ESTUDO DE MODELOS DO CONJUNTO LUVA-ESTACA NA SIMULAÇÃO DA OPERAÇÃO DE DOCAGEM DE JAQUETAS

CARLOS CYRANKA

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 OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Aprovada por:

Nelson Francisco Favilla Ebecken, D.Sc.
(Presidente)

Gilberto Bruno Ellwanger, D.Sc.

Breno Pinheiro Jacob, D.Sc.

Márcio Martins Mourelle, M.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

ABRIL DE 1993

CYRANKA, CARLOS

Estudo de Modelos do Conjunto Luva-Estaca na Simulação do Operação de Docagem de Jaquetas [Rio de Janeiro] 1993

VII, 198 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Civil, 1993)

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Instalação de Jaquetas 2. Estruturas Offshore

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

À Zélia, aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Nelson Francisco Favilla Ebecken pela orientação, pelo apoio e por crer na realização desta tese.

Ao amigo Márcio Martins Mourelle pelo apoio e incentivo que posssibilitaram a obtenção dos resultados apresentados neste trabalho.

A Lea Margarida B. Troina, Jorge Roberto A. Hijjar, Carlos Eduardo L. R. de Mendonça e Angelo Francisco dos Santos pelas importantes sugestões.

A Marcos José de Sousa pelo auxílio na revisão dos originais.

A Deborah Martinez de Mattos, Marina Barbosa Fachetti, Aldemir Bonfim dos Santos, Carlos Alberto Bardanachvili, Luiz Henrique Moraes Alves, Gerson Sales Verlangieri e Glauco de Deus Ribeiro pelo apoio e amizade.

A Petrobrás, pelo incentivo e facilidades oferecidas.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Mestre em Ciências (M.Sc.).

ESTUDO DE MODELOS DO CONJUNTO LUVA-ESTACA NA SIMULAÇÃO DA OPERAÇÃO DE DOCAGEM DE JAQUETAS

CARLOS CYRANKA

Abril de 1993

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

Este trabalho analisa o comportamento de modelos do conjunto luva-estaca em simulações da operação de docagem de jaquetas. Inicialmente são apresentados os fundamentos teóricos relacionados a este tipo de problema. Após, são realizadas análises para os modelos ditos completos onde são considerados a estaca de docagem e o solo marinho.
As análises com as simplificações normalmente utilizadas e as propostas neste trabalho são apresentadas a seguir. Seus resultados são, então, comparados com os dos modelos completos com o objetivo de se estabelecer o mais recomendável a este tipo de análise.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

SLEEVE-PILE SET MODELS STUDY IN THE DOCKING JACKET OPERATION SIMULATION

CARLOS CYRANKA

Abril de 1993

Chairman : Prof. Nelson Francisco Favilla Ebecken

Department: Civil Engineering

This work deals with the behavior of sleeve-pile set models used in the simulation of docking jacket operations.

First, the theoretical basis related to this problem is presented. Then, computational analysis with complete models, where docking pile and marine soil are considered, are compared to simplified models, including the ones here proposed.

Finally, some conclusions are presented in order to establish the most recommended aproach to this analysis.

ÍNDICE

Capítulo I - INTRODUÇÃO 1

Capítulo II - DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

II.1 - Classificação dos Sistemas de Docagem 6

II.1.1 - Sistemas de Acoplamento

II.1.1.1 - Combinação de Luvas e Estacas 7

II.1.1.2 - Combinação de Estacas e Pórtico de Docagem 9

II.1.1.3 - Combinação de Gabarito de Poços e Pórtico de Docagem 10

II.1.2 - Assistência de Guindaste 12

II.2 - Configuração a Ser Analisada 13

II.3 - Descrição da Operação de Docagem 13

Capítulo III - MÉTODOS DE SOLUÇÃO E PROGRAMAS DE COMPUTADOR

III.1 - Introdução 17

III.2 - Análise de Vibrações Livres

III.2.1 - Programa de Computador 19

III.2.2 - Método de Solução 19

III.3 - Movimentos do Conjunto Jaqueta Balsa

III.3.1 - Programa de Computador 24

III.3.2 - Método de Solução 24

III.4 - Conjunto Luva-Estaca

III.4.1 - Programa de Computador 27

III.4.2 - Método de Solução 27

III.5 - Análise de Docagem

III.5.1 - Programa de Computador 28

III.5.2 - Método de Solução 28

Capítulo IV - MÉTODOS NUMÉRICOS PARA ANÁLISE NÃO-LINEAR

IV.1 - Introdução 33

IV.2 - Análise Não-Linear e Método dos Elementos Finitos 34

IV.2.1 - Análise Não-Linear Incremental Iterativa . 37

IV.3 - O Sistema DOCNAP

IV.3.1 - Introdução 42

IV.3.2 - Análise Estática 46

IV.3.3 - Análise Dinâmica

IV.3.3.1 - Método de Guyan 51

IV.3.3.2 - Super-Elemento Jaqueta 57

IV.3.3.3 - Definição dos Carregamentos 60

IV.3.4 - Carregamentos Hidrodinâmicos 67

IV.3.4.1 - Ondas 69

IV.3.4.2 - Correnteza 73

Capítulo V - MODELOS DO CONJUNTO LUVA-ESTACA

V.1 - Introdução 75

V.2 - Dados Globais 79

V.3 - Modelos Completos

V.3.1 - Luva de Docagem Rígida e Estaca Flexível .. 84

V.3.2 - Luva de Docagem e Estaca Flexíveis 88

V.4 - Modelos Simplificados

V.4.1 - Luva de Docagem Rígida e Estaca Flexível .. 92

V.4.2 - Luva de Docagem e Estaca Flexíveis 96

Capítulo VI - ESTUDOS NUMÉRICOS E COMPARAÇÕES

VI.1 - Introdução 102

VI.2 - Modelos Completos

VI.2.1 - Luva de Docagem Rígida e Estaca Flexível

VI.2.1.1 - Vibrações Livres 104
VI.2.1.2 - Intervalo de Integração 114
VI.2.1.3 - Molas de Contato 115
VI.2.1.4 - Resultados 117

VI.2.2 - Luva de Docagem e Estaca Flexíveis

VI.2.2.1 - Vibrações Livres 124
VI.2.2.2 - Intervalo de Integração 131
VI.2.2.3 - Molas de Contato 131
VI.2.2.4 - Resultados..... 132

VI.3 - Modelos Simplificados

VI.3.1 - Luva de Docagem Rígida e Estaca Flexível

VI.3.1.1 - Vibrações Livres 140
VI.3.1.2 - Intervalo de Integração 145
VI.3.1.3 - Molas de Docagem 145
VI.3.1.4 - Resultados 146

VI.3.2 - Luva de Docagem e Estaca Flexíveis

VI.3.2.1 - Procedimento Usual 151

VI.3.2.1.1 - Molas de Docagem 152
VI.3.2.1.2 - Vibrações Livres 152
VI.3.2.1.3 - Resultados 158

VI.3.2.2 - Proposta 1 158

VI.3.2.2.1 - Molas de Docagem 159
VI.3.2.2.2 - Vibrações Livres 159
VI.3.2.2.3 - Resultados 164

VI.3.2.3 - Proposta 2 169

VI.3.2.3.1 - Molas de Docagem 170
VI.3.2.3.2 - Vibrações Livres 172
VI.3.2.3.3 - Intervalos de Integração 177
VI.3.2.3.4 - Resultados 177

Capítulo VII - CONCLUSÕES 186

Apêndice 1 - Resultados para Mola de Docagem Aplicada na Extremidade Inferior do Cone da Luva de Docagem 190

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 195

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A instalação de estruturas fixas "offshore" do tipo jaqueta sobre gabaritos de poços submarinos - "templates" - previamente instalados tem se tornado uma operação de considerável frequência.

As primeiras operações de docagem no Mar do Norte ocorreram no ano de 1979, com as jaquetas de Fulmar e BNOC Beatrice. Tendo seu uso se difundido desde então [1].

No Brasil, mais precisamente no Pólo Norte da Bacia de Campos, tivemos a primeira operação de docagem, envolvendo estrutura de grande porte, no ano de 1980 com a jaqueta de Garoupa, pesando 8850 t numa lâmina d'água de 123 m.

Mais recentemente, foram instaladas , ao longo dos anos de 1987 e 1988, seis plataformas sobre gabaritos submarinos, nos campos de Vermelho, Pargo e Carapeba do

Pólo Nordeste da Bacia de Campos, com pesos, durante a operação, variando entre 3800 t e 5600 t para lâminas d'água entre 80 m e 101 m. O uso de gabaritos de perfuração também foi considerado nos recentes projetos das plataformas de Enchova Oeste , pesando 4200 t em 118 m de profundidade; de Albacora 2 com 13400 t em 270 m e em Carapeba 3 com 1420 t em lâmina d'água de 86 m.

O surgimento desta alternativa de desenvolvimento de campo petrolífero tem como origem a necessidade crescente na indústria "offshore" de se obter o rápido retorno do capital investido. A exploração convencional de um campo baseia-se em eventos em série, isto é, a perfuração dos poços somente é iniciada após a instalação da jaqueta e suas facilidades de convés igualmente instaladas e devidamente testadas. Esta forma de exploração resulta em altos custos e prazos longos para retorno do capital. No entanto, se a perfuração dos poços puder ser efetuada durante as fases de projeto e construção das facilidades de produção, teremos a antecipação do início da produção do campo e, como consequência, redução do prazo para retorno do capital investido.

O desenvolvimento em paralelo de um campo, através da prévia instalação de um gabarito de poços e

utilização de uma plataforma móvel ou navio para realizar o trabalho de perfuração dos poços durante as fases de projeto e construção, permite economia no projeto da jaqueta pois não há mais a necessidade de instalação, em seu convés, de equipamentos para perfuração, reduzindo, em média, 40% do peso total do convés.

A economia também existe no projeto das facilidades de produção devido ao melhor conhecimento das características do campo a ser explorado além de uma significativa redução no tempo necessário para início da produção bem como no tempo de retorno dos investimentos.

Estas vantagens, geralmente, superam os custos do projeto, construção e instalação do gabarito de poços e da inclusão de uma estrutura de docagem na jaqueta de maneira a permitir sua instalação sobre o gabarito de poços sem danos à jaqueta ou aos poços.

A utilização desta estratégia, no entanto, impõe novos parâmetros ao projeto da estrutura da jaqueta. A instalação da jaqueta sobre o gabarito de poços, operação chamada de docagem, é realizada com a estrutura suspensa sobre o gabarito de poços sendo manobrada com o auxílio de uma balsa-guindaste até que a docagem seja obtida através

do encaixe de um conjunto de luvas, que faz parte da jaqueta, à estacas instaladas previamente próximas ao gabarito de poços.

A análise do sistema de docagem torna-se necessária para se determinar os movimentos da jaqueta, que tem que obedecer a limites operacionais, e para se estabelecer a magnitude das cargas atuantes nos pontos de conexão das luvas com as estacas imediatamente após o acoplamento inicial, mas antes que a jaqueta esteja assentada sobre o solo marinho.

Particularmente, cargas significativas são esperadas para ondas com períodos entre 7 e 13 segundos pois estas são potencialmente capazes de excitar respostas ressonantes no sistema de docagem.

A motivação para a realização deste estudo surgiu das incertezas existentes em relação às simplificações adotadas na realização de análises de docagem de jaquetas. A principal dúvida estava relacionada ao procedimento adotado no cálculo do valor da rigidez a ser adotado na mola de docagem, que substitui o conjunto formado pela luva e estaca de docagem.

Estabeleceu-se como objetivo para este trabalho a geração de um modelo, o mais completo possível, para análise. Neste modelo, ao invés de se utilizar molas de docagem, encontra-se representada a estaca, o solo marinho, assim como a jaqueta com sua luva de docagem. Sua finalidade é servir como elemento de referência nas comparações com os modelos simplificados utilizados na prática da engenharia de modo que se permita estabelecer um procedimento para modelar o conjunto luva e estaca de docagem de maneira mais confiável.

CAPÍTULO II

DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Diversos métodos e sistemas para docagem de jaquetas sobre gabaritos de poços submarinos previamente instalados têm sido desenvolvidos pelas companhias projetistas e instaladoras de estruturas marítimas. Todos estes procuram satisfazer a necessidade básica da operação que consiste em posicionar a jaqueta de modo a garantir o alinhamento entre as guias dos condutores de poços, localizadas na jaqueta, e as guias do gabarito de poços.

II.1 - CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS DE DOCAGEM

Os sistemas de docagem normalmente utilizados podem ser classificados da seguinte forma:

- Sistema de acoplamento: a classificação é definida pelos componentes de encaixe do sistema;

- Assistência de guindaste: a classificação é feita em função do grau de assistência prestado por embarcações equipadas com guindaste.

II.1.1 - SISTEMAS DE ACOPLAMENTO

Os sistemas de acoplamento usualmente projetados podem ser agrupados em três categorias distintas:

II.1.1.1 - COMBINAÇÃO DE LUVAS E ESTACAS

A figura II.1 nos mostra um típico arranjo de luvas e estacas de docagem. Esta solução necessita da instalação prévia de estacas de docagem próximas ao gabarito de poços. As estacas são geralmente instaladas através de guias acopladas ao gabarito de poços. As guias são retiradas após a instalação das estacas de docagem de modo a isolar estas estacas da estrutura do gabarito de poços, impedindo que as cargas oriundas da operação de docagem possam danificar os poços previamente perfurados. As estacas de docagem atuam como componentes de um sistema macho-fêmea no qual luvas montadas na jaqueta são encaixadas através de aproximação vertical.

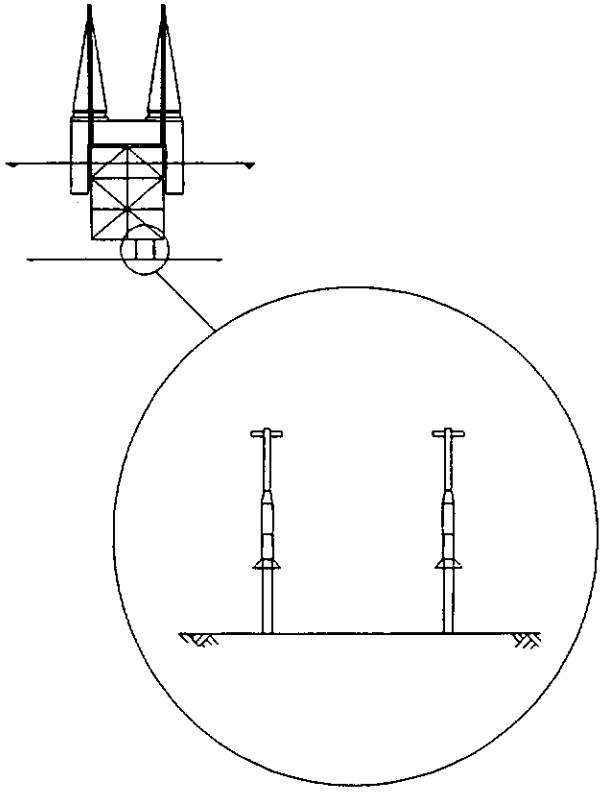


Figura II.1 - Combinação de Luvas e Estacas de Docagem

Este método de docagem vem se tornando muito usual, especialmente entre jaquetas mais pesadas, devido à rapidez com que pode ser executado e ao bom posicionamento final obtido. Entretanto, este método necessita de uma aproximação vertical, normalmente efetuada com auxílio de uma embarcação guindaste.

II.1.1.2 - COMBINAÇÃO DE ESTACAS E PÓRTICO DE DOCAGEM

A figura II.2 mostra um arranjo de estacas e pórtico de docagem. Esta solução também necessita da instalação prévia de estacas de docagem através de guias no gabarito de poços que são posteriormente retiradas.

O que diferencia este sistema do anterior é a colocação,na última elevação da jaqueta de um pórtico estrutural reforçado para suportar as cargas de docagem. A jaqueta flutuando é, então, posicionada sobre o gabarito de poços e, através de uma aproximação lateral, o encaixe das estacas no pórtico de docagem é obtido.

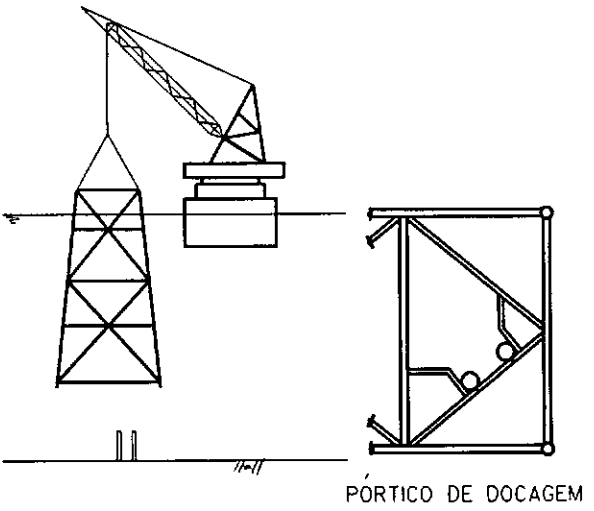


Figura II.2 - Combinação de Estacas e Pórtico de Docagem

Normalmente, um sistema mecânico é incorporado para prevenir uma eventual perda de contato e permitir o assentamento da jaqueta dentro das tolerâncias necessárias.

Este método necessita de um grande controle lateral dos movimentos da jaqueta uma vez que as estacas de docagem podem interferir com outros membros da jaqueta, localizados na mesma elevação do pórtico de docagem. Isto implica em uma maior duração da operação, em relação ao método de luvas e estacas, devido à dificuldade de se manobrar a jaqueta através do gabarito de poços e ao risco de impacto com outros membros da jaqueta.

II.1.1.3 - COMBINAÇÃO DE GABARITO DE POÇOS E PÓRTICO DE DOCAGEM

A figura II.3 apresenta o sistema gabarito de poços e pórtico de docagem. O gabarito de poços é construído com uma estrutura de reforço para permitir o encaixe direto da jaqueta, não havendo estacas de docagem. A última elevação da jaqueta é construída com um pórtico de docagem para suportar os esforços gerados na operação de docagem.

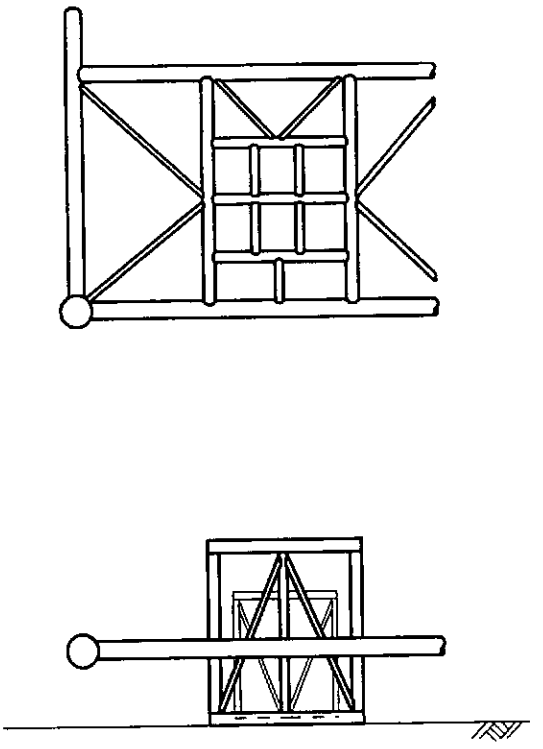


Figura II.3 - Combinação de Gabarito de Poços e Pórtico de Docagem

Este método tem sido utilizado apenas em estruturas leves pois as cargas da operação necessitam ser pequenas uma vez que elas são suportadas diretamente pelo gabarito de poços e pelos poços perfurados os quais não devem ser danificados.

II.1.2 - ASSISTÊNCIA DE GUINDASTE

As manobras para posicionar a jaqueta sobre o gabarito de poços, necessitam tanto de controle lateral como de orientação da direção e de controle vertical.

Nas operações de docagem, a maneira mais difundida de se providenciar o controle lateral da estrutura a ser docada é através de embarcações equipadas com guindastes capazes de içar grandes cargas.

O sistema de ancoragem da embarcação guindaste normalmente é utilizado para promover, de forma rápida e segura, as manobras da jaqueta sobre o gabarito de poços.

O uso de guindastes em operações de docagem permite que a operação se realize sem a necessidade de equipamentos adicionais para promover a estabilidade da jaqueta assim como realizar operações de lastro. No entanto, as operações assistidas por guindastes tendem a provocar maiores esforços nas estacas, pois os movimentos provenientes das cargas de ondas atuando na embarcação são transferidos através dos cabos dos guindastes para a jaqueta e desta para as estacas de docagem [1].

II.2 - CONFIGURAÇÃO A SER ANALISADA

O sistema de docagem mais utilizado mundialmente é o que se baseia na combinação de estacas com luvas de docagem. As operações mais comuns fundamentam-se também na utilização de embarcações com guindastes, assim como a aproximação vertical tem sido preferida em detrimento da horizontal.

Esta configuração tem sido adotada em todas as operações de docagem já realizadas na Bacia de Campos, assim como em todos os projetos executados ou em andamento. Estes fatos nos levaram a considerá-la neste estudo.

II.3 - DESCRIÇÃO DA OPERAÇÃO DE DOCAGEM

A operação de docagem é realizada com a estrutura da jaqueta suspensa pelo guindaste da embarcação instaladora. A jaqueta, após ter sido lançada e verticalizada, é manobrada pelo guindaste de forma a permitir o encaixe das luvas de docagem sobre as estacas previamente instaladas.

Durante a operação, o conjunto formado pela embarcação guindaste e a jaqueta sofre a ação das cargas ambientais de onda e correnteza. Os movimentos da embarcação guindaste são transmitidos à jaqueta através dos cabos do guindaste e dos cabos de reboque, os quais podem estar ligados a própria embarcação guindaste ou a rebocadores posicionados nas proximidades. A função destes cabos de reboque é não permitir o movimento de rotação da jaqueta em torno do seu eixo vertical ("yaw").

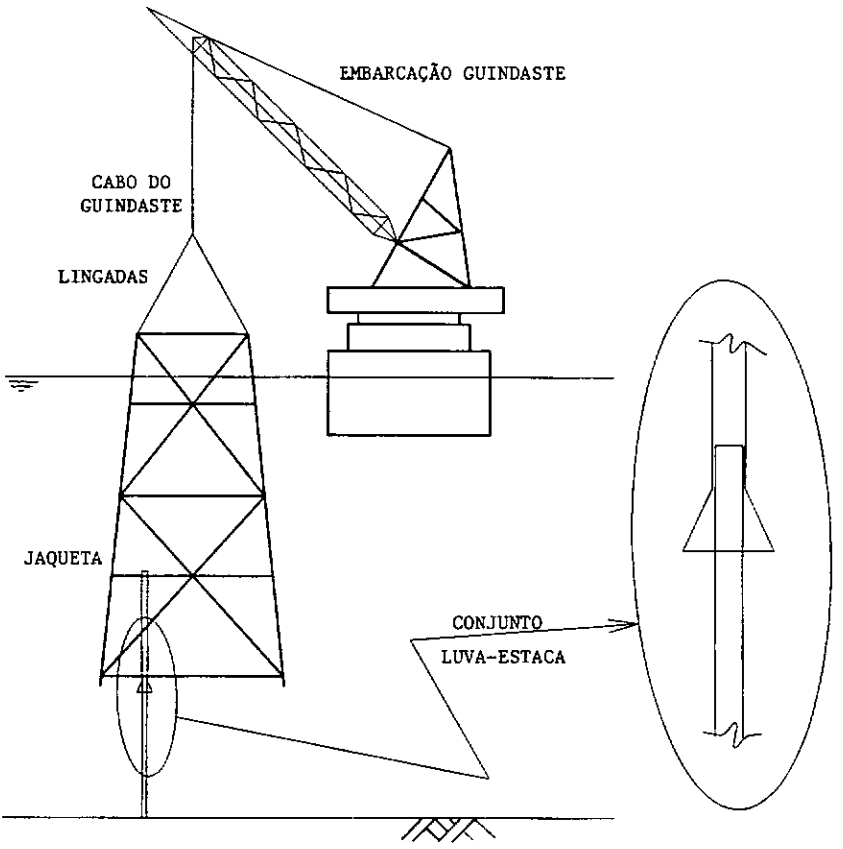


Figura II.4 - Operação de Docagem

O sistema tem um comportamento bastante complexo, sofrendo a ação das cargas ambientais, além dos movimentos transmitidos pelas embarcações instaladoras.

As incógnitas principais são as reações nas estacas de docagem, os movimentos da jaqueta e as tensões nos cabos do guindaste.

Algumas características importantes fazem com que seja necessária a utilização de técnicas de análise não-linear dinâmica para uma abordagem mais rigorosa do problema:

- Grandes deslocamentos;
- Contato variável entre a luva e a estaca de docagem;
- Amortecimento hidrodinâmico;
- Solicitações dinâmicas próximas da ressonância do sistema;
- Descontinuidades significativas na geometria da estrutura próximas da linha d'água.

Análises mais simplificadas realizadas através da linearização dos efeitos acima podem conduzir a resultados bastante discrepantes em relação à abordagem não-linear [11,12].

Para efeito da análise de movimentos da operação, a embarcação guindaste e a jaqueta são consideradas acopladas. O acoplamento é usualmente obtido incluindo a presença da jaqueta no cálculo linearizado dos movimentos da embarcação. Após a determinação destes movimentos no domínio da frequência, passa-se a uma análise da jaqueta e estacas de docagem através da dinâmica não-linear.

No presente estudo, o sistema objeto da análise é formado pela jaqueta e seus vínculos externos que são os cabos do rebocador, os cabos do guindaste e as estacas.

