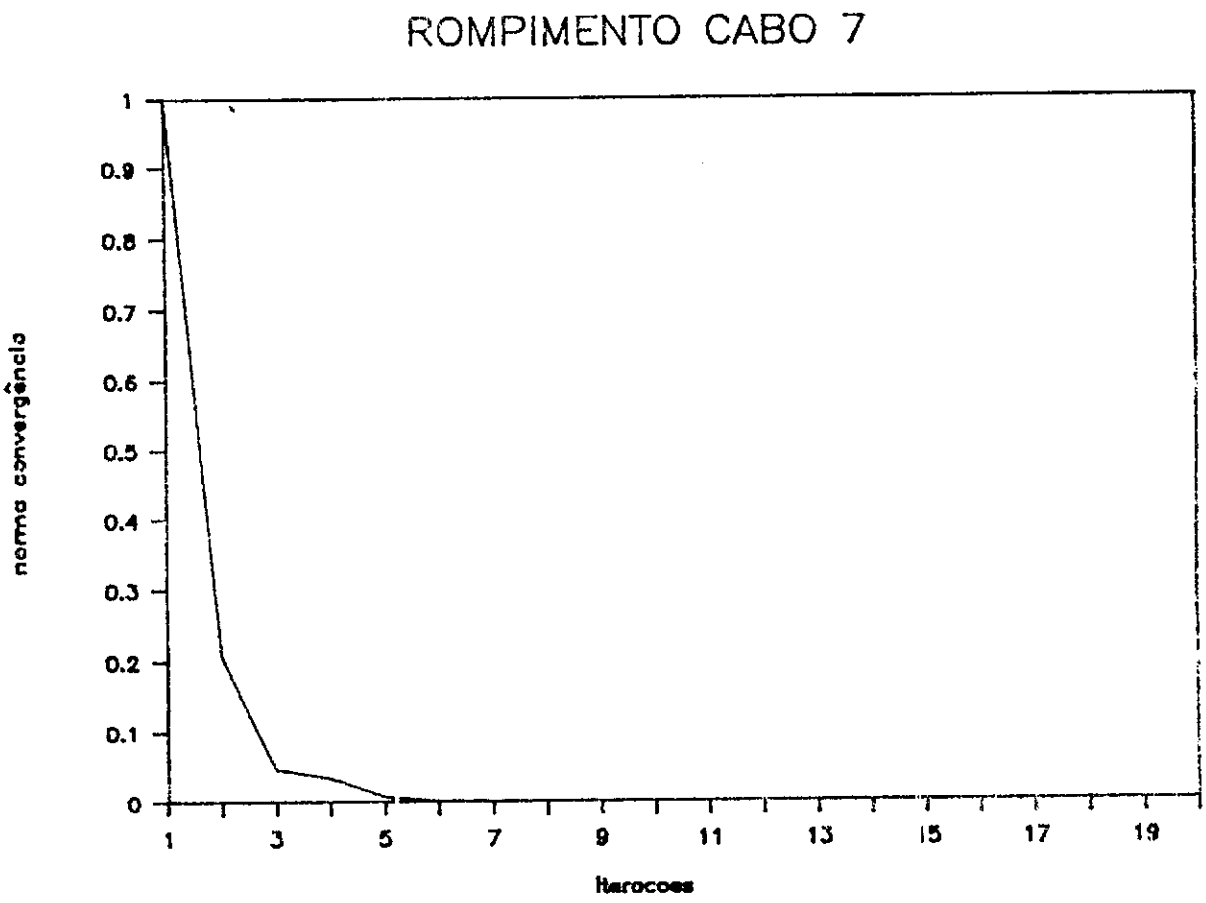


Figura 4.4 – Convergência para o rompimento do cabo 7

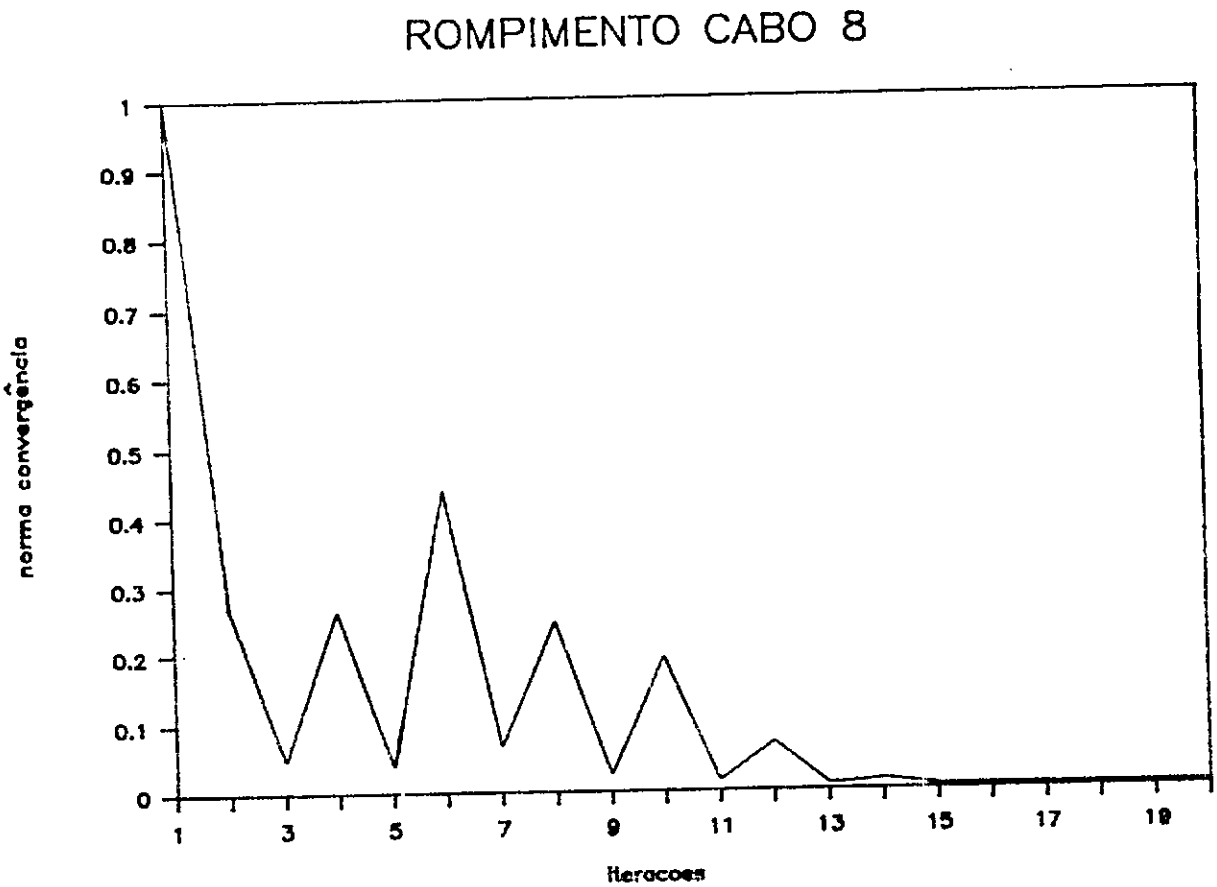


Figura 4.5 – Convergência para o rompimento do cabo 8

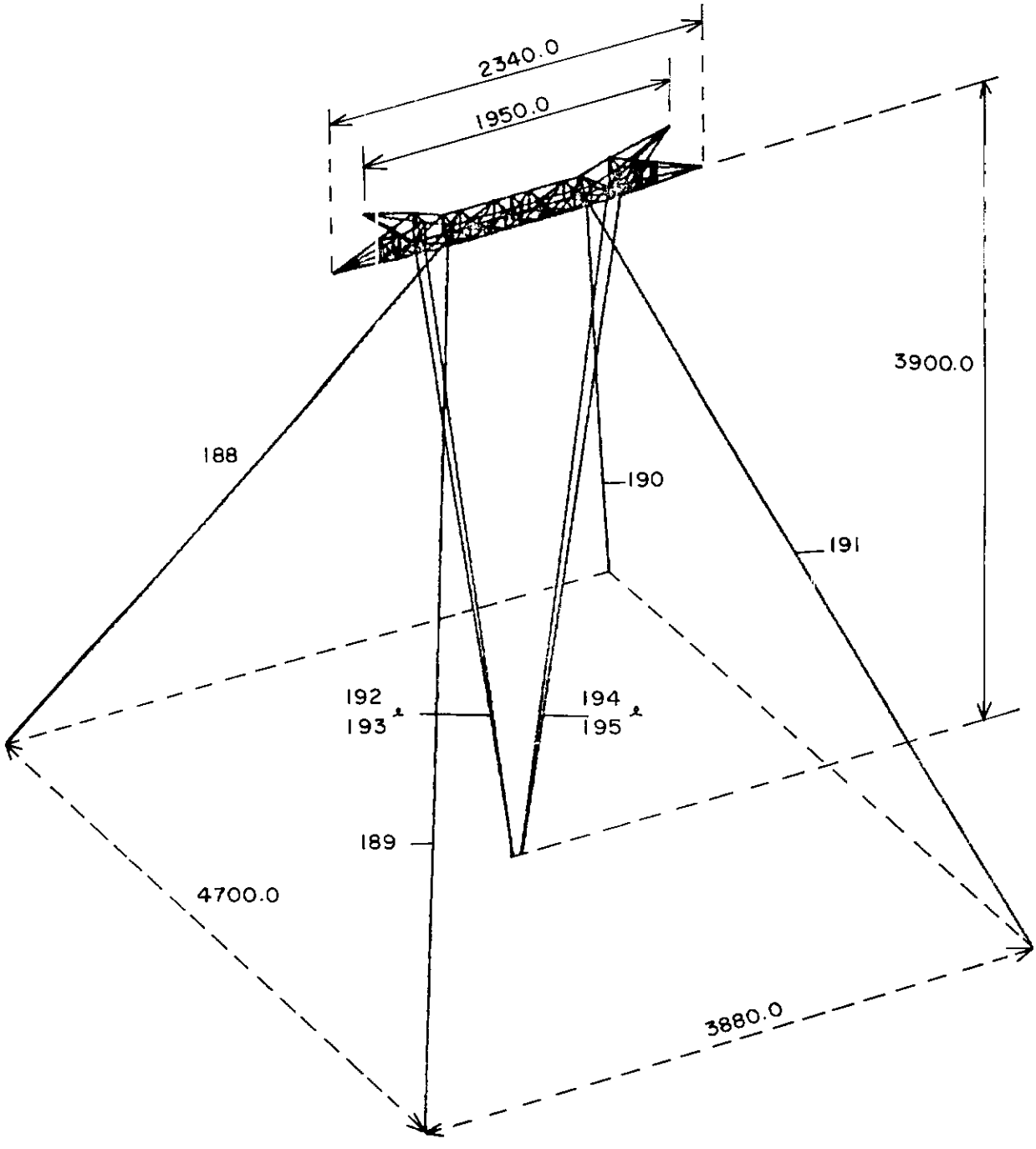
Tabela 5

Tempos de Execução

ANÁLISE	TEMPO DE EXECUÇÃO (s)		
	IBM-PC/XT	IBM-PC/AT	COMPAQ 386/20
1 Torre Chainete rompimento do cabo 7	94	50	22
2 Torre Chainete rompimento do cabo 8	693	290	135
3 Torre Chainete recalque 1" no apoio 3	112	54	25

IV.2 - Análise não linear de torre de transmissão de energia elétrica do tipo "V" estaiada

A estrutura analisada neste exemplo é uma estrutura proposta para transmissão de energia elétrica em linhas de até 500 kV. A torre é composta por 219 elementos de barra e 4 cabos que formam o estaiamento. Na figura IV.6 indicam-se as dimensões da estrutura e a disposição geral dos elementos. O comportamento global desta estrutura é bastante similar à torre "Chainette" do primeiro exemplo, a menos do cabo de manutenção e demais cabos internos que são substituídos pela estrutura reticulada mostrada em detalhe na figura IV.7. Neste exemplo temos quatro elementos suportes, rotulados na fundação, ao invés de dois.



TORRE TIPO ve - ESTAIADA (dimensões em mm)

Figura 4.6

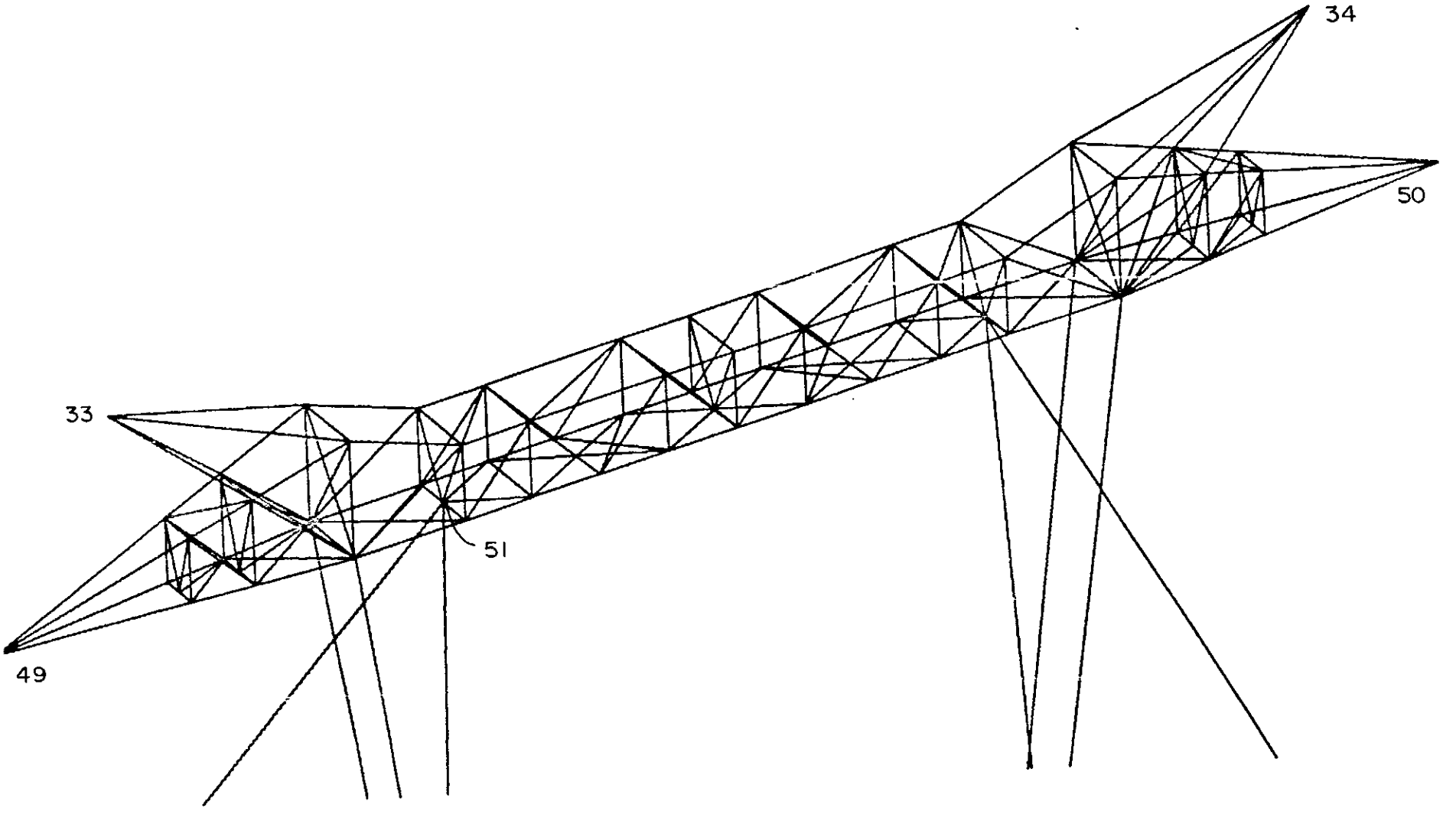


Figura 4.7 – Detalhe

Primeiramente foram quantificadas as diferenças de resultado na consideração da estrutura reticulada da figura IV.7 com elementos de pórtico ou treliça. Para esta análise preliminar, visando simplicidade, foram considerados somente duas seções diferentes para os elementos de barra. Os cabos são todos iguais (ver tabela 5).

Tabela 5

Propriedades das Seções

SEÇÃO Nº (barras)	A_x (mm^2)	I_x (mm^4)	I_y (mm^4)	I_z (mm^4)	LARGURA (mm)
1	6.56	29.20	14.60	14.60	5.00
2	22.70	414.00	207.00	207.00	5.00

SEÇÃO Nº (cabos)	A_x (mm^2)	diam (mm)
1	2.5	0.0

Os quatro elementos de barra suportes foram considerados com seção 2 (Perfil L 100 x 100 x 12 mm) e os demais elementos, seção 1 (Perfil L 50 x 50 x 7 mm).

A primeira diferença considerável é o tempo de execução. A consideração de elementos de treliça resulta em somente 201 equações enquanto que para elementos de pórtico tem-se 420 equações. O número de blocos para uma e outra análise encontra-se abaixo:

Tabela 6

Número de Blocos para Elem. Treliça

TRELIÇA (4 BLOCOS)				
Nº DO BLOCO	1	2	3	4
EQUAÇÕES POR BLOCO	73	40	35	53
1º BLOCO ACOPLADO	1	1	1	1

PÓRTICO (23 BLOCOS)												
Nº DO BLOCO	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
EQUAÇÕES POR BLOCO	66	26	20	18	14	13	15	15	12	15	14	15
1º BLOCO ACOPLADO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	3

Tabela 7

Número de Blocos para Elem. de Pórtico

PÓRTICO (cont.)											
Nº DO BLOCO	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
EQ. POR BLOCO	11	13	13	14	9	28	17	15	17	23	17
1 BLOCO ACOPL.	2	2	5	6	3	3	11	11	12	14	19

Para quantificar as diferenças, foram comparados os deslocamentos dos nós 33, 34, 49 e 50, devido sua fundamental importância, pois são os pontos onde liga-se a linha de transmissão. O carregamento adotado é o da figura IV.8. Os resultados são apresentados na tabela abaixo.

Tabela 8

NÓ	TRELIÇA		PÓRTICO		DIFERENÇA (%)	
Nº	DX	DZ	DX	DZ	DX	DZ
33	71.9297	15.300	80.3539	18.3346	11.71	19.83
34	70.1725	-14.7076	77.5694	-16.4352	10.54	11.75
49	66.0002	17.6866	72.7193	22.1060	10.18	24.99
50	66.3394	-17.1855	73.3249	-19.3917	10.53	12.84

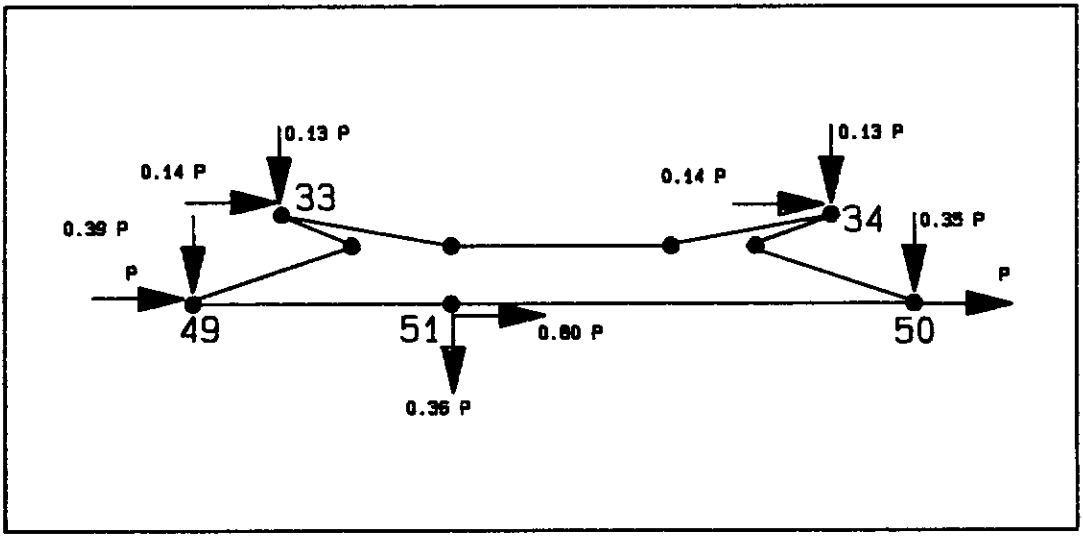


Fig. 4.8 - Carregamento Adotado - P = 11750 KN

Outras comparações são feitas considerando-se as forças nos quatro elementos de suporte e nos estais (ver figura IV.6).

Tabela 9

	TRELIÇA	PÓRTICO	
BARRAS SUPORTE	FORÇA AXIAL	FORÇA AXIAL	DIFERENÇA (%)
192	19531.38 (c)	18401.96 (c)	5.78
193	20115.29 (c)	18733.86 (c)	6.87
194	2837.33 (c)	5774.25 (c)	103.51
195	3028.43 (c)	5442.41 (c)	79.71

	TRELIÇA	PÓRTICO	
ESTAIS	FORÇA AXIAL	FORÇA AXIAL	DIFERENÇA (%)
188	20102.12	21842.10	8.66
189	20078.46	21841.49	8.78
190	200.05	191.02	4.51
191	199.99	191.17	4.41

(c) compressão

Observa-se que as diferenças para os deslocamentos globais dos nós 33, 34, 49 e 50 (Tabela 8), não justificam a consideração de elementos de pórtico espacial para a estrutura reticulada.

A segunda análise efetuada na torre "V" estaiada é um estudo comparativo entre elementos de treliça linear e elementos de treliça não linear geométrica. Utiliza-se a formulação Lagrangeana para grandes deslocamentos. O carregamento é o mesmo da figura IV.8, aplicado de forma incremental segundo a tabela 10.

Tabela 10

INCREMENTO	CARGA (P) KN
1	5875
2	7050
3	8225
4	9400
5	10575
6	11750

Foram consideradas 7 seções diferente para os elementos de barra, procurando-se obter um comportamento mais próximo ao real.

Resultados comparativos entre elementos de treliça linear e não-linear geométrico são apresentados a seguir. Observa-se que o treliçado da figura IV.7 desloca-se como um corpo rígido.