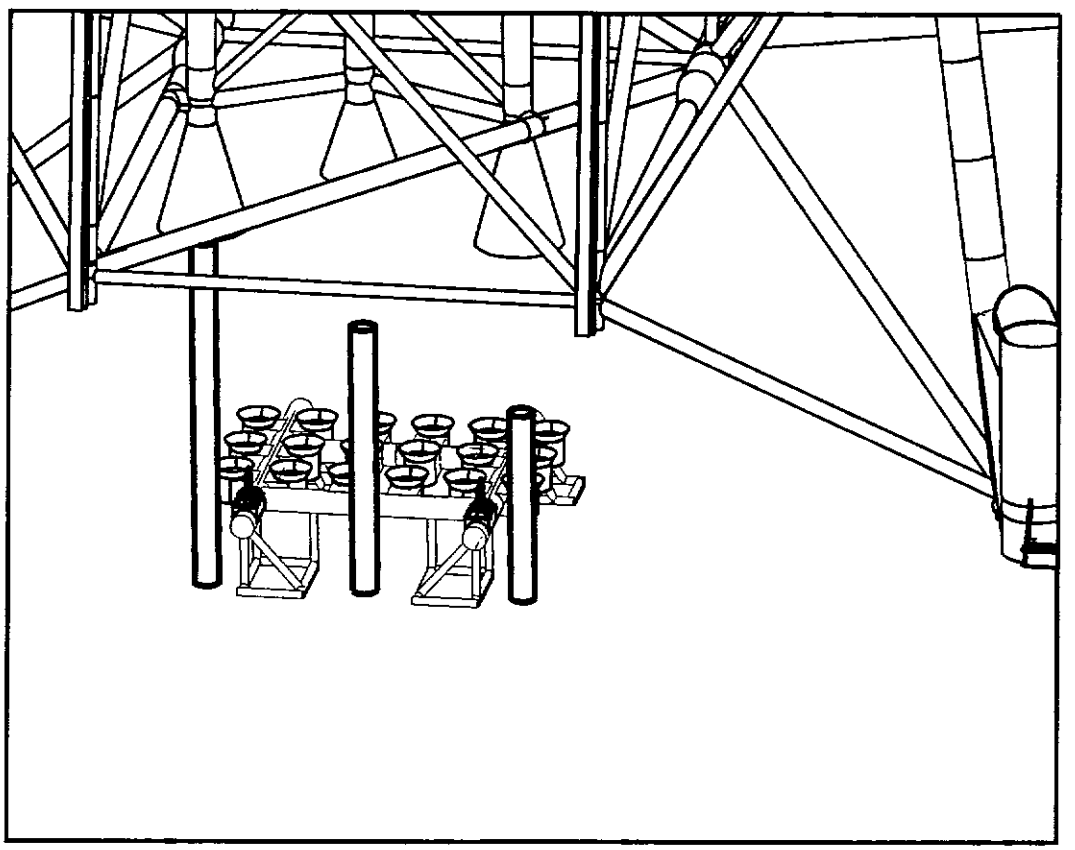


Figura II.5 - Jaqueta sobre Gabarito de Poços

CAPÍTULO III

MÉTODOS DE SOLUÇÃO E PROGRAMAS DE COMPUTADOR

III.1 - INTRODUÇÃO

Na obtenção da resposta de uma operação de docagem no domínio do tempo, através do programa DOCNAP, torna-se necessária a realização de determinadas análises preliminares. Estas análises têm como objetivo definir os parâmetros necessários para a realização das análises de docagem.

Os principais parâmetros que necessitam de definição prévia são:

- Cabos do guindaste e lingadas: definição das suas características principais;

- Linhas de reboque: definição da configuração a ser utilizada e obtenção das relações força *versus* deslocamento dos cabos;

- Movimentos da embarcação instaladora: os movimentos resultantes da ação das ondas marítimas são impostos na extremidade da lança do guindaste;

- Vibrações livres: o cálculo dos períodos e modos de vibração se constitui numa análise importante pois permite o conhecimento das características dinâmicas do sistema estrutural além de revelar possíveis problemas na estrutura ou no modelo;

- Conjunto luva e estaca de docagem: as rijezas dos conjuntos luva e estaca em cada configuração analisada necessitam ser previamente obtidas. Sua modelação é feita através de molas não-lineares que incluem a folga existente entre a luva e a estaca de docagem.

As características principais e respectivos métodos de solução dos programas utilizados nestas análises, assim como do programa DOCNAP, são relatadas a seguir.

III.2 - ANÁLISE DE VIBRAÇÕES LIVRES

III.2.1 - PROGRAMA DE COMPUTADOR

Nas análises realizadas para obtenção dos modos e períodos naturais de vibração do conjunto formado pelos cabos do guindaste, lingadas, linhas de reboque, jaqueta e estaca de docagem, ou mola de docagem nos modelos simplificados, foi utilizado o subsistema DINA [20], do sistema ADEP.

III.2.2 - MÉTODO DE SOLUÇÃO

O subsistema DINA utiliza o Método de Iteração por Subespaços [5,6], considerado um dos mais eficientes na solução de problemas estruturais com muitos graus de liberdade.

A equação diferencial de equilíbrio dinâmico de um sistema estrutural discretizado através do método dos elementos finitos é dada por:

$$\underset{\sim}{M}\,\ddot{\underset{\sim}{u}}(t) + \underset{\sim}{C}\,\dot{\underset{\sim}{u}}(t) + \underset{\sim}{K}\,\underset{\sim}{u}(t) = \underset{\sim}{P}(t) \qquad [III.1]$$

onde:

$\underset{\sim}{M}$ é a matriz de massa do sistema

$\underset{\sim}{C}$ é a matriz de amortecimento

$\underset{\sim}{K}$ é a matriz de rigidez

$\underset{\sim}{u}(t)$ é o vetor dos deslocamentos

$\dot{\underset{\sim}{u}}(t)$ é o vetor das velocidades

$\ddot{\underset{\sim}{u}}(t)$ é o vetor das acelerações

$\underset{\sim}{P}(t)$ é o vetor com as forças nodais

Uma análise de vibrações livres tem como objetivo obter a resposta do sistema estrutural sem a atuação de forças aplicadas e sem amortecimento. Logo, a equação diferencial do movimento resulta em:

$$\underset{\sim}{M}\,\ddot{\underset{\sim}{u}}(t) + \underset{\sim}{K}\,\underset{\sim}{u}(t) = \underset{\sim}{0} \qquad [III.2]$$

cuja solução pode ser do tipo

$$\underset{\sim}{u} = \underset{\sim}{\phi} \cos(\omega t) \qquad [III.3]$$

onde

ω é uma frequência natural de oscilação

$\underset{\sim}{\phi}$ é um vetor de amplitudes dos deslocamentos

Substituindo III.3 em III.2 teremos:

$$\underset{\sim}{K}\ \underset{\sim}{\phi}_i = \omega_i^2\ \underset{\sim}{M}\ \underset{\sim}{\phi}_i \quad ; \ i = 1, n \qquad [III.4]$$

Os autovalores ω_i^2 correspondem às frequências naturais elevadas ao quadrado e os respectivos autovetores $\underset{\sim}{\phi}_i$, aos modos de vibração da estrutura.

A expressão III.4 pode ser reescrita como:

$$\underset{\sim}{K}\ \underset{\sim}{\phi} = \underset{\sim}{M}\ \underset{\sim}{\phi}\ \underset{\sim}{A} \qquad [III.5]$$

sendo $\underset{\sim}{\phi}$ a matriz cujas colunas contém os modos de vibração ordenados

$$\underset{\sim}{\phi} = \left[\underset{\sim}{\phi}_1 \ \underset{\sim}{\phi}_2 \cdots \underset{\sim}{\phi}_n\right] \qquad [III.6]$$

e $\underset{\sim}{A}$ a matriz diagonal cujos elementos são os autovalores ordenados

$$\underset{\sim}{A} = \begin{bmatrix} \omega_1^2 & & & & \\ & \omega_2^2 & & & \\ & & \omega_3^2 & & \\ & & & \ddots & \\ & & & & \omega_n^2 \end{bmatrix} \qquad [III.7]$$

O objetivo do método consiste na obtenção dos *r* primeiros autovetores que satisfaçam às equações:

$$\underset{\sim}{K}\ \underset{\sim}{\phi} = \underset{\sim}{M}\ \underset{\sim}{\phi}\ \underset{\sim}{A} \qquad [III.8]$$

$$\underset{\sim}{\phi}^T\ \underset{\sim}{K}\ \underset{\sim}{\phi} = \underset{\sim}{A} \qquad [III.9]$$

$$\underset{\sim}{\phi}^T \underset{\sim}{M}\ \underset{\sim}{\phi} = \underset{\sim}{I} \qquad [III.10]$$

O Método de Iteração por Subespaços pode ser sumarizado na combinação do Método de Iteração Inversa Simultânea com a Análise de Rayleigh-Ritz e o Método de Jacobi Generalizado [21] e encontra-se resumido no quadro III.1 a seguir.

Cálculos Iniciais

. Dimensão do subespaço: m = mínimo de $(2r, r+8)$

. Seleção dos vetores de partida $\underset{\sim}{Y}_1$

. Fatoração de $\underset{\sim}{K}$: $\underset{\sim}{L}\ \underset{\sim}{D}\ \underset{\sim}{L}^T = \underset{\sim}{K}$

Iteração por Subespaços

.Iteração Inversa Simultânea passando do subespaço E_k para E_{k+1}

$$\underset{\sim}{L}\ \underset{\sim}{D}\ \underset{\sim}{L}^T\ \overline{\underset{\sim}{X}}_{i+1} = \underset{\sim}{Y}_i$$

.Projeção das Matrizes $\underset{\sim}{K}$ e $\underset{\sim}{M}$ no subespaço E_{k+1}

$$\underset{\sim}{K}_{i+1} = \overline{\underset{\sim}{X}}^T_{i+1}\ \underset{\sim}{K}\ \overline{\underset{\sim}{X}}_{i+1} = \overline{\underset{\sim}{X}}^T_{i+1}\ \underset{\sim}{Y}_i$$

$$\overline{\underset{\sim}{Y}}_{i+1} = \underset{\sim}{M}\ \overline{\underset{\sim}{X}}_{i+1}$$

$$\underset{\sim}{M}_{i+1} = \overline{\underset{\sim}{X}}^T_{i+1}\ \underset{\sim}{M}\ \overline{\underset{\sim}{X}}_{i+1} = \overline{\underset{\sim}{X}}^T_{i+1}\ \overline{\underset{\sim}{Y}}_{i+1}$$

.Solução do Problema de Autovalor Reduzido

$$\underset{\sim}{K}_{i+1}\underset{\sim}{Q}_{i+1} = \underset{\sim}{M}_{i+1}\ \underset{\sim}{Q}_{i+1}\underset{\sim}{A}_{i+1}$$

.Melhor Aproximação dos Vetores de Iteração

$$\underset{\sim}{Y}_{i+1} = \overline{\underset{\sim}{Y}}_{i+1}\ \underset{\sim}{Q}_{i+1}$$

.Testa Convergência

.Resultados

$\underset{\sim}{A}_{i+1}$ contém as frequências ao quadrado

$\underset{\sim}{Y}_{i+1}$ contém os modos de vibração

Quadro III.1 - Método de Iteração por Subespaços

III.3 - MOVIMENTOS DO CONJUNTO JAQUETA BALSA

III.3.1 - PROGRAMA DE COMPUTADOR

A ferramenta de análise utilizada para se obter os movimentos do conjunto formado pela embarcação instaladora e a jaqueta, ligados entre si através dos cabos do guindaste, sofrendo a ação de uma série de ondas regulares foi o sistema MOSES [25], da Ultramarine.

III.3.2 - MÉTODO DE SOLUÇÃO

A resposta de uma embarcação navegando é um fenômeno complexo envolvendo a interação entre a dinâmica do corpo e forças hidrodinâmicas. No caso da embarcação movendo-se numa série de ondas regulares os movimentos de corpo rígido se dão em seis graus de liberdade. Isto é, o movimento pode ser considerado como uma composição de três movimentos de translação, "surge", "sway" e "heave" e três movimentos de rotação, "roll", "pitch" e "yaw".

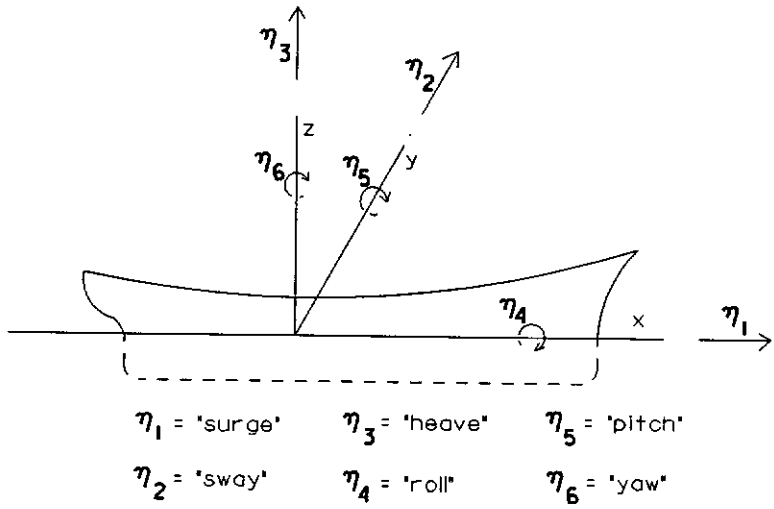


Figura III.1 - MOVIMENTOS DE UMA EMBARCAÇÃO

A análise dos movimentos resume-se em uma análise dinâmica descrita pela equação geral III.1.

$$\underset{\sim}{M}\,\ddot{\underset{\sim}{u}}(t) + \underset{\sim}{C}\,\dot{\underset{\sim}{u}}(t) + \underset{\sim}{K}\,\underset{\sim}{u}(t) = \underset{\sim}{P}(t) \qquad [III.11]$$

onde as forças externas são causadas pelas pressões hidrostáticas sobre o casco da embarcação.

As características físicas e geométricas da embarcação definirão as matrizes de massa $\underset{\sim}{M}$ e de restauração $\underset{\sim}{K}$.

Adicionalmente, o escoamento potencial produzirá uma contribuição sob a forma de massa adicional, que será adicionada a matriz de massa do sistema, e outra sob a forma de amortecimento potencial.

A excitação é admitida como uma carga do tipo harmônica - Teoria de Airy - com ondas regulares senoidais, o que produzirá uma resposta também harmônica.

$$\underset{\sim}{P} = \underset{\sim}{P}_0 \cos(\omega t) \qquad [III.12]$$

$$\underset{\sim}{\eta} = \underset{\sim}{\eta}_0 \cos(\omega t + \phi) \qquad [III.13]$$

onde

ω é a frequência da excitação;

ϕ é a fase da resposta;

$\underset{\sim}{\eta}$ é o vetor de deslocamentos,

a fase ϕ ocorre devido a existência de amortecimento.

A equação geral III.11 fica:

$$\left[\underset{\sim}{M}+\underset{\sim}{A}\right] \ddot{\underset{\sim}{\eta}}(t) + \underset{\sim}{C}\, \dot{\underset{\sim}{\eta}}(t) + \underset{\sim}{K}\, \underset{\sim}{\eta}(t) = \underset{\sim}{P}(t) \qquad [III.14]$$

onde

$\underset{\sim}{A}$ é a matriz de massa adicional;

$\underset{\sim}{C}$ é a matriz de amortecimento potencial

Para a resolução do problema de análise dinâmica em pauta é usualmente adotada a análise no domínio da frequência. Neste trabalho, foram empregados valores calculados pela equipe de projeto da DIPREX/SEPRON.

III.4 - CONJUNTO LUVA-ESTACA

III.4.1 - PROGRAMA DE COMPUTADOR

Na determinação das molas não-lineares, utilizadas nos modelos simplificados para representar o comportamento do conjunto formado pela luva e a estaca de docagem, adotou-se o subsistema ANCAB [15], do sistema ADEP.

III.4.2 - MÉTODO DE SOLUÇÃO

Análises estáticas não-lineares, utilizando um algoritmo incremental e iterativo são realizadas na determinação das molas representativas do conjunto luva e estaca de docagem. Estas análises são realizadas através do subsistema ANCAB, do ADEP. Os elementos finitos utilizados nos modelos possuem comportamento não linear geométrico.

Este método encontra-se descrito, em detalhe, no Capítulo IV item 2.1 que trata dos métodos numéricos utilizados em análises não lineares.

III.5 - ANÁLISE DE DOCAGEM

III.5.1 - PROGRAMA DE COMPUTADOR

Nas análises de operações de docagem, foi utilizado o programa DOCNAP, desenvolvido especificamente para realização deste tipo de análise, pela Petrobrás em conjunto com a COPPE/UFRJ, como parte do projeto "Desenvolvimento de Metodologia para Análise de Docagem de Jaquetas" [2].

III.5.2 - MÉTODO DE SOLUÇÃO

Devido às características não lineares dos sistemas a serem analisados, este programa utiliza o método dos elementos finitos para realizar uma análise dinâmica, através de carregamentos determinísticos, no domínio do tempo, com integração direta. Para tanto, foi empregado o algoritmo de Newmark.

A seguir são apresentadas as técnicas empregadas no DOCNAP para integração direta no domínio do tempo. São tomadas equações lineares por simplicidade, apenas para compreensão do algoritmo:

$$\underset{\sim}{M}\,\ddot{\underset{\sim}{u}}(t) + \underset{\sim}{C}\,\dot{\underset{\sim}{u}}(t) + \underset{\sim}{K}\,\underset{\sim}{u}(t) = \underset{\sim}{P}(t) \qquad \text{[III.15]}$$

onde:

$\underset{\sim}{M}$ é a matriz de massa do sistema

$\underset{\sim}{C}$ é a matriz de amortecimento

$\underset{\sim}{K}$ é a matriz de rigidez

$\underset{\sim}{u}(t)$ é o vetor dos deslocamentos

$\dot{\underset{\sim}{u}}(t)$ é o vetor das velocidades

$\ddot{\underset{\sim}{u}}(t)$ é o vetor das acelerações

$\underset{\sim}{P}(t)$ é o vetor com as forças nodais

A partir dos deslocamentos, velocidades e acelerações iniciais do problema dinâmico, o método de integração direta satisfaz III.15 somente em pontos discretos separados entre si por intervalos de tempo Δt, ao invés de buscar sua solução em qualquer tempo t. Os algoritmos são desenvolvidos de forma a se calcular a solução para o tempo $t+\Delta t$, sendo conhecidos os resultados para os intervalos anteriores. Os cálculos efetuados para

obter a solução no tempo $t+\Delta t$ a partir do tempo t são os mesmos para obter a solução no tempo $t+2\Delta t$ a partir do tempo $t+\Delta t$, o que permite estabelecer um algoritmo geral para calcular a solução em todos os pontos discretos de tempo.

No DOCNAP, a matriz de massa discreta é diagonal e constante ao longo do tempo, a matriz de amortecimento é proporcional às matrizes de massa e rigidez , sendo atualizada a cada intervalo de tempo de acordo com as mudanças na matriz de rigidez. O vetor de forças também é avaliado a cada intervalo de tempo, levando-se em conta a configuração e velocidades do intervalo imediatamente anterior.

O algoritmo de Newmark é o operador de integração direta utilizado pelo programa DOCNAP. Ele se baseia nas seguintes hipóteses:

$$ {}^{t+\Delta t}\dot{\underset{\sim}{u}} = {}^{t}\dot{\underset{\sim}{u}} + \left[\left(1 - \delta \right) {}^{t}\ddot{\underset{\sim}{u}} + \delta \; {}^{t+\Delta t}\ddot{\underset{\sim}{u}} \right] \Delta t \qquad [III.16] $$

$$ {}^{t+\Delta t}\underset{\sim}{u} = {}^{t}\underset{\sim}{u} + {}^{t}\dot{\underset{\sim}{u}} \, \Delta t + \left[\left(\frac{1}{2} - \alpha \right) {}^{t}\ddot{\underset{\sim}{u}} + \alpha \; {}^{t+\Delta t}\ddot{\underset{\sim}{u}} \right] \Delta t^2 \qquad [III.17] $$

sendo adotados os parâmetros $\delta = 1/2$ e $\alpha = 1/4$, de acordo com o método da aceleração média constante.

A equação do equilíbrio dinâmico é resolvida, referindo-se ao instante de tempo $t+\Delta t$:

$$\underset{\sim}{M}\,{}^{t+\Delta t}\ddot{\underset{\sim}{u}} + \underset{\sim}{C}\,{}^{t+\Delta t}\dot{\underset{\sim}{u}} + \underset{\sim}{K}\,{}^{t+\Delta t}\underset{\sim}{u} = \underset{\sim}{P} \qquad \text{[III.18]}$$

A partir das expressões III.16 e III.17, são obtidas as relações entre as velocidades e acelerações do tempo $t+\Delta t$ e as demais grandezas. Estas relações são então substituídas na equação III.18 , de maneira a ficarmos com o vetor de deslocamentos como única incógnita:

$$\hat{\underset{\sim}{K}}\,{}^{t+\Delta t}\underset{\sim}{u} = {}^{t+\Delta t}\hat{\underset{\sim}{R}} \qquad \text{[III.19]}$$

onde, $\hat{\underset{\sim}{K}}$ e $\hat{\underset{\sim}{R}}$ são chamadas de "matriz de rigidez efetiva" e "vetor de cargas efetivo", respectivamente, e são dados por:

$$\hat{\underset{\sim}{K}} = \underset{\sim}{K} + a_0\,\underset{\sim}{M} + a_1\,\underset{\sim}{C} \qquad \text{[III.20]}$$

$$\begin{aligned} {}^{t+\Delta t}\hat{\underset{\sim}{R}} = {}^{t+\Delta t}\underset{\sim}{R} + \underset{\sim}{M}\left(a_0\,{}^{t}\underset{\sim}{u} + a_2\,{}^{t}\dot{\underset{\sim}{u}} + a_3\,{}^{t}\ddot{\underset{\sim}{u}} \right) + \\ + \underset{\sim}{C}\left(a_1\,{}^{t}\underset{\sim}{u} + a_4\,{}^{t}\dot{\underset{\sim}{u}} + a_5\,{}^{t}\ddot{\underset{\sim}{u}} \right) \end{aligned} \qquad \text{[III.21]}$$

sendo:

$$a_0 = \frac{1}{\alpha\,\Delta t^2} \; ; \quad a_1 = \frac{\delta}{\alpha\,\Delta t} \; ; \quad a_2 = \frac{1}{\alpha\,\Delta t}$$

$$a_3 = \frac{1}{2\alpha} - 1 \; ; \; a_4 = \frac{\delta}{\alpha} - 1 \; ; \; a_5 = \frac{\Delta t}{2}\left(\frac{\delta}{\alpha} - 2\right) \qquad [III.22]$$

A solução para o deslocamento no tempo $t+\Delta t$ é obtida considerando a equação de equilíbrio dinâmico no próprio tempo $t+\Delta t$, razão pela qual o método é chamado de implícito.

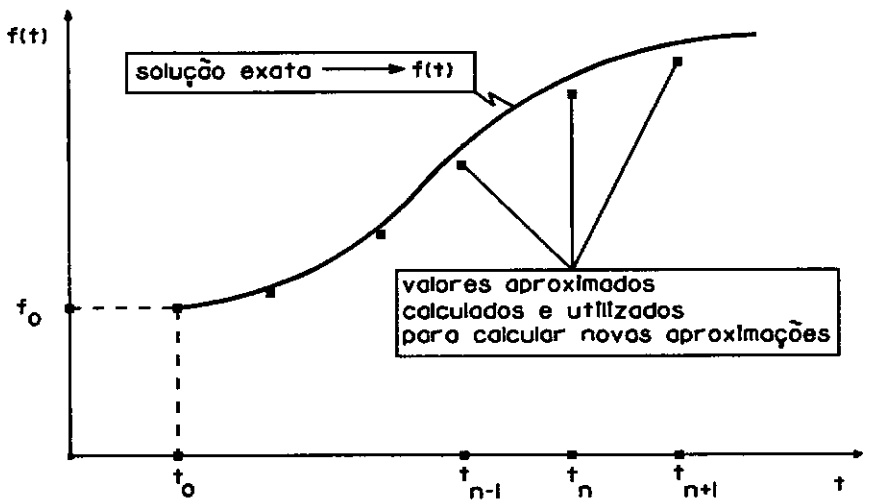


Figura III.2 - Método de Integração Direta

CAPÍTULO IV

MÉTODOS NUMÉRICOS PARA ANÁLISE NÃO-LINEAR

IV.1 - INTRODUÇÃO

O que caracteriza um problema como possuindo um comportamento linear é a proporcionalidade entre a resposta do sistema e o carregamento aplicado.

As estruturas cujos comportamentos fogem a este critério de proporcionalidade, são consideradas como de comportamento não-linear [13].

Em estruturas de comportamento linear os deslocamentos são infinitesimais e os materiais empregados são elásticos lineares, fazendo com que a configuração deformada se confunda com a original.

No caso de estruturas flexíveis, os deslocamentos podem ser da mesma ordem de grandeza das dimensões da estrutura ou, ainda, mesmo com deslocamentos relativamente

pequenos, a disposição das cargas na estrutura pode ser tal que, combinada aos deslocamentos, leve a uma situação de instabilidade, fazendo com que seja necessário estabelecer as equações de equilíbrio com a estrutura na configuração deformada.

Uma análise não-linear estrutural tem como objetivo prever a resposta de estruturas com comportamento não-linear e combina recursos fornecidos por modelos matemáticos com métodos de discretização estrutural e técnicas numéricas.

Em geral, é necessário, também, empregar uma formulação incremental para os carregamentos aplicados, assim como uma variável de tempo é utilizada para descrever convenientemente o carregamento e os movimentos da estrutura.

IV.2 - ANÁLISE NÃO-LINEAR E MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O comportamento não-linear de uma estrutura pode ser de origem geométrica ou física.

Numa análise estrutural, em que supõe-se o material com comportamento elasto-plástico, quando a

tensão, em um ou mais pontos da estrutura, atinge o valor de escoamento, a relação carga-deslocamento é não-linear. Esta não-linearidade é chamada de física. Sua consideração é importante, por exemplo, quando se deseja obter a carga correspondente ao colapso plástico da estrutura.

O colapso plástico ocorre quando a estrutura deixa de ter capacidade para absorver novos incrementos de carga e os deslocamentos crescem sob carga constante, configurando o regime plástico.

A não-linearidade geométrica é relevante nos casos de instabilidade estrutural, interação de esforços axiais e transversais e grandes deslocamentos. Este último efeito é significativo em um sistema estrutural do tipo encontrado em análises de docagem de jaquetas.

O método dos elementos finitos estabelece a discretização das equações que regem o comportamento estrutural [5]. A análise não-linear de estruturas possibilita o estudo dos deslocamentos do sistema em função dos carregamentos impostos, os quais deverão ser suportados pela estrutura antes que falhas globais possam ocorrer.

Os procedimentos numéricos adotados para análises não-lineares consistem na realização de uma série de análises lineares onde, através da aplicação de incrementos de carga, procura-se obter melhores aproximações para os deslocamentos. Isto é, aplica-se vários incrementos de carga ΔP até se atingir o carregamento total P. Dentro de cada novo nível de carga pode-se realizar iterações ou não. Quando não são realizadas, o método é dito puramente incremental. Caso sejam realizadas iterações, tem-se um algoritmo incremental-iterativo.

O carregamento aplicado para um novo ciclo será a diferença entre a carga aplicada e as forças resistentes causadas pela deformação da estrutura. A natureza não-linear do sistema estrutural é considerada através do cálculo de novas propriedades, adequadas ao atual estado de deformação da estrutura. A configuração e o estado de deformações após atingida a convergência, para um ciclo de carga, servirá como condição inicial para o próximo incremento de carga, continuando o processo até o nível de carregamento desejado, aproximando o comportamento não-linear por uma sequência de sistemas lineares sucessivamente alterados.

Pode-se adotar, também, um método puramente iterativo, que consiste em aplicar o carregamento em seu

valor total e realizar iterações sucessivas até atingir o equilíbrio. A figura IV.1 ilustra o procedimento para um sistema com um grau de liberdade.

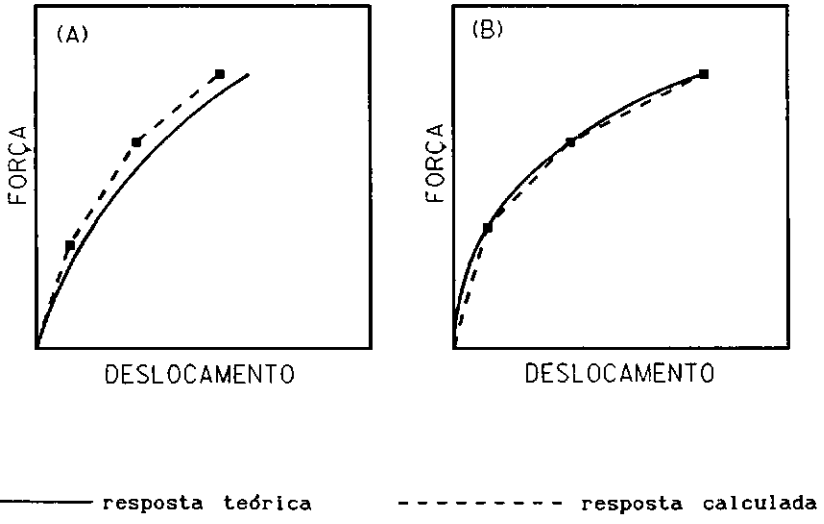


Figura IV.1 - Procedimento Incremental (a) e Incremental Iterativo (b)

IV.2.1 - ANÁLISE NÃO-LINEAR INCREMENTAL ITERATIVA

Os problemas com não-linearidades geométricas, envolvem não apenas grandes deslocamentos como também uma iteração entre as tensões axiais, as quais exercem significativa influência na rigidez da estrutura, e tensões transversais.

Em comparação com problemas lineares, onde os termos da matriz de rigidez da estrutura são constantes, a matriz de rigidez para problemas com não-lineridades geométricas contém termos que são funções do estado de tensões da estrutura. Isto é, na equação

$$\underset{\sim}{K}\,\underset{\sim}{u} = \underset{\sim}{P} \qquad [IV.1]$$

onde

$\underset{\sim}{K}$ é a matriz de rigidez;

$\underset{\sim}{u}$ é o vetor dos deslocamentos;

$\underset{\sim}{P}$ é o vetor das cargas nodais,

A matriz de rigidez $\underset{\sim}{K}$ é obtida em relação a geometria deformada que, a princípio, é desconhecida.

O método de análise não-linear incremental iterativo emprega uma matriz de rigidez incremental que é função dos deslocamentos e forças internas desenvolvidas durante um incremento de carga.

Então, no início de cada incremento de carga, as forças internas e a geometria deformada existentes são usadas para formar a matriz de rigidez da estrutura. Um esquema iterativo é, então, empregado. Com a matriz de rigidez sendo continuamente atualizada, utilizando os deslocamentos incrementais previamente calculados.

Embora existam diferentes maneiras de se realizar a iteração, o método mais amplamente utilizado é o de Newton-Raphson. Este método consiste na determinação dos desequilíbrios entre as cargas nodais externas aplicadas e as forças internas calculadas ao fim de cada iteração. O desequilíbrio das forças obtido é utilizado para corrigir os deslocamentos incrementais previamente determinados.

Como ilustração, apresentamos o procedimento utilizado para determinar o deslocamento incremental $\Delta\underset{\sim}{u}$ correspondente a um incremento de carga $\Delta\underset{\sim}{P}_0$ para a curva força *versus* deslocamento apresentada na figura IV.2.

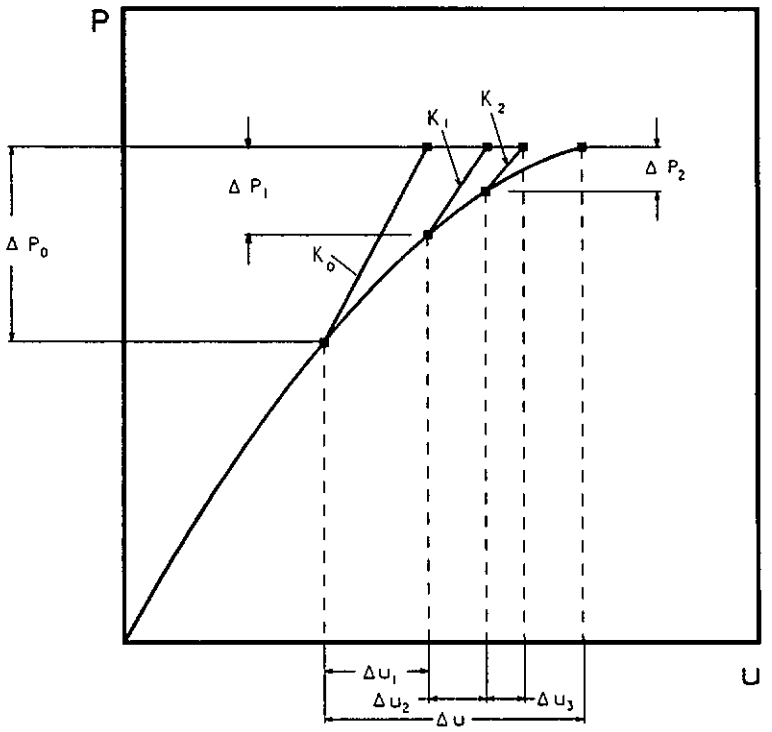


Figura IV.2 - Procedimento Iterativo

1º passo: obtenção dos deslocamentos incrementais $\Delta \underset{\sim}{u}_1$, a partir do incremento de carga $\Delta \underset{\sim}{P}_o$.

$$\underset{\sim}{K}_0 \ \Delta \underset{\sim}{u}_1 = \Delta \underset{\sim}{P}_o \qquad [IV.2]$$

2º passo: com $\Delta \underset{\sim}{u}_1$, é feita a atualização da matriz de rigidez de $\underset{\sim}{K}_0$ para $\underset{\sim}{K}_1$ e verificada a convergência para o vetor de cargas desequilibradas $\Delta \underset{\sim}{P}_1$.

$$\underset{\sim}{K}_1 \ \Delta \underset{\sim}{u}_1 - \left(\Delta \underset{\sim}{P}_o - \Delta \underset{\sim}{P}_1 \right) \leq TOL \qquad [IV.3]$$

3^{o} passo: caso a convergência não tenha sido obtida, passamos a obtenção dos deslocamentos $\Delta\underset{\sim}{u}_2$, a partir do vetor de cargas desequilibradas $\Delta\underset{\sim}{P}_1$.

$$\underset{\sim}{K}_1 \ \Delta\underset{\sim}{u}_2 = \Delta\underset{\sim}{P}_1 \qquad [IV.4]$$

4^{o} passo: com $\Delta\underset{\sim}{u}_2$, é feita a atualização da matriz de rigidez de $\underset{\sim}{K}_1$ para $\underset{\sim}{K}_2$ e verificada a convergência, para o vetor de cargas desequilibradas $\Delta\underset{\sim}{P}_2$.

$$\underset{\sim}{K}_2 \ \Delta\underset{\sim}{u}_2 - \left(\Delta\underset{\sim}{P}_o - \Delta\underset{\sim}{P}_2 \right) \leq TOL \qquad [IV.5]$$

Consequentemente, as relações de recorrência serão:

$$\underset{\sim}{K}_{i-1} \ \Delta\underset{\sim}{u}_i = \Delta\underset{\sim}{P}_{i-1} \qquad [IV.6]$$

e

$$\underset{\sim}{K}_i \ \Delta\underset{\sim}{u}_1 - \left(\Delta\underset{\sim}{P} - \Delta\underset{\sim}{P}_i \right) \leq TOL \qquad [IV.7]$$

Os deslocamentos incrementais utilizados para obter $\underset{\sim}{K}_i$, serão:

$$\Delta\underset{\sim}{u} = \Delta\underset{\sim}{u}_1 + \Delta\underset{\sim}{u}_2 + \ldots + \Delta\underset{\sim}{u}_i \qquad [IV.8]$$

A convergência é alcançada quando o vetor de forças desequilibradas ΔP_i torna-se desprezível. O objetivo é fazer com que o desequilíbrio apresente uma queda ao final de cada iteração. Num procedimento numérico, este valor jamais chegará exatamente ao valor zero. Adota-se, com o objetivo de controlar o fim do processo iterativo, um critério de convergência em função de uma tolerância previamente especificada.

O critério pode ser função dos deslocamentos, das forças, dos dois em conjunto ou de energia. Os critérios variam em função do tipo de problema que se está enfocando [18].

IV.3 - O SISTEMA DOCNAP

IV.3.1 - INTRODUÇÃO

O sistema DOCNAP, conforme dito no Capítulo III, foi desenvolvido pela Petrobras, em conjunto com a COPPE/UFRJ, como parte de um programa para o desenvolvimento de metodologia de docagem de jaquetas.

O arquivo de entrada de dados para o programa DOCNAP é gerado a partir de um módulo de interface para docagem, instalado no sistema ADEP.

A leitura dos dados da plataforma é realizada em formato ADEP/ANCAB, devido a afinidade com os comandos de análise não-linear, acrescentando-se comandos específicos para a análise de docagem. Consequentemente, o arquivo ADEP original, utilizado pelo projeto em análises lineares, tem de sofrer algumas alterações para se adaptar aos comandos ANCAB.

Desta maneira, após a transformação de grande massa de dados da jaqueta, o usuário pode realizar alterações diretamente no arquivo DOCNAP [2]. A sequência descrita acima encontra-se ilustrada na figura IV.2.

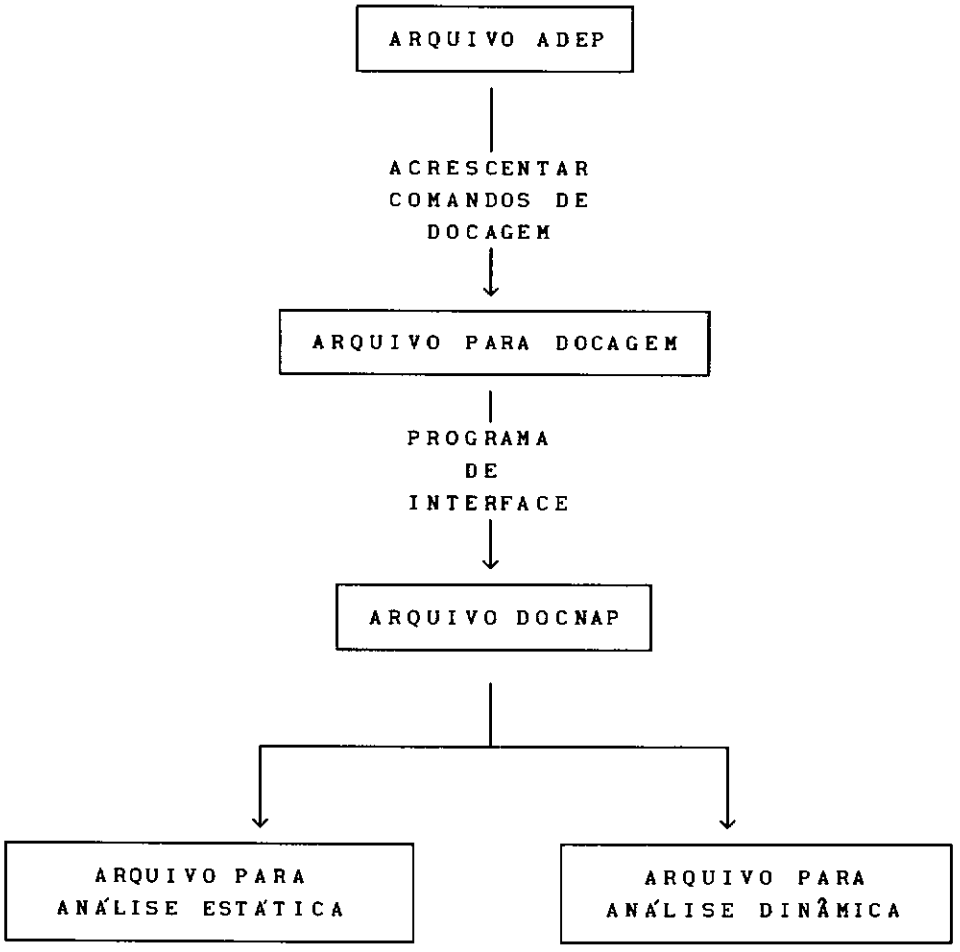


Figura IV.3 - Procedimento para Gerar Arquivo DOCNAP

As principais facilidades adicionais encontradas no programa DOCNAP estão ilustradas na figura IV.4.

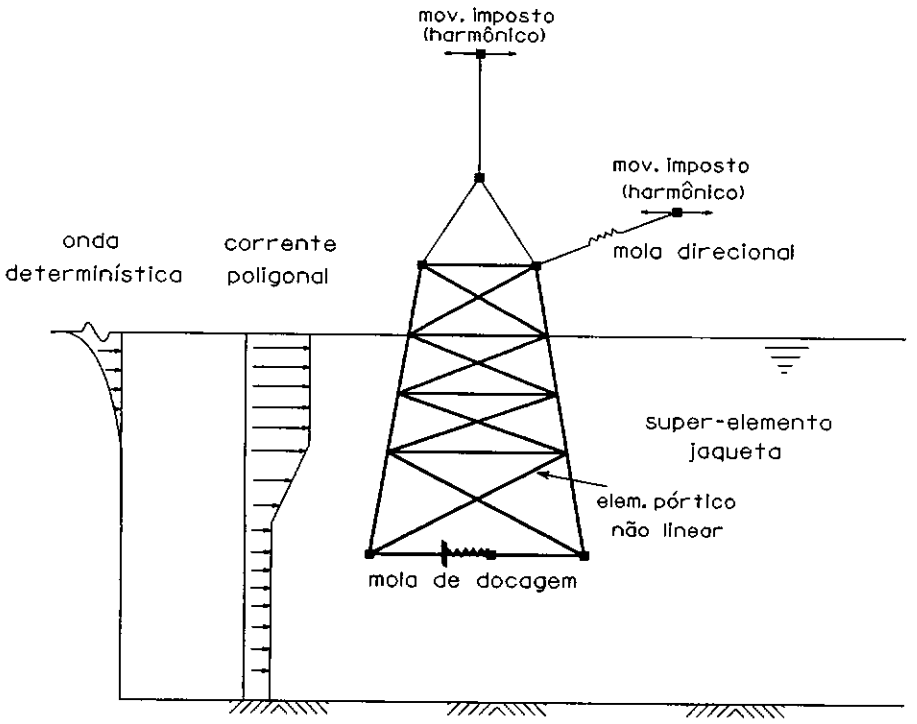


Figura IV.4 - Principais Características do DOCNAP

Como é prática em análises dinâmicas não-lineares, a simulação será iniciada sempre após se estabelecer a configuração de equilíbrio estático.

Esta estratégia é adotada porque uma análise não-linear dinâmica no domínio do tempo é um cálculo dispendioso em termos de custo computacional. Como maneira de viabilizar este tipo de análise, a parcela estática do carregamento é aplicada numa análise estática não-linear.

Todos os dados da estrutura são fornecidos para a realização da análise estática. Quando se realiza a análise dinâmica, torna-se necessário apenas o fornecimento dos dados das cargas dinâmicas e a redefinição das cargas estáticas.

IV.3.2 - ANÁLISE ESTÁTICA

A razão principal pela qual se realiza primeiramente uma análise estática não-linear é a economia computacional. Numa análise estática não-linear, os incrementos de carga utilizados são bem maiores que numa análise dinâmica e são evitadas as vibrações transientes resultantes da aplicação do carregamento.

A associação destas vibrações transientes aos primeiros modos de vibração da estrutura pode consumir bastante tempo de integração até que se alcance seu amortecimento, podendo impedir que a estrutura alcance o regime permanente.

Na análise de docagem de jaquetas, os carregamentos considerados estáticos são os seguintes:

- peso próprio;
- empuxo;
- corrente.

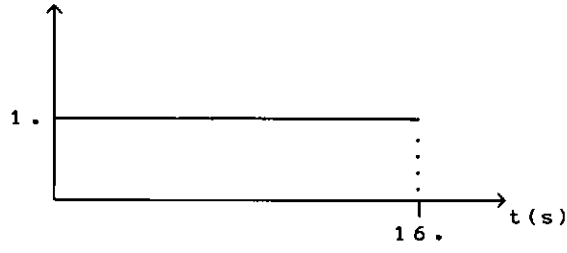
As cargas devido ao peso próprio e ao empuxo são aplicadas integralmente logo no primeiro incremento de carga, sem introdução da corrente, de maneira que a jaqueta

atinja a configuração inicial de equilíbrio, incorporando o estado de tensões correspondente nos elementos da estrutura.

O carregamento devido a corrente é introduzido de forma gradual, através de uma função tempo para o carregamento especificado.

A figura IV.5 abaixo resume, de forma esquemática, o procedimento acima descrito.

CARGAS VERTICAIS DE PESO PRÓPRIO E EMPUXO



CARGA HORIZONTAL DE CORRENTE

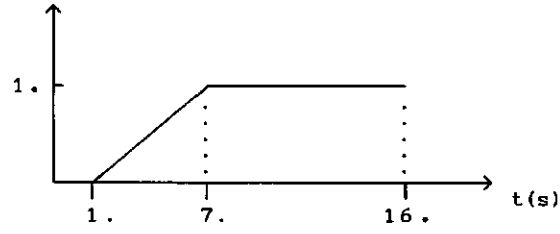


Figura IV.5 - Estratégia de Aplicação de Cargas Estáticas

Na análise estática, as molas de docagem ainda não se encontram atuantes. Consequentemente, a estrutura só adquire rigidez lateral após a aplicação dos carregamentos verticais de peso próprio e empuxo, quando as matrizes de rigidez geométricas dos elementos de pórtico não-linear passam a ser somadas. Por este motivo, portanto, o carregamento horizontal devido à correnteza só pode ser introduzido após o carregamento vertical.

A presença de grandes deslocamentos laterais, em função da pequena rigidez lateral para suportar as cargas de corrente, obriga a que o carregamento estático seja aplicado de forma incremental, com a matriz de rigidez sendo reavaliada a cada iteração. Os deslocamentos incrementais são acumulados e os esforços obtidos, a partir dos deslocamentos finais.

Para possibilitar a convergência durante a análise estática, são utilizadas molas de relaxação associadas aos nós de conexão das molas de docagem. Este tipo de dispositivo associa a um grau de liberdade, um valor de rigidez e este valor vai sendo reduzido ao longo das iterações, de maneira que ao se atingir a convergência esta rigidez fictícia tenha um valor mínimo previamente especificado.

A rigidez varia segundo a seguinte função:

$$k_i = k_0 \, e^{-\frac{i-1}{\beta}} + k_{min} \qquad [IV.9]$$

onde:

k_i é o valor de rigidez da iteração i;

k_0 é o valor inicial de rigidez;

i é o número da iteração;

β é o fator de decaimento da função;

k_{min} é o valor mínimo de rigidez.

O algoritmo de solução do programa DOCNAP, para análise não-linear estática, encontra-se resumido no quadro IV.1 apresentado a seguir.

CÁLCULO:

* Loop nos incrementos de carga i = 1, I

  Monta vetor de cargas concentradas aplicadas $^{i}\underset{\sim}{P}$

  * Loop nas iterações n = 1, N

    Calcula para cada elemento m:

    matriz de rigidez atualizada $^{i\ n}\underset{\sim}{k}_{m}$

    forças internas resistentes $^{i}\underset{\sim}{f}_{m}^{n}$

    forças equivalentes às cargas distribuídas $^{i}\underset{\sim}{c}_{m}$ (apenas para n=1)

    Monta matriz de rigidez global $^{i\ n}\underset{\sim}{K} = \sum_{m} {}^{i\ n}\underset{\sim}{k}_{m}$

    Monta vetor de desequilíbrio

    $$^{i}\underset{\sim}{R}^{n} = {}^{i}\underset{\sim}{P} + \sum_{m} {}^{i}\underset{\sim}{c}_{m} + \sum_{m} {}^{i}\underset{\sim}{f}_{m}^{n}$$

    Calcula deslocamentos incrementais

    $$\Delta^{i}\underset{\sim}{u} = {}^{i}\underset{\sim}{K}^{n\,-1}\ {}^{i}\underset{\sim}{R}^{n}$$

    Totaliza deslocamentos $^{i}\underset{\sim}{u}^{n} = {}^{1}\underset{\sim}{u}^{n-1} + \Delta^{i}\underset{\sim}{u}$

  Testa convergência

Imprime resultados

Quadro IV.1 - Algoritmo da Análise Não-Linear Estática

IV.3.3 - ANÁLISE DINÂMICA

A resposta dinâmica dos modos globais do conjunto formado pelos cabos do guindaste, jaqueta e estacas de docagem, necessita ser obtida com precisão, assim como as forças hidrodinâmicas aplicadas [2].

Tendo em vista o custo computacional proibitivo da análise de uma estrutura real, no sistema DOCNAP, é utilizada uma técnica de condensação dinâmica. O método de Guyan é adotado de modo a possibilitar o alcance do grau de precisão necessário, ao mesmo tempo em que mantém o custo da análise em níveis aceitáveis.

IV.3.3.1 - MÉTODO DE GUYAN

A hipótese na qual se baseia este método de condensação dinâmica nos diz que é necessário um número menor de graus de liberdade para descrever a inércia de uma estrutura, em relação aos necessários para descrever suas propriedades elásticas com igual precisão [2].

Sua dedução parte da condensação estática da rigidez, onde se realiza uma simplificação. A matriz de massa é condensada com a mesma matriz de transformação obtida para a matriz de rigidez.

A condensação estática é feita de forma que a estrutura ou parte dela, chamada de subestrutura, tenha o seu comportamento representado por alguns nós previamente selecionados e chamados de "nós de contorno". Os demais nós são chamados de "nós internos" [5]. Consequentemente, a equação do equilíbrio estático pode ser escrita da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \underset{\sim}{K}_{cc} & \underset{\sim}{K}_{ci} \\ \underset{\sim}{K}_{ic} & \underset{\sim}{K}_{ii} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \underset{\sim}{u}_{c} \\ \underset{\sim}{u}_{i} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \underset{\sim}{P}_{c} \\ \underset{\sim}{P}_{i} \end{Bmatrix} \qquad [IV.10]$$

onde os subscritos c indicam contorno e i internos.