Tabela 11

INC	CARGA	DESLOCAMENTO RESULTANTE-NÓ 49*		DESLOCAMENTO RESULTANTE-NÓ 50*	
		LINEAR	NL geom.	LINEAR	NL geom.
1	5875	74.43	80.28	74.52	80.27
2	7050	89.90	98.39	90.02	98.37
3	8225	105.10	116.72	105.25	116.67
4	9400	120.04	135.24	120.23	135.16
5	10575	134.74	152.79	134.96	152.67
6	11750	149.20	172.96	149.47	172.76

(*) $\sqrt{\overline{DX}^2 + \overline{DY}^2 + \overline{DZ}^2}$

Apesar dos esforços nos cabos dependerem das projeções horizontal e vertical, isto é, das coordenadas atualizadas dos nós extremos, não ocorreram diferenças muito significativas utilizando-se elementos de treliça linear ou não-linear geométrico, como pode ser observado nos gráficos das figuras IV.10a e IV.10b. Os valores usados nos gráficos estão nas tabelas 12 e 13.

Tabela 12

FORÇAS AXIAIS NOS CABOS TRACIONADOS (CABOS 188 e 189)				
INCR	P(kN)	LINEAR	NL GEOMETRIA	DIFERENÇA (%)
1	5875	21857.68	22970.59	5.09
2	7050	26014.40	27626.44	6.19
3	8225	30126.68	32325.53	7.29
4	9400	34193.56	37067.47	8.40
5	10575	38220.13	41549.98	8.71
6	11750	42205.98	46678.17	10.50

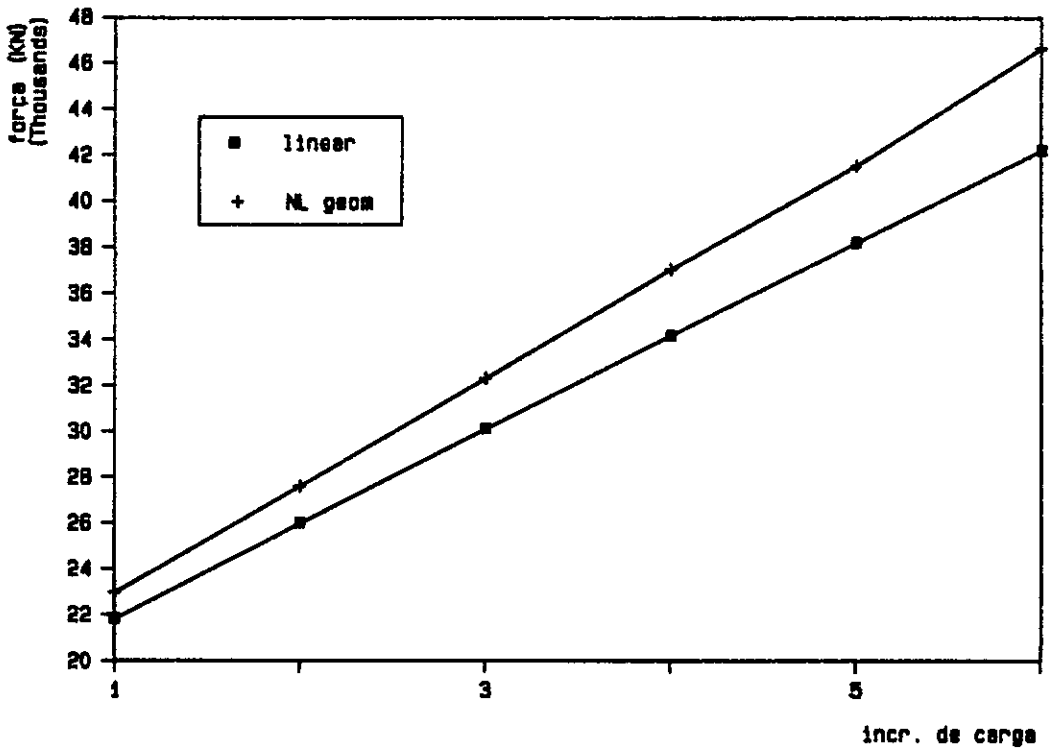


Fig. 4.10 a - FORÇA NOS CABOS 188 e 189

Tabela 13

FORÇAS AXIAIS NOS CABOS COMPRIMIDOS (CABOS 190 e 191)				
INCR	P	LINEAR	NL GEOMETRIA	DIFERENÇA (%)
1	5875	193.37	186.14	3.73
2	7056	179.17	171.45	4.31
3	8225	168.71	160.64	4.78
4	9400	160.62	152.23	5.22
5	10575	154.14	145.84	5.38
6	11750	148.81	139.83	6.02

Tempos de execução são comparados a seguir:

Tabela 14

	TEMPO DE EXECUÇÃO (s)		
A N Á L I S E	IBM-PC/XT	IBM-PC/AT	COMPAQ 386/20
1 Torre "V" estaiada Treliça Linear 1 Bloco - 201 equações	1721	590	300
2 Torre "V" estaiada Pórtico Linear 9 Blocos - 420 equações	8941	3480	1860

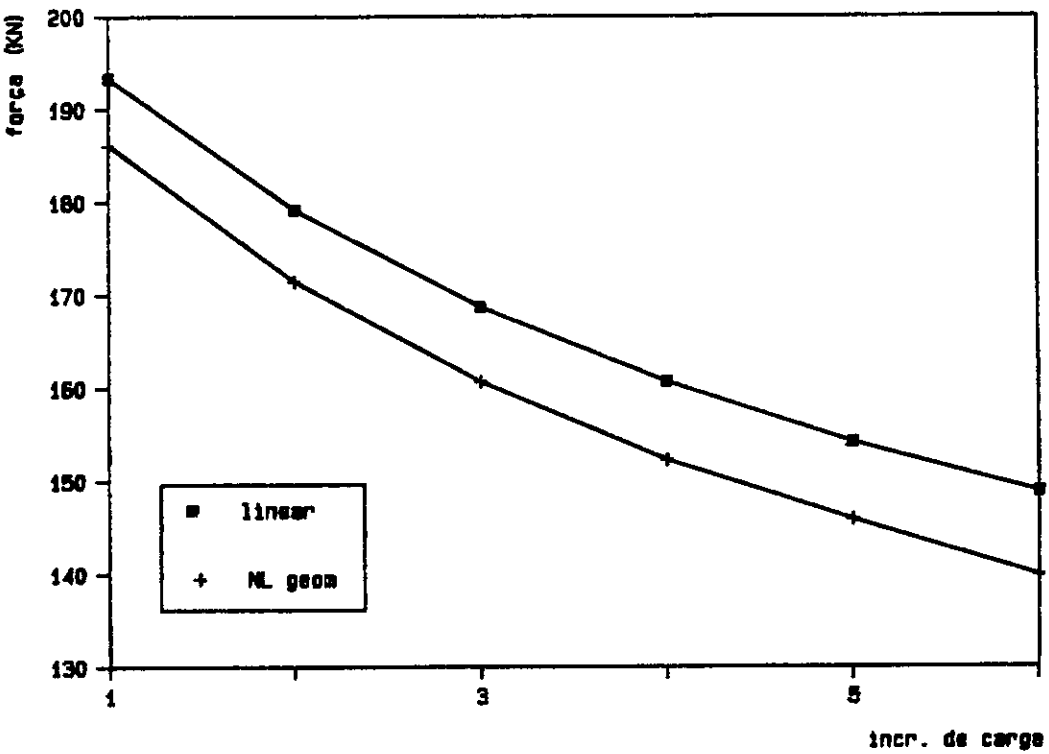


Fig. 4.10 b - FORÇA NOS CABOS 190 e 191

IV.3 - Análise elasto-plástica de pórtico

Neste exemplo foi efetuada uma análise de carga de ruptura do pórtico metálico da figura IV.16. Este exemplo visa principalmente uma aferição das rotinas de não linearidade física de pórticos.

Em geral,na análise de carga limite para pórticos, aplica-se uma teoria de plastificação para vigas e projeta se as colunas de modo a resistirem às cargas máximas. A formação de mecanismos somente nas vigas simplifica sobremaneira o enfoque do problema.

Yura e Lu [16], testaram experimentalmente a estrutura e obtiveram resultados bastante significativos no que tange ao comportamento de elementos de pórtico metálico quando submetidos à carga de ruptura. A estrutura é composta por 3 colunas de perfil W 150 x 29.8 e 6 vigas de perfil W 310 x 23.8. Todos os elementos estruturais são feitos de aço A36.

Os valores para Momento de Plastificação (M_p) e esforço axial de plastificação (N_p), utilizados no critério de escoamento, foram obtidos experimentalmente [16].

A seguir apresenta-se os resultados obtidos com o programa **CABO-micro** em uma análise de carga limite.

O carregamento adotado é devido somente ao peso próprio e foi aplicado conforme figura IV.17.

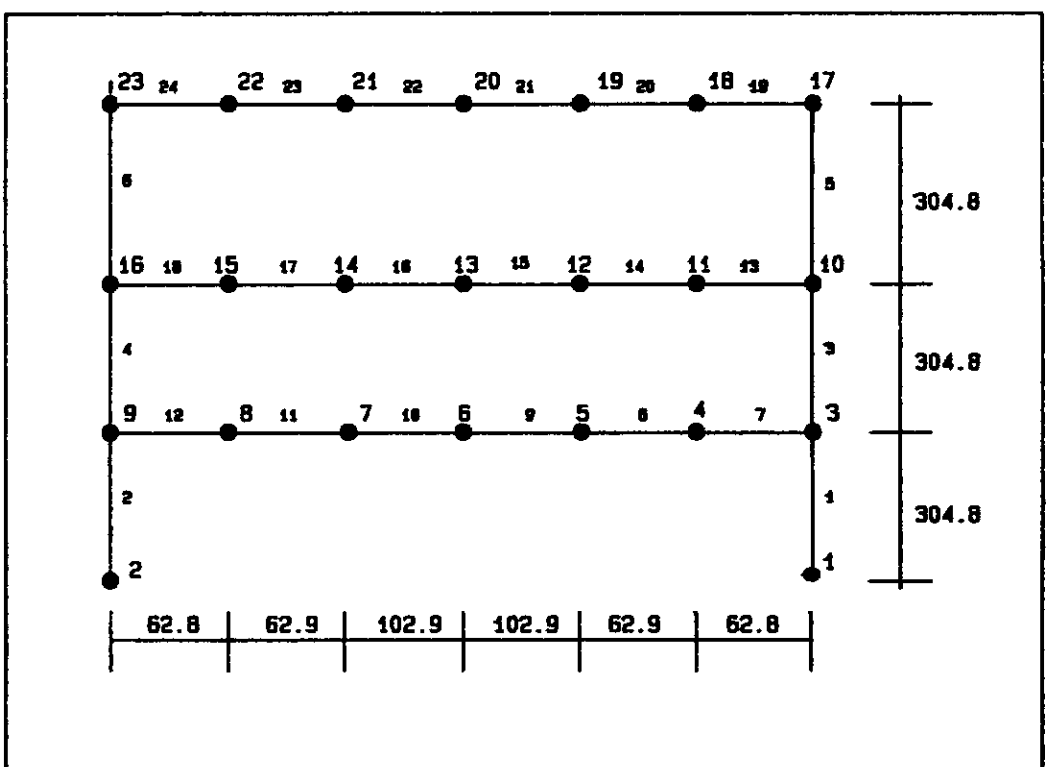


Fig. 4.16 - Pórtico com discretização utilizada

A nomenclatura para as colunas e vigas adotada neste estudo encontra-se na figura IV.18.

Foram consideradas cargas no topo da estrutura, 75% menores que as restantes para prevenir a formação de um mecanismo de barra isolado no último andar.

O carregamento incremental adotado encontra-se indicado na Tabela 15.

A figura IV.20 apresenta curvas comparativas de carga x deslocamento vertical no ponto médio da viga V2, para a consideração de não linearidade geométrica e física.

A ordem de formação de rótulas plásticas é apresentada na figura IV.21. Na mesma figura associa-se a carga à formação das rótulas.

A viga V2, por ser o elemento mais solicitado da estrutura, é estudada em detalhe a seguir.

Apresenta-se na figura IV.22 os momentos em quatro seções distintas da viga V2 (nós 9,7,5 e 3).

Mostra-se na figura IV.23 a plastificação do nó 9 sob a forma de um gráfico adimensional M/M_p x cargas. O nó 9 é o primeiro a plastificar.

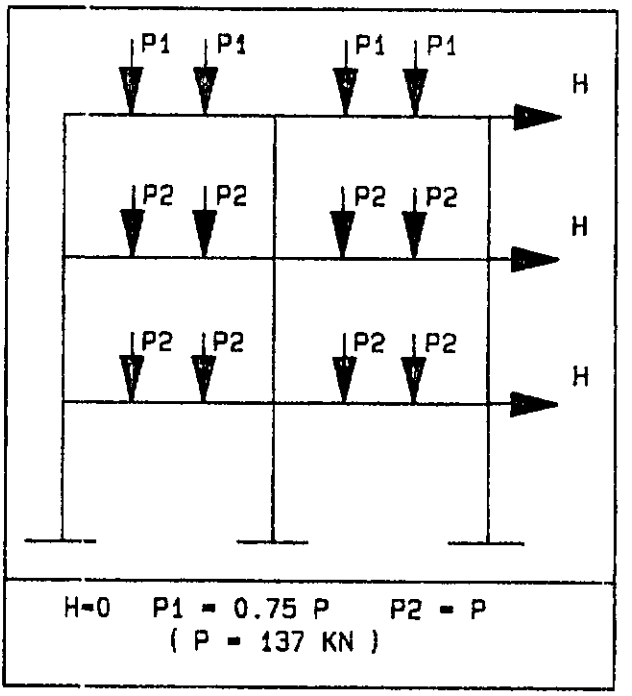


Fig. 4.17 - Carregamento Adotado

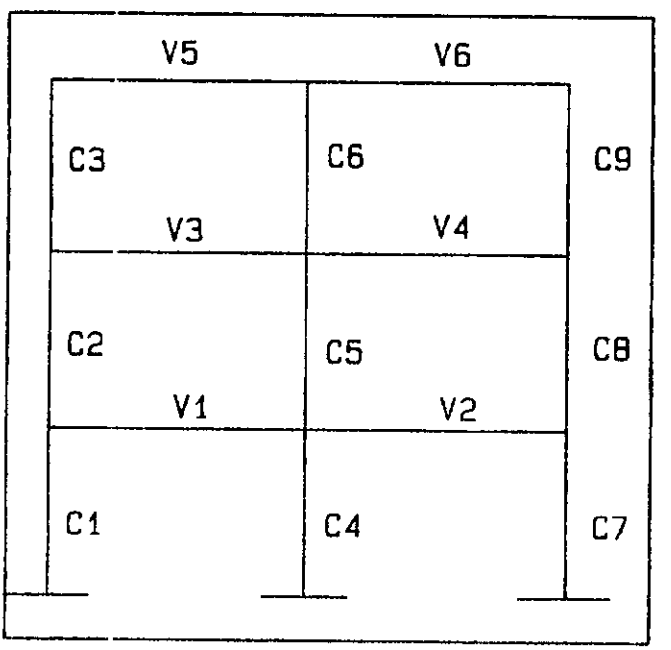


Figura 4.18 - Nomenclatura

Tabela 15

Carregamento Incremental

INCREMENTO	% CARGA TOTAL	INCREMENTO	% CARGA TOTAL
1	25.182	20	76.642
2	50.365	21	78.102
3	51.825	22	79.562
4	53.285	23	81.022
5	54.745	24	82.482
6	56.204	25	83.942
7	57.664	26	85.401
8	59.124	27	86.861
9	60.584	28	88.321
10	62.044	29	89.781
11	63.504	30	91.241
12	64.964	31	92.701
13	66.423	32	94.161
14	67.883	33	95.620
15	69.343	34	97.080
16	70.803	35	97.810
17	72.263	36	98.540
18	73.723	37	99.270
19	75.182	38	100.000

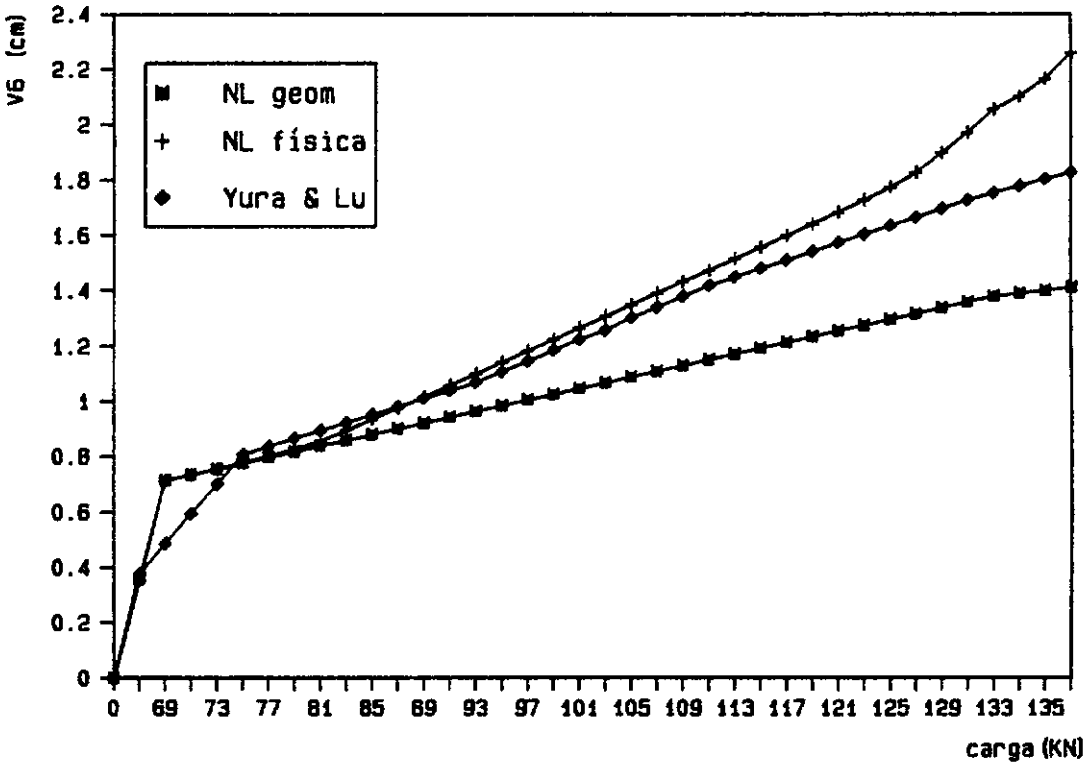


FIG 4.20 - DESLOCAMENTO VERTICAL NO 6

Observa-se na figura 4.20 que no colapso, a média entre a resposta não-linear geométrica, tendendo ao "enrigecimento" e a resposta não linear física, tendendo ao "não enrigecimento", corresponde ao comportamento experimental da estrutura.

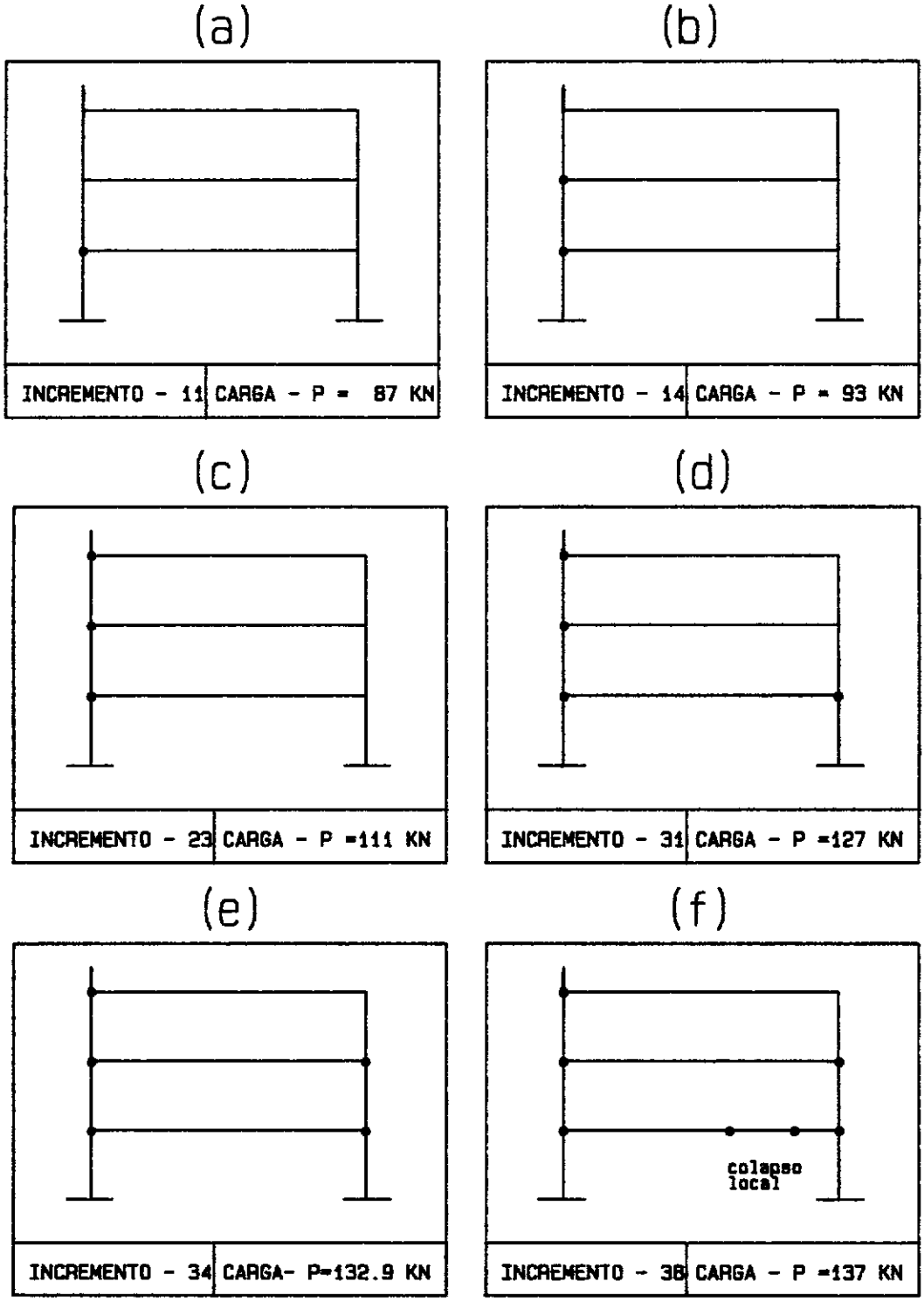


Fig. 4.21 - Formação das rótulas plásticas

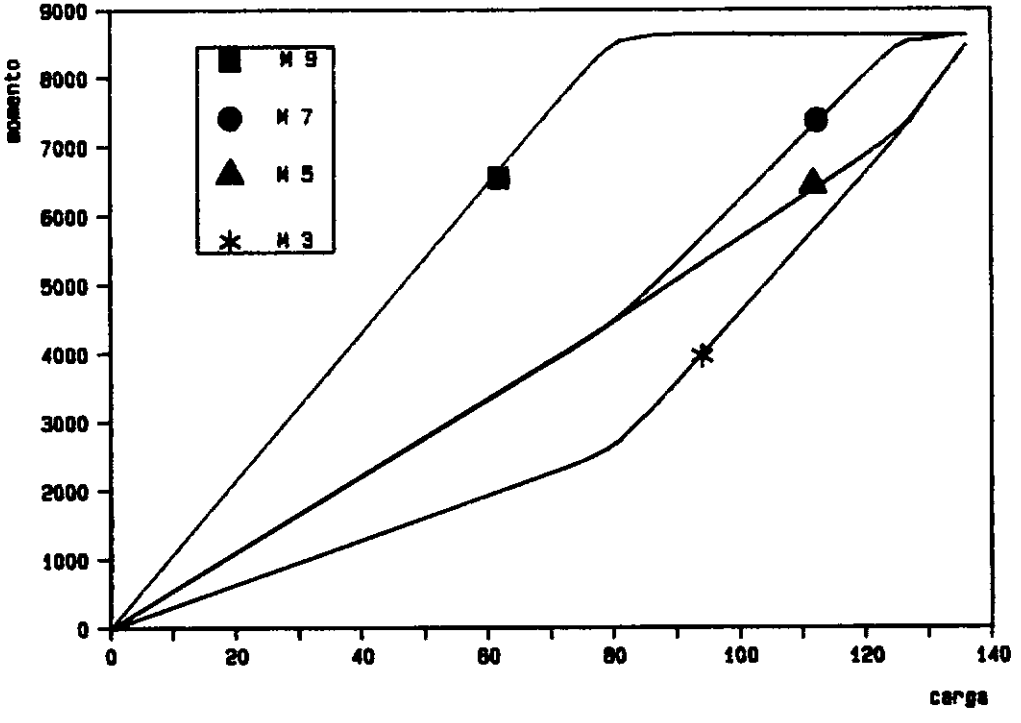
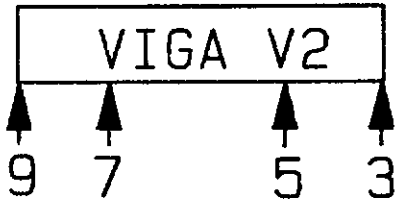


Fig. 4.22 - MOMENTOS FLETORES



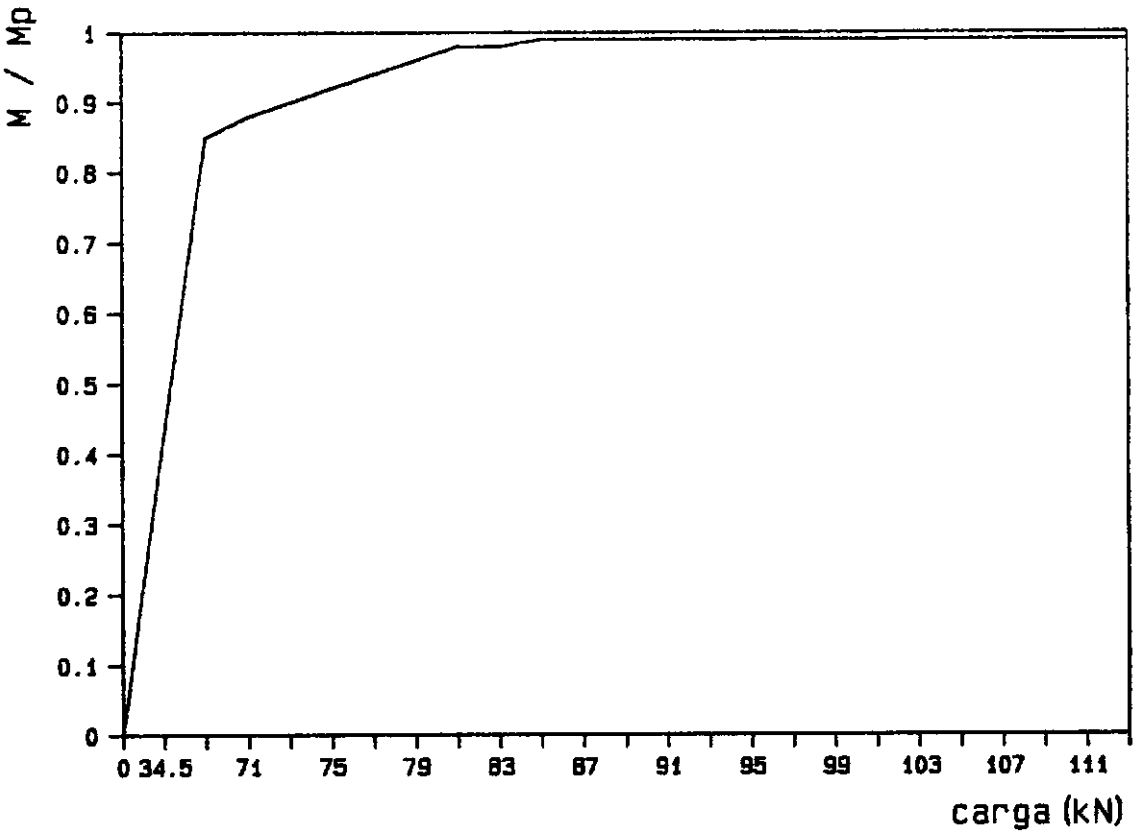


Fig. 4.23 - PLASTIFIÇACÃO DO NO 9

A seguir tecem-se algumas considerações sobre os resultados obtidos.

Os nós mais internos (juntas com a coluna interior) das vigas V1 e V2 são os mais solicitados. O início do escoamento do nó 9 se dá para uma carga P=69 kN (2º incremento). A plastificação total deste nó ocorre para uma carga P=87 kN enquanto que uma carga máxima (P_{max}) de 136 kN é atingida, ocorrendo então o colapso local da viga V2 (ver mecanismo formado na figura IV.21f).

Apesar da plastificação do nó 9, o momento de plastificação (M_p = 8733 kN.cm), não é atingido pois o critério de escoamento é dependente também dos esforços normais.

Observa-se na figura IV.22 que para a carga de colapso, os momentos nas quatro seções da viga V2, são aproximadamente iguais devido a uma redistribuição interna de esforços.

A mesma estrutura foi analisada com um carregamento lateral (H=P/6), de modo a simular cargas de vento. Entretanto logo no 2º incremento de carga (P=69 kN), ocorreu o colapso da barra 25 com a plastificação dos nós 9 e 24. A barra colapsada é indicada em destaque na figura a seguir. Yura & Lu em sua estrutura experimental evitam este problema com a inclusão de elementos estabilizadores diagonais.

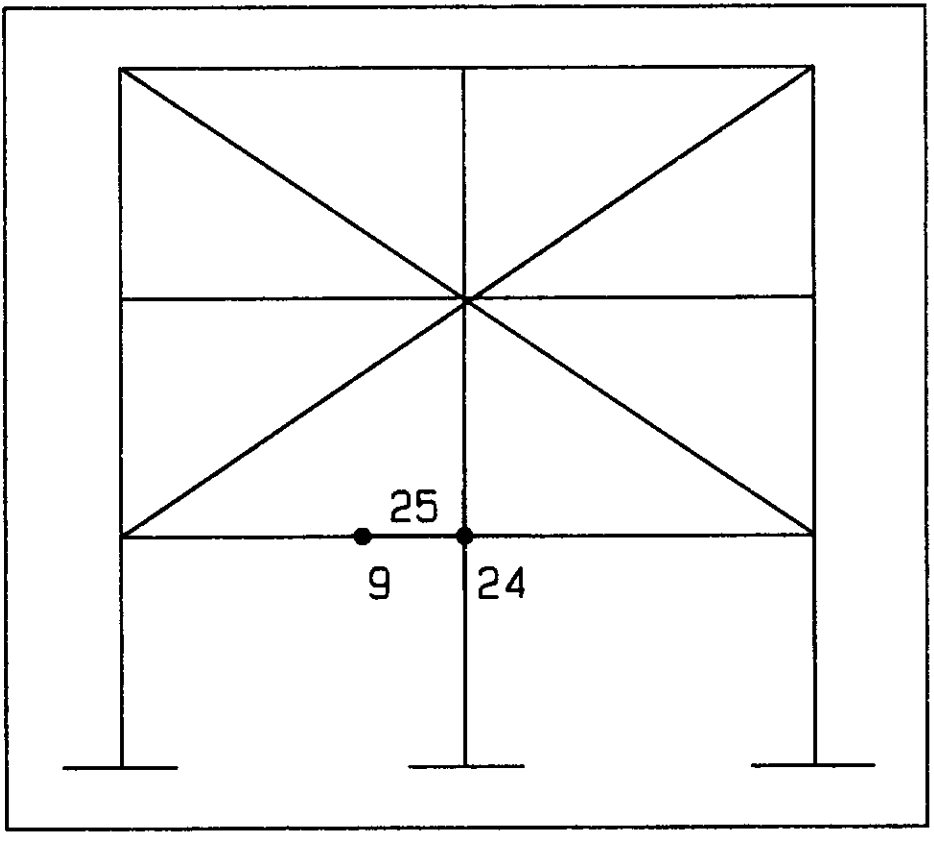


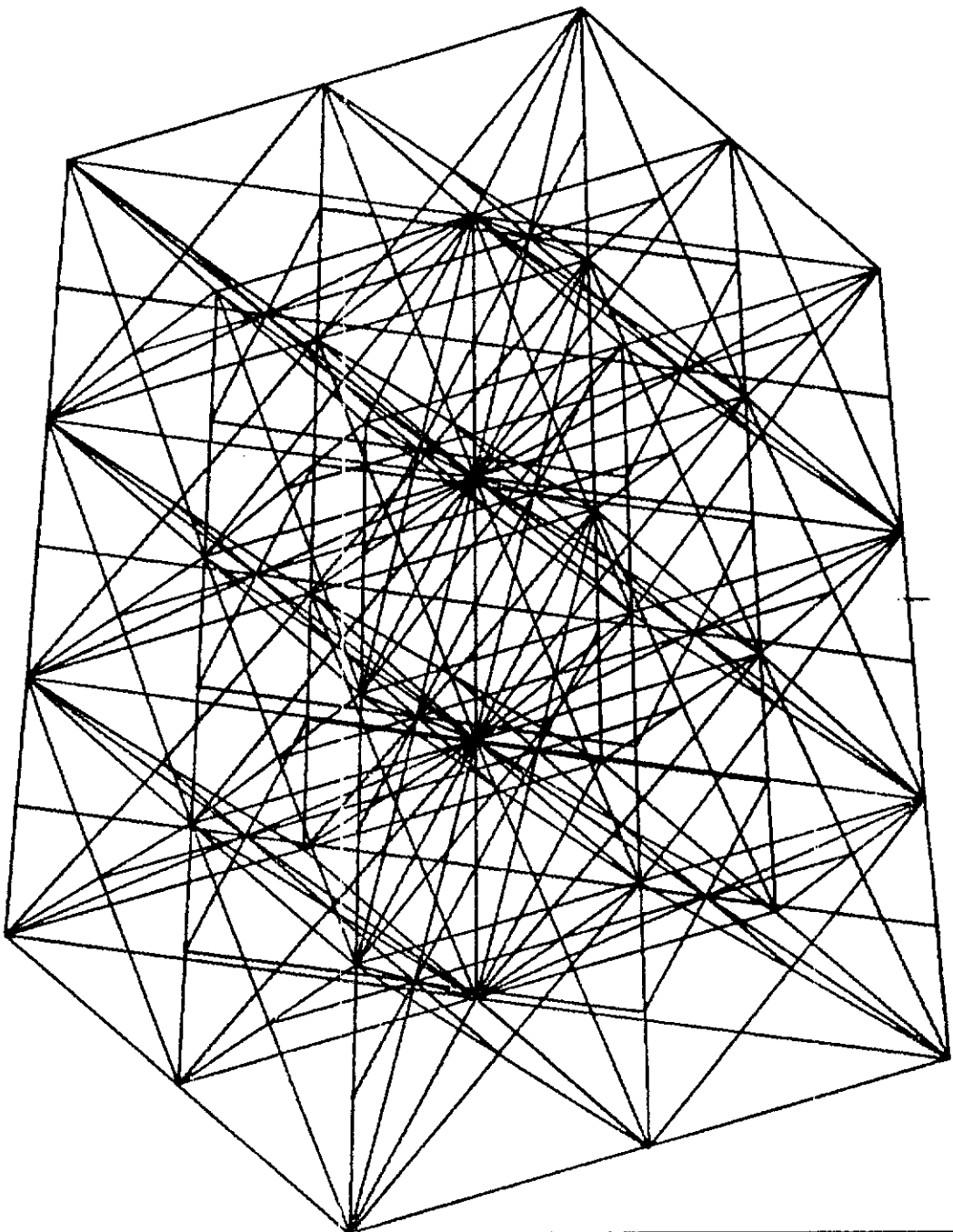
Figura 4.24 - Estabilizadores Diagonais

IV.4 - Análise de tempo de execução de uma plataforma marítima fixa em microcomputador

Este exemplo visa principalmente estabelecer as potencialidades e limitações do programa implementado em microcomputador, na análise de estruturas reais comumente encontradas na engenharia offshore. A estrutura escolhida é uma plataforma fixa, hipotética, de 75 metros de altura e situada em uma lâmina d'água de 65 metros. A seção transversal é quadrada com 58 metros na base e 50 metros no topo. As figuras IV.26, IV.27 e IV.28 mostram uma perspectiva, projeção horizontal e projeção vertical, respectivamente. O modelo estrutural é composto por 111 nós, 406 elementos e molas lineares representando as estacas. O modelo apresenta 666 graus de liberdade.

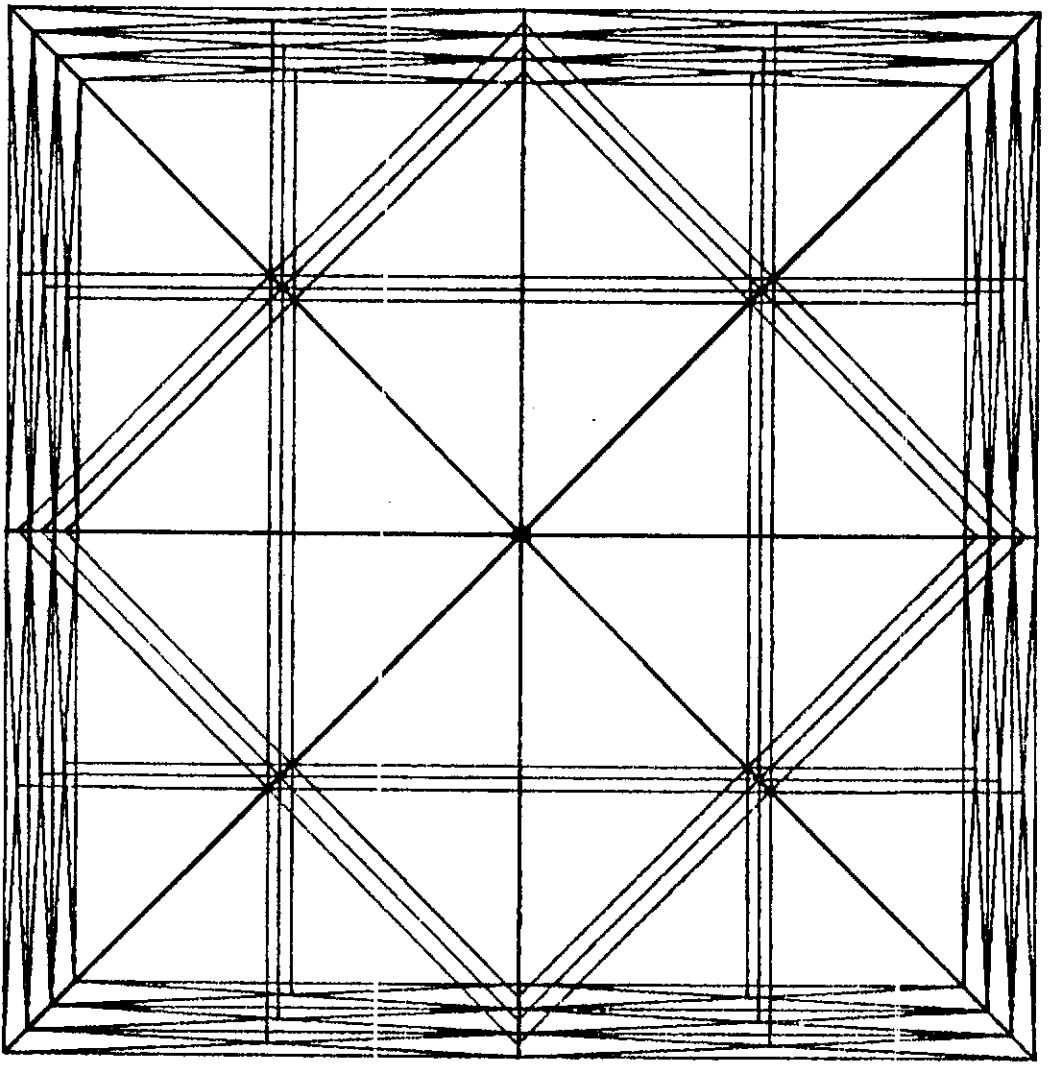
Esta estrutura foi analisada na referência [18] como estudo do comportamento não-linear elasto-plástico de plataformas marítimas fixas com membros danificados, usando o programa CALEB- Carga Limite de Estruturas Formadas por Barras.

As características geométricas da estrutura são ajustadas de modo a forçar um comportamento essencialmente estático. O módulo de elasticidade longitudinal das 4 pernas externas é o dobro do módulo de elasticidade dos elementos do sistema de travamento. Desta forma, a estrutura apresenta alto grau de ductibilidade, isto é, pode absorver cargas mesmo após a plastificação total de um ou mais nós.



ANÁLISE NÃO LINEAR DE JAQUETA -111 NÓS/406 ELEMENTOS

Figura 4.26



ANÁLISE NÃO LINEAR DE JAQUETA -111 NOS/406 ELEMENTOS

Figura 4.27

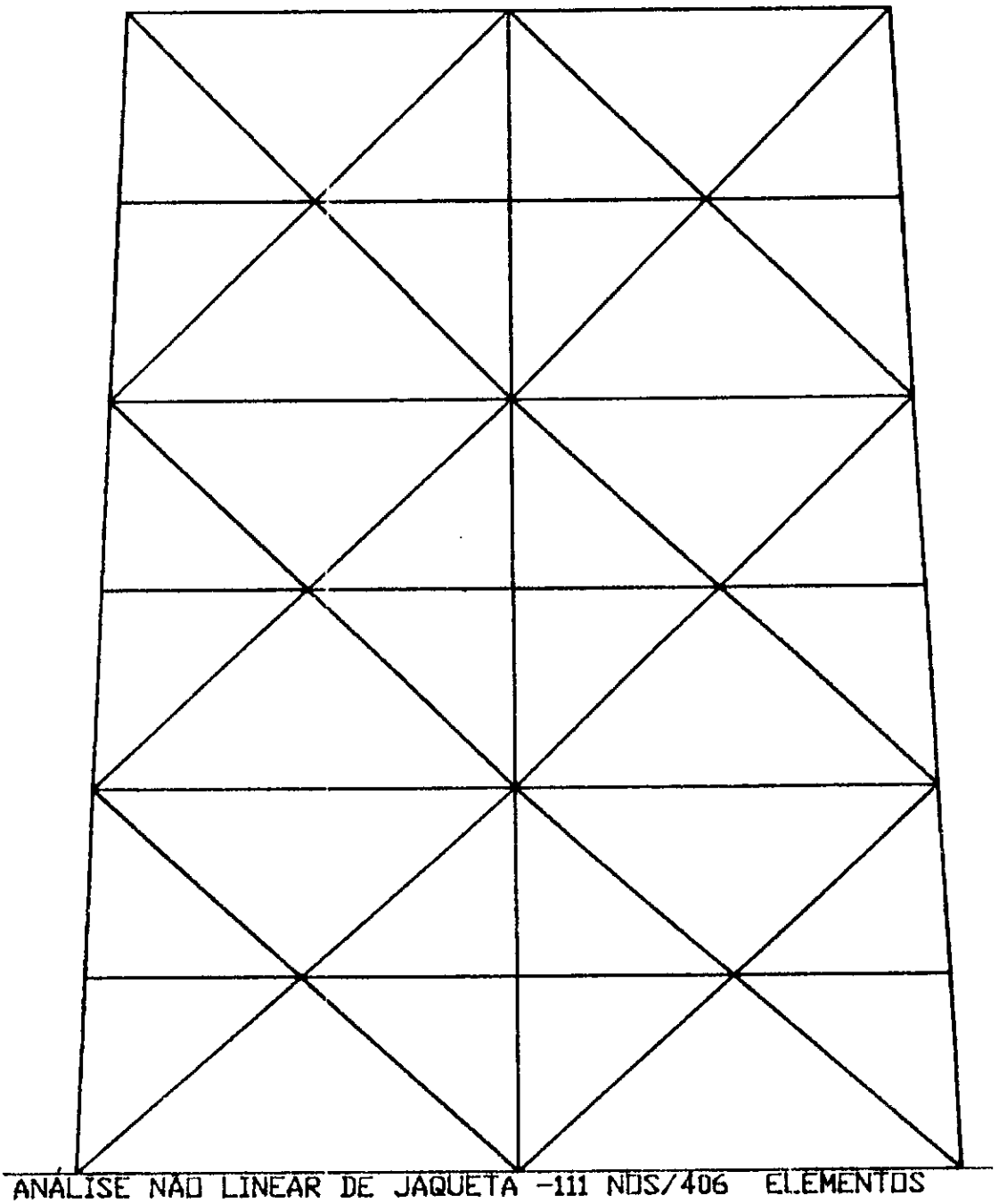


Figura 4.28

Determina-se a capacidade de carga da plataforma íntegra,onde as cargas de peso próprio e cargas de convés são aplicadas incrementalmente e mantidas constantes durante a análise. As cargas ambientais (onda, corrente, etc.) são gradativamente majoradas até o colapso da estrutura.Como os elementos de pórtico consideram tanto não linearidade geométrica como física, a forma como o carregamento é aplicado incrementalmente é de fundamental importância para a convergência do problema.

Primeiramente a estrutura foi analisada somente com um incremento de carga. Foi considerado um nível de carga apenas com forças devido ao peso próprio da estrutura.