De IV.10, obtém-se as seguintes expressões:

$$\underset{\sim}{K}_{cc}\ \underset{\sim}{u}_{c} + \underset{\sim}{K}_{ci}\ \underset{\sim}{u}_{i} = \underset{\sim}{P}_{c} \qquad [IV.11]$$

$$\underset{\sim}{K}_{ic}\ \underset{\sim}{u}_{c} + \underset{\sim}{K}_{ii}\ \underset{\sim}{u}_{i} = \underset{\sim}{P}_{i} \qquad [IV.12]$$

Resolvendo IV.12 para $\underset{\sim}{u}_i$, temos:

$$\underset{\sim}{u}_i = \underset{\sim}{K}_{ii}^{-1} \underset{\sim}{P}_i - \underset{\sim}{K}_{ii}^{-1} \underset{\sim}{K}_{ic} \underset{\sim}{u}_c \qquad [IV.13]$$

Com IV.13 em IV.11, temos:

$$(\underset{\sim}{K}_{cc} - \underset{\sim}{K}_{ci} \underset{\sim}{K}_{ii}^{-1} \underset{\sim}{K}_{ic}) \underset{\sim}{u}_c = \underset{\sim}{P}_c - \underset{\sim}{K}_{ci} \underset{\sim}{K}_{ii}^{-1} \underset{\sim}{P}_i \qquad [IV.14]$$

A equação IV.14 acima, é a equação do equilíbrio da estrutura condensada, que pode ser reescrita:

$$\underset{\sim}{K}_{eq} \underset{\sim}{u}_c = \underset{\sim}{P}_{eq} \qquad [IV.15]$$

Onde,

$$\underset{\sim}{K}_{eq} = \underset{\sim}{K}_{cc} - \underset{\sim}{K}_{ci} \underset{\sim}{K}_{ii}^{-1} \underset{\sim}{K}_{ic} \qquad [IV.16]$$

$$\underset{\sim}{P}_{eq} = \underset{\sim}{P}_c - \underset{\sim}{K}_{ci} \underset{\sim}{K}_{ii}^{-1} \underset{\sim}{P}_i \qquad [IV.17]$$

Após a obtenção dos deslocamentos $\underset{\sim}{u}_c$, empregando-se a matriz de rigidez e o vetor de cargas equivalentes, os deslocamentos dos nós internos são calculados a partir da expressão IV.13.

No cálculo estático, a técnica de condensação é exata. Nenhuma simplificação é feita na dedução das equações.

O método de Guyan parte da condensação estática, introduzindo-se uma aproximação que consiste em desprezar o termo $\underset{\sim}{K}_{ii}^{-1}\ \underset{\sim}{P}_{i}$ na equação IV.13 acima, que relaciona os deslocamentos dos graus internos aos deslocamentos dos graus de liberdade de contorno.

A relação fica, então, reduzida a :

$$\underset{\sim}{u}_{i} = - \underset{\sim}{K}_{ii}^{-1}\ \underset{\sim}{K}_{ic}\ \underset{\sim}{u}_{c} \qquad [IV.18]$$

Parte-se do princípio que o erro cometido nesta aproximação será pequeno se os nós de contorno forem escolhidos de maneira adequada. Estes nós devem ser uniformemente distribuídos pela estrutura e devem estar associados às maiores massas [2]. A figura IV.6 apresenta a distribuição dos nós de contorno adotada no modelo deste estudo.

Define-se então a matriz de transformação:

$$\underset{\sim}{T}_{ic} = \underset{\sim}{K}_{ii}^{-1}\ \underset{\sim}{K}_{ic} \qquad [IV.19]$$

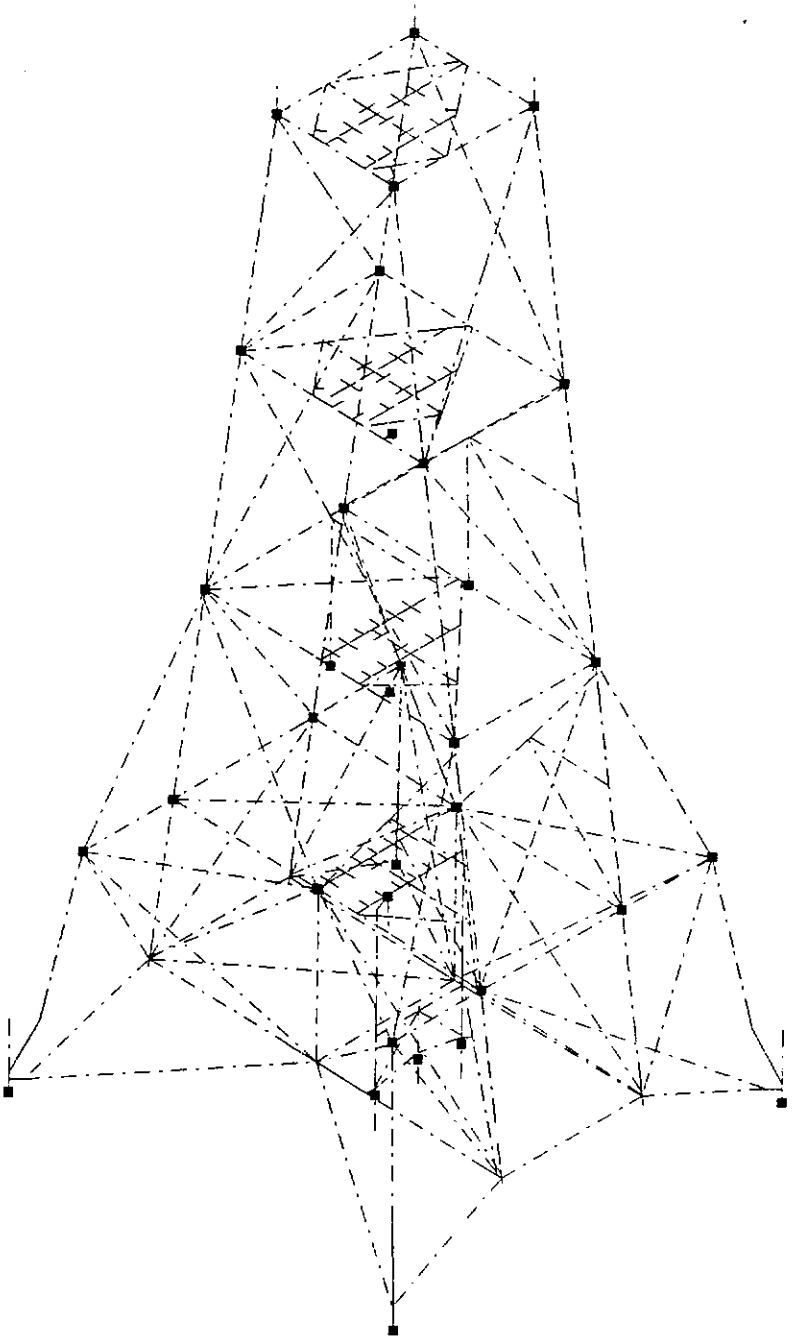


Figura IV.6 - Distribuição dos Nós de Contorno

A expressão dos deslocamentos fica:

$$\underset{\sim}{u}_i = -\underset{\sim}{T}_{ic}\ \underset{\sim}{u}_c \qquad [IV.20]$$

Observando-se a expressão IV.16, constata-se que a matriz de transformação é obtida como parcela intermediária na avaliação da matriz de rigidez equivalente.

A expressão IV.17, do vetor de cargas equivalentes, pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$\underset{\sim}{P}_{eq} = \underset{\sim}{P}_c - \overset{t}{\underset{\sim}{K}}_{ic}\ \overset{-1}{\underset{\sim}{K}}_{ii}\ \underset{\sim}{P}_i \qquad [IV.21]$$

Pela propriedade de transposição de matrizes [5]:

$$(\underset{\sim}{A}\cdot\underset{\sim}{B})^T = \underset{\sim}{B}^T \cdot \underset{\sim}{A}^T$$

Logo,

$$(\overset{-1}{\underset{\sim}{K}}_{ii} \cdot \underset{\sim}{K}_{ic})^T = \overset{T}{\underset{\sim}{K}}_{ic} \cdot \overset{-T}{\underset{\sim}{K}}_{ii}$$

Como $\underset{\sim}{K}_{ii}$ é simétrica, temos:

$$\overset{-T}{\underset{\sim}{K}}_{ii} = \overset{-1}{\underset{\sim}{K}}_{ii}$$

$$\overset{T}{\underset{\sim}{K}}_{ic}\ \overset{-1}{\underset{\sim}{K}}_{ii} = (\overset{-1}{\underset{\sim}{K}}_{ii}\ \underset{\sim}{K}_{ic})^T = \underset{\sim}{T}^T_{ic} \qquad [IV.22]$$

A partir da substituição de IV.22 em IV.21, temos a expressão para o vetor de cargas equivalente:

$$\underset{\sim}{P}_{eq} = \underset{\sim}{P}_{c} - \underset{\sim}{T}_{ic}^{T} \underset{\sim}{P}_{i} \qquad [IV.23]$$

A matriz de massa equivalente é avaliada empregando-se a mesma matriz de transformação:

$$\underset{\sim}{M}_{eq} = \underset{\sim}{M}_{cc} + \underset{\sim}{T}_{ic}^{T} \underset{\sim}{M}_{ii} \underset{\sim}{T}_{ic} \qquad [IV.24]$$

A expressão IV.24 supõe que a matriz de massa seja diagonal. No caso de se ter uma matriz cheia, aparecerão mais de dois termos na expressão.

IV.3.3.2 - SUPER-ELEMENTO JAQUETA

A incorporação da técnica de condensação dinâmica em um programa de elementos finitos é realizada através da inclusão de super-elementos. As matrizes desses super-elementos são geradas de acordo com as expressões de Guyan.

No DOCNAP, chama-se de "super-elemento jaqueta" uma subestrutura composta de elementos de pórtico espacial representativa de uma parte da jaqueta, normalmente um vão ou andar ("bay").

Para obtenção das matrizes equivalentes, a partir das equações deduzidas no item IV.3.3.1 e utilizando-se o método de Gauss na decomposição da matriz de rigidez, chega-se a algumas simplificações:

$$\underset{\sim}{K}_{ii} = \underset{\sim}{L}\ \underset{\sim}{D}\ \underset{\sim}{L}^{T} \qquad [IV.25]$$

Aplicando-se IV.25 em IV.16:

$$\underset{\sim}{K}_{eq} = \underset{\sim}{K}_{cc} - \underset{\sim}{K}_{ci}\ \underset{\sim}{L}^{-T}\ \underset{\sim}{D}^{-1}\ \underset{\sim}{L}^{-1}\ \underset{\sim}{K}_{ic} \qquad [IV.26]$$

Definido-se a matriz $\underset{\sim}{R}_{ic}$:

$$\underset{\sim}{R}_{ic} = \underset{\sim}{L}^{-1}\ \underset{\sim}{K}_{ic} \qquad [IV.27]$$

A expressão para a matriz equivalente torna-se:

$$\underset{\sim}{K}_{eq} = \underset{\sim}{K}_{cc} - \underset{\sim}{R}_{ic}^{T}\ \underset{\sim}{D}^{-1}\ \underset{\sim}{R}_{ic} \qquad [IV.28]$$

A equação indicada em IV.27 para cálculo de $\underset{\sim}{R}_{ic}$ corresponde a uma operação de redução, a qual normalmente é executada sobre o vetor de cargas. Neste caso, a redução é feita sobre as colunas de $\underset{\sim}{K}_{ic}$.

A obtenção de $\underset{\sim}{T}_{ic}$ pode ser realizada em seguida, através da retro-substituição de $\underset{\sim}{R}_{ic}$. Tomando-se a expressão original para a matriz de transformação IV.19, e substituindo-se IV.25 e IV.27, temos:

$$\underset{\sim}{T}_{ic} = \underset{\sim}{L}^{-T}\ \underset{\sim}{D}^{-1}\ \underset{\sim}{L}^{-1}\ \ \underset{\sim}{K}_{ic} = \underset{\sim}{L}^{-T}\ \underset{\sim}{D}^{-1}\ \underset{\sim}{R}_{ic} \qquad [IV.29]$$

A avaliação das matrizes $\underset{\sim}{R}_{ic}$ e $\underset{\sim}{T}_{ic}$ segue uma sequência lógica de decomposição da matriz $\underset{\sim}{K}_{ii}$ e, após isto, são executadas as operações de redução e retrosubstituição da matriz $\underset{\sim}{K}_{ic}$, pelo resultado daquela decomposição.

As principais características do "super-elemento jaqueta" são:

-Número arbitrário de nós internos e de contorno;
-Escalares pontuais internos;
-Massas concentradas internas;
-Cargas distribuídas internas;
-Cargas concentradas internas.

IV.3.3.3 - DEFINIÇÃO DOS CARREGAMENTOS

A análise dinâmica, como dito anteriormente, é realizada a partir dos resultados armazenados da configuração de equilíbrio estático da estrutura em análise.

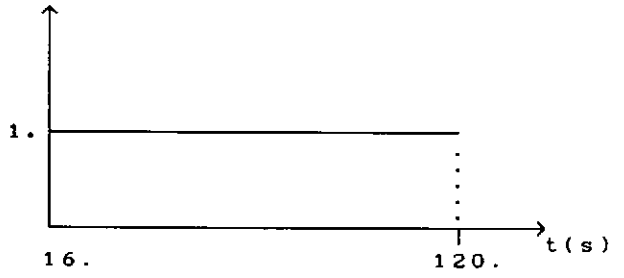
Os carregamentos estáticos necessitam ser redefinidos, assim como devem ser definidas as cargas dinâmicas, que são:

- ondas;
- movimentos da embarcação guindaste;
- movimentos nos cabos dos rebocadores.

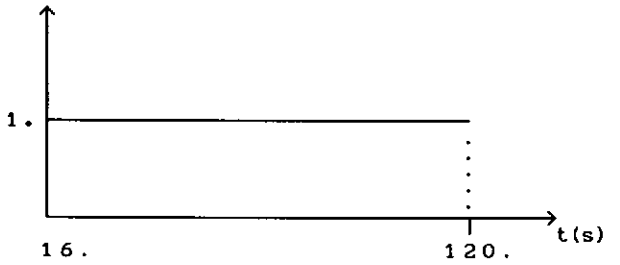
Os carregamentos dinâmicos devidos aos movimentos impostos da embarcação guindaste são introduzidos através de função tempo, com uma suavização inicial de forma a facilitar a convergência na análise dinâmica.

As cargas das ondas são aplicadas integralmente logo no primeiro incremento de carga, através da mesma função tempo das cargas de correnteza. A figura IV.7, a seguir, resume, de forma esquemática, o procedimento acima descrito.

CARGAS DE PESO PRÓPRIO, EMPUXO, ONDA E CORRENTEZA



CARGAS DAS LINHAS DE REBOQUE



CARGAS DO MOVIMENTO DA EMBARCAÇÃO GUINDASTE

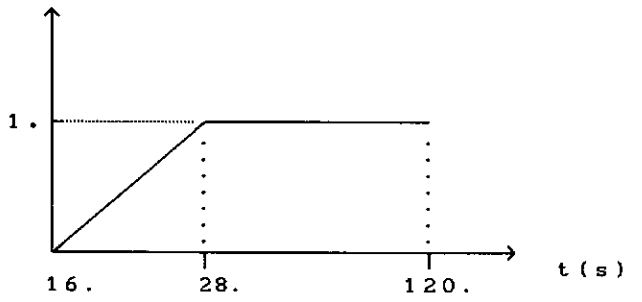


Figura IV.7 - Estratégia de Aplicação de Cargas na Análise Dinâmica

A resposta dinâmica de um sistema estrutural é diferente da sua resposta estática, em função dos efeitos inerciais e de amortecimento.

A possibilidade de uma estrutura responder dinamicamente a um dado carregamento periódico depende das suas características intrínsecas, traduzidas por seus modos e períodos naturais de vibração. Um sistema estrutural apresentará resposta dinâmica se o carregamento a que esta submetido possui um período, ou um componente harmônico, próximo de um de seus períodos naturais, além de uma distribuição espacial não-ortogonal ao modo natural correspondente. Ou seja, quanto maior for esta proximidade, mais importante será o comportamento dinâmico da estrutura.

As estruturas necessitam ser analisadas para os carregamentos dinâmicos porque a resposta dinâmica pode ser algumas vezes maior, ou algumas vezes menor que a resposta estática.

Neste estudo, pela análise dos modos naturais de vibração conforme descrito no Capítulo III, verificamos que a resposta dinâmica para os períodos de onda de interesse - 7s a 13s - estará presente.

Além do efeito das forças inerciais, observa-se que o comportamento dinâmico provoca o aparecimento de forças devidas ao efeito do amortecimento.

O amortecimento está ligado a dissipação de energia do sistema durante a vibração. A energia mecânica do sistema - cinética ou potencial - é transformada em outras formas de energia como, por exemplo, calor. Esta maneira de transformação de energia é bastante complexa e não completamente entendida.

Normalmente, o que se faz é assumir que a força de amortecimento é proporcional à magnitude da velocidade. Este amortecimento é chamado viscoso ou estrutural.

No sistema DOCNAP, o amortecimento estrutural é considerado através do modelo de Rayleigh. A matriz $\underset{\sim}{C}$ é obtida através de uma combinação linear das matrizes de massa $\underset{\sim}{M}$ e de rigidez $\underset{\sim}{K}$.

$$\underset{\sim}{C} = \alpha \underset{\sim}{M} + \beta \underset{\sim}{K} \qquad [IV.30]$$

Este modelo permite que sejam especificados percentuais de amortecimento crítico, relativos apenas a dois modos de vibração da estrutura. O amortecimento crítico é definido como o menor valor de amortecimento para

o qual o sistema deixa de oscilar quando recebe uma perturbação inicial. Sendo assim, assumem-se taxas de amortecimento crítico ξ_1 e ξ_2 relativas às duas frequências ω_1 e ω_2 da estrutura.

A partir desses dados, as constantes α e β são obtidas através das equações:

$$\alpha = \frac{2\ \omega_1\omega_2(\ \xi_1\omega_2 - \xi_2\omega_1)}{\omega_2^2 - \omega_1^2} \qquad [IV.31]$$

$$\beta = \frac{2\ (\ \xi_2\omega_2 - \xi_1\omega_1)}{\omega_2^2 - \omega_1^2} \qquad [IV.32]$$

Obtidos os valores de α e β, o valor do amortecimento relativo a uma frequência qualquer ω_i será determinado através da expressão:

$$\xi_i = \frac{1}{2}\left(\frac{\alpha}{\omega_i} + \beta\ \omega_i\right) \qquad [IV.33]$$

O amortecimento estrutural é empregado como forma de limitar, ou até eliminar, a resposta dinâmica para frequências muito altas ou muito baixas, que não sejam importantes para a resposta global do sistema e que muitas vezes prejudicam o bom condicionamento do algoritmo de integração das equações dinâmicas.

O modelo de Rayleigh é empregado estabelecendo-se limites de frequências entre as quais se realiza a resposta dinâmica da estrutura. Na figura IV.8 pode-se verificar que, para frequências muito abaixo de ω_i e muito acima de ω_j, o amortecimento cresce de forma irreal estabelecendo, desta forma, um filtro para as frequências que estejam fora do intervalo selecionado.

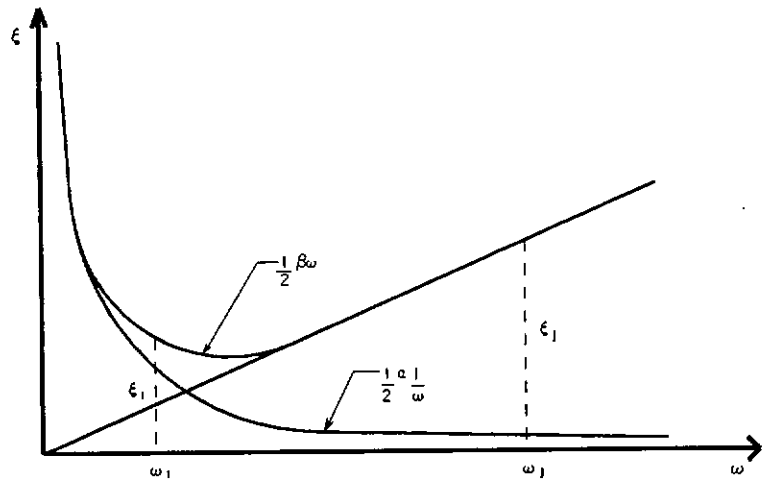


Figura IV.8 - Amortecimento de Rayleigh

O algoritmo de solução das equações não-lineares é incremental do tipo Newton-Rapshon modificado, conforme descrito no capítulo III e apresentado no quadro IV.2, apresentado a seguir.

*Loop nos intervalos de tempo i= 1, I

Tempo $t+\Delta t$

Monta vetor de cargas externas aplicadas ${}^{t+\Delta t}\underset{\sim}{\mathbf{R}}$

* Loop nas iterações n= 1, N

Calcula para cada elemento m:

matriz de rigidez atualizada ${}^{t+\Delta t}\underset{\sim}{\mathbf{k}}_m$ (n=1)

matriz de massa do elemento $\underset{\sim}{\mathbf{m}}_m$ (t=Δt)

forças internas resistentes ${}^{t+\Delta t}\underset{\sim}{\mathbf{f}}_m^n$

forças equivalentes às cargas distribuídas ${}^{i}\underset{\sim}{\mathbf{c}}_m$ (n=1)

Monta matrizes globais: (apenas para n=1)

Rigidez: ${}^{t+\Delta t}\underset{\sim}{\mathbf{K}} = \sum_m {}^{t+\Delta t}\underset{\sim}{\mathbf{k}}$

Massa: $\underset{\sim}{\mathbf{M}} = \sum_m \underset{\sim}{\mathbf{m}}$

Amortecimento ${}^{t+\Delta t}\underset{\sim}{\mathbf{C}} = \alpha\ \underset{\sim}{\mathbf{M}} + \beta\ {}^{t+\Delta t}\underset{\sim}{\mathbf{K}}$

Rigidez Efetiva: ${}^{t+\Delta t}\hat{\underset{\sim}{\mathbf{K}}} = {}^{t+\Delta t}\underset{\sim}{\mathbf{K}} + a_0\underset{\sim}{\mathbf{M}} + a_1\,{}^{t+\Delta t}\underset{\sim}{\mathbf{C}}$

Monta vetor de cargas efetivo:

$$
\begin{aligned}
{}^{t+\Delta t}\hat{\underset{\sim}{\mathbf{R}}}^n = {}^{t+\Delta t}\underset{\sim}{\mathbf{R}} + \sum {}^{t+\Delta t}\underset{\sim}{\mathbf{c}}_m + \sum {}^{t+\Delta t}\underset{\sim}{\mathbf{f}}_m^n + \\
+ \underset{\sim}{\mathbf{M}}\,(a_0\,{}^{t+\Delta t}\underset{\sim}{\Delta\mathbf{u}}^{n-1} + a_2\,{}^{t}\underset{\sim}{\mathbf{v}} + a_3\,{}^{t}\underset{\sim}{\mathbf{a}}) + \\
+ \underset{\sim}{\mathbf{C}}\,(a_1\,{}^{t+\Delta t}\underset{\sim}{\Delta\mathbf{u}}^{n-1} + a_4\,{}^{t}\underset{\sim}{\mathbf{v}} + a_5\,{}^{t}\underset{\sim}{\mathbf{a}})
\end{aligned}
$$

Calcula variação dos deslocamentos incrementais:

$${}^{t+\Delta t}\hat{\underset{\sim}{\mathbf{K}}}^n\ {}^{t+\Delta t}\underset{\sim}{\Delta\mathbf{u}}^n = {}^{t+\Delta t}\hat{\underset{\sim}{\mathbf{R}}}^n$$

Totaliza deslocamentos incrementais:

$${}^{t+\Delta t}\underset{\sim}{\Delta\mathbf{u}}^n = {}^{t+\Delta t}\underset{\sim}{\Delta\mathbf{u}}^{n-1} + {}^{t+\Delta t}\underset{\sim}{\Delta\mathbf{u}}^n$$

Testa convergência

Calcula velocidades e acelerações finais

Imprime Resultados

Quadro IV.2 - Algoritmo da Análise Não-Linear Dinâmica

IV.3.4 - CARREGAMENTOS HIDRODINÂMICOS

Na obtenção das forças hidrodinâmicas, realiza-se primeiramente o cálculo das velocidades e acelerações das partículas fluidas e, em seguida, transforma-se estas grandezas em forças atuantes sobre os membros da estrutura.

Na transformação destas grandezas em forças, o DOCNAP utiliza o modelo de Morison, o qual foi apresentado em 1950. Este modelo é apropriado para as análises de docagem de jaquetas pois as dimensões dos elementos estruturais são pequenas quando comparadas aos comprimentos de onda. O modelo de Morison é utilizado conforme a fórmula:

$$\underset{\sim}{F} = Cd \frac{wde}{g} \frac{Hd}{2} \left| \underset{\sim}{v}_f - \underset{\sim}{v}_e \right| \left(\underset{\sim}{v}_f - \underset{\sim}{v}_e \right) +$$

$$+ Cm \frac{wde}{g} \frac{\pi\ Hd^2}{4} \underset{\sim}{a}_f - Ca \frac{wde}{g} \frac{\pi\ Hd^2}{4} \underset{\sim}{a}_e \qquad [IV.34]$$

onde,

$\underset{\sim}{F}$ é a força por unidade de comprimento num ponto do membro estrutural,

Cd é o coeficiente de arraste,

wde é o peso específico da água,

g é a constante gravitacional,

Hd é o diâmetro hidrodinâmico,

$\underset{\sim}{v}_f$ é o vetor de velocidades do fluido na direção normal ao membro estrutural,

$\underset{\sim}{v}_e$ é o vetor de velocidades da estrutura na direção normal ao membro estrutural,

Cm é o coeficiente de inércia

Ca é o coeficiente de massa adicionada (no DOCNAP, Ca = Cm - 1),

$\underset{\sim}{a}_f$ é o vetor de acelerações do fluido na direção normal ao membro estrutural,

$\underset{\sim}{a}_e$ é o vetor de acelerações da estrutura na direção normal ao membro estrutural,

O termo de massa adicionada é passado para o lado esquerdo da equação de equilíbrio dinâmico [III.1] e adicionado ao termo de massa estrutural. Este parcela é chamada de massa adicionada externa, pois podemos ter uma parcela correspondendo à massa contida no interior dos elementos, quando se declarar um tubo como aberto.