Foram comparados os tempos de execução em um microcomputador IBM-PC/AT com processador 80286 operando com clock de 12 MHz e co-processador matemático 80287 com clock de 11.10 MHz e em um microcomputador COMPAQ 386/20 com processador 80386 e co processador matemático 80287 com clock de 20 MHz. Nos dois computadores, foi analisada a estrutura da figura IV.26, sujeita apenas a um nível de carga. Dimensionou-se o vetor de trabalho $\underset{\sim}{A}$ com 15000 posições, NMAX = 15000. Este dimensionamento acarreta uma partição do sistema de equações em 15 blocos. A matriz de rigidez elasto-plástica dos elementos é reavaliada a cada iteração. A seguir apresenta-se uma tabela com os tempos de execução das diversas etapas na resolução do problema proposto.

Deve-se observar que a triangularização do sistema de equações é a etapa que consome maior esforço computacional. Isto é devido à divisão do sistema de equações em blocos, resultando em diversas transferências entre memórias. Como o microcomputador COMPAQ 386/20 trabalha com um clock de 20 MHz, este tempo é bastante reduzido, fazendo com que o tempo total de execução seja aproximadamente 176% menor.

Tabela 16

E T A P A	IBM-PC/AT		COMPAQ 386/20	
	TEMPO (s)	% TEMPO TOTAL	TEMPO (s)	% TEMPO TOTAL
1 Leitura dos dados de entrada cálculo das matrizes de rigidez e rotação dos elementos	671	16.47	477	31.32
2 Atualização das matrizes elasto-plásticas e montagem do vetor de forças internas	454	10.77	166	12.3
3 Montagem da matriz de rigidez global da estrutura	263	6.24	201	13.19
4 Triangularização	2543	60.35	563	36.96
5 Retrosubstituição	260	6.17	95	6.23
TOTAL	4214		1523	

Para obter resultados mais significativos foi feita uma segunda análise visando atingir um nível de carga suficientemente grande para o início de escoamento de alguns nós.

A função de carga adotada encontra-se na tabela abaixo.

Tabela 17

INCREMENTO	1	2	3	4	5	6	7
PARÂMETRO λ	1.0	1.25	1.5	1.75	2.0	2.125	2.25

INCREMENTO	8	9	10	11	12	13
PARÂMETRO λ	2.375	2.5	2.625	2.75	2.875	3.0

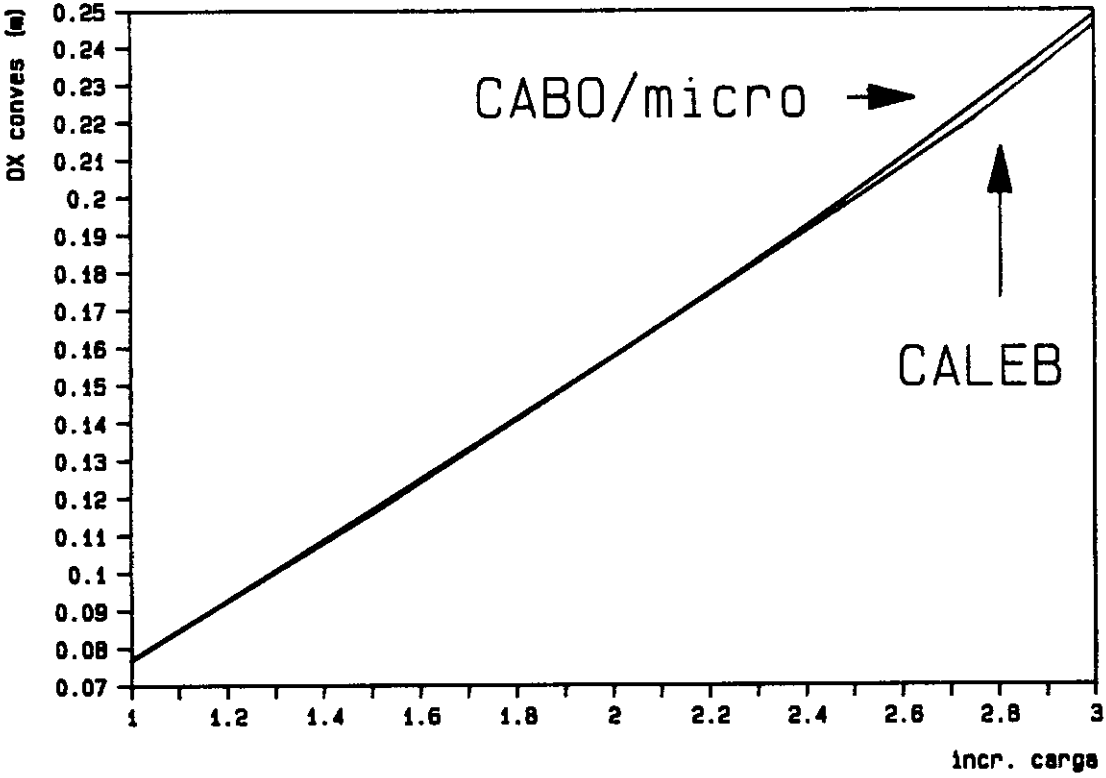
onde λ é o parâmetro multiplicador das cargas ambientais.

A curva de resposta do deslocamento horizontal do convés encontra-se no gráfico da figura IV.33. Os valores utilizados no gráfico estão na tabela 18.

A curva de resposta para a força axial na barra 116 encontra-se no gráfico da figura IV.34, enquanto que, os valores utilizados na confecção deste gráfico estão na tabela 19.

Tabela 18

DESLOCAMENTO HORIZONTAL DO CONVÉS			
INCR	λ	CABO/MICRO	IBM 3090
1	1.000	0.0772	0.0776935
2	1.250	0.0969	-
3	1.500	0.1170	0.116604
4	1.750	0.1373	-
5	2.000	0.1578	0.157620
6	2.125	0.1683	-
7	2.250	0.1790	0.178434
8	2.375	0.1899	-
9	2.500	0.2012	0.199345
10	2.625	0.2128	-
11	2.750	0.2246	0.220999
12	2.875	0.2366	-
13	3.000	0.2487	0.245919



CALEB - Carga Limite de Estruturas Formadas por Barras

Fig. 4.33 - DESL. HORIZONTAL DO CONVES

Tabela 19

FORÇA AXIAL - BARRA 116 (kN)			
INCR	λ	CABO/MICRO	IBM 3090
1	1.000	458.90	460.10
2	1.250	496.10	-
3	1.500	548.26	553.89
4	1.750	554.23	-
5	2.000	559.33	580.45
6	2.125	563.48	-
7	2.250	566.72	583.76
8	2.375	569.54	-
9	2.500	571.10	583.89
10	2.625	573.34	-
11	2.750	573.79	583.89
12	2.875	573.53	-
13	3.000	573.42	583.91

CONTROLE DA FORÇA AXIAL
IBM 3090
CONTROLE
COMPAQ 20/386

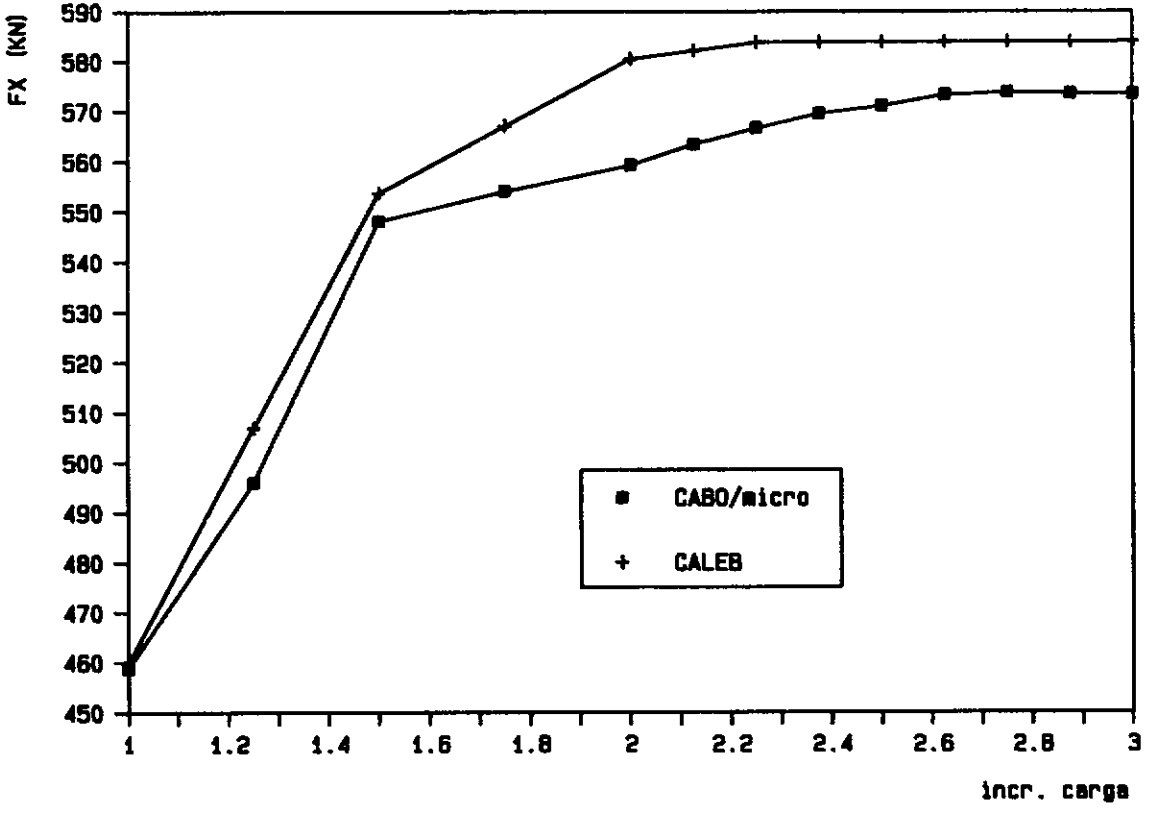


Fig. 4.34 - FORCA AXIAL DA BARRA 116

A barra 116 é a mais solicitada e é a primeira que apresenta escoamento nodal.

Os resultados obtidos em microcomputador são bastante próximos aos resultados da análise original. Deve-se ressaltar que apesar de ocorrer plastificação da barra 116, o trecho da função de carga incremental escolhido é quase elástico.

Quando se considera apenas o efeito de não linearidade física, a função de escoamento da barra 116 atinge o valor unitário (plastificação total) para uma força axial de 573.34 kN. Em contrapartida, ao incluir efeitos de não-linearidade geométrica tal efeito ocorre para força axial igual a 583.76 kN.

O tempo total de execução dos 13 incrementos de carga foi bastante elevado (aproximadamente 5.5 horas no COMPAQ 386/20), apesar da matriz de rigidez elasto-plástica dos elementos ser reavaliada somente a cada novo incremento de carga.

Para uma análise incremental adequada deste caso em microcomputador, faz-se necessária a utilização de um procedimento do tipo "save-restore", onde valores intermediários são gravados em arquivos. A adoção deste procedimento dá liberdade ao usuário de continuar a análise a partir de uma configuração anterior, viabilizando cargas aplicadas em maior número de incrementos. Outra consideração importante é o fato de que as cargas devido à ação hidrodinâmica são aplicadas incrementalmente, podendo ocorrer o colapso da estrutura correspondente a um estado de mar i-

nexistente. Deve-se prever uma variação dos estados de mar iniciais para determinar as cargas de ruptura.

IV.5 - Análise Estática Não-Linear de Plataforma Estaiada para Águas Profundas

Este exemplo visa principalmente a aferição do módulo de cargas hidrodinâmicas, implementado no programa **CABO/micro**. Estuda-se as restrições do programa na análise estática, não-linear geométrica de uma plataforma estaiada para águas profundas.

O cálculo de estruturas marítimas deve ser minucioso e preciso na consideração de cargas ambientais (onda, corrente, empuxo, peso próprio, etc.) pois sua configuração final deve ser tal que, a probabilidade de ocorrência de amplificação dinâmica seja minimizada. Para tanto, o período natural da estrutura deve ser bem diferente do período natural da onda. Isto pode ser obtido através de enrijecimento da estrutura.

Entretanto, estruturas muito rígidas tornam-se inviáveis do ponto de vista econômico e operacional quando a profundidade da lâmina d'água é elevado.

A ineficiência de estruturas convencionais (rígidas e engastadas no fundo do mar), para profundidades superiores a 300 m é compensada com a adoção de estruturas complacentes. Estas estruturas apresentam grandes deslocamentos quando sujeitas às cargas ambientais, isto é, possuem períodos naturais de vibração elevados, maiores que os períodos naturais da onda.

O seu comportamento global é semelhante a uma viga bi-rotulada. O movimento torsional da torre é evitado através de 8 pares de estais, ligados à plataforma no nível de 275 metros e ancorados no fundo do mar a uma distância de 1154 metros do centro da torre.

Foram feitas análises em um modelo completo com elementos de pórtico não-linear geométrico e molas lineares e em um modelo unidimensional ("stick model") com cabos (modelo acoplado).

Foram assumidas molas lineares cuja rigidez é relativa ao primeiro trecho positivo (0-3m) das curvas da figura V.1. Estas molas lineares são consideradas somente em uma das faces, visto que só ocorre deslocamento global da estrutura em uma direção (onda e corrente aplicadas a 0^0 com o eixo X-global). A disposição das molas lineares está na figura V.3 a seguir.

Estas aproximações pecam em dois aspectos:

1º) Para deslocamentos maiores que 3 m.nos nós 100, 103 e 107, é necessário uma nova interpolação nas curvas força-deslocamento.

2º) A disposição das molas somente em uma face desconsidera que os cabos na face oposta, mesmo frouxos, apresentam alguma rigidez.

PLATAFORMA: Encontra-se na figura V.4 uma perspectiva da torre. A plataforma tem 330 metros de altura e situa-se em uma lâmina d'água de 300 metros. O modelo estrutural é composto por uma torre externa com 27 metros quadrados de seção que é suportada internamente por uma outra torre com 7 metros quadrados de seção. As duas torres são interconectadas, da base ao topo, por diversos elementos. O modelo final possue 520 elementos de pórtico não-linear geométrico, 139 nós, molas lineares representando os cabos e 810 graus de liberdade.

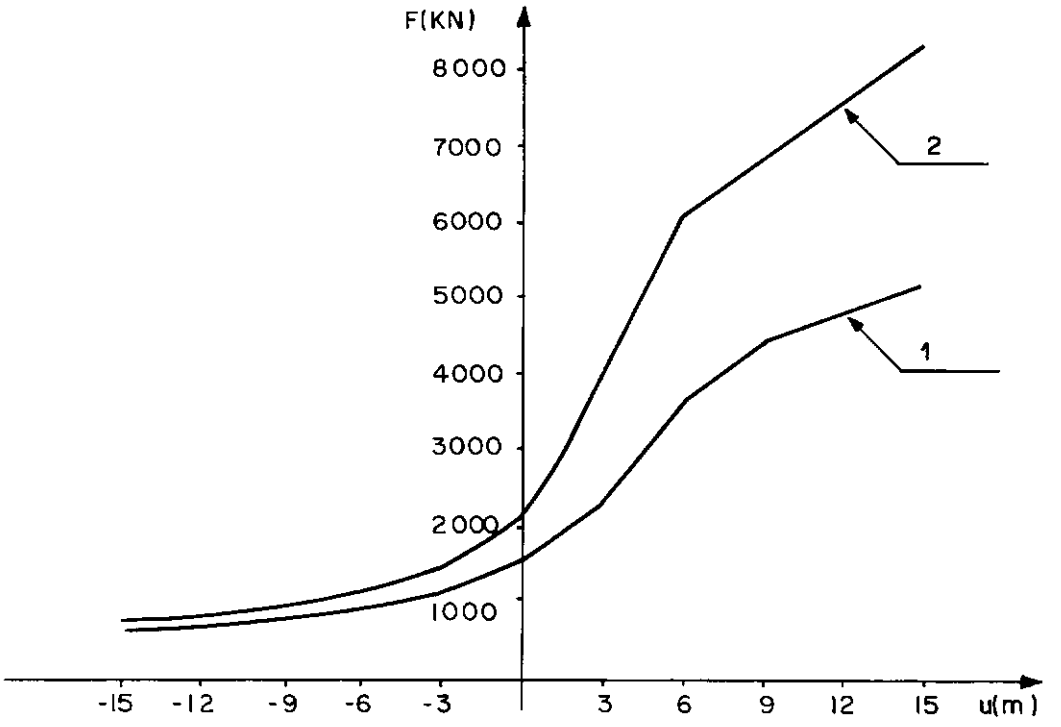


Fig. 5.1 — Funções força - deslocamento

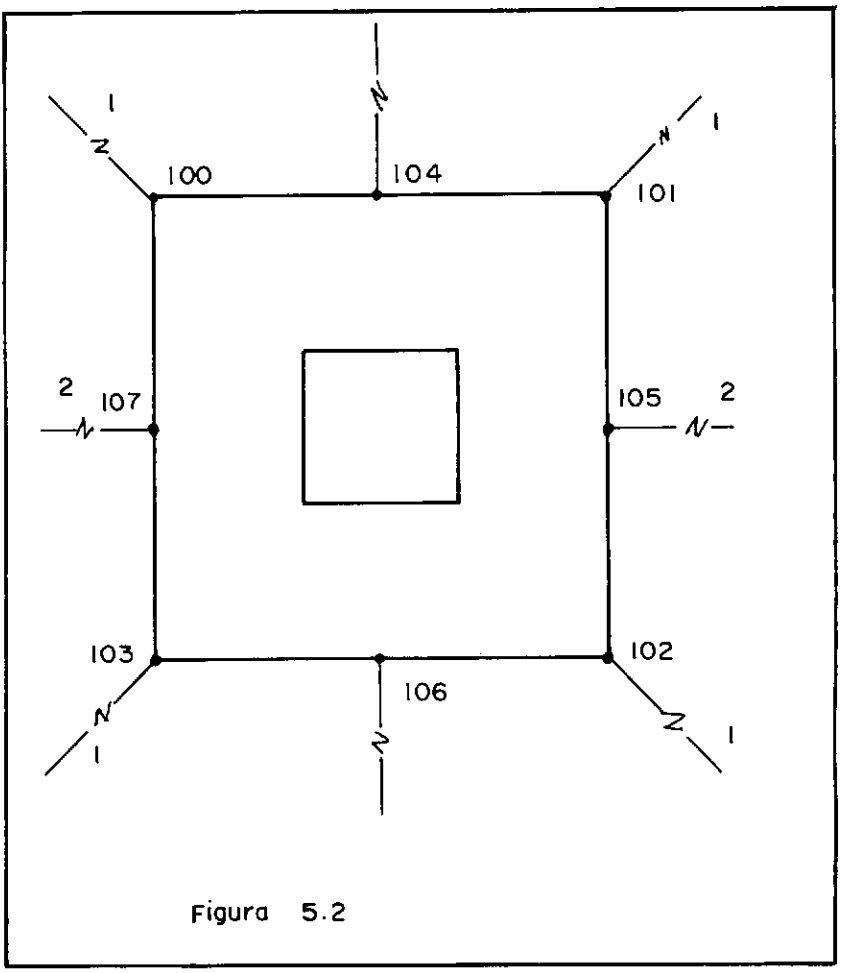


Figura 5.2

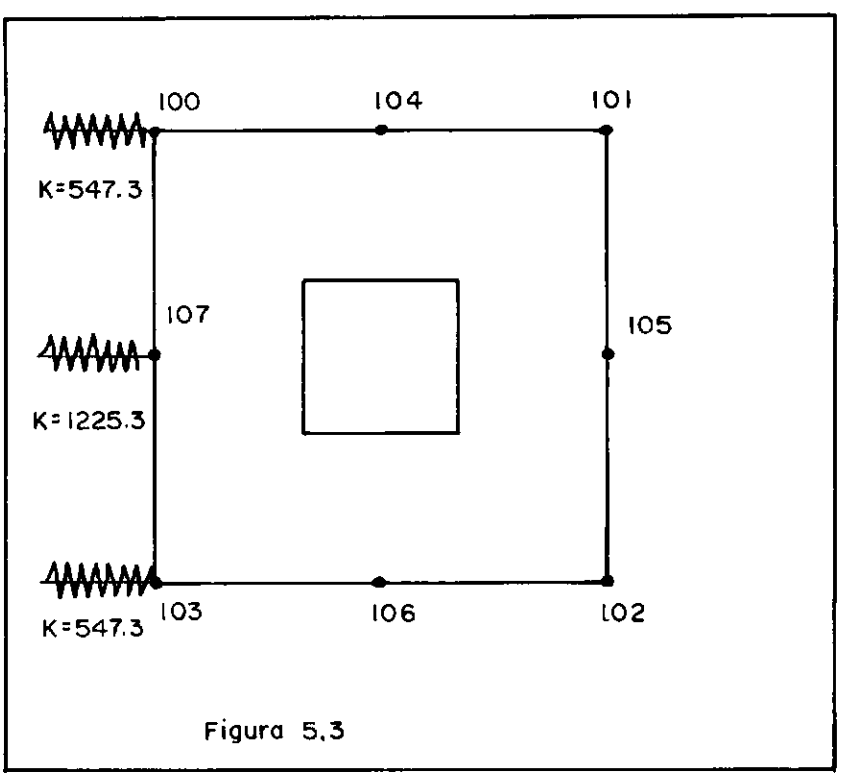


Figura 5.3

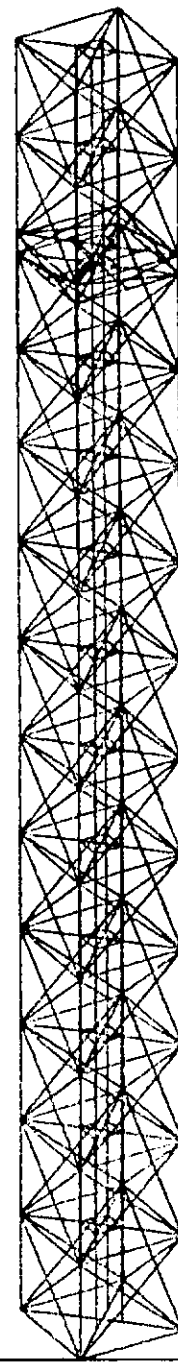


Figura 5.4 – Perspectiva da torre

Enquanto que o modelo completo visa determinar a capacidade do programa em termos de memória, o modelo acoplado procura avaliar a precisão de resultados.

A seguir são descritos os modelos adotados e os resultados dos estudos realizados.

1º) MODELO COMPLETO

CABOS: Para modelar a estrutura original [19], foram necessárias algumas simplificações devido às limitações do programa **CABO/micro**.

Na análise da referência [19], cada estal foi discretizado com 24 elementos de cabo. Efetuou-se então uma análise estática considerando somente o peso próprio dos estais e impondo um deslocamento horizontal no nó superior para simular o movimento da plataforma. Com isso foi possível determinar curvas força-deslocamento, representativas do comportamento não-linear dos estais. Estas curvas não lineares são apresentadas na figura V.1, enquanto que os cabos ao qual estão associados estão na figura V.2.

CARGAS APLICADAS:

ONDA : Amplitude (H) - 9 metros
Período (T) - 8 segundos

CORRENTE: Velocidade na superfície (VCSURF) - 0.8 m/s
Velocidade no fundo (VCBOTT) - 0.1 m/s

VENTO : Velocidade 36 m/s

ANÁLISE DE RESULTADOS:

Foram feitas 2 análises estáticas com o modelo completo: a primeira considera elementos de pórtico linear e molas lineares enquanto que a segunda utiliza elementos de pórtico não linear e molas lineares.

Os valores do último incremento de carga são utilizados para plotar o deslocamento global da estrutura na direção X (figura V.7). Os resultados obtidos em microcomputador são bastante precisos quando comparados com os resultados do **ADEP/ANCAB**, apesar de que no programa **CABO/micro**, as cargas de onda e corrente são consideradas para a posição indeformada da estrutura.

A figura V.8 apresenta curvas: deslocamento do convés x carga aplicada. Os valores para o caso onde são consideradas molas não-lineares foram obtidos no ADEP/ANCAB.

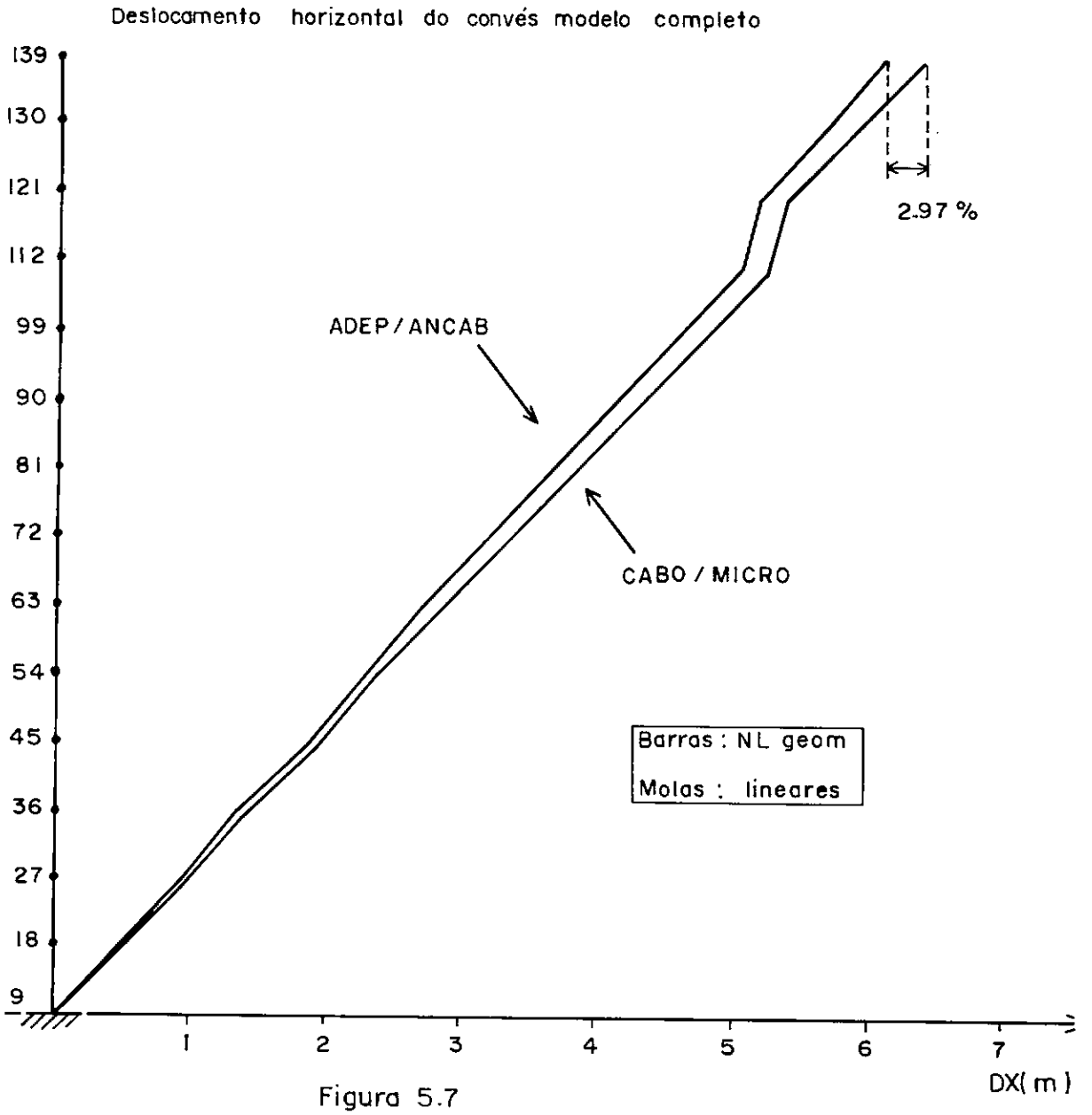

Deslocamento horizontal do convés modelo completo
139
130
121
112
99
90
81
72
63
54
45
36
27
18
9
2.97 %
ADEP / ANCAB
CABO / MICRO
Barras : NL geom
Molas : lineares
1
2
3
4
5
6
7
DX(m)

Figura 5.7

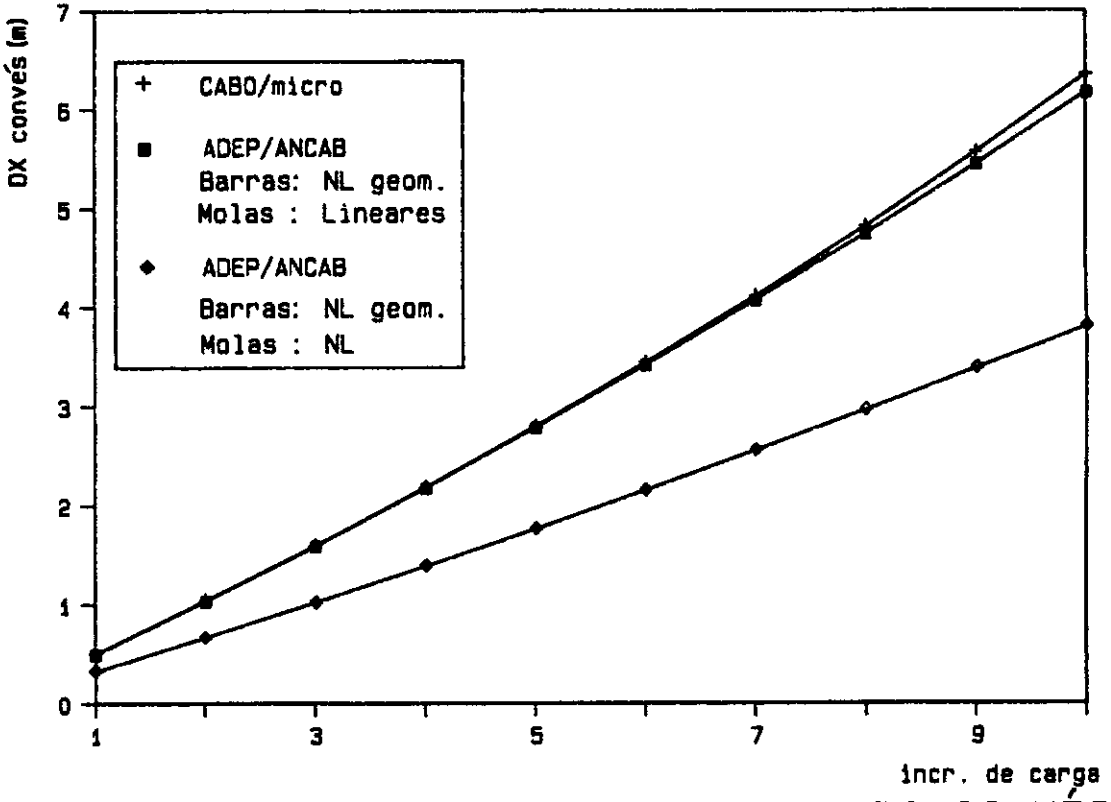


FIG. 5.8 - DESLOC. HORIZONTAL DO CONVÉS

Deve-se observar que mesmo efetuando uma linearização adequada nas curvas força-deslocamento dos cabos, é difícil reproduzir adequadamente o comportamento não linear dos mesmos, reforçando assim a necessidade de se prever a implementação de molas não lineares.

2º) MODELO ACOPLADO

CABOS: A disposição dos cabos encontra-se na figura V.10. Cada estal é discretizado com 11 elementos de cabo. Os elementos 103, 203, ..., 803 possuem propriedades do material e da seção diferentes dos outros elementos para representar os pesos articulados ("Clumped Weights").

PLATAFORMA: É considerado um modelo unidimensional ("Stick Model") com 14 elementos de pórtico não-linear, 1 mola linear e os cabos (modelo com 329 graus de liberdade). O comportamento da estrutura tridimensional é preservado através da consideração de rigidezes e cargas equivalentes, obtidas a partir de seções e coeficientes de Morison apropriados.

CARGAS APLICADAS: Como o principal propósito na análise do modelo acoplado é a verificação da validade dos módulos de carga hidrodinâmica, foram consideradas somente cargas de onda, corrente, peso próprio e empuxo para um carregamento de operação e um carregamento de tormenta:

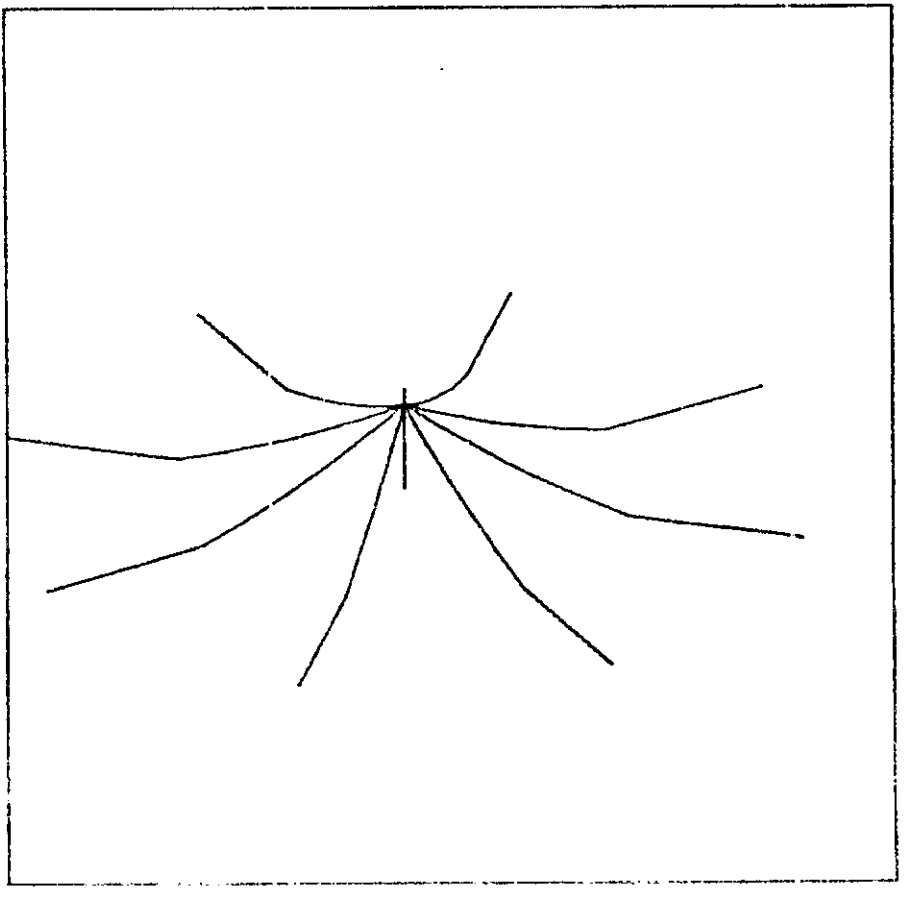


Figura 5.10 — Disposição do cabo no modelo acoplado — perspectiva

ANÁLISE DE RESULTADOS: A tabela 20 a seguir apresenta os deslocamentos horizontais do modelo acoplado. Obteve-se um deslocamento no convés (nó 15) de 6.3832 m.no **CABO/micro**, contra 6.0819 m. no ADEP/ANCAB. Esta diferença de 4.95% é bastante desprezível em um problema com tantas fontes de não-linearidade como este.

Já a figura V.11 apresenta as deformadas para carregamento de operação e tormenta. Nota-se a complacência do modelo e a influência do carregamento ambiental no deslocamento do convés. Para cargas de operação, obtém-se um deslocamento de 6.38 metros, enquanto que ao considerarmos cargas de tormenta este deslocamento será de 23.32 metros.

Alguns tempos de execução são apresentados a seguir: (vide tabela 21).

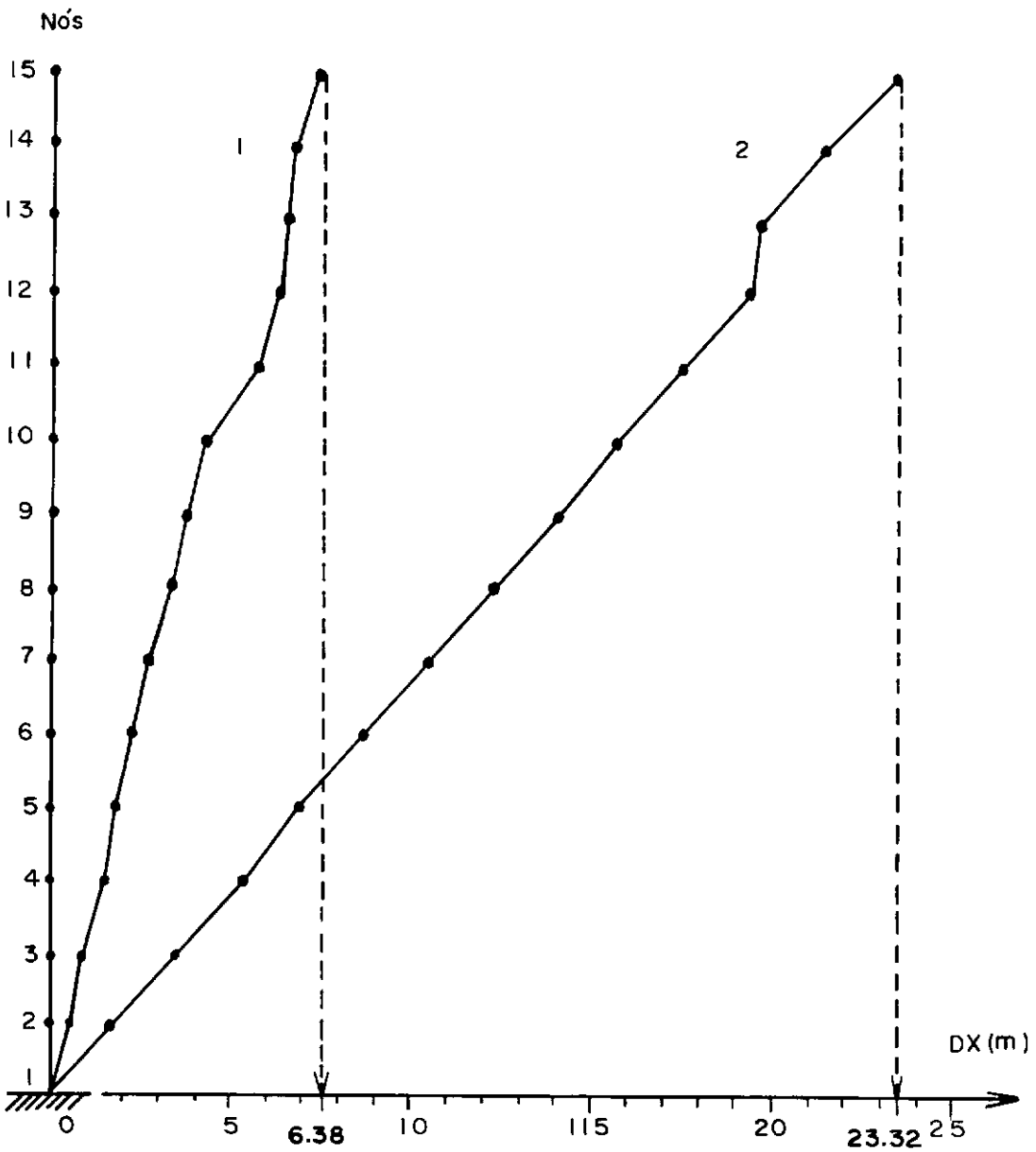
Tabela 20

Deslocamento X

ELEM.	1 inc λ = 0.2		2 inc λ = 0.4		3 inc λ = 0.6		4 inc λ = 0.8		5 inc λ = 1.0	
	ANCAB	MICRO	ANCAB	MICRO	ANCAB	MICRO	ANCAB	MICRO	ANCAB	MICRO
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0.289271	0.2757	0.35898	0.3751	0.395934	0.4187	0.422481	0.4507	0.445568	0.4696
3	0.580428	0.5532	0.720335	0.7526	0.794523	0.8401	0.847833	0.9043	0.894204	0.9423
4	0.873312	0.8323	1.08390	1.1323	1.19561	1.2461	1.27593	1.3607	1.34581	1.4178
5	1.16776	1.1129	1.44949	1.5141	1.599904	1.6903	1.70661	1.8195	1.80025	1.8959
6	1.46361	1.3948	1.81692	1.8976	2.00461	2.1185	2.13970	2.2806	2.25737	2.3765
7	1.76070	1.6777	2.18602	2.2827	2.41215	2.5486	2.57504	2.7434	2.71700	2.8592
8	2.05886	1.9617	2.55658	2.6692	2.82146	2.9803	3.01241	3.2087	3.17894	3.3440
9	2.35793	2.2465	2.92843	3.0569	3.23234	3.4134	3.45163	3.6752	3.64302	3.8305
10	2.65774	2.5319	3.30136	3.4455	3.64460	3.8478	3.89251	4.1433	4.10902	4.3186
11	2.95814	2.8179	3.67521	3.8351	4.05805	4.2832	4.33486	4.6126	4.57679	4.8083
12	3.25899	3.1043	4.04982	4.2253	4.47256	4.7197	4.77853	5.0832	5.04617	5.2995
13	3.31921	3.1616	4.12482	4.3035	4.55558	4.8071	4.86742	5.1775	5.14024	5.3979
14	3.62036	3.4483	4.50002	4.6943	4.97095	5.2443	5.31224	5.6492	5.61105	5.8905
15	3.92155	3.7350	4.87527	5.0852	5.38640	5.6817	5.75715	6.1210	6.08198	6.3832

TABELA 21 : TEMPOS DE EXECUÇÃO

ETAPA	IBM - PC/AT		COMPAQ 386/20	
	tempo (s)	% tempo total	tempo (s)	% tempo total
1) LEITURA DOS DADOS DE ENTRADA (INPUT)	165	5.10	155	9.01
2) ATUALIZAÇÃO DA PARCELA GEO - MÉTRICA DA MATRIZ DE RIGIDEZ DOS ELEMENTOS DE PÓRTICO E CÁLCULO DE FORÇAS DE ONDA SOBRE OS CABOS. (NOVAK2)	1900	58.73	900	52.32
3) MONTAGEM DA MATRIZ DE RIGIDEZ GLOBAL DA ESTRUTURA (1 BLOCO) (MAKOU)	245	7.57	300	17.44
4) TRIANGULARIZAÇÃO (COLSOU)	741	22.90	200	11.63
5) RETROSUBSTITUIÇÃO (COLSOU)	184	5.69	165	9.60
TOTAL:	3235		1720	



CARGA	ONDA		VEL. CORRENTE (m/s)	
	H (m)	T (s)	SUPERF	FUNDO
1 OPERAÇÃO	9	8	0.8	0.1
2 TORMENTA	18	14	1.45	0.25

Figura 5.11 – Modelo acoplado

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Este trabalho descreve um programa para análise estática não-linear de estruturas marítimas estaiadas, implementado em microcomputador. O programa **CABO/micro** baseia-se principalmente no programa **CABO**, implementado no Burroughs B6700.

O enfoque adotado foi modificar as rotinas do programa original de modo a funcionar em microcomputador, sem entretanto alterar a estrutura global do programa. Além disso foram incorporadas rotinas para a consideração do efeito de cargas hidrodinâmicas e não-linearidade física de elementos de pórtico espacial, possibilitando análises bastante completas de estruturas comumente encontradas na engenharia offshore.

Como a estrutura do programa original foi projetada para computadores de grande porte, a entrada de dados é um arquivo que é processado sob forma de "batch". Perde-se desta forma uma vantagem preponderante nos microcomputadores que é a possibilidade de interação com o usuário, por exemplo, na especificação dos dados de entrada.

O programa resultante é um "bloco monolítico" que, mesmo sendo executado em overlays, necessita alocar mais área de memória para a análise de estruturas de grande porte. A seguir são tecidos comentários a respeito dos modelos estruturais adotados e do programa resultante. São também enumeradas algumas sugestões para futuras melhorias.

SOBRE OS MODELOS UTILIZADOS

A representação dos cabos é feita através do uso do elemento catenária, cuja formulação baseia-se em um processo iterativo do método de flexibilidade. Diversos estudos sobre o elemento catenária foram feitos por pesquisadores como Creus e Mourelle [25]. Este elemento é bastante eficiente pois, em problemas estáticos não-lineares, apresenta alta capacidade de convergência sem a necessidade de dividir as cargas em muitos incrementos ou discretizar muito a estrutura. Outros elementos mostram-se extremamente sensíveis ao refinamento da malha.

A consideração de cargas de onda, corrente, empuxo e peso próprio é feito mediante o comando **ONDA**. Este comando deve ser o primeiro no arquivo de dados, logo após a especificação do título da análise.

Para cada elemento são calculadas 12 ações de engastamento perfeito devido a ação hidrodinâmica.

A consideração de não-linearidade geométrica em elementos de pórtico espacial e treliças baseia-se na suposição de grandes deslocamentos, pequenas deformações e material elástico. A formulação adotada resulta de uma equação incremental não linear deduzida a partir do princípio dos trabalhos virtuais.