Os valores das forças são calculados nas extremidades dos elementos, considerando-se uma variação linear ao longo do seu comprimento. Nos elementos que cruzam a superfície livre, uma das forças é avaliada no ponto de intersecção onda-elemento. Uma vez obtida a carga linear ao longo do membro, são calculadas forças nodais equivalentes, as quais, finalmente,são distribuídas ao longo do vetor de cargas externas.

IV.3.4.1 - ONDAS

Com respeito às cargas de ondas, o programa DOCNAP dispõe de formulação específica, baseada na teoria linear de Airy, para o cálculo das velocidades e acelerações das partículas fluidas. Esta maneira de se representar a ação das ondas corresponde ao enfoque determinístico onde se considera uma única onda passando na estrutura, com período e altura constantes.

Embora de menor rigor científico que outras teorias que consideram o caráter não-linear do problema, como a teoria de quinta ordem de Stokes, a teoria de Airy vem sendo utilizada com grande frequência em aplicações práticas. Isto ocorre em função dos bons resultados

obtidos, quando comparada a ensaios e medições em escala real e, principalmente, devido a um esforço computacional bem menor, o que é relevante num programa de análise não-linear.

Os parâmetros que definem uma onda são sua altura H, o período T, a profundidade d e seu comprimento λ. A figura IV.9 abaixo ilustra estas características.

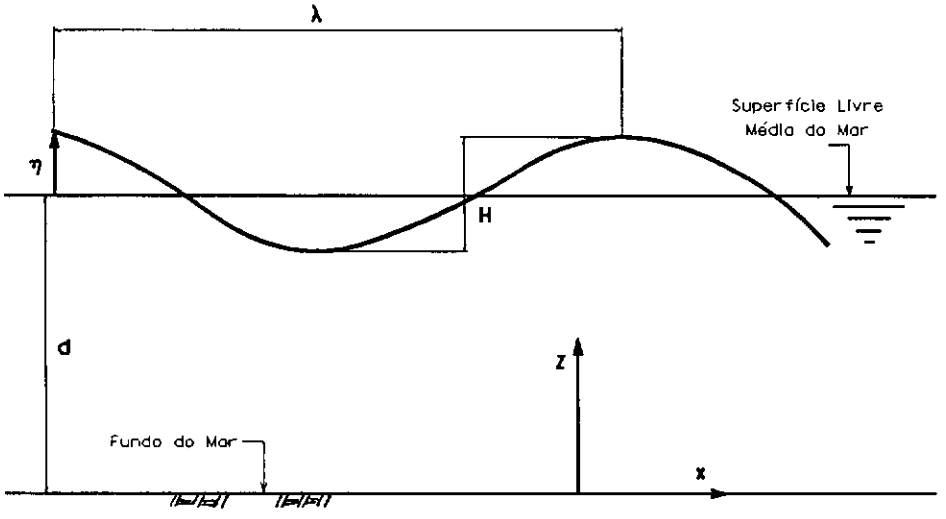


Figura IV.9 - Onda Determinística

A cinemática da onda é considerada como bidimensional e ocorre num plano vertical. A direção de propagação da onda é fornecida através de um ângulo em relação ao eixo x do sistema global, medido no sentido anti-horário. A posição da crista da onda no início da análise é especificada através da variável "offset", cujo valor é medido na direção de propagação da onda.

Nas análises dinâmicas, a onda evolui naturalmente de acordo com o tempo, sendo o "offset" de fundamental importância na especificação correta da fase do movimento periódico aplicado ao nó do topo da linha do guindaste, relativo aos movimentos da embarcação instaladora. A fase do movimento de embarcações representa um atraso ou avanço do pico do movimento em relação a crista da onda. Diferentes valores de fase ou de "offset" podem levar a resultados bastante discrepantes com relação à carga aplicada.

A teoria de Airy baseia-se na hipótese de que o comprimento de onda (λ) é muito maior que sua altura (H). Esta hipótese satisfaz as condições de contorno apenas até o nível de águas tranquilas. Nas aplicações práticas onde a altura de onda é significativa, é adotado algum tipo de extrapolação a partir da teoria original. No DOCNAP, é utilizada a técnica de extrapolação exponencial onde, simplesmente, estende-se o domínio de validade da teoria original, empregando-se as mesmas expressões.

As expressões utilizadas no cálculo da cinemática das partículas são:

$$v_x = \frac{H}{2}\,\omega\,\frac{\cosh(kz)}{\operatorname{senh}(kd)}\cos(kx - \omega t) \qquad [IV.35]$$

$$v_z = \frac{H}{2}\,\omega\,\frac{\operatorname{senh}(kz)}{\operatorname{senh}(kd)}\operatorname{sen}(kx - \omega t) \qquad [IV.36]$$

$$a_x = \frac{H}{2}\,\omega^2\,\frac{\cosh(kz)}{\operatorname{senh}(kd)}\operatorname{sen}(kx - \omega t) \qquad [IV.37]$$

$$a_z = -\frac{H}{2}\,\omega^2\,\frac{\operatorname{senh}(kz)}{\operatorname{senh}(kd)}\cos(kx - \omega t) \qquad [IV.38]$$

onde:

v_x e v_z são velocidades das partículas fluidas nas direções x e z do referencial da onda.

a_x e a_z são acelerações das partículas fluidas nas direções x e z do referencial da onda.

A frequência da onda é dada por:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \qquad [IV.39]$$

A posição da superfície livre é dada pela equação:

$$\eta(t) = \frac{H}{2}\cos(kx - \omega t) \qquad [IV.40]$$

O comprimento da onda é dado por:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh(kd) \qquad [IV.41]$$

O número de onda k, é obtido por:

$$\omega^2 = gk \tanh(kd) \qquad [IV.42]$$

Este cálculo é realizado através de um procedimento iterativo pois, como visto, a expressão para determinação do número de onda é recursiva.

IV.3.4.2 - CORRENTEZA

A corrente é fornecida através de um perfil poligonal, onde os valores de velocidade são definidos em relação a valores de coordenada Z global, orientada do solo marinho para a superfície. O ângulo de ataque, de maneira semelhante ao da onda, é referido ao eixo X global, sendo seu valor positivo contado no sentido anti-horário.

A carga de corrente tem caráter estático, sendo aplicada incrementalmente à estrutura através de uma função tempo, durante a análise estática, e permanecendo constante ao longo da análise dinâmica. As velocidades de corrente são somadas vetorialmente às velocidades de onda para aplicação da fórmula de Morison.

Na região de variação da superfície livre não é feita extrapolação dos valores de corrente fornecidos, sendo conveniente fornecer o perfil até a cota Z que corresponda a elevação da crista da onda.

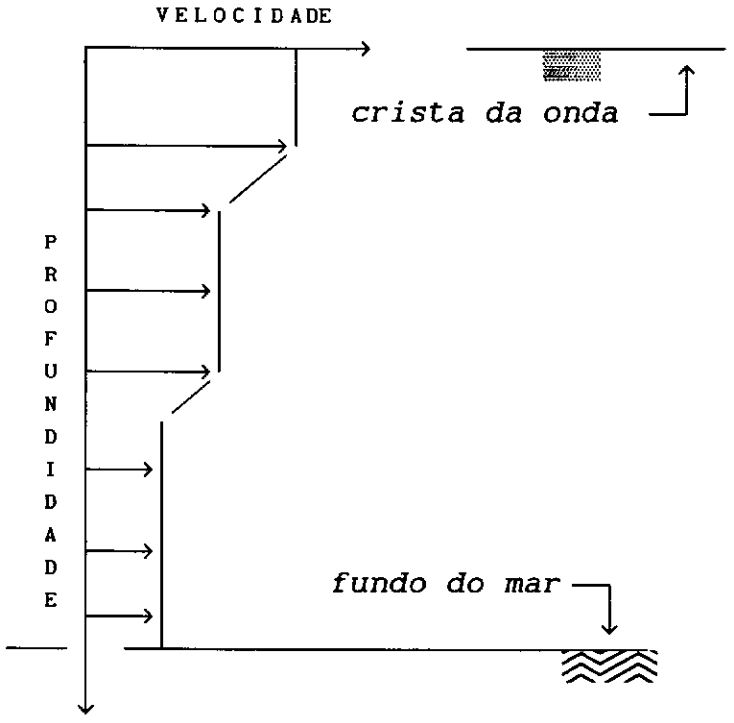


Figura IV.10 - Perfil Poligonal de Corrente

CAPÍTULO V

MODELOS DO CONJUNTO LUVA ESTACA

V.1 - INTRODUÇÃO

Para a realização das análises de docagem, foram utilizados modelos de estruturas que correspondem a casos reais.

O modelo de uma jaqueta, com projeto detalhado e 544 nós, para uma lâmina d'água de 90 metros na Bacia de Campos foi adotado para a realização destes estudos.

O inconveniente existente neste modelo de jaqueta era o fato da sua luva de docagem estar conectada à última mesa da jaqueta, não possuindo, portanto flexibilidade global. Como os projetos de sistemas de docagem usualmente optam por utilizar a flexibilidade da luva como forma de se diminuir a carga na estaca de docagem, optou-se pela alteração do projeto original.

A razão principal para esta alteração foi ampliar a abragência deste estudo, visto que, na grande maioria dos projetos de sistemas de docagem pode-se contar com a flexibilidade da estaca e da luva de docagem. Para tanto, foram retirados os tubos que conectavam a luva na última mesa da jaqueta. Esta alteração encontra-se detalhada ao longo deste capítulo.

Após a determinação das estruturas que seriam objeto de estudos passou-se a elaborar os modelos que convencionou-se chamar de completos. Estes modelos contam também com a estaca de docagem e o solo marinho modelados.

Esta abordagem é inédita em análises de docagem de jaquetas e tem como objetivo principal esclarecer algumas dúvidas existentes em relação às simplificações usualmente aplicadas na prática de projetos.

Nas análises consideradas completas temos basicamente dois modelos. O primeiro corresponde a jaqueta na sua configuração original, isto é, com a luva travada. O segundo diferencia-se deste pelo fato de possuir a luva de docagem flexibilizada.

Após as análises com os modelos completos, foram analisados os modelos simplificados. Nestes modelos, o solo, a estaca e a luva de docagem são substituídos por molas não-lineares, que incluem a folga entre a luva e a estaca. Estas molas são chamadas de molas de docagem.

Esta abordagem constitui-se na prática usual em análises de docagem sendo o objetivo desta simplificação eliminar a necessidade de se integrar a dinâmica local do conjunto luva-estaca de docagem, permitindo aumentar o intervalo de integração, resultando numa economia de tempo na execução destas análises. Além disso, em programas que modelam a jaqueta como um corpo rígido com 6 graus de liberdade, estes componentes só podem ser representados por molas. Os diversos modelos de molas de docagem utilizados são descritos a seguir.

As figuras V.1 e V.2 ilustram as principais características das análises com os modelos completo e simplificado.

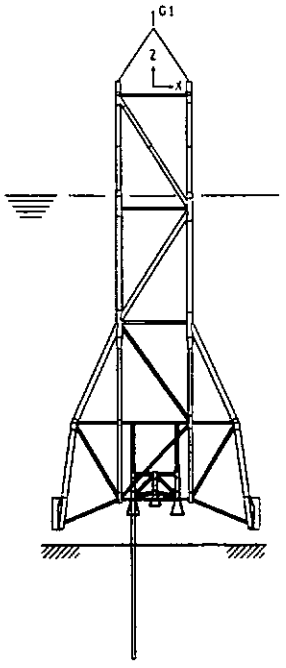


Figura V.1 - Modelo Completo

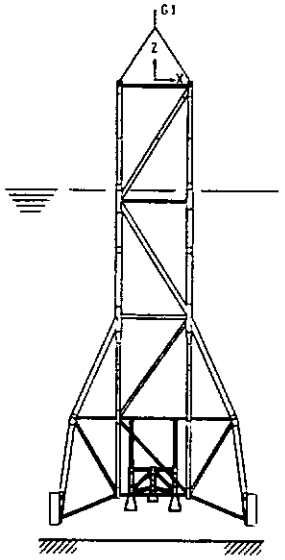


Figura V.2 - Modelo Simplificado

V.2 - DADOS GLOBAIS

Alguns itens são comuns a todas as análises realizadas, ou seja, foram modelados da mesma forma. Por simplificação, serão apresentados neste item.

- CABOS DO GUINDASTE

Foram modelados através de um único elemento de pórtico espacial com rigidez axial de 6410 t/m. Este valor corresponde à rigidez real do conjunto de cabos do guindaste da embarcação considerada na análise, balsa guindaste BGL-1.

- LINGADAS

Foram modelados quatro cabos de lingada, de mesmo comprimento, unindo nós do topo da jaqueta ao cabo do guindaste. Sua rigidez axial é de 1877 t/m e corresponde ao valor da rigidez de lingadas existentes na BGL-1.

- LINHAS DE REBOQUE

Foi considerado o padrão de linhas de reboque mostrado na figura V.3.

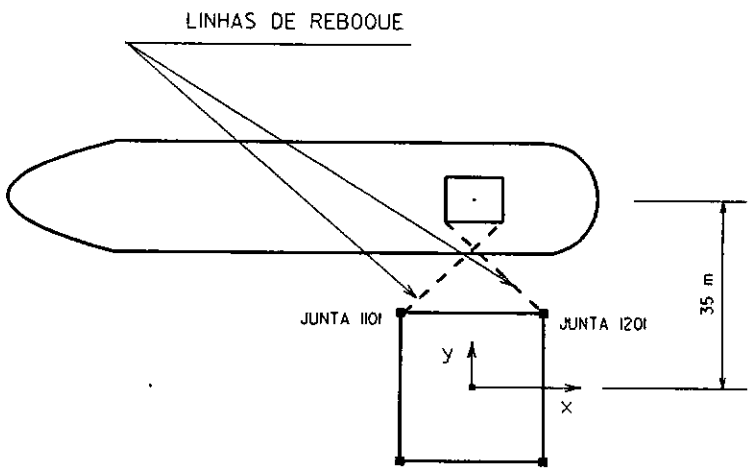


Figura V.3 - Linhas de Reboque

Os dados das funções força *versus* deslocamento para linhas de reboque da BGL-1 são:

PONTO	DESLOCAMENTO (m)	FORÇA (t)
1	-103.0	-70.00
2	-3.0	0.00
3	-1.5	20.00
4	0.0	20.70
5	100.0	85.70

Tabela V.1 - Linha de Reboque 1

PONTO	DESLOCAMENTO (m)	FORÇA (t)
1	-100.0	-70.00
2	0.0	0.00
3	1.5	15.00
4	3.0	15.70
5	103.0	85.70

Tabela V.2- Linha de Reboque 2

- MOVIMENTOS DA EMBARCAÇÃO INSTALADORA

Os movimentos da ponta do guindaste, nó G1, devido à ação das ondas na embarcação instaladora foram obtidos pelo programa MOSES, da Ultramarine. Foram consideradas ondas com H = 3.0 m.

PERÍODO (s)	MOV. X (SURGE)		MOV Y (SWAY)		MOV Z (HEAVE)	
	AMPL. (m)	FASE (graus)	AMPL. (m)	FASE (graus)	AMPL. (m)	FASE (graus)
7.	1.266	155.	0.520	-27.	0.204	71.
8.	0.642	60.	1.840	-160.	0.138	-119.
9.	4.012	137.	4.534	-30.	0.882	-118.
10.	6.598	-168.	5.872	46.	1.804	-30.
11.	7.872	-127.	6.708	97.	2.368	30.
12.	8.142	-96.	7.312	135.	2.736	72.
13.	7.774	-70.	7.704	166.	2.994	104.

Tabela V.3 - Movimentos da Embarcação

- DADOS AMBIENTAIS

. Lâmina d'água: 89.05 m

. Peso específico da água do mar: 1.025 t/m^3

. Aceleração da gravidade: 9.81 m/s^2

. Correnteza:

Incidência: 0^0

Perfil poligonal:

PONTO	PROFUNDIDADE (m)	VELOCIDADE (m/s)
1	-89.05	0.2
2	-81.33	0.2
3	-4.93	1.0
4	0.00	1.0

Tabela V.4 - Perfil Poligonal da Corrente

. Ondas:

Incidência: 0^{o}

Altura: 3.0 m

Períodos: 7 s a 13 s

OBS.:

1. A especificação do "offset" da onda necessita ser feita considerando-se a crista posicionada no centro de gravidade da embarcação guindaste quando do início da análise. Neste estudo o "offset" é de -39.7 m.

2. As incidências de onda e corrente referem-se ao eixo X global da jaqueta.

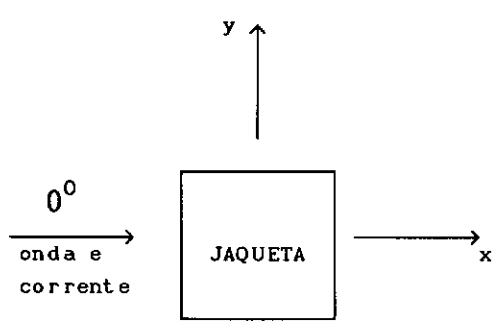


Figura V.4 - Incidência de Onda e Correnteza

- SUPER-ELEMENTOS

A figura V.5 abaixo apresenta, de forma esquemática a divisão da estrutura em 4 superelementos do tipo jaqueta.

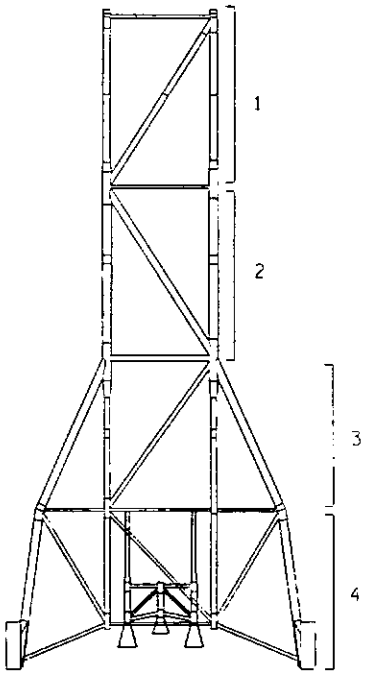


Figura V.5 - Super-elementos

V.3 - MODELOS COMPLETOS

V.3.1 - LUVA DE DOCAGEM RIGIDA E ESTACA FLEXIVEL

Este modelo corresponde ao projeto existente para uma plataforma na Bacia de Campos. Como dito anteriormente, as luvas de docagem são conectadas à última

mesa de jaqueta, não havendo flexão global dos elementos da luva.

Os itens específicos a este modelo são descritos a seguir:

- SOLO

O comportamento do solo é representado através da aplicação de molas não-lineares aos nós da estaca de docagem localizados abaixo do "mud-line". Estas molas são chamadas de PY para o comportamento lateral; TZ para o comportamento axial e QU para a reação de ponta. São obtidas através do comando PILE DATA GENERATION do programa ANCAB. As molas PY atendem às especificações da norma API RP 2A, de 1989 [22].

O perfil de solo adotado neste estudo refere-se ao projeto do campo de Carapeba 1, localizado na Bacia de Campos. Suas características encontram-se detalhadas no quadro V.1, apresentado a seguir.

CAMADA	PROF. (m)	TIPO DE SOLO	ϕ (graus)	γ_{sub} (t/m^3)	f_{max} (t/m^3)	q_{max} (t/m^3)
1	3.00	AREIA	36	0.80	9.76	976
2	9.00	AREIA	36	0.85	9.76	976
3	19.00	AREIA	40	0.90	11.70	1177
4	30.00	AREIA	40	0.80	1.80	1177

Tabela V.5 - Perfil do Solo

- ESTACA

A estaca de docagem é modelada por elementos de pórtico espacial. Sua geometria, propriedades e discretização adotadas encontram-se na figura V.6.

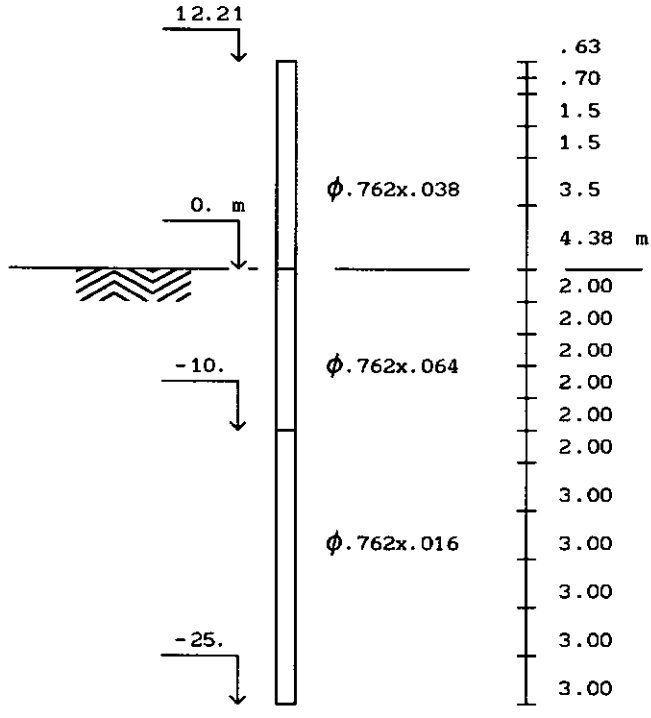


Figura V.6 - Modelo da Estaca

- MOLA DE CONTATO

A simulação do contato entre a luva e a estaca de docagem é feita por molas não-lineares ligadas às direções X e Y globais, associadas a funções força *versus* deslocamento conforme mostrado na figura V.7.

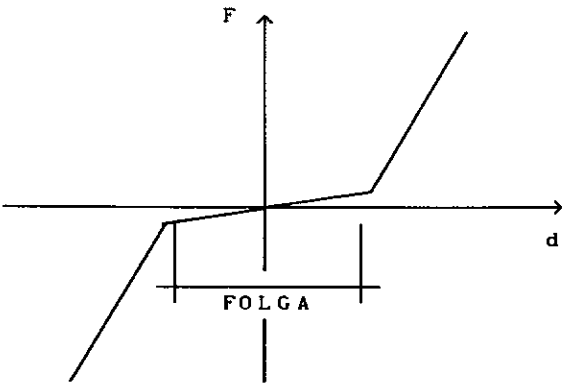


Figura V.7 - Mola de Contato

No trecho da folga, emprega-se um valor pequeno para a rigidez. Este procedimento tem como finalidade evitar problemas na convergência da solução não-linear. Esta rigidez deve apresentar reações pequenas em relação às reações do trecho rígido.

V.3.2 - LUVA DE DOCAGEM E ESTACA FLEXÍVEIS

Este modelo com a luva de docagem flexível tem como objetivo analisar a configuração mais comumente adotada nos sistemas de docagem que combinam luvas e estacas, ambas com flexibilidade.

Os itens específicos a este modelo são:

- LUVA DE DOCAGEM

Para torná-la flexível, sua extremidade inferior foi desconectada da última elevação da jaqueta . Os membros tubulares que contraventam o sistema de docagem situados entre as elevações -75.0m e -80.0m da jaqueta foram transladados para as elevações -65.0m e -70.0m, respectivamente. Consequentemente, a luva de docagem passou a ter um comprimento livre de 10.0m. A figura V.8 ilustra as alterações efetuadas.

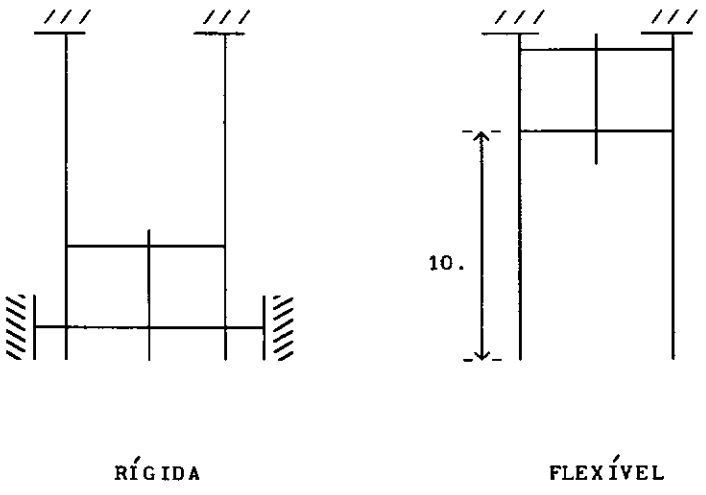


Figura V.8 - Flexibilização da Luva de Docagem

Nas primeiras análises do modelo com a luva flexível, foram mantidas suas propriedades originais. Ao se analisar os resultados, verificou-se que as reações da mola de docagem eram muito baixas e o modelo apresentava um comportamento praticamente estático.

A razão destes resultados estava na flexibilidade exagerada da luva de docagem. Como consequência, foram alteradas as propriedades dos tubos da luva para que fossem obtidas maiores reações na mola de docagem e para que o sistema apresentasse um comportamento dinâmico. A tabela V.6 apresenta as alterações efetuadas.

TUBO	COMPRIMENTO (m)	PROPRIEDADES (mm)	
		ORIGINAIS	ALTERADAS
1	3.00	550X12	900X22
2	0.75	637X12	900X22
3	0.75	812X12	900X22
4	1.00	900X22	900X22
5	3.20	900X10	900X22
6	1.30	900X25	900X22

Tabela V.6 - Propriedades da Luva de Docagem

- SOLO

Para este modelo, foi adotado o mesmo perfil do solo de Carapeba 1, descrito no item V.3.1.

- ESTACA

A estaca de docagem utilizada neste modelo pouco se diferencia da anterior. Sua geometria, propriedades e discretização encontram-se na figura V.9.

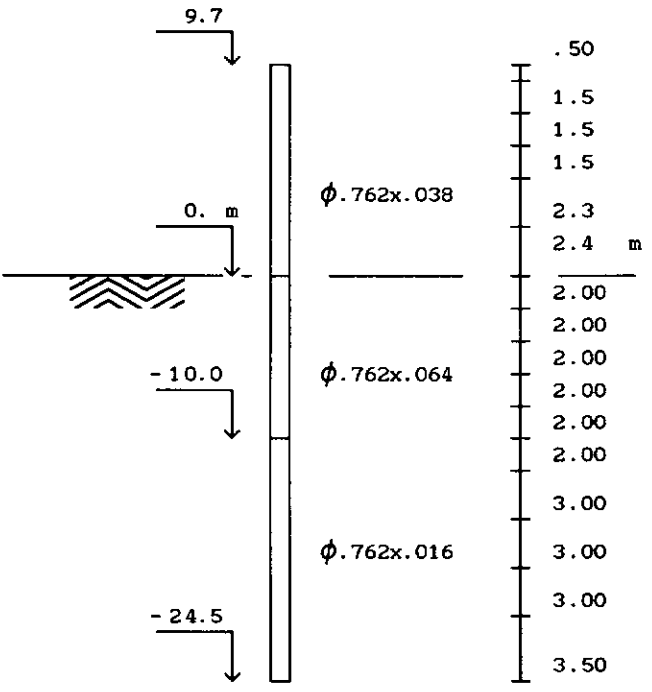


Figura V.9 - Modelo da Estaca

- MOLA DE CONTATO

As molas de contato adotadas são as mesmas do modelo anterior. Devemos esclarecer que os valores das rijezas adotados foram determinados após um longo processo com exaustivas análises. Estas molas de contato tiveram que ser cuidadosamente determinadas de modo a representar convenientemente o problema físico e permitir a convergência na análise não-linear.

V.4 - MODELOS SIMPLIFICADOS

V.4.1 - LUVA DE DOCAGEM RÍGIDA E ESTACA FLEXÍVEL

Neste modelo, o solo e a estaca de docagem são simulados através de molas não-lineares, que incluem a folga entre a luva e a estaca.

Foram consideradas duas situações de contato. Na primeira, temos contato da luva de docagem com o topo da estaca, havendo apenas uma mola. Na segunda, considera-se a penetração de 0.63m da estaca na luva, permitindo o contato em dois pontos, através de duas molas de docagem.

- MOLAS DE DOCAGEM

Na obtenção das molas de docagem, para este modelo, foi utilizado o seguinte procedimento:

. Elaboração de um modelo para a estaca de docagem, incluindo a simulação do solo;

. Aplicação de cargas horizontais no topo das estacas de docagem, variando de 0.5 a 100.t;

. Análise estática não-linear incremental e iterativa pelo programa ANCAB, do sistema ADEP;

. A partir dos resultados obtidos, monta-se a função força *versus* deslocamento considerando a folga anular entre a estaca e a luva de docagem.

Os modelos utilizados na determinação destas molas são apresentados nas tabelas a seguir, juntamente com os resultados obtidos.

FORÇA (t)	DESLOCAMENTO (m)
0.	0.
0.	0.069
1.	0.078
2.	0.088
3.	0.098
4.	0.109
5.	0.119
6.	0.130
7.	0.140
8.	0.151
9.	0.162
10.	0.172
12.	0.194
15.	0.229
18.	0.267
20.	0.292
100.	1.199

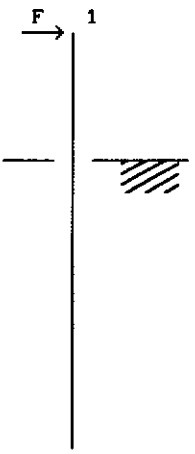


Tabela V.7 - Mola de Docagem - Contato no Topo da Estaca

FORÇA (t)	DESLOCAMENTO NÓ 1 (m)	DESLOCAMENTO NÓ 2 (m)
0.0	0	0
0.0	0.069	0.069
1.0	0.08732	0.08626
2.0	0.10762	0.10543
3.0	0.12808	0.12475
4.0	0.14878	0.1443
5.0	0.16947	0.16385
6.0	0.19016	0.18339
7.0	0.21196	0.20401
8.0	0.23631	0.22709
9.0	0.26068	0.25018
10.0	0.28511	0.27333
11.0	0.30956	0.29651
12.0	0.33401	0.31968
13.0	0.35846	0.34285
14.0	0.38293	0.36604
15.0	0.40858	0.39038
18.0	0.49597	0.47348
20.0	0.55728	0.53179
100.0	2.8675	2.7254

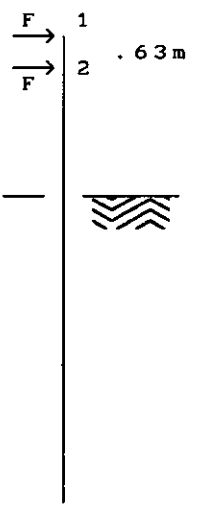


Tabela V.8 - Mola de Docagem - Contato em 2 pontos

V.4.2 - LUVA DE DOCAGEM E ESTACA FLEXÍVEIS

Na determinação de uma mola de docagem que melhor representasse o comportamento de um conjunto de luva e estaca flexíveis estava a motivação principal para a realização deste estudo.

Basicamente, o procedimento adotado na prática de projeto, resume-se em substituir a luva, a estaca e o solo marinho por uma mola de docagem.

Para obter esta mola, modela-se o conjunto e aplica-se deslocamentos incrementais no topo da luva de docagem. A principal incerteza estava em quais deslocamentos deveriam ser considerados, se Δ, $\Delta 1$ ou $\Delta 2$, conforme apresentado na figura V.10. Logo, o objetivo inicial deste estudo era realizar a análise de docagem com o modelo completo e, partindo deste resultado, realizar comparações com os modelos simplificados utilizando as molas F x Δ, F x $\Delta 1$ e F x $\Delta 2$.

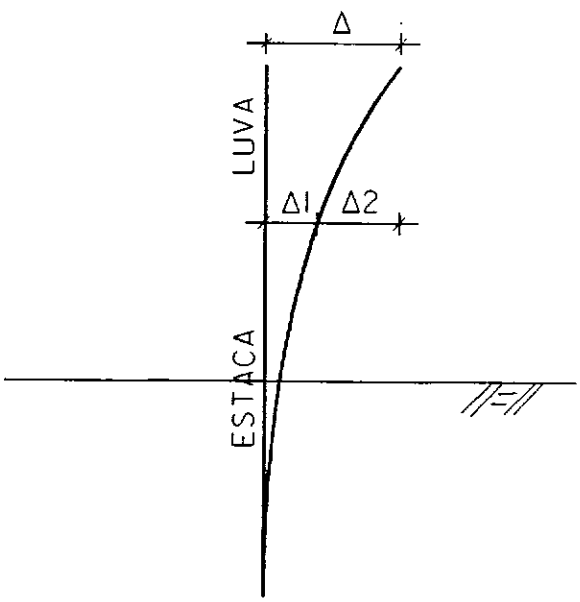


Figura V.10 - Modelo Luva-Estaca

Para aplicação destas molas, que têm como objetivo simular a flexibilidade do conjunto luva-estaca, são realizadas as seguintes alterações no modelo da jaqueta:

· O conjunto luva-estaca é representado por molas associadas aos nós da última elevação da jaqueta;

· Os nós da extremidade inferior da estaca de docagem são travejados uma vez que sua flexibilidade está incorporada na mola de docagem. Este travejamento é obtido pela incorporação de elementos com rigidez normal e sem massa, peso e empuxo, de acordo com o apresentado na figura V.11.

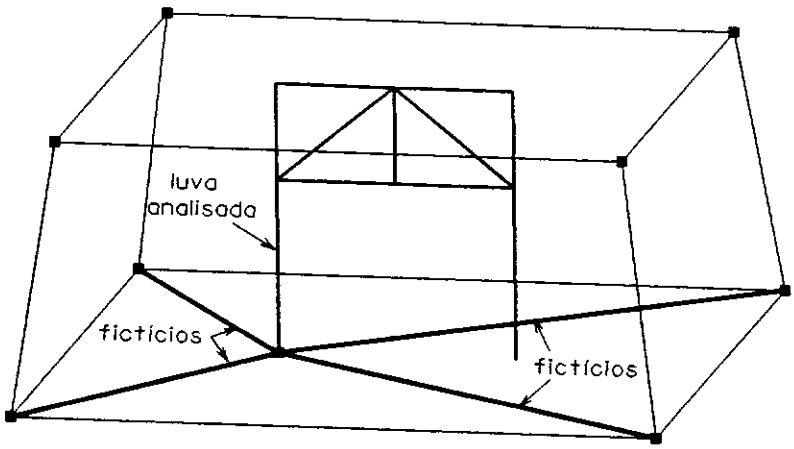


Figura V.11 - Travejamento da Luva de Docagem

Este procedimento foi executado e as molas obtidas podem ser visualizadas nas tabelas V.9 e V.10.

Como está descrito no Capítulo VI, verificou-se que este procedimento apresentava resultados inadequados quanto a dinâmica do sistema analisado.

Tendo em vista estes resultados, partiu-se para um novo procedimento de modelação que permitisse representar adequadamente o comportamento dinâmico da sistema. Para isso, foram geradas molas que substituem apenas a estaca e o solo marinho como apresentado no item V.4.1. Estas molas são apresentadas nas tabelas V.11 e V.12 e este procedimento é comentado no Capítulo VI, a seguir.

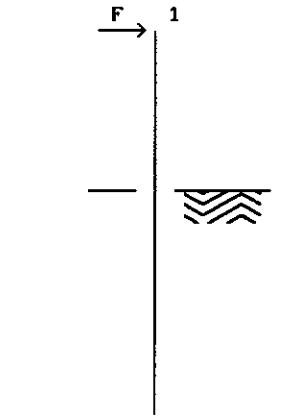
Δ (m)	Δ1 (m)	Δ2 (m)	CORTANTE (t)
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0690	0.0690	0.0690	0.1000
0.0790	0.0730	0.0750	0.4417
0.0990	0.0811	0.0869	1.3803
0.1190	0.0895	0.0985	2.2728
0.1490	0.1022	0.1158	3.5894
0.1690	0.1107	0.1273	4.4641
0.2690	0.1533	0.1847	8.8062
0.3690	0.1970	0.2410	12.9716
0.4690	0.2410	0.2970	17.0232
0.5690	0.2862	0.3518	20.8892
0.6690	0.3316	0.4064	24.7229
0.7690	0.3782	0.4598	28.3583
0.8690	0.4260	0.5120	31.8170
0.9690	0.4742	0.5638	35.1985

Tabela V.9 - Molas de Docagem - Luva Original

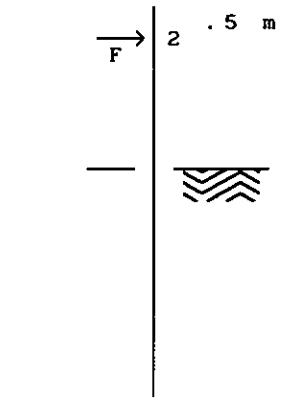
Δ (m)	Δ1 (m)	Δ2 (m)	CORTANTE (t)
0.000	0.000	0.000	0.000
0.069	0.069	0.069	0.100
0.079	0.0741	0.0739	0.952
0.089	0.0794	0.0786	1.936
0.099	0.0847	0.0833	2.875
0.109	0.0901	0.0879	3.805
0.119	0.0955	0.0925	4.723
0.129	0.1009	0.0971	5.641
0.139	0.1063	0.1017	6.560
0.149	0.1117	0.1063	7.471
0.159	0.1172	0.1108	8.381
0.169	0.1226	0.1154	9.292
0.219	0.1499	0.1381	13.780
0.269	0.1776	0.1604	18.131
0.319	0.2058	0.1822	22.312
0.369	0.2340	0.2040	26.483
0.419	0.2626	0.2254	30.484
0.469	0.2913	0.2467	34.471

Tabela V.10 - Molas de Docagem - Luva Alterada

FORÇA (t)	DESLOCAMENTO NÓ 1 (m)	DESLOCAMENTO NÓ 2 (m)
0.00	0.0000	0.0000
0.00	0.0690	0.0690
0.50	0.0719	0.0716
1.00	0.0747	0.0741
1.50	0.0776	0.0767
2.00	0.0805	0.0793
2.50	0.0839	0.0822
3.00	0.0872	0.0852
3.50	0.0905	0.0882
4.00	0.0938	0.0912
4.50	0.0971	0.0941
5.00	0.1004	0.0971
5.50	0.1037	0.1001
6.00	0.1070	0.1031
6.50	0.1104	0.1061
7.00	0.1138	0.1092
7.50	0.1172	0.1122
8.00	0.1206	0.1152
9.00	0.1274	0.1213
10.00	0.1341	0.1274
12.00	0.1477	0.1396
15.00	0.1680	0.1579
18.00	0.1920	0.1790
20.00	0.2080	0.1940
100.00	0.7640	0.6940



DESLOCAMENTO NÓ 1



DESLOCAMENTO NÓ 2

Tabela V.11 - Mola de Docagem - Cargas não simultâneas

FORÇA (t)	DESLOCAMENTO NÓ 1 (m)	DESLOCAMENTO NÓ 2 (m)
0.00	0.0000	0.0000
0.00	0.0690	0.0690
0.50	0.0746	0.0743
1.00	0.0802	0.0796
1.50	0.0866	0.0857
2.00	0.0931	0.0918
2.50	0.0995	0.0979
3.00	0.1060	0.1040
3.50	0.1126	0.1103
4.00	0.1192	0.1165
4.50	0.1258	0.1228
5.00	0.1324	0.1291
5.50	0.1390	0.1353
6.00	0.1456	0.1416
6.50	0.1522	0.1478
7.00	0.1587	0.1541
7.50	0.1653	0.1603
8.00	0.1720	0.1671
9.00	0.1880	0.1820
10.00	0.2040	0.1970
12.00	0.2360	0.2280
15.00	0.2840	0.2730
18.00	0.3350	0.3220
20.00	0.3740	0.3590
100.00	1.5940	1.5190

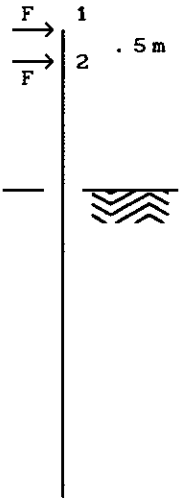


Tabela V.12 - Mola de Docagem - Cargas simultâneas

CAPÍTULO VI

ESTUDOS NUMÉRICOS E COMPARAÇÕES

VI.1 - INTRODUÇÃO

Conforme já dito anteriormente, o objetivo deste trabalho é estudar os modelos do conjunto luva-estaca utilizados na prática da engenharia, comparando-os com resultados obtidos pelos modelos completos.

Com o intuito de se obter uma estimativa do comportamento dinâmico dos modelos analisados foram realizadas, primeiramente, análises de vibrações livres para obtenção de suas frequências e modos naturais de vibração, pois a resposta dinâmica de uma estrutura depende tanto das características das forças de excitação quanto das suas características modais.

As análises de vibrações livres são, portanto, utilizadas para se verificar o efeito da variação estrutural nas frequências naturais da estrutura e para uma previsão do comportamento global da estrutura em relação às cargas atuantes. Estas análises são uma

aproximação, visto que numa estrutura com comportamento não-linear os modos naturais de vibração variam ao longo do tempo.

Neste capítulo são apresentados primeiramente os resultados obtidos para as análises dos modelos com a estaca de docagem e solo marinho. A seguir, apresentamos os resultados para os modelos com as simplificações normalmente utilizadas, analisando-as em comparação com os modelos completos.

Após esta etapa, passa-se para a definição de um procedimento para análises simplificadas da operação de docagem de jaquetas. No item VI.4 são realizadas comparações entre os resultados obtidos para o modelo completo e os modelos simplificados utilizando as molas de docagem obtidas através do procedimento proposto.

VI.2 - MODELOS COMPLETOS

VI.2.1 - LUVA DE DOCAGEM RÍGIDA E ESTACA FLEXÍVEL

VI.2.1.1 - VIBRAÇÕES LIVRES

A análise de vibrações livres para o sistema estrutural em estudo foi realizada através do subsistema DINA utilizando o Método de Iteração por Subespaços [5], possibilitando o trabalho com estruturas de muitos graus de liberdade.

O cálculo dos autovetores foi precedido de uma análise estática linear considerando as cargas verticais de peso próprio e empuxo. Esta análise é necessária para incorporar o efeito das tensões iniciais no cabo do guindaste.

Após a análise linear, em função dos esforços calculados, é incorporada uma matriz geométrica à matriz linear da estrutura, sendo então realizado o cálculo dos autovalores. Este procedimento é executado através dos comandos STATIC ANALYSIS e INITIAL STRESS, colocados antes do comando EIGENVALUE ANALYSIS [20].

Na análise com o modelo completo, consideramos a luva unida a estaca de docagem através de molas lineares com rigidez de 210 t/m. Tentativas realizadas com o objetivo de considerar numa análise o trecho correspondente a folga entre a luva e a estaca de docagem não foram bem sucedidas [2].

Desta forma, para obtermos uma estimativa do comportamento da estrutura no trecho correspondente à folga entre a luva e a estaca de docagem realizamos mais duas análises. Na primeira, modelamos a jaqueta apenas com seus vínculos superiores - lingadas do guindaste e as linhas de reboque, utilizadas para evitar sua rotação vertical. Na segunda, obtivemos os períodos e modos de vibração do modelo da estaca com as molas representativas do solo, obtidas através do comando PILE ANALYSIS WITH DYNAMIC DATA GENERATION do ADEP [23].

Examinando os modos de vibração das análises com a jaqueta, identificamos dois tipos de modos: os modos de corpo rígido e os modos elásticos. Os modos denominados de corpo rígido são aqueles onde não se verifica deformação na estrutura da jaqueta, apenas nos vínculos externos. Os modos denominados elásticos são aqueles que correspondem a deformações internas da jaqueta, sendo portanto localizados.

Para efeito da análise de docagem, onde precisamos calcular apenas os movimentos e as reações nos vínculos da jaqueta, os modos de vibração que necessitamos calcular com precisão são exatamente os globais, aqueles em que a estrutura se comporta como corpo rígido.

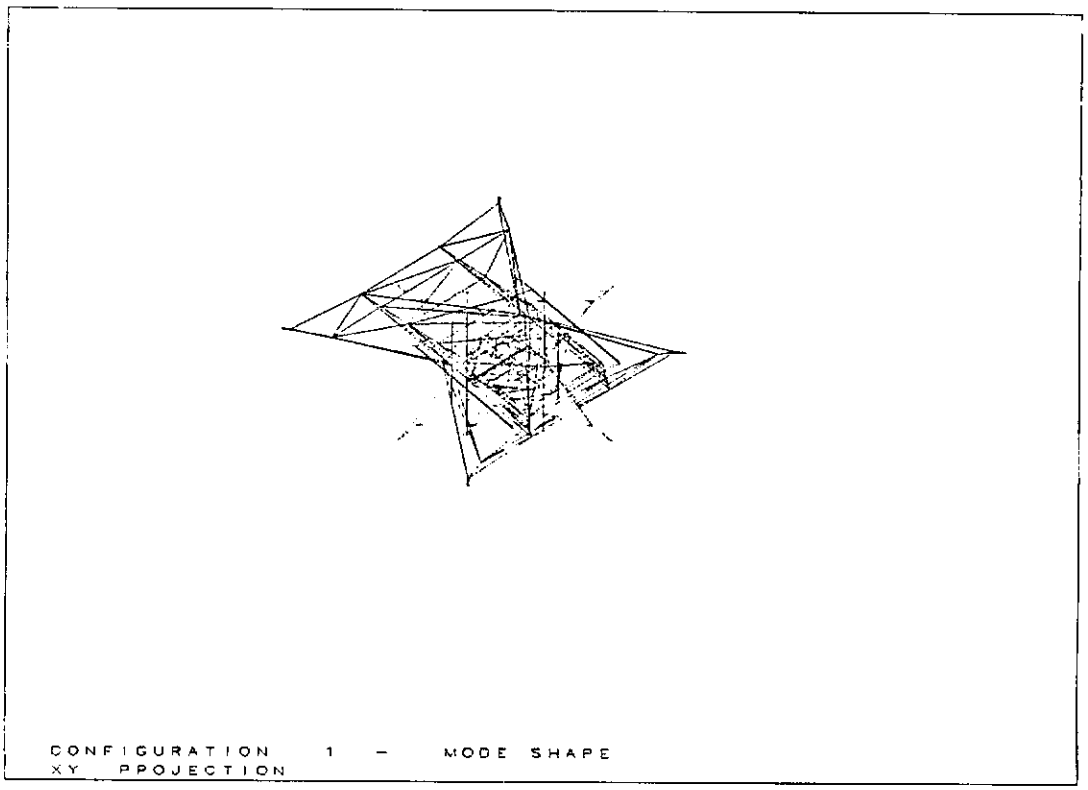
Os valores dos períodos obtidos,para a análise com o modelo completo da jaqueta com a estaca, estão mostrados na tabela VI.1. Os modos de vibração são mostrados nas figuras VI.1 a VI.3, podendo-se verificar claramente a diferença entre os modos de corpo rígido e os elásticos.

Os resultados para a análise da jaqueta e seus vínculos superiores estão na tabela VI.2 e na tabela VI.3 para a análise da estaca. Na figura VI.4 encontram-se os dois modos de pêndulo da jaqueta sem contato com a estaca de docagem, os demais modos são semelhantes aos da jaqueta com a estaca. Na figura VI.5, estão os modos 1, 3 e 5 da estaca de docagem, vibrando sem contato com a jaqueta.

MODO	PERÍODOS (s)	DESCRIÇÃO
1	64.33	Rotação em Z
2	14.58	Tombamento em XZ
3	13.08	Tombamento em YZ
4	7.880	Tombamento em XZ
5	7.703	Tombamento em YZ
6	1.892	Desloc. Vertical
7	0.6299	Elástico Local
8	0.5354	Elástico Local
9	0.5150	Elástico Local
10	0.4840	Elástico Local

TABELA VI.1 - PERÍODOS E MODOS DE VIBRAÇÃO

JAQUETA CONECTADA A ESTACA



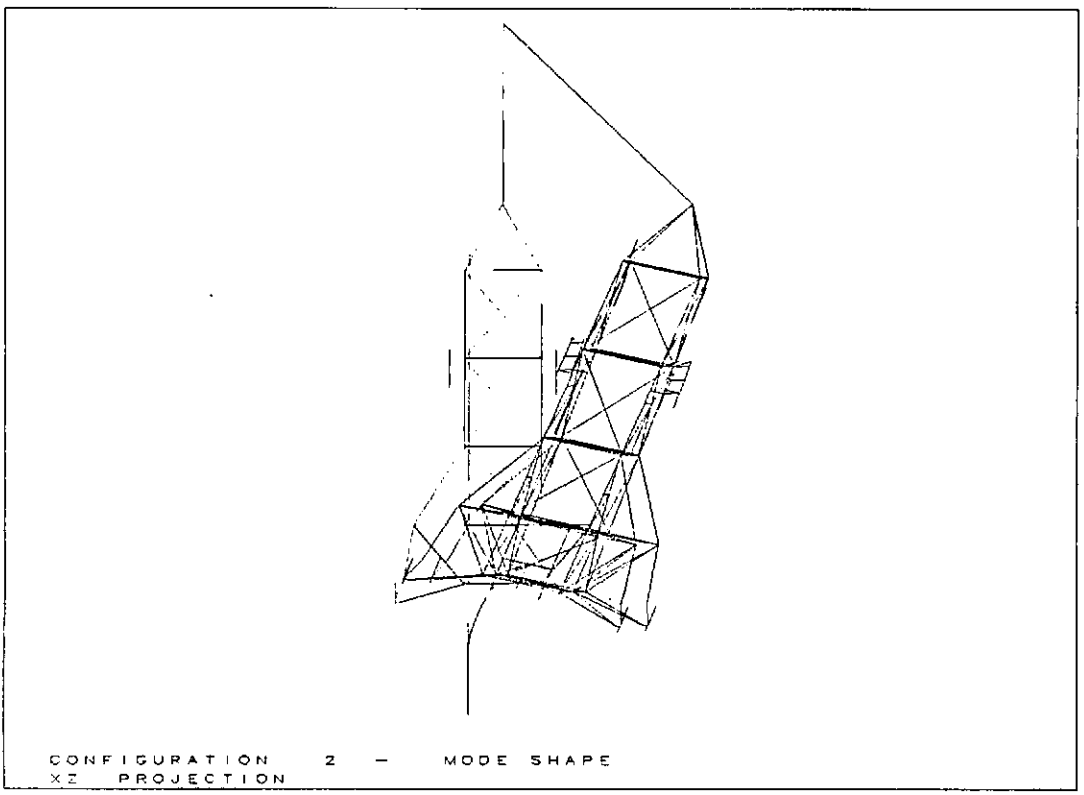
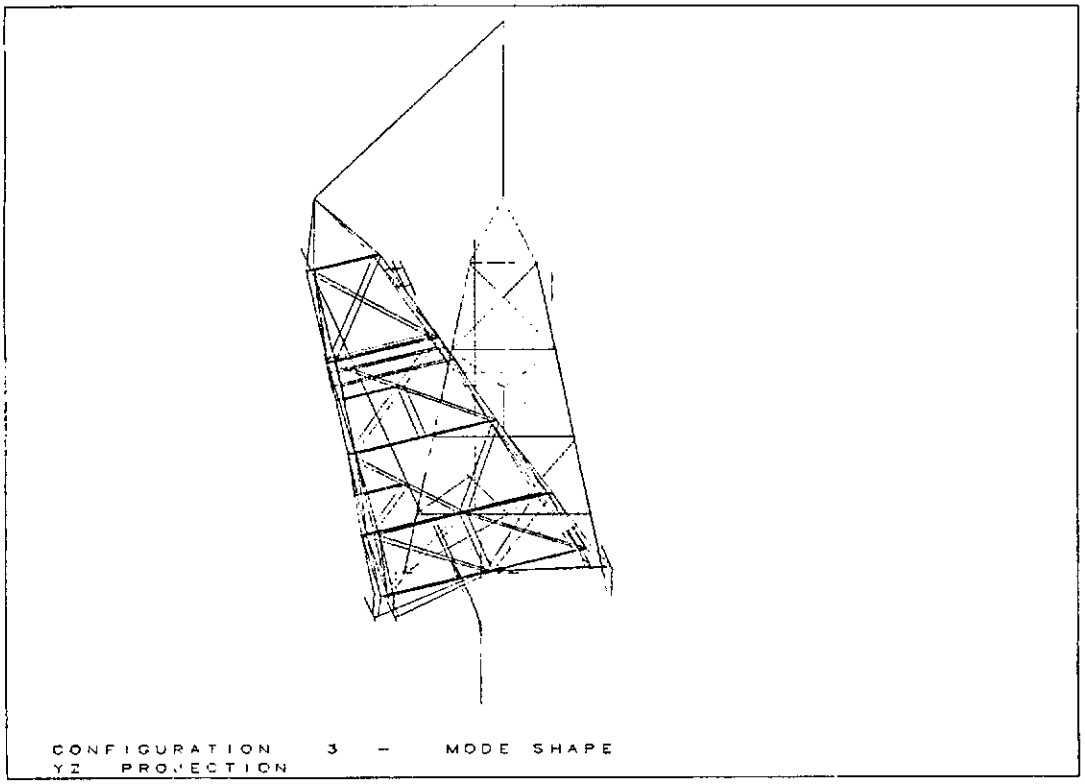