A consideração de não linearidade física de pórticos espaciais é feita mediante o emprego de uma matriz de rigidez elastoplástica deduzida a partir da teoria plástica das vi-

gas e de um critério de escoamento nodal.

Todos os elementos enumerados acima foram exaustivamente testados, apresentando resultados bastante satisfatórios.

SOBRE O PROGRAMA

Uma das conclusões mais destacadas desta pesquisa é a necessidade de uma total reavaliação e adaptação dos programas de cálculo estrutural, desenvolvidos e projetados para computadores de grande porte, na sua utilização em microcomputadores.

Os microcomputadores caracterizam-se por possuir reduzida capacidade de "memória central" e endereçamento de váriáveis. Desta forma, programas desenvolvidos para um computador de grande porte, dificilmente apresentarão boa performance quando transferidos diretamente para o microcomputador.

Visando uma economia de "memória central", é indispensável uma eficiente estruturação do programa e uma otimização no gerenciamento dos dados e resultados intermediários. Deve-se também procurar a utilização racional e equilibrada de transferências entre memória principal e memórias secundárias.

O esquema de armazenamento das alturas efetivas das colunas em um vetor de trabalho e o particionamento em blocos (ver capítulo III, item III.3.2 para uma explicação detalhada) é bastante eficiente no tratamento da esparsidade da matriz de rigidez global da estrutura. As transferências entre me-

mória central e auxiliar dos blocos que não estão sendo acoplados, deixam mais área livre na memória central, apesar de aumentar as operações de Input/Output.

Para a análise de estruturas mais complexas (4º e 5º casos apresentados), foi necessário alterar a configuração dos arquivos secundários.

No programa original era feita uma "bufferização" nos arquivos 19 e 20 (ver conteúdo dos arquivos no Apêndice C), com o propósito de diminuir o número de transferências entre memórias. Consistia em acumular os dados em um vetor temporário (BUFFP), na memória central, para gravá-los posteriormente. Devido ao exíguo espaço de memória central, optou-se por eliminar a "bufferização".

Outra importante modificação foi transformar alguns arquivos diretos em sequenciais. Isto diminui consideravelmente o esforço computacional,pois menos apontadores internos são utilizados. Optou-se por arquivos sequenciais binários.

Imprescindível também foi a utilização de "overlays" (módulos de mesmo nível hierárquico, compartilhando não concomitantemente a mesma área de memória RAM). São efetuados 6 "overlays".

O dimensionamento adequado do vetor de trabalho A no programa principal, tanto no COMMON como na variável NMAX, deve ser ajustado para possibilitar a análise de estruturas complexas com o menor número de blocos possíveis.

Pode-se considerar que os resultados obtidos são bastante satisfatórios, mesmo em análises envolvendo não-linearidades de cabos e pórticos sujeitos a ações ambientais as mais variadas. O programa implementado pretende se constituir em uma ferramenta de auxílio na análise estática de plataformas estaiadas,"risers"e torres estaiadas para transmissão de energia elétrica. Deve-se ressaltar que para estudos mais detalhados torna-se conveniente a inclusão de rotinas para a consideração de molas não-lineares para simular o contato com o fundo do mar. Com o propósito de tornar o programa mais eficiente em microcomputador, já está sendo implantada uma formulação mais interativa,onde os comandos são módulos executáveis ou macrocomandos de forma semelhante à proposta por ZIENCKIEWICZ [20].

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] JAYARAMAN, H.B. e KNUDSON, W.C. - "A Curved Element for the Analysis of Cable Structures" - Computers & Structures. Vol. 14 n. 3.4 pp. 325-333, 1981.

[2] PEYROT, A.H. e GOULOIS, A.M. - "Analysis of Cable Structures" - Computers & Structures, Vol. 10, pp. 805-813.

[3] PEYROT, A.H. - "Marine Cable Structures" - Journal of the Structural Div. - ASCE, Dezembro, 1980, pp. 2392-2403.

[4] BATHE, K.J. - "Finite Element Procedures in Engineering Analysis" - Prentice Hall, 1982.

[5] EBECKEN, N.F.F. - "LORANE-NL - Uma Linguagem Orientada a Análise Estrutural Não-Linear" - Tese de D.Sc. - COPPE/UFRJ, 1977.

[6] EBECKEN, N.F.F. - "Teoria das Ondas. Ação do mar em estruturas de jaquetas". - Curso de Doutorado. Análise Avançada de Estruturas Offshore I (1982).

[7] MOURELLE, M.M. e EBECKEN, N.F.F. - "A Computational System for the Analysis of Marine Structures with Cable Arrays" - 3 Simpósio de Engenharia Offshore, Rio de Janeiro, Setembro 1983.

[8] PEYROT, A.H. e GOULOIS, A.M. - "Analysis of Flexible Transmission Lines" - Journal of the Structural Division - ASCE, Maio, 1978.

[9] ARGYRIS, J.M. e SCHARPF, D.W. - "Large Defletion Analysis of Prestressed Networks". Journal of the Structural Division - ASCE, March, 1972, pp. 633-654.

[10] PEYROT, A,M.; LEE, J.W.; JENSEN, H.G.; OSTERAAS, J.D. - "Application of Cable Elements Concept to a Transmission Line with Cross Rope Suspension Structures". IEE. Transactions on Power Apparaters and Systems. Vol. PAS-100, nº 7, Julho, 1981.

[11] WANG, C.K. - "General Computer Program for Limit Analysis"- Journal of the Structural Division, ASCE - vol. 89, ST6, (1963), pp. 101-117.

[12] MORRIS, G.A. e FERRIUS, S.J. - "Elastic Plastic Analysis of Frameworks", Journal of the Structural Division, ASCE - vol. 89, ST5, (1970), pp. 931-946.

[13] OWEN, O.R.J. e HINTON, E. - "Finite Elements in Plasticity - Theory and Practice", Pineridge Press Limited, Swansea, UK (1980).

[14] BATHE, K.J. e WILSON, E.L. - "Numerical Methods in Finite Element Analysis", Prentice Hall, New Jersey, USA (1976).

[15] JOHNSTON, B.G.; LIN, F.J.; GALAMBOS, T.V. - "Basic Steel Design", 2nd edition, Prentice Hall, New Jersey, USA (1980).

[16] YURA, J.A. e LU, L.W. - "Ultimate Load Tests on Braced Multistory Frames", Journal of the Structural Division, ASCE, 95, ST10, (1969), pp. 2243-2263.

[17] BEEDLE, S.L. - "Plastic Design of Steel Frames", John Wiley & Sons Inc. (1958).

[18] BENJAMIN, A.C. e EBECKEN, N.F.F. - "Nonlinear Analysis of Fixed Offshore Platforms with Damaged Members" - Offshore Engineering, vol. 6, Pentech Press, London (1987), pp. 370-384.

[19] BENJAMIN, A.C.; MOURELLE, M.M.; JACOB, B.P.; EBECKEN, N. F.F., "Coupled and Uncoupled solutions for the Non-linear Dynamic Behaviour of Guyed Deep Water Platforms", Advances in Engineering Software, vol. 10, no. 1, pp. 2-7.

[20] ZIENKIEWICZ, O.C. - "The Finite Element Method" - 3nd edition, McGraw-Hill (1977).

[21] BENJAMIN, A.C. e EBECKEN, N.F.F. - "Formulação de um Elemento Finito de Pórtico Elasto-Plástico a Partir da Teoria Plástica de Vigas" - Revista Brasileira de Engenharia (RBE), Caderno de Engenharia Estrutural, vol. 3, N.2 (1985), pp. 29-57.

[22] FELIPA, C.A. - "Métodos de Elementos Finitos Não-Lineares" - Seminário da Associação para Métodos Computacionais em Engenharia (AMCE) - Rio de Janeiro, Novembro de 1987.

[23] SORIANO, H.L. - "Análise de Estruturas Reticuladas em Computadores de Pequeno Porte" - Curso da Escola de Engenharia da UFRJ.

[24] CABO - Análise Não Linear de Estruturas Compostas de Barras e Cabos - Manual do Usuário.

[25] MOURELLE, M.M. - "Análise de Estruturas Marítimas e Sistemas Flexíveis Constituídos por Cabos", Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ (1984).

[26] SARPKAYA, T. e ISSACSON, M. - "Mechanics of Wave Forces on Offshore Structures", Van Nostrand Reinhold Co. (1981).

[27] OWEN, D.R.J. e HINTON, E. - "Finite Element Programming"- Academic Press, 1977.

[28] WILSON, E.L. - "CAL-86, computer Assisted Learning of Structured Analysis and the CAL/SAP Development System" - Department of Civil Engineering - University of California.

[29] JACOB, B.P. - "Características Gerais e Utilização de um Programa para Representação Gráfica de Estruturas" - Seminário de Doutorado, COPPE/UFRJ.

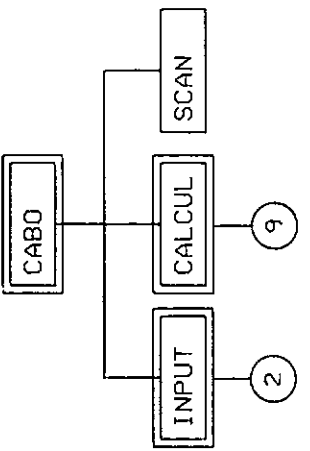
[30] WILSON, E.L. e HOIT, M.I. - "A Computer Adaptative Language for the Development of Structural Analysis Programs"- Computers & Structures, vol. 19, N.3, pp. 321-338.

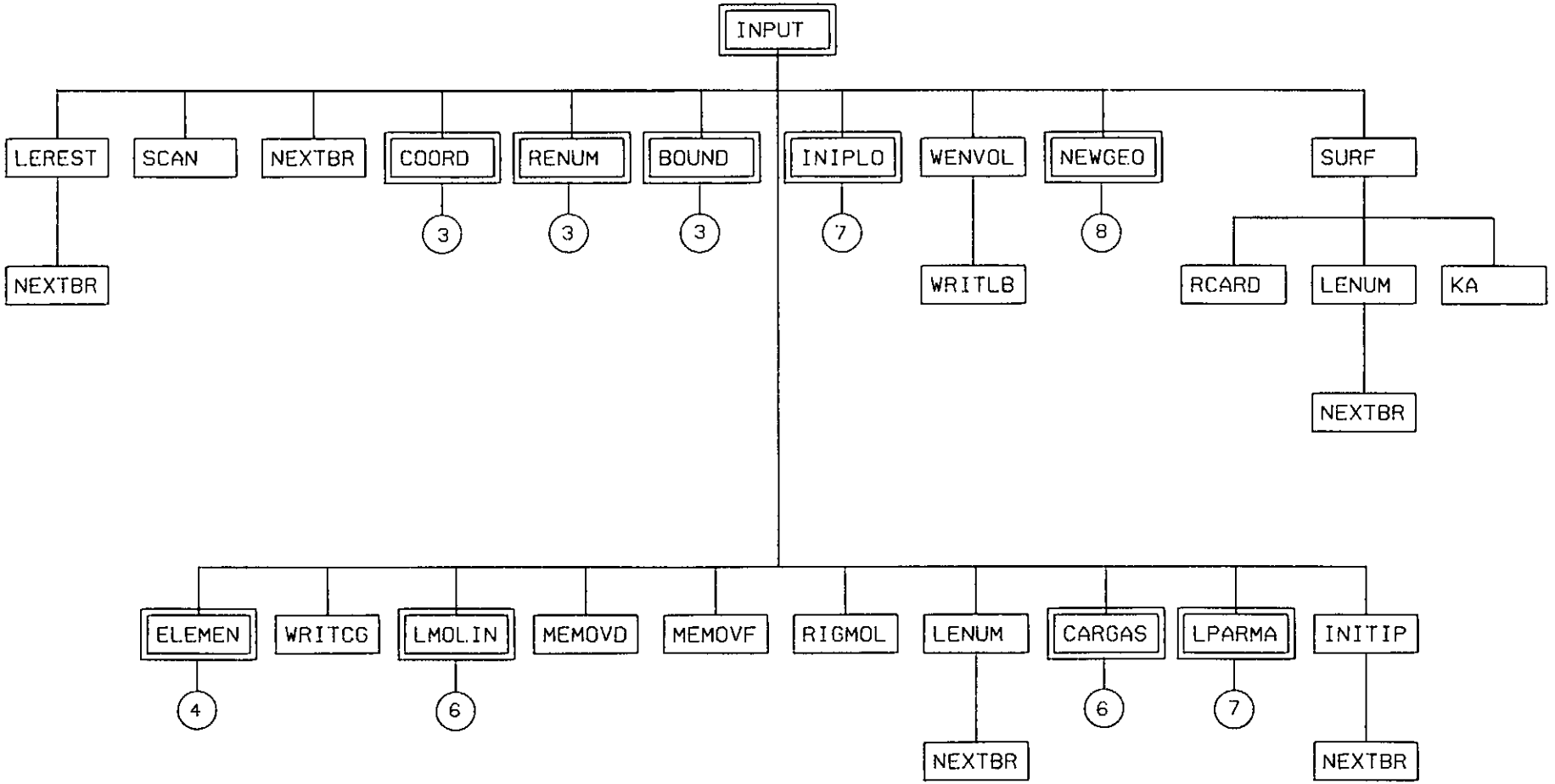
[31] O'BRIEN, W.T. - "General Solution of Suspended Cable Problems" - Journal of the Structural Division - ASCE, 1964, pp. 89-123.

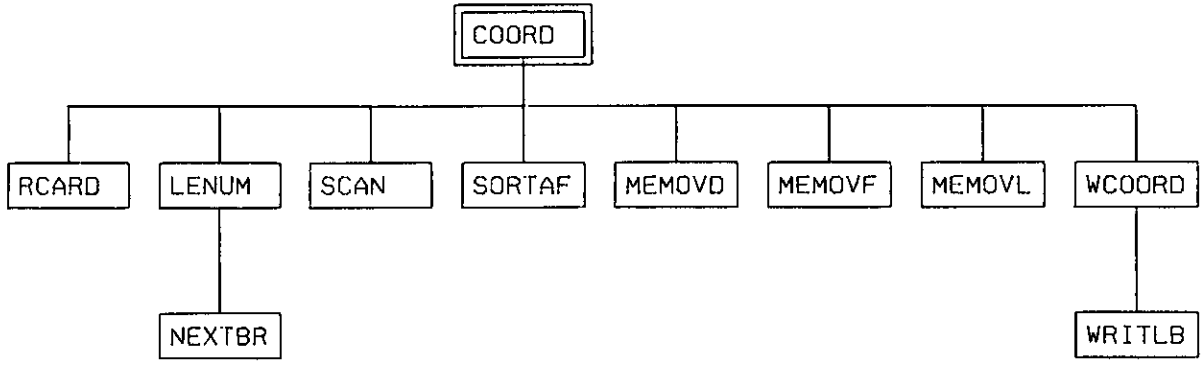
[32] DEAN, R.G. - "Stream Function Representation of Non Linear Ocean Waves", Journal of Geophysical Research, Vol. 70, N. 18, September 1965.

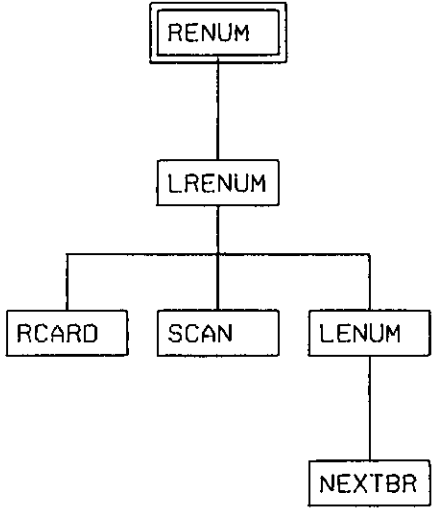
APÊNDICE A

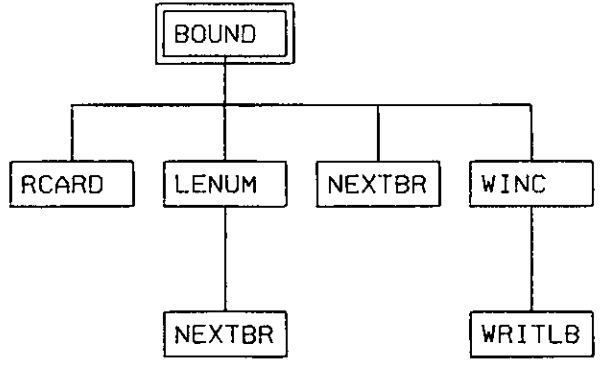
FLUXOGRAMA

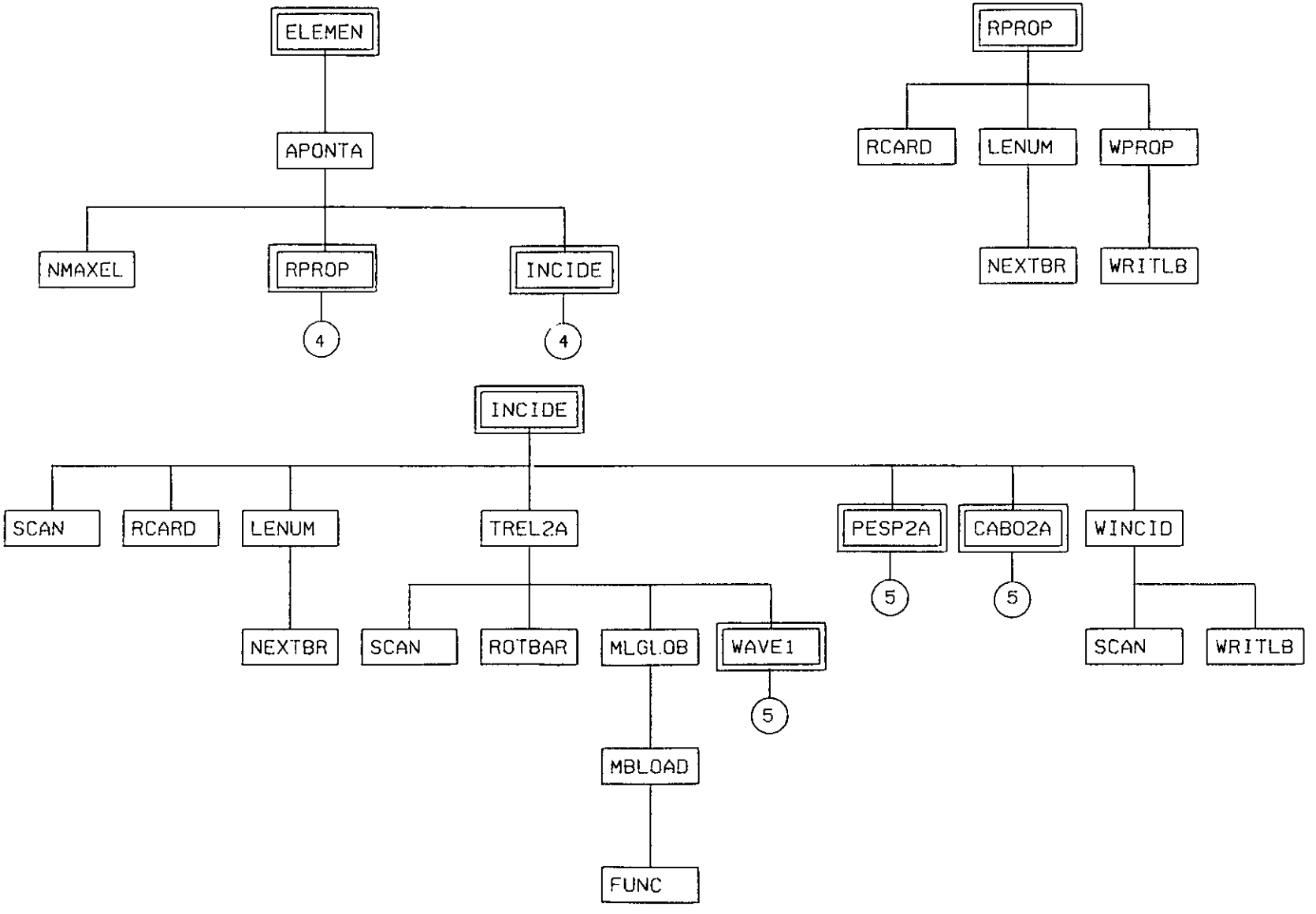



INPUT
LEREST
SCAN
NEXTBR
COORD
RENUM
BOUND
INIPLO
WENVOL
NEWGEO
SURF
NEXTBR
3
3
3
7
WRITLB
8
RCARD
LENUM
KA
NEXTBR
ELEMEN
WRITCG
LMOL.IN
MEMOVD
MEMOVF
RIGMOL
LENUM
CARGAS
LPARMA
INITIP
4
6
6
7
NEXTBR
NEXTBR

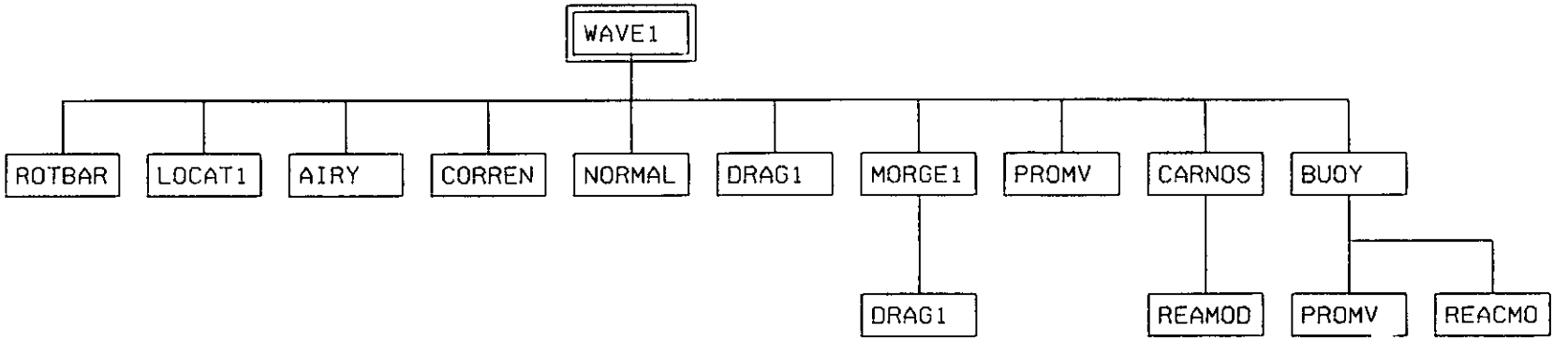

COORD
RCARD
LENUM
SCAN
SORTAF
MEMOVD
MEMOVF
MEMOVL
WCOORD
NEXTBR
WRITLB

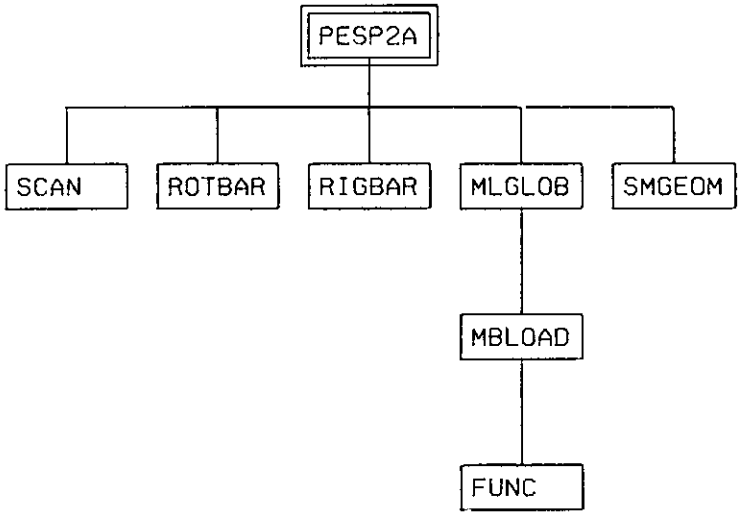

RENUM
LRENUM
RCARD
SCAN
LENUM
NEXTBR

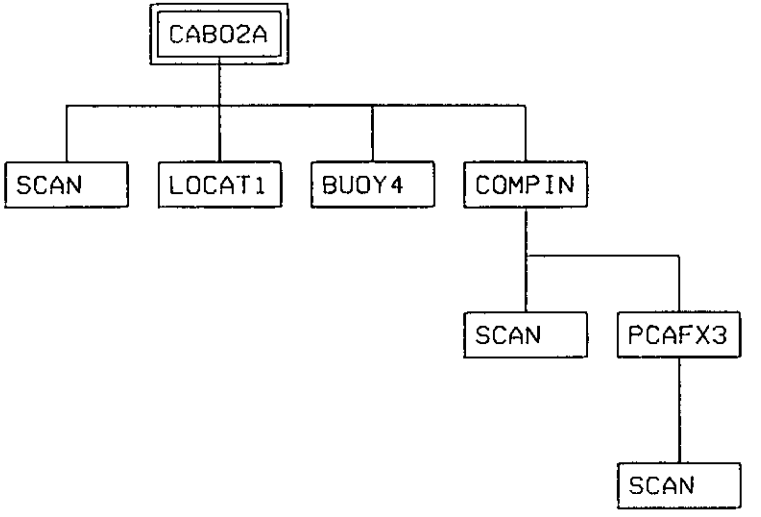

BOUND
RCARD
LENUM
NEXTBR
WINC
NEXTBR
WRITLB

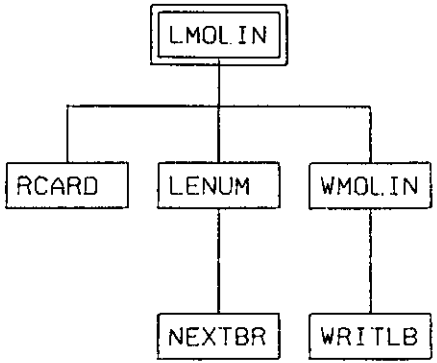

ELEMEN
APONTA
NMAXEL
RPROP
INCIDE
4
4
RPROP
RCARD
LENUM
WPROP
NEXTBR
WRITLB
INCIDE
SCAN
RCARD
LENUM
TREL2A
PESP2A
CABO2A
WINCID
NEXTBR
SCAN
ROTBAR
MLGLOB
WAVE1
5
5
5
SCAN
WRITLB
MBLOAD
FUNC

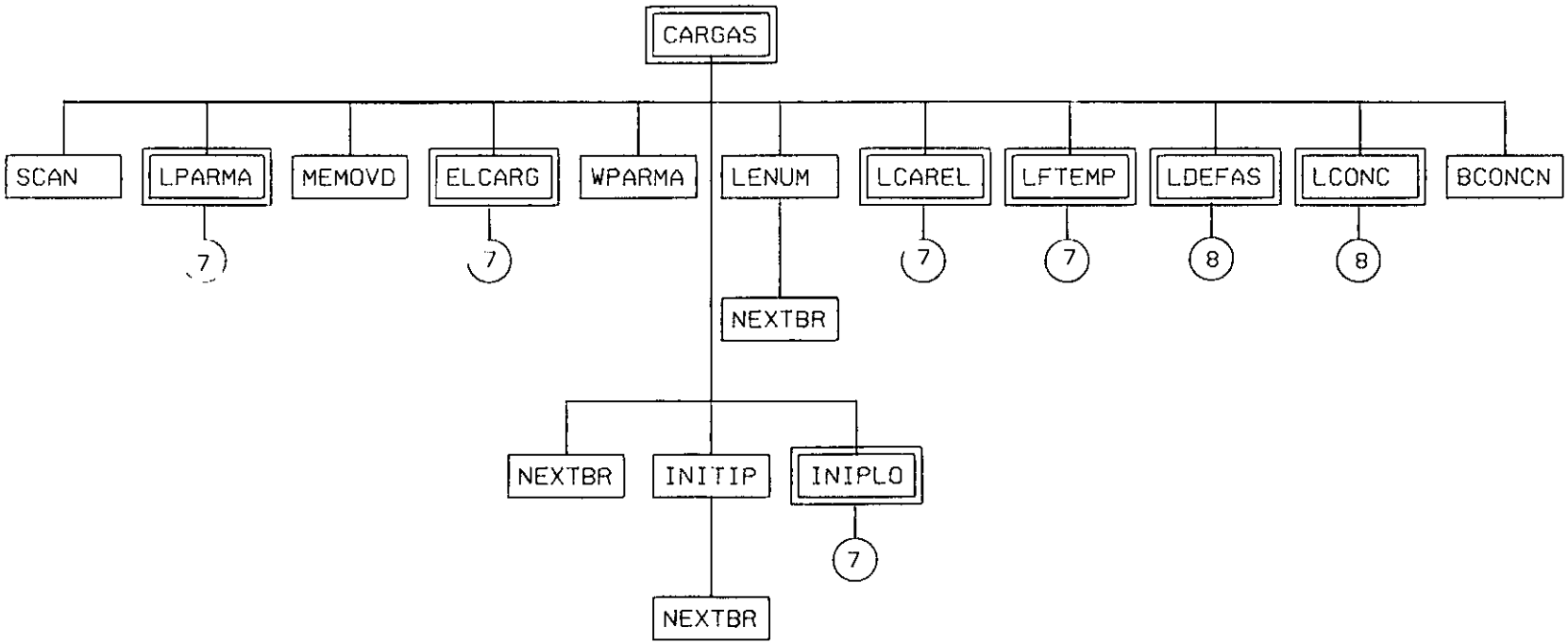
4

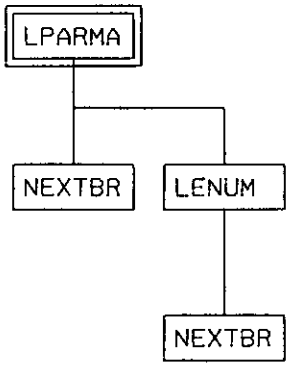

WAVE1
ROTBAR
LOCAT1
AIRY
CORREN
NORMAL
DRAG1
MORGE1
PROMV
CARNOS
BUOY
DRAG1
REAMOD
PROMV
REACMO

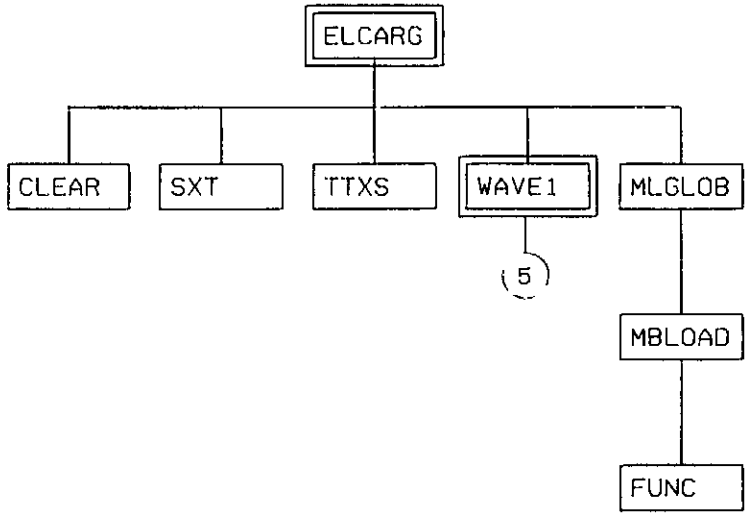

PESP2A
SCAN
ROTBAR
RIGBAR
MLGLOB
SMGEOM
MBLOAD
FUNC

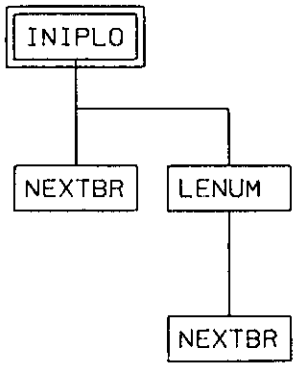

CAB02A
SCAN
LOCAT1
BUOY4
COMPIN
SCAN
PCAFX3
SCAN

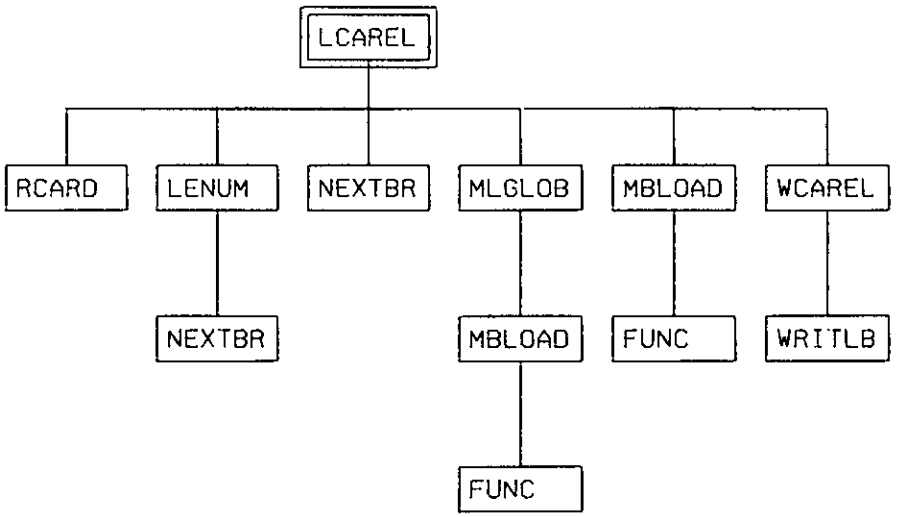

LMOLIN
RCARD
LENUM
WMOLIN
NEXTBR
WRITLB

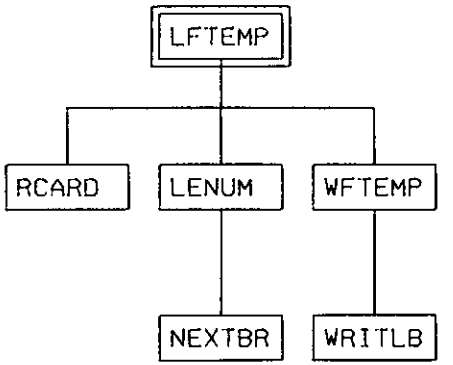

CARGAS
SCAN
LPARMA
MEMOVD
ELCARG
WPARMA
LENUM
LCAREL
LFTEMP
LDEFAS
LCONC
BCONCN
7
7
7
7
8
8
NEXTBR
NEXTBR
INITIP
INIPLO
7
NEXTBR

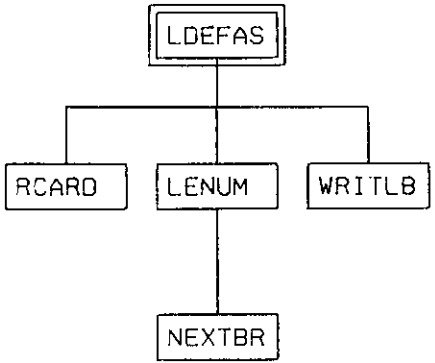

LPARMA
NEXTBR
LENUM
NEXTBR

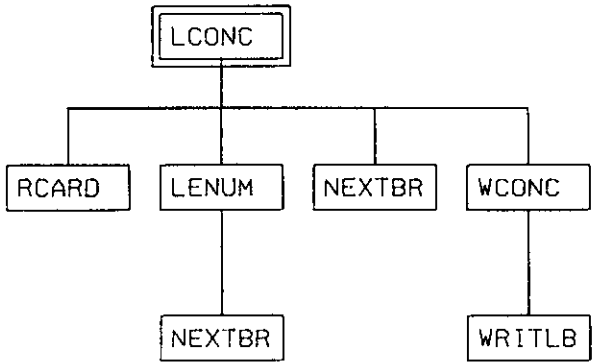

ELCARG
CLEAR
SXT
TTXS
WAVE1
MLGLOB
5
MBLOAD
FUNC

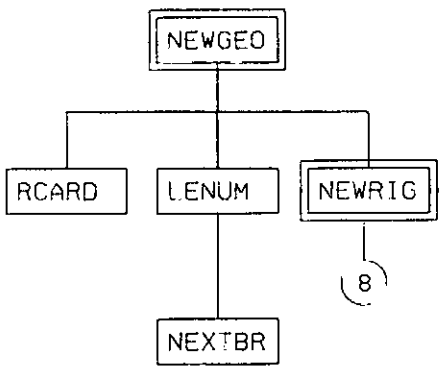

INIPLO
NEXTBR
LENUM
NEXTBR

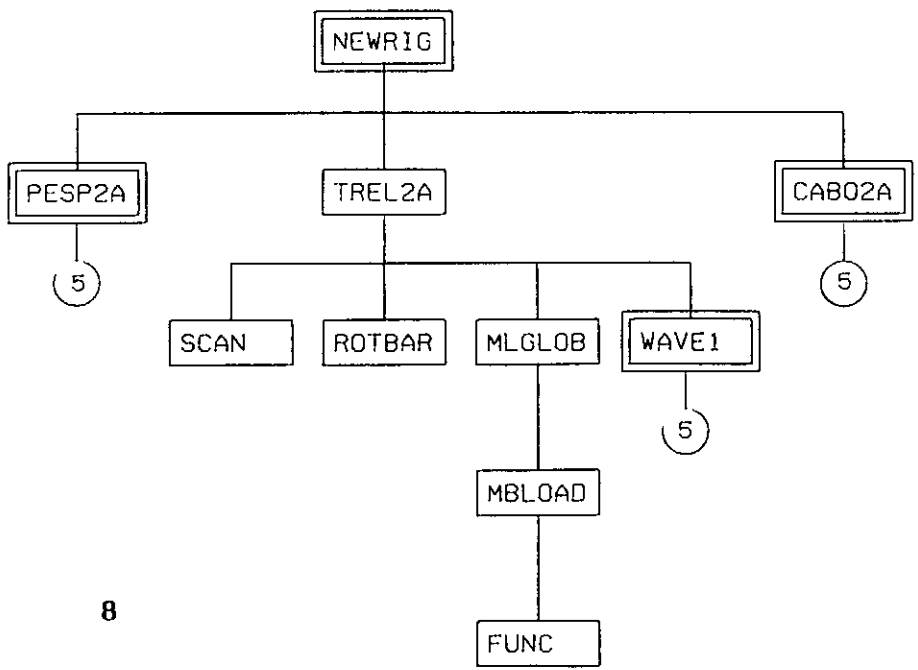

LCAREL
RCARD
LENUM
NEXTBR
MLGLOB
MBLOAD
WCAREL
NEXTBR
MBLOAD
FUNC
WRITLB
FUNC

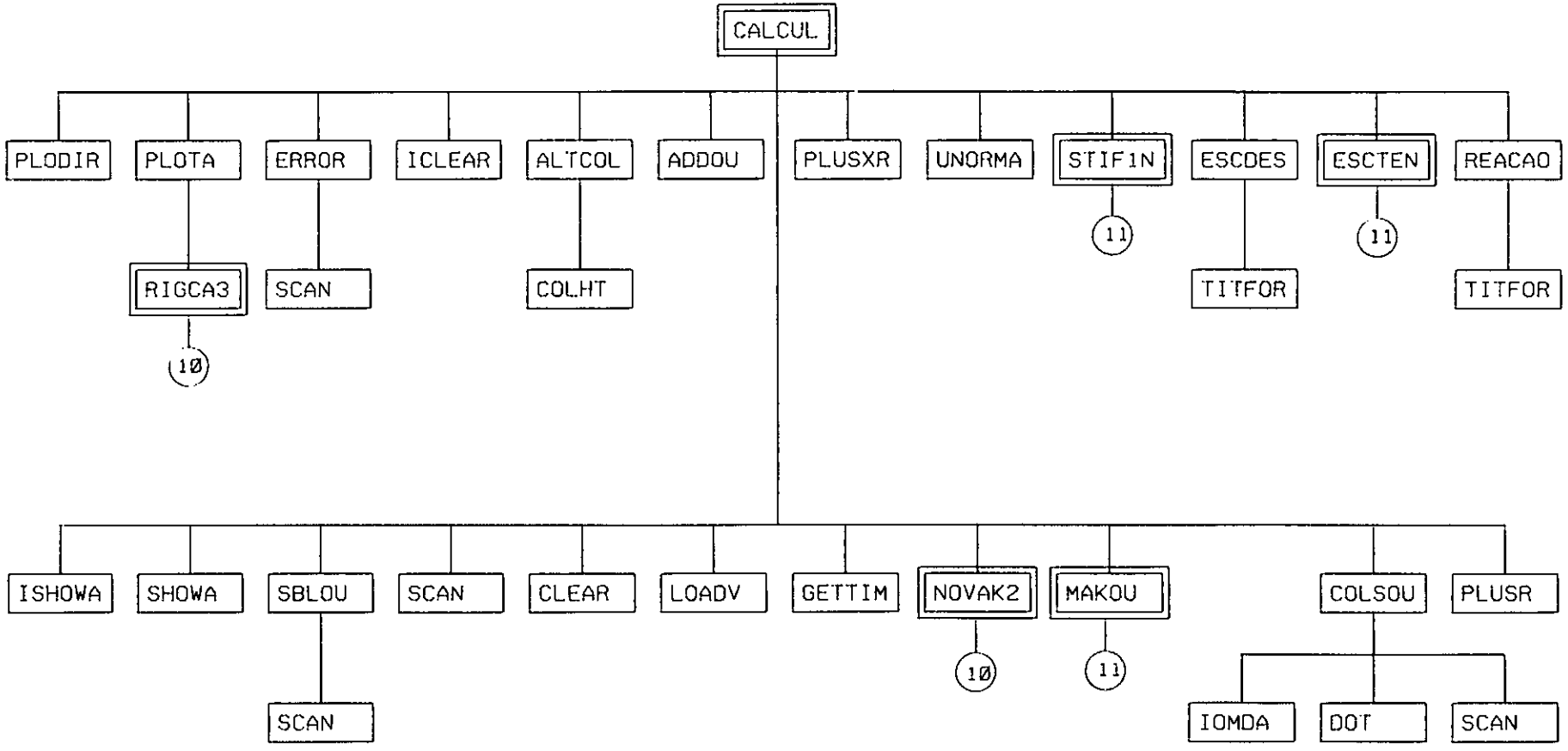

LFTEMP
RCARD
LENUM
WFTEMP
NEXTBR
WRITLB

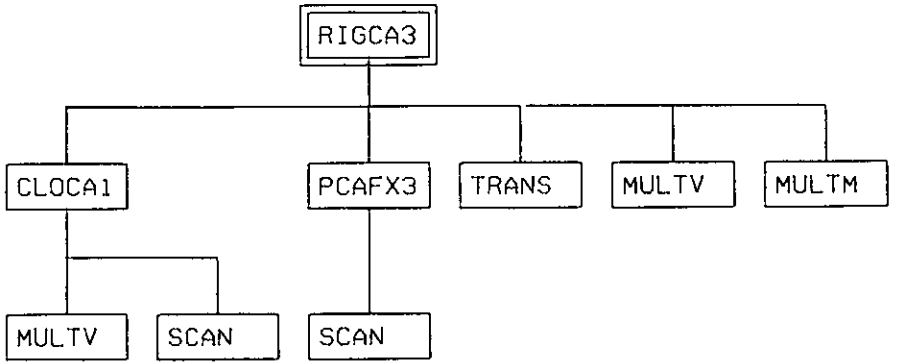

LDEFAS
RCARD
LENUM
WRITLB
NEXTBR

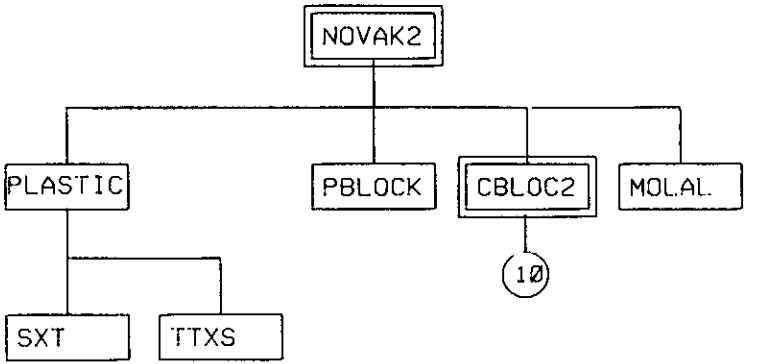

LCONC
RCARD
LENUM
NEXTBR
WCONC
NEXTBR
WRITLB

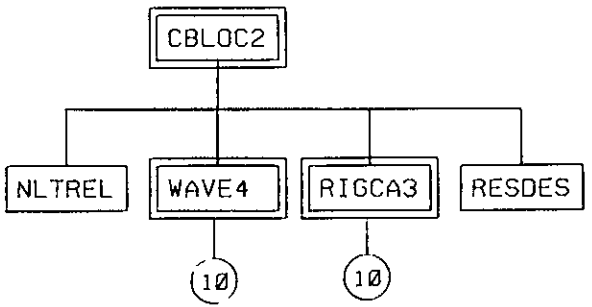

NEWGEO
RCARD
LENUM
NEWRIG
8
NEXTBR

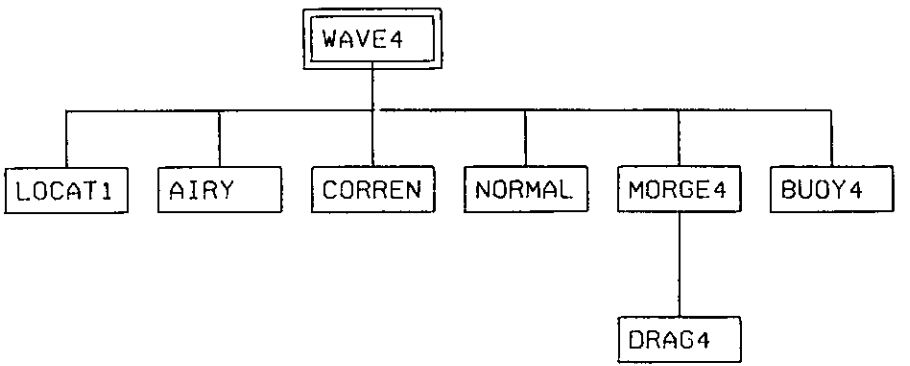

NEWRIG
PESP2A
TREL2A
CAB02A
5
5
SCAN
ROTBAR
MLGLOB
WAVE1
5
MBLOAD
FUNC

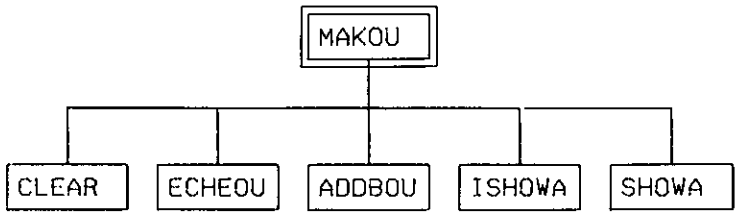

CALCUL
PLODIR
PLOTA
ERROR
ICLEAR
ALTCOL
ADDOU
PLUSXR
UNORMA
STIF1N
ESCDES
ESCTEN
REACAO
RIGCA3
SCAN
COLHT
11
TITFOR
11
TITFOR
10
ISHOWA
SHOWA
SBLOU
SCAN
CLEAR
LOADV
GETTIM
NOVAK2
MAKOU
COLSOU
PLUSR
SCAN
10
11
IOMDA
DOT
SCAN