Figura VI.1 - Modos de Vibração 1 e 2



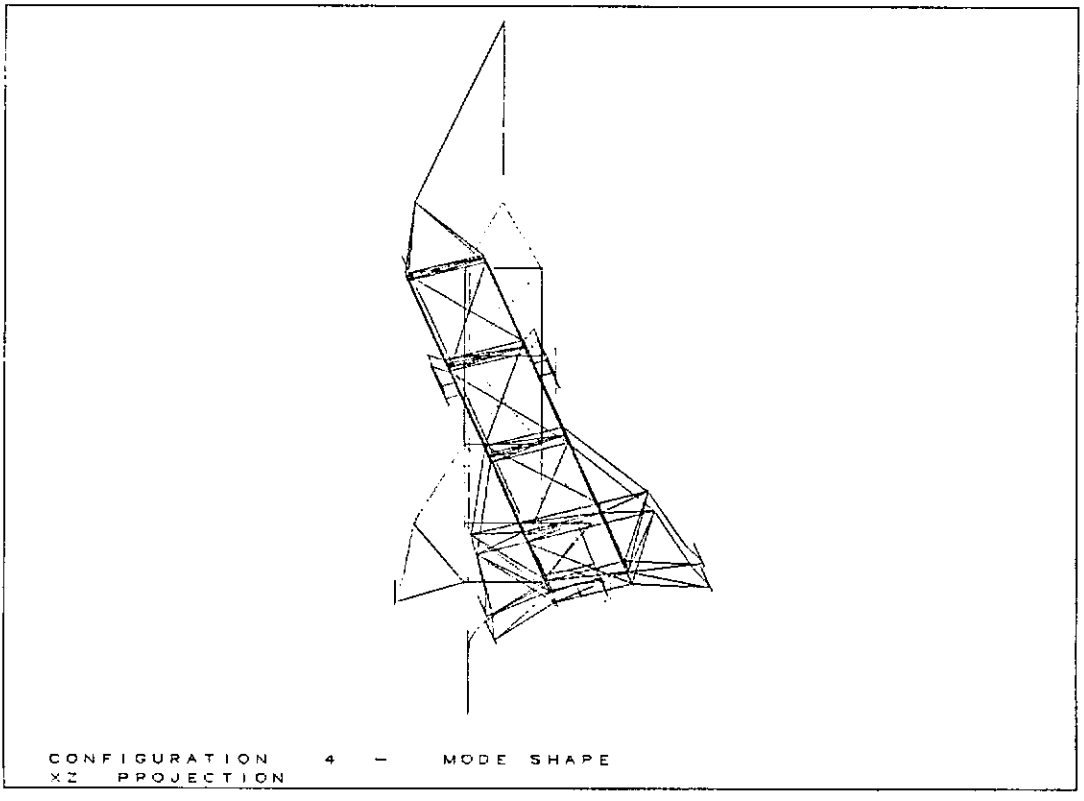
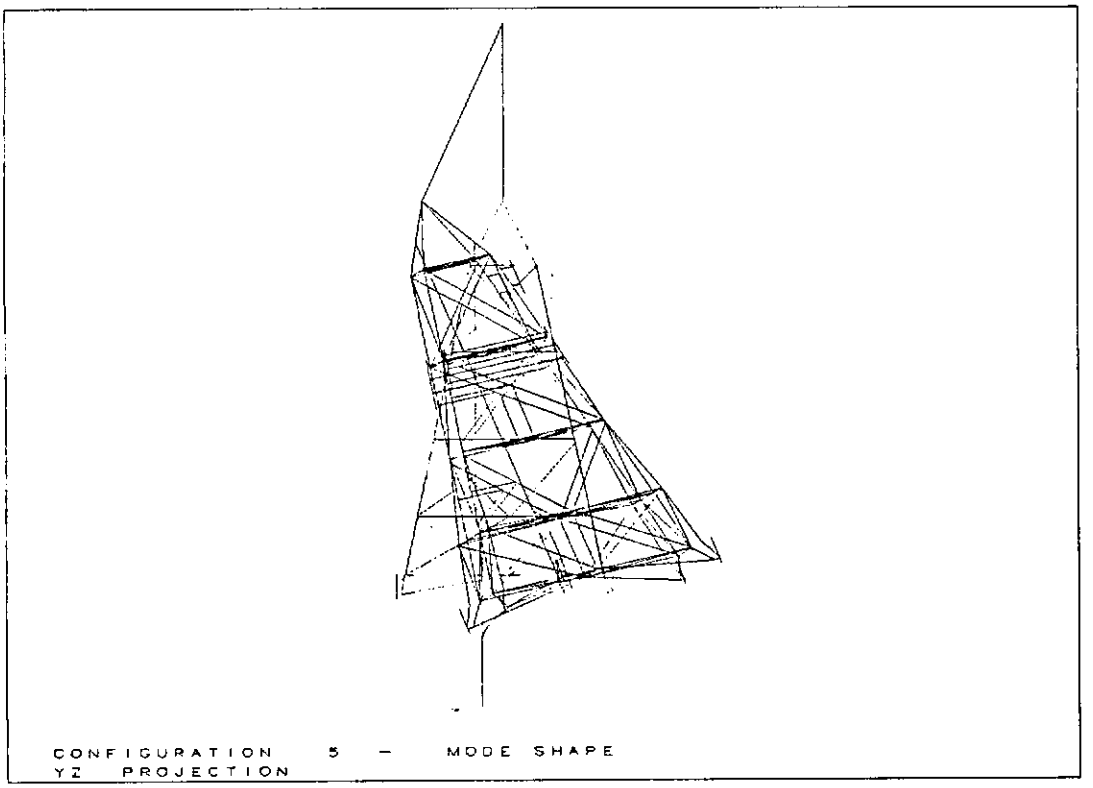


Figura VI.2 - Modos de Vibração 3 e 4



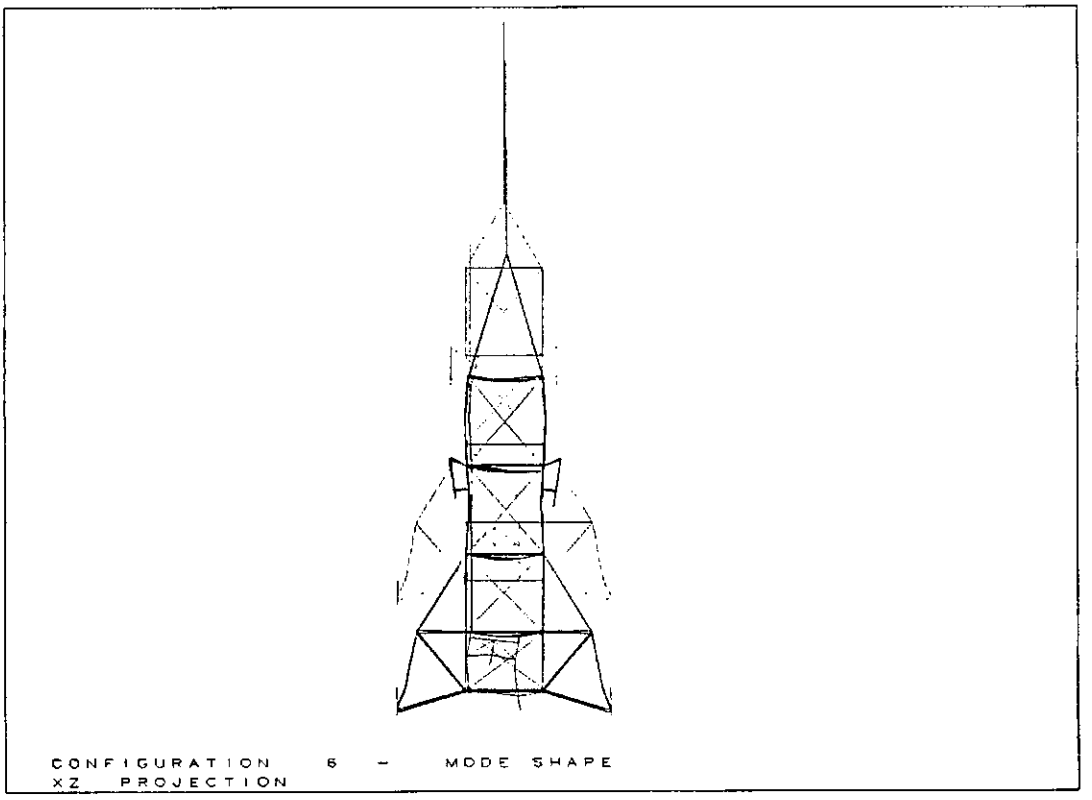


Figura VI.3 - Modos de Vibração 5 e 6

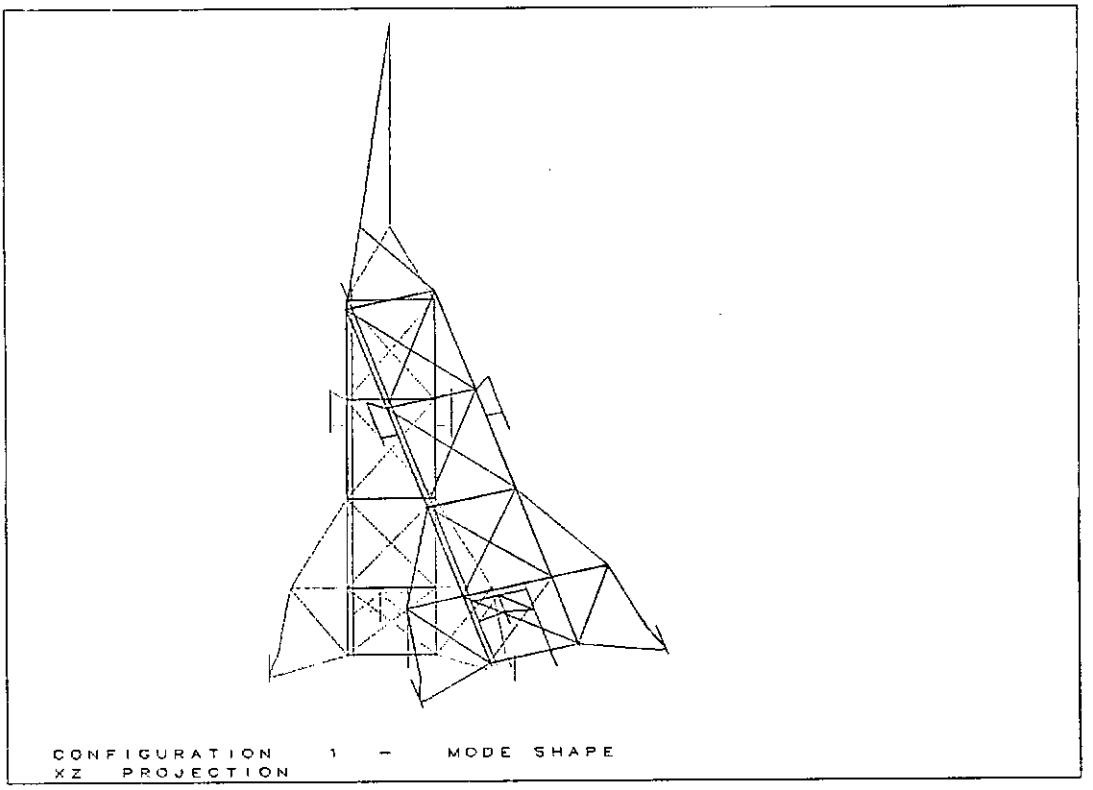
MODO	PERÍODOS (s)	DESCRIÇÃO
1	1789.	Pêndulo em XZ
2	1740.	Pêndulo em YZ
3	62.09	Rotação em Z
4	12.90	Tombamento em XZ
5	11.98	Tombamento em YZ
6	1.867	Desloc. Vertical
7	0.6420	Elástico Local
8	0.5417	Elástico Local
9	0.5174	Elástico Local
10	0.4475	Elástico Local

TABELA VI.2 - PERÍODOS E MODOS DE VIBRAÇÃO
JAQUETA E VÍNCULOS SUPERIORES

MODOS	PERÍODOS (s)
1 e 2	0.5097
3 e 4	0.09975
5 e 6	0.03869
7 e 8	0.02902

TABELA VI.3 - PERÍODOS DE VIBRAÇÃO

ESTACA DE DOCAGEM



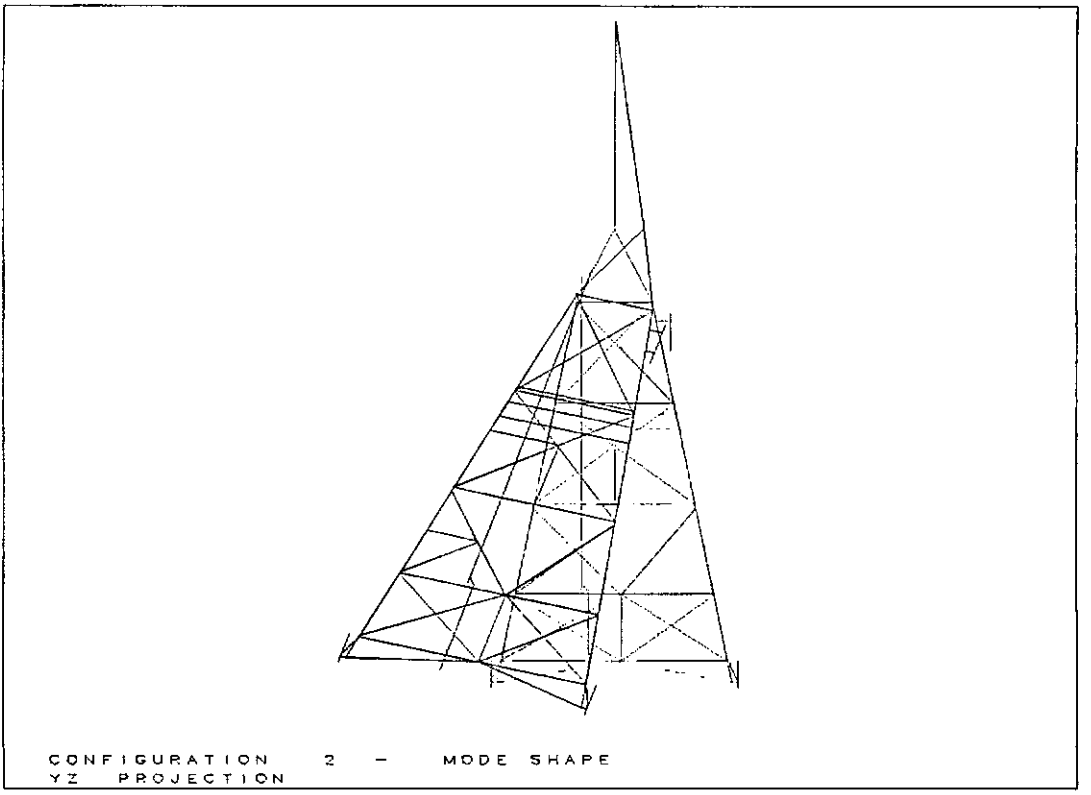
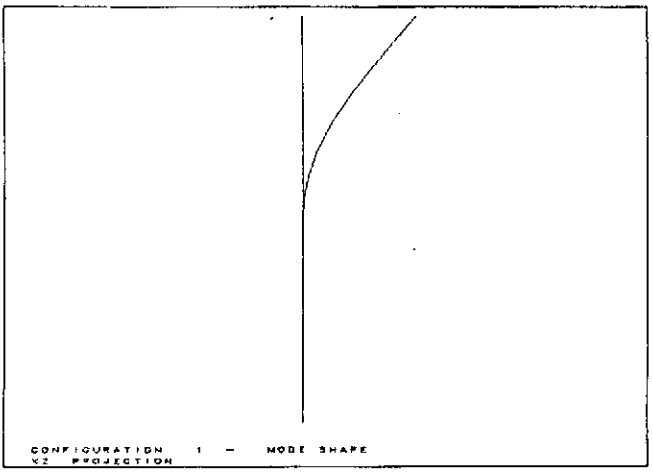
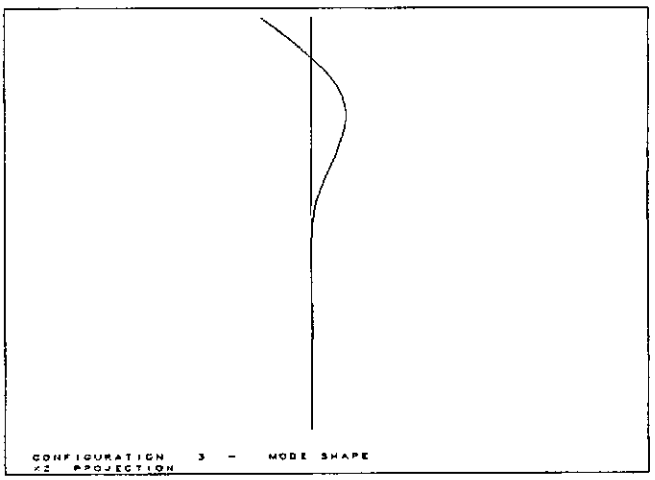


Figura VI.4 - Modos de Vibração 1 e 2





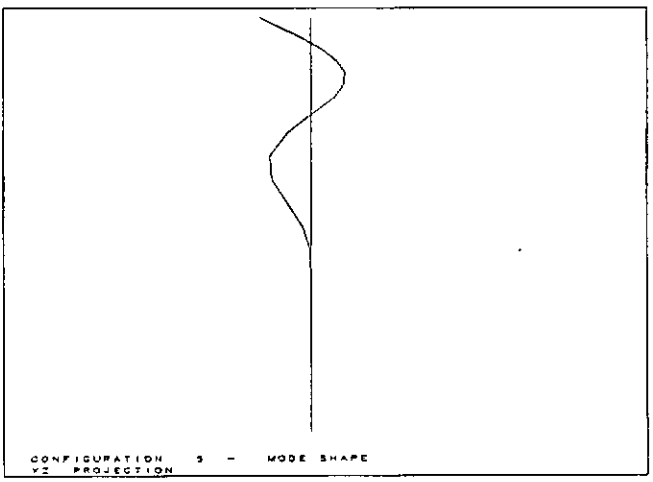


Figura VI.5 - Modos de Vibração da Estaca de Docagem

VI.2.1.2 - INTERVALO DE INTEGRAÇÃO

A criteriosa definição do intervalo de tempo para integração é importante pelo aspecto da precisão dos resultados assim como pela eficiência computacional da análise como um todo.

A escolha do intervalo de integração foi feita de acordo com o estabelecido em [2], adotando-se entre:

$$\Delta t_1 = \frac{T_{onda}}{40} \qquad [VI.1]$$

ou

$$\Delta t_2 = \frac{T_{mínimo}}{10} \qquad [VI.2]$$

onde

T_{onda} é o período da onda;

$T_{mínimo}$ é o modo de vibração, de interesse, correspondente ao menor período.

O menor período de onda de interesse é de 7 segundos. Como desejamos obter também a resposta dinâmica da estaca, para período mínimo foi adotado seu primeiro de vibração, considerando-a vibrando livre na folga da luva

folga da luva de docagem. Logo,

$$\Delta t_1 = \frac{7.}{40} = 0.175 \text{ s}$$

$$\Delta t_2 = \frac{0.5}{10} = 0.05 \text{ s}$$

O intervalo de integração adotado foi de 0.05 s.

O intervalo de 0.05 segundos integra corretamente os seis modos de corpo rígido do modelo da jaqueta com a estaca, o modo local da estaca na luva de docagem - décimo modo de vibração - além do primeiro modo da estaca livre e os seis modos de corpo rígido da jaqueta sem contato com a estaca de docagem.

VI.2.1.3 - MOLAS DE CONTATO

Após a montagem do modelo conforme descrito no Capítulo V, foram realizadas as primeiras análises utilizando o modelo completo.

Inicialmente, procurou-se modelar a mola de contato entre a luva e a estaca de docagem utilizando-se um valor para a rigidez igual ao do módulo de elasticidade do aço - E = 21E+6 t/m^2 - e, para possibilitar a

convergência da análise não-linear, utilizou-se para o trecho da folga uma reação máxima de 0.5 t. Esta reação foi considerada pouco significativa em relação aos valores esperados para o trecho rígido, que seriam da ordem de 30 t. Este modelo de mola de contato apresentou problemas de convergência, não sendo possível completar as análises.

Como o Δt adotado é suficientemente pequeno para obtermos as respostas de interesse, foram realizadas variações nos valores das rijezas envolvidas procurando-se soluções a partir do adoçamento da mola de contato. Este procedimento foi adotado para se evitar a variação brusca nos valores das rijezas de modo a contornar os problemas na convergência da análise não-linear.

Para isto, o trecho da folga na mola, que vai de -0.069 m a 0.069 m, foi subdividido chegando-se a seguinte mola de contato para esta análise:

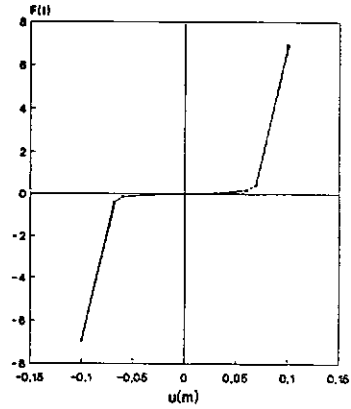


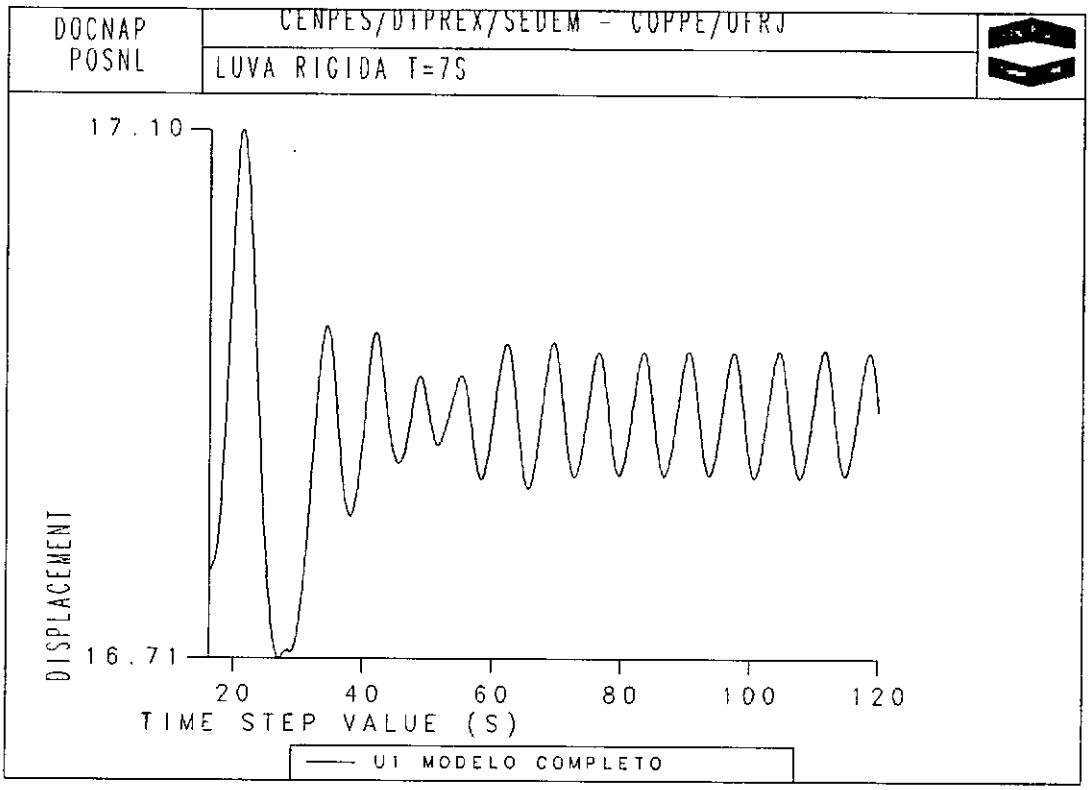
Figura VI.6 - Mola de Contato

FORÇA (t)	DESLOCAMENTO (m)
-0.21E+4	-10.069
-0.420	-0.069
-0.159	-0.060
-0.030	-0.030
0.0	0.0
0.030	0.030
0.159	0.060
0.420	0.069
0.21E+4	10.069

TABELA VI.4 - Mola de Contato

VI.2.1.4 - RESULTADOS

Neste item encontram-se os gráficos, obtidos através do programa POSNL [24], para os resultados de interesse desta análise, com contato entre a luva e a estaca de docagem através de dois pontos. São apresentados os deslocamentos dos nós 1 e 2 da luva de docagem, nós E1 e E2 da estaca e forças nas molas de contato que interligam estes nós.



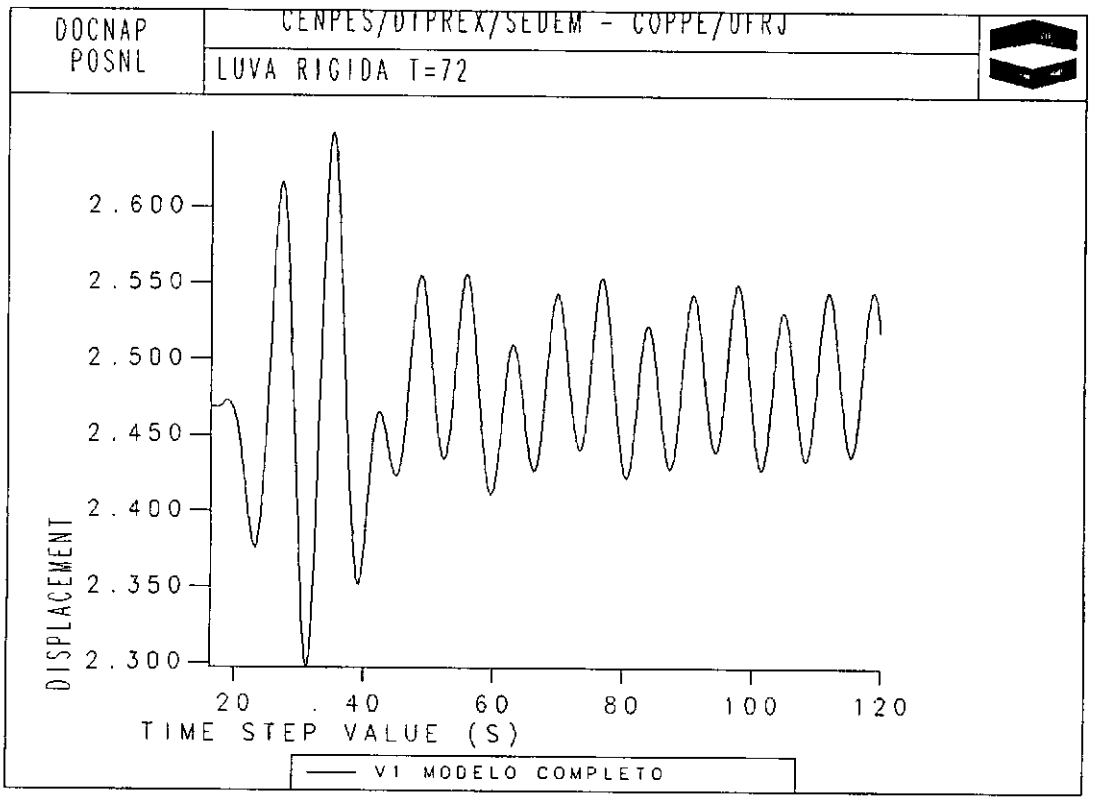
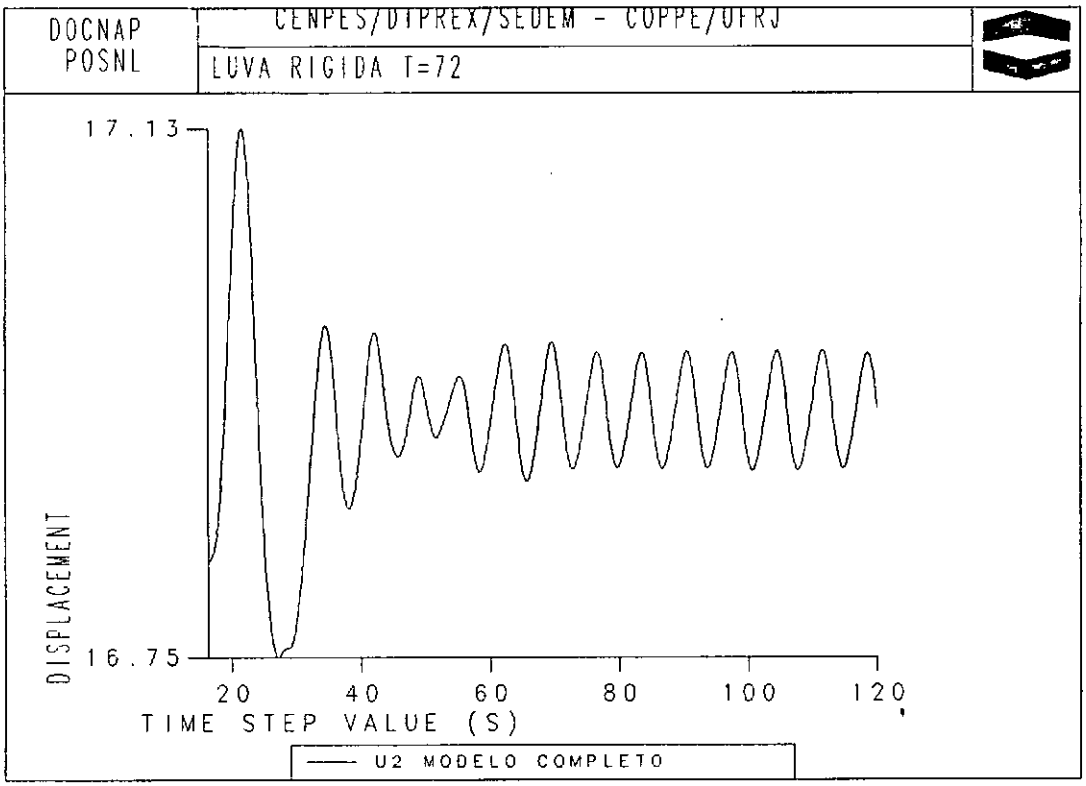


Figura VI.7 - Modelo Completo Luva Rígida



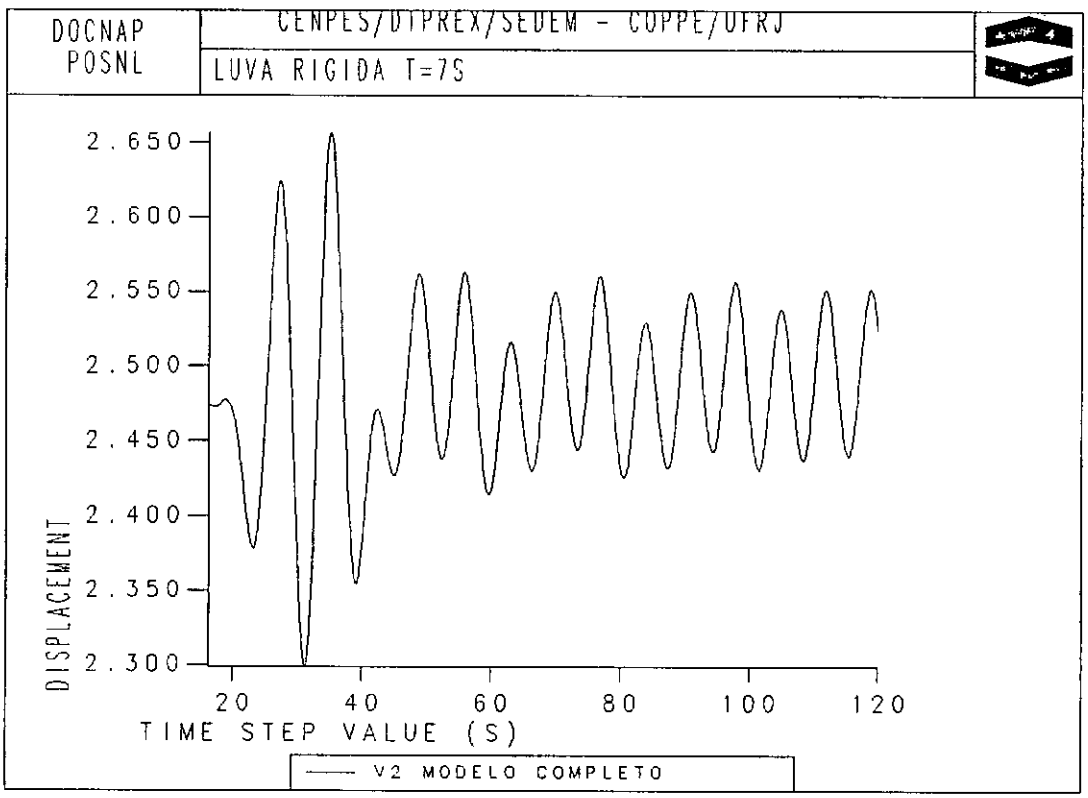
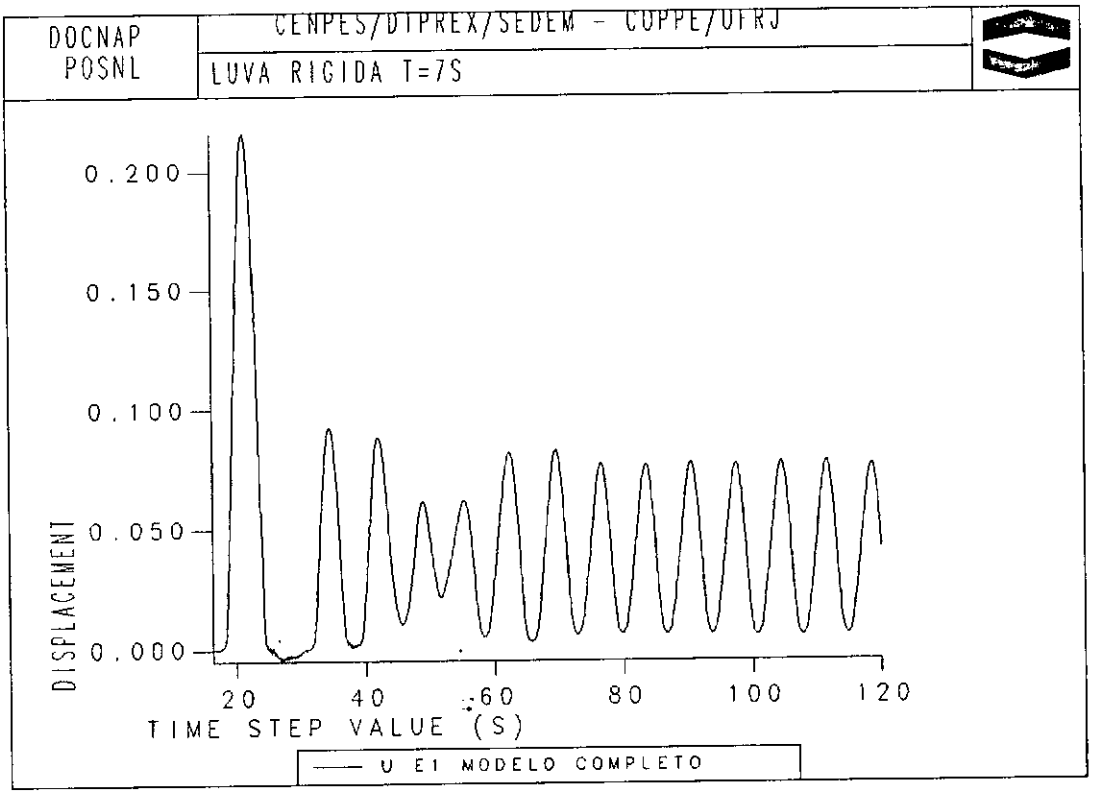


Figura VI.8 - Modelo Completo Luva Rígida



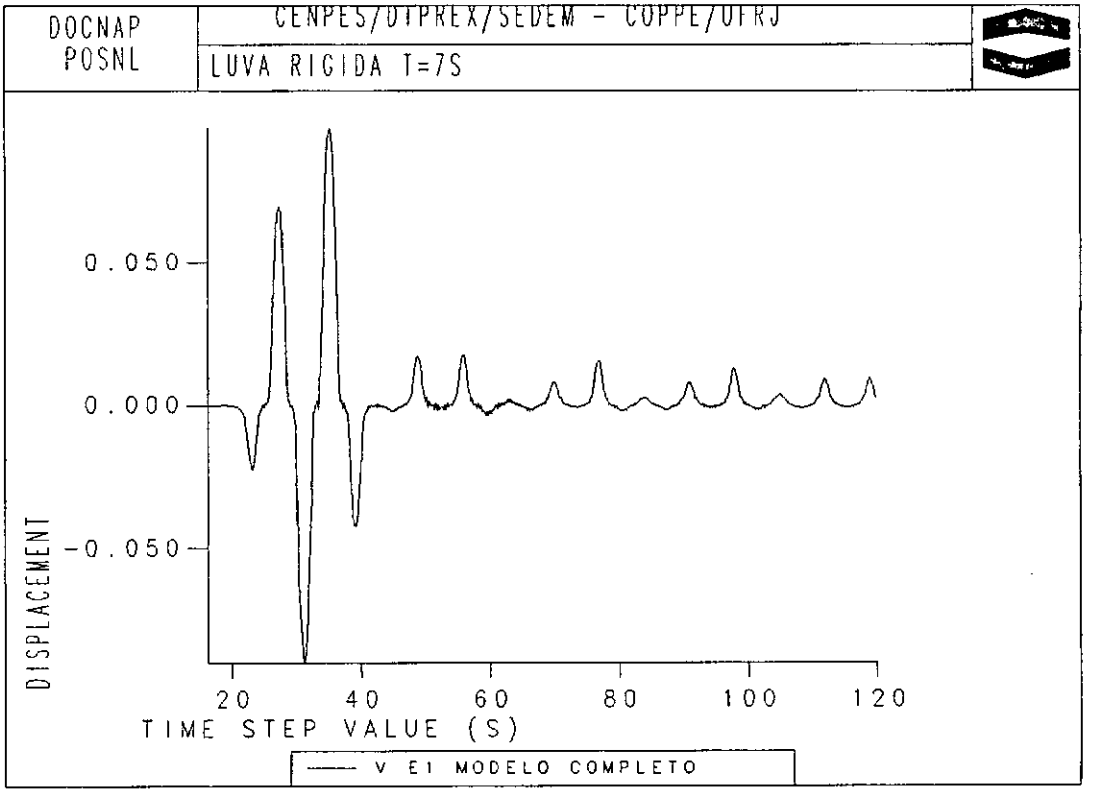
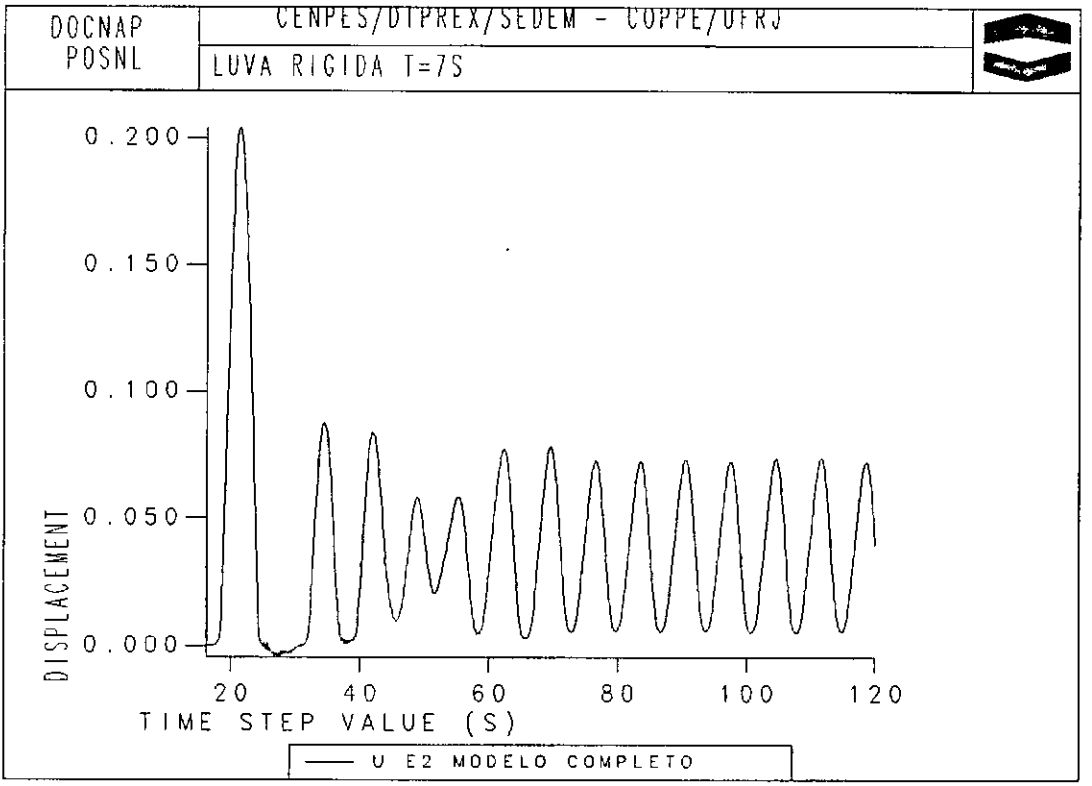


Figura VI.9 - Modelo Completo Luva Rígida



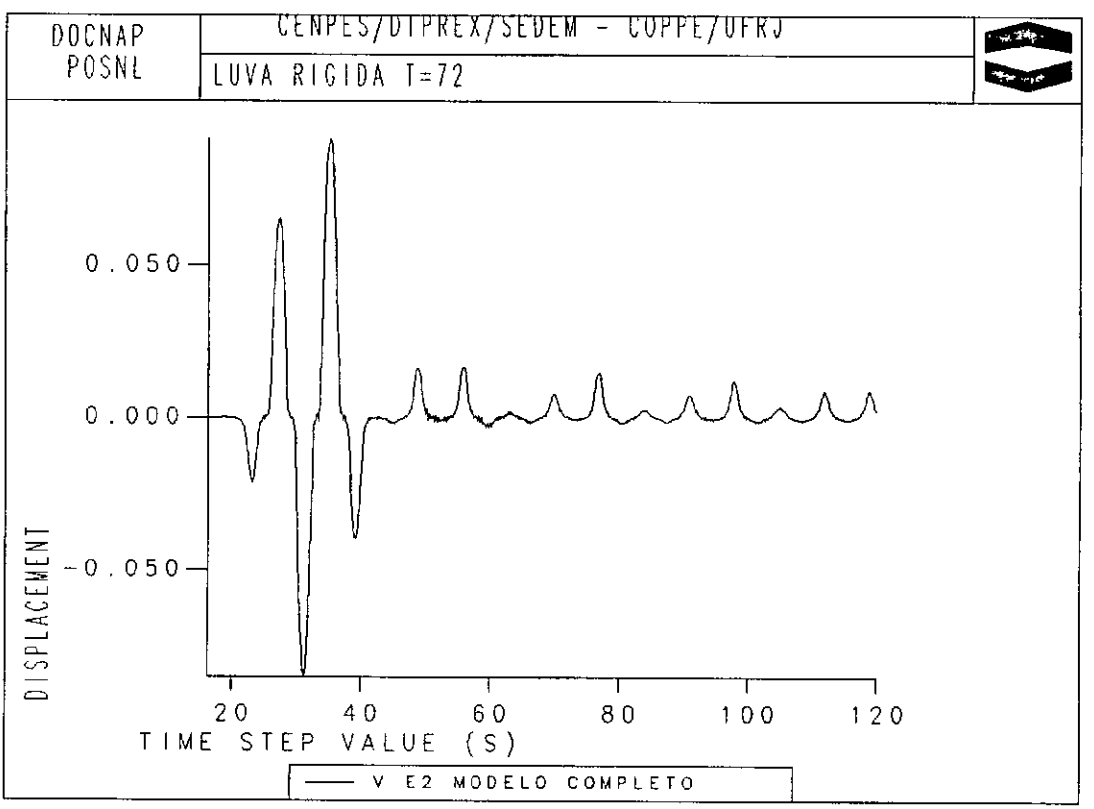
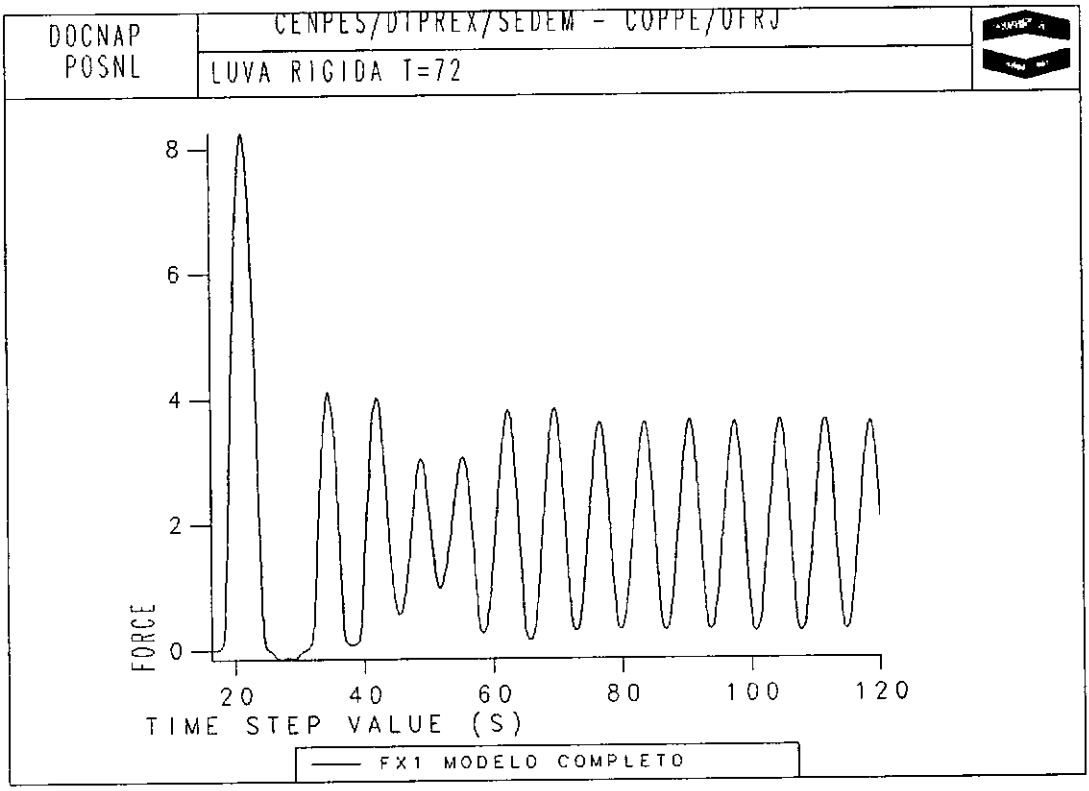


Figura VI.10 - Modelo Completo Luva Rígida



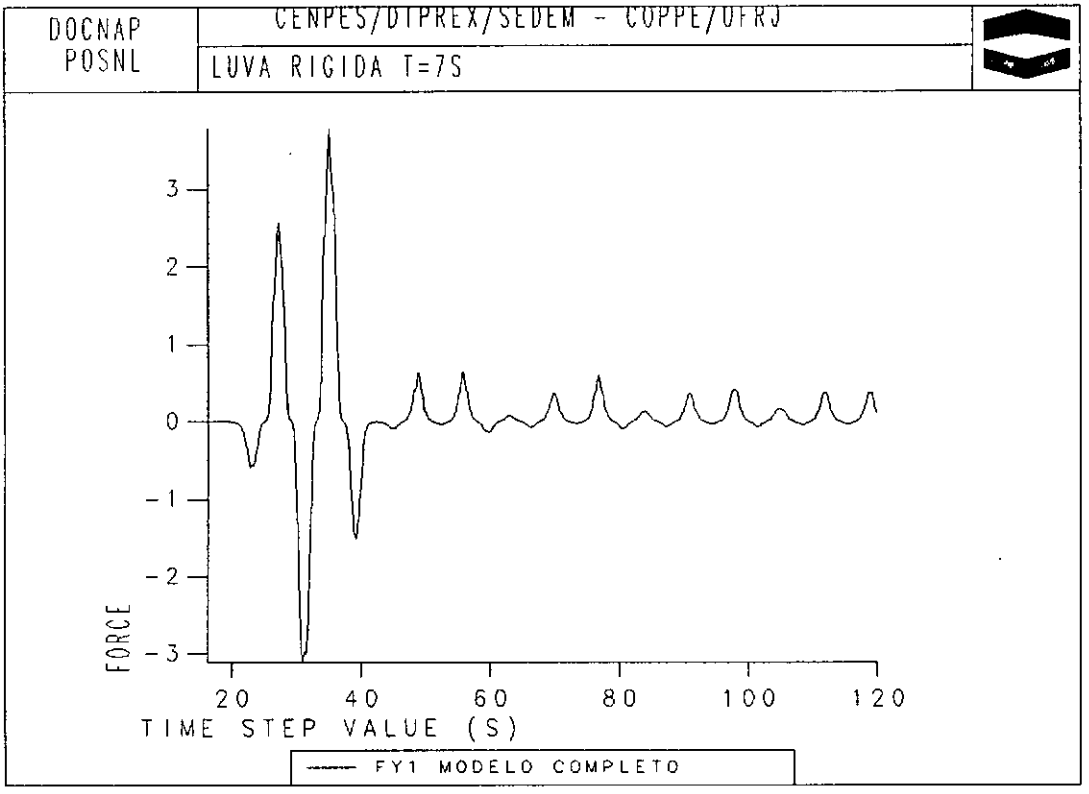