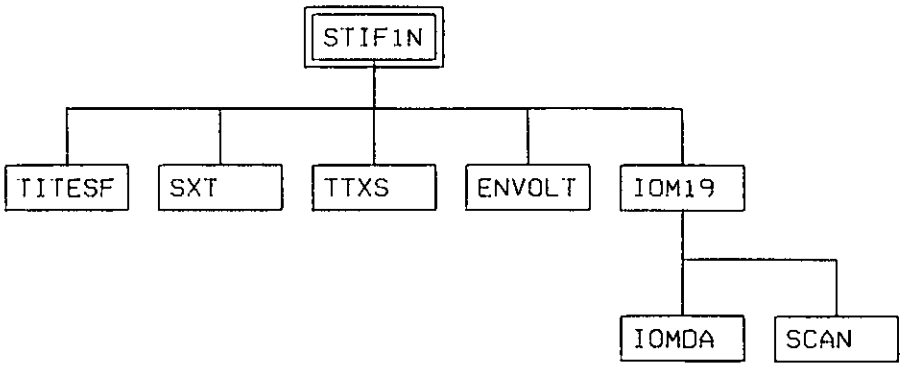

RIGCA3
CLOCA1
PCAFX3
TRANS
MULTV
MULTM
MULTV
SCAN
SCAN

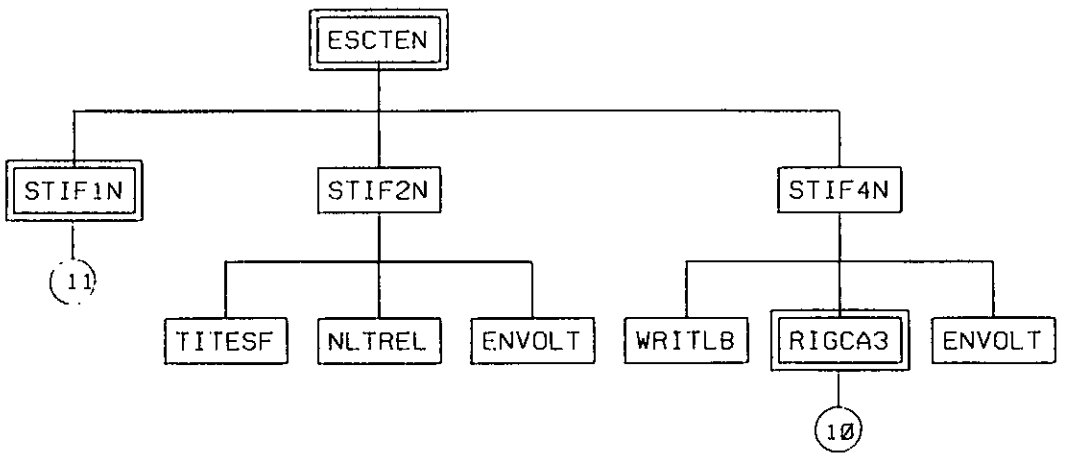

NOVAK2
PLASTIC
PBLOCK
CBLOC2
MOLAL
10
SXT
TTXS


CBLOC2
NLTREL
WAVE4
RIGCA3
RESDES
10
10


WAVE4
LOCAT1
AIRY
CORREN
NORMAL
MORGE4
BUOY4
DRAG4


MAKOU
CLEAR
ECHEOU
ADDBOU
ISHOWA
SHOWA


STIF1N
TITESF
SXT
TTXS
ENVOLT
IOM19
IOMDA
SCAN


ESCTEN
STIF1N
11
STIF2N
TITESF
NLTREL
ENVOLT
STIF4N
WRITLB
RIGCA3
ENVOLT
10

APÊNDICE B

ROTINAS DO PROGRAMA CABO/micro

1) **STIF1N** - Forma a matriz de rigidez geométrica de elementos de pórtico espacial.

2) **STIF2N** - Cálculo e impressão dos esforços nas treliças não-lineares.

3) **STIF4N** - Cálculo e impressão de tensões e geometria dos cabos.

4) **TITESF** - Imprime os títulos da tabela de esforços nas barras.

5) **TITFOR** - Imprime os títulos das tabelas de deslocamentos e reações.

6) **MAKOU** - Monta a matriz de rigidez global.

7) **CBLOC2** - Lê as propriedades das treliças NL e dos cabos no arquivo 20. Calcula as forças nas extremidades e a nova matriz de rigidez dos elementos para armazenar no arquivo 20.

8) **PLOTA** - Grava o arquivo 80 com os dados para o programa pós-processador: SISPLOT.

9) **PLODIR** - Grava o arquivo 79 com as diretivas para o programa pós-processador: SISPLOT.

10) **PLASTIC** - Calcula a matriz de rigidez elasto-plástica dos elementos de pórtico.

11) **COLSOU** - Triangularização da matriz de rigidez.

12) **WAVE4** - Calcula a carga uniformemente distribuída em um elemento de cabo devido a ação do mar e peso próprio.

13) **MORGE4** - Calcula a força em um ponto do cabo pela fórmula de Morison, usando coeficiente de arraste longitudinal.

14) **PCAFX3** - Calcula as forças (F_1,F_2,F_3 e F_4) na extremidade do cabo.

15) **DRAG4** - Calcula coeficientes de arraste (**CD**) e inercia (CM) para cabos.

16) **CALCUL** - Programa principal da análise estática não-linear.

17) **DOT** - Realiza produto escalar.

18) **MOLAL** - Soma parcela das molas lineares ao vetor de desequilíbrio $\underset{\sim}{R}$.

19) **PLUSR** - Soma 2 vetores.

20) **SHOWA** - Impressão de parte do vetor de trabalho $\underset{\sim}{A}$.

21) **ADDBOU** - Espalha as matrizes de rigidez dos elementos na matriz global da estrutura.

22) **ECHEOU** - Verifica se o elemento pertence ao bloco.

23) **NLTREL** - Cálculo da matriz de rigidez tangente e vetor de forças nas direções globais para elementos de treliça NL, formulação Lagrangeana.

24) **NOVAK2** - Chama rotinas para cálculo do vetor de forças internas $\underset{\sim}{R}$.

25) **PBLOCK** - Calcula as forças elásticas em pórticos.

26) **PLUSXR** - Efetua a operação V1=V1+V2* **C** onde V1 e V2 são vetores e **C** uma constante.

27) **RESDES** - Calcula os coeficientes para restrição dos deslocamentos.

28) **UNORMA** - Testa a convergência na análise não-linear.

29) **MULTM** - Multiplica 2 matrizes.

30) **MULTV** - Multiplica 2 vetores.

31) **TRANS** - Calcula e transporta da matriz.

32) **CLOCA1** - Montagem da matriz de rotação do cabo.

33) **RIGCA3** - Cálculo das forças nas extremidades e matriz de rigidez de cabos.

34) **ENVOLT** - Forma a envoltória de esforços axiais.

35) **ESCDES** - Imprime os deslocamentos nodais.

36) **ESCTEN** - Imprime os esforços nos elementos.

37) **REACAO** - Calcula e imprime as reações nas barras.

38) **ADDOU** - Calcula os endereços dos termos diagonais.

39) **COLHT** - Calcula as alturas efetivas das colunas.

40) **SBLOU** - Calcula o número de blocos e vetores auxiliares.

41) **ALTCOL** - Calcula as alturas efetivas das colunas.

42) **INPUT** - Leitura dos dados de entrada.

43) **LEREST** - Lê o resto de um comando com 2 opções.

44) **SCAN** - Lista os cartões de entrada depois de um erro fatal e aborta a execução.

45) **RCARD** - Leitura de um cartão para interpretação sem formato.

46) **SORTAD** - Ordenação ascendente de um vetor de reais dupla precisão.

47) **SORTAF** - Ordenação ascendente de um vetor de inteiros.

48) **LENUM** - Função para converter um campo alfanumérico (formato A1) em número real ou inteiro.

49) **CLEAR** - Zera parte do vetor de trabalho $\underset{\sim}{A}$.

50) **ICLEAR** - Zera parte do vetor de trabalho $\underset{\sim}{IA}$.

51) **IOM19** - Leitura e/ou gravação do arquivo 19 com os esforços axiais nas barras para o cálculo da matriz de rigidez geométrica.

52) **IOM20** - Leitura e/ou gravação do arquivo 20 com os parâmetros dos cabos.

53) **IOMDA** - Ler ou gravar registros de arquivos sequenciais em acesso direto (function).

54) **SXT** - Multiplicação da matriz de rigidez pela matriz de rotação.

55) **TTXS** - Multiplicação da matriz de rotação transporta pela matriz de rigidez.

56) **COMPIN** - Cálculo do comprimento inicial dos cabos, correspondente a uma força SI.

57) **AIRY** - Calcula velocidades e acelerações de onda no sistema global para um ponto de coordenadas (X,Y,Z).

58) **CORREN** - Calcula e adiciona vetorialmente a contribuição da corrente ao vetor de velocidades do fluído.

59) **NORMAL** - Cálculo da velocidade e aceleração normais ao elemento no ponto considerado.

60) **LOCAT1** - Cálculo do ponto de interseção onda-elemento. Cálculo das coordenadas dos pontos sobre o elemento onde serão calculadas as forças. Cálculo das alturas de onda: AOND nos 3 pontos considerados.

61) **MLGLOB** - Cálculo das ações de engastamento perfeito para cargas aplicadas nas direções globais.

62) **MBLOAD** - Ações de engastamento em elementos de pórtico ou treliça.

63) **WRITCG** - Imprime o peso total e as coordenadas do centro de gravidade do modelo.

64) **WRITLB** - Imprime o título no topo de cada página numerada.

65) **LPARMA** - Leitura de parâmetros relevantes para a análise não-linear: número de incrementos de carga, tolerância, número máximo de iterações.

66) **KA** - Cálculo do número da onda "k".

67) **SURF** - Leitura dos dados do fluido, dados de onda e dados de corrente.

68) **LRENUM** - Lê o vetor **NOVNUM** com a nova numeração dos nós.

69) **COORD** - Leitura das coordenadas dos nós.
Leitura dos nós suprimidos.

70) **WCOORD** - Imprime as coordenadas nodais na listagem principal.

71) **RENUM** - Renumera os nós desprezando os nós suprimidos.

72) **BOUND** - Lê a lista de liberações dos nós.
Lê a lista dos nós que não tem rotações (nós de cabos e treliças). Forma a lista de restrições **INC**.

73) **WINC** - Imprime a lista de restrições nodais na listagem principal.

74) **RPROP** - Lê as propriedades elásticas dos materiais e características geométricas das seções.

75) **ELEMEN** - Chama a cadeia de rotinas para formação da matriz de rigidez dos elementos.

76) **APONTA** - Cálculo dos apontadores para a chamada de **PESP2A** e **CABO2A**.

77) **NMAXEL** - Cálculo do número máximo de elementos.

78) **INCIDE** - Leitura das incidências e das propriedades dos elementos de pórtico espacial, treliça não-linear e cabo.

79) **TREL2A** - Calcula a matriz de rotação na posição inicial. Armazena as propriedades da treliça não-linear no Arquivo 20.

80) **PESP2A** - Formação das matrizes de rigidez elástica e geométrica de pórticos espaciais.

81) **CABO2A** - Armazenamento das propriedades dos cabos no arquivo 20.

82) **WINCID** - Imprime as incidências na listagem principal.

83) **ROTBAR** - Formação da matriz de rotação das barras.

84) **RIGBAR** - Cálculo da matriz de rigidez local de elementos de pórtico espacial.

85) **SMGEOM** - Formação da matriz de rigidez geométrica das barras.

86) **CARGAS** - Leitura das cargas (gerenciador).

87) **ELCARG** - Formação das cargas nodais equivalentes devidas ao vento, ao peso próprio e às cargas nos elementos de barra.

88) **WPARMA** - Impressão dos parâmetros relevantes para a análise incremental - Iterativa na listagem principal.

89) **LCAREL** - Leitura das cargas aplicadas nos elementos.

90) **LFTEMP** - Leitura das funções tempo.

91) **LDEFAS** - Leitura e impressão das defasagens.

92) **LCONC** - Leitura das cargas concentradas.

93) **BCONCN** - Cálculo do vetor de cargas concentradas nodais aplicadas na estrutura $\underset{\sim}{P}$.

94) **LMOLIN** - Leitura dos coeficientes das molas lineares.

95) **WMOLIN** - Impressão da lista de elementos de mola na listagem principal.

96) **RIGMOL** - Cálcula a rigidez das molas; grava no arquivo 2.

97) **INIPLO** - Leitura dos dados constantes no comando PLOT.

98) **WENVOL** - Imprime a envoltória dos esforços axiais.

99) **NEWGEO** - Forma nova configuração geométrica a partir da anterior. O cálculo de peso próprio das barras e o cálculo das cargas nos elementos passa a considerar o comprimento deformado.

100) **NEWRIG** - Recalcula as matrizes de rigidez dos pórticos e forma novamente o arquivo 20 com as propriedades das treliças NL e cabos para a nova configuração.

101) **WCONC** - Impressão das cargas concentradas.

102) **WPROP** - Impressão das propriedades elásticas dos materiais e características geométricas das seções.

103) **WCAREL** - Impressão das cargas atuantes nos elementos de pórtico espacial na listagem principal.

104) **WFTEMP** - Impressão das funções tempo.

105) **BUOY** - Calcula as ações de engastamento perfeito devido à ação de forças de empuxo e peso próprio em elementos de pórtico e treliça.

106) **BUOY4** - Calcula a carga uniformemente distribuída ao longo do cabo devido ao empuxo e peso próprio.

107) **DRAG1** - Calcula os coeficientes de inércia e arrastamento para elementos de pórtico e treliça, de acordo com o número de Reynolds.

108) **WAVE1** - Calcula as forças sobre elementos, devido a ação hidrodinâmica.

109) **CARNOS** - Calcula cargas nodais equivalentes devido a uma carga distribuída parabólica.

110) **MORGE1** - Cálculo das forças normais em um ponto do elemento, usando a fórmula de Morison.

APÊNDICE C

CONTEÚDO DOS ARQUIVOS SECUNDÁRIOS

ARQ.	ACESSO	TAMANHO DO REGISTRO (bytes)	C O N T E Ú D O
1	Direto	1450	IM~ - número da equação correspondente ao grau de liberdade. S~(12,12) - matriz de rigidez local do elemento. DL - comprimento do elemento. T~(3,3) - matriz de rotação do elemento. DX,DY,DZ - projeções nos 3 eixos globais. SGEOM(12,12) - matriz de rigidez geométrica. NI,NJ,IMAT,ISEC - nó inicial, nó final, tipo de material e tipo de seção.
2	Direto	680	ND - número de graus de liberdade para elemento de pórtico (12) LM~ K(12,12) - matriz de rigidez dos elementos no sistema de referência global.
3	Direto	270	NI,NJ - nó inicial e final LIB - liberações nos nós extremos ELPROP~(5) - Propriedades do material do elemento COPROP(11) - Propriedades da seção do elemento. MBVENT - Pressões devido ao vento.
4	Binário	-	Matriz de rigidez global da estrutura dividida em blocos.

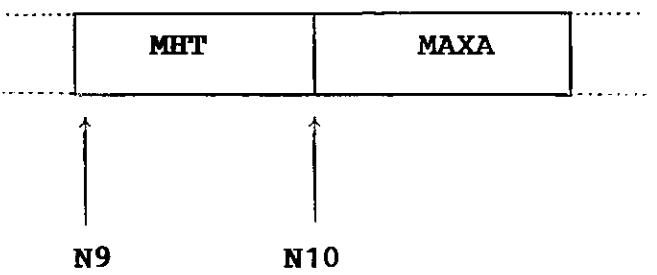
ARQ.	ACESSO	TAMANHO DO REGISTRO (bytes)	C O N T E Ú D O
5	Sequencial	-	Arquivo com os dados de entrada do programa.
6	Sequencial	-	Terminal ou impressora: listagem secundária
8	Sequencial	-	Terminal ou impressora: listagem principal
10	Sequencial	-	Blocos já reduzidos pelos prescedentes ao qual estão acoplados, na etapa de triangularização da matriz de rigidez global da estrutura.
11	Sequencial	-	Vetor de cargas concentradas.
13	Sequencial	-	Coordenada X,Y e Z de todos os nós da estrutura.
14	Direto	790	LIB **AML**(24) - Ações de engastamento perfeito devido às cargas distribuídas sobre os elementos.
15	Direto	1630	Forças axiais máximas e mínimas dos elementos (envoltória)
19	Direto	10	Força axial dos elementos para o cálculo da matriz de rigidez geométrica.
20	Direto	190	Dados dos cabos e treliças não-lineares.
21	Direto	210	12 forças no sistema de referência global para cada elemento. Estas forças são acumuladas a cada iteração para o cálculo da matriz de rigidez elasto-plástica de elementos de pórtico.

ARQ.	ACESSO	TAMANHO DO REGISTRO (bytes)	C O N T E Ú D O
79	Sequencial	-	Diretivas para o programa pós-processador: SISPLOT
80	Sequencial	-	Dados geométricos para o programa pós-processador: SISPLOT.

APÊNDICE D

CONTEÚDO DOS VETORES DE TRABALHO IA E A NO PROCEDIMENTO INCREMENTAL-ITERATIVO

a) Vetor de trabalho **IA**:



onde:

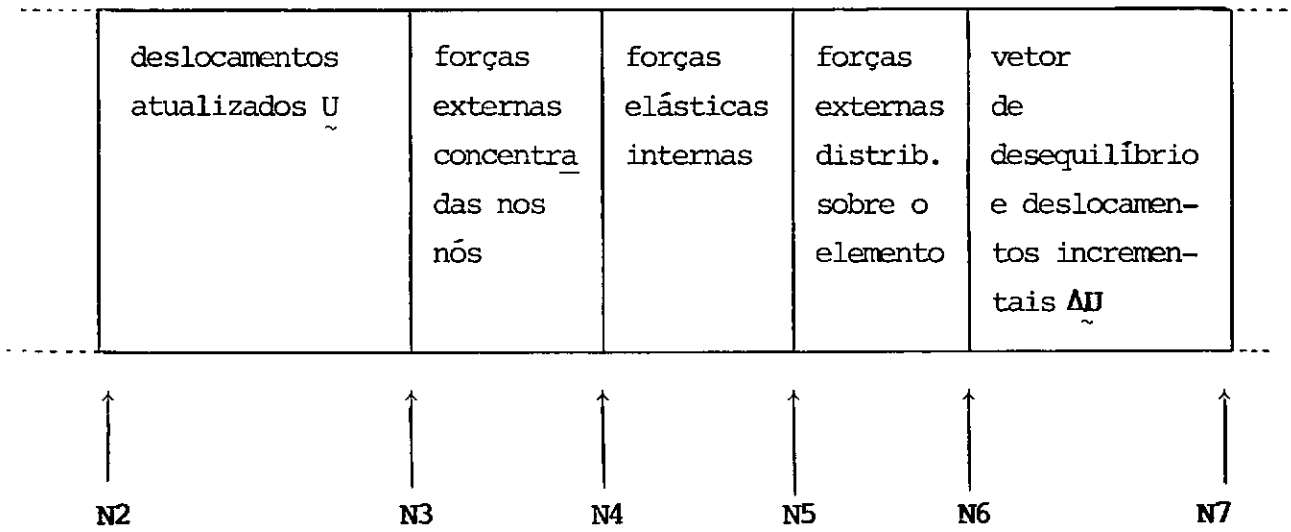
MHT - altura efetiva das colunas

MAXA - endereço dos termos diagonais

N9 - apontador inicial para gravação de **MHT**

N10 - apontador inicial para gravação de **MAXA** onde N10=N9+NEQ+1 e NEQ=número de equações.

b) Vetor de trabalho **A**:



onde:

N2	Apontador inicial para a gravação de U
N3 = N2+NEQ	Apontador inicial para a gravação das forças concentradas nodais
N4 = N3+NEQMR*NLOAD	Apontador inicial para a gravação das forças elásticas internas
N5 = N4+NEQ	Apontador inicial para a gravação de forças externas distribuídas sobre os elementos
N6 = NEQ+NEQMR*NPP	Apontador para gravação do vetor de desequilíbrio R e vetor de deslocamentos incrementais

sendo que a seguinte terminologia se aplica:

NEQ - número de equações

NLOAD - número de carregamentos

NEQMR - número de graus de liberdade restringidos

NPP - indicador que assume valor unitário para estruturas que possuem elementos de pórtico ou zero caso contrário.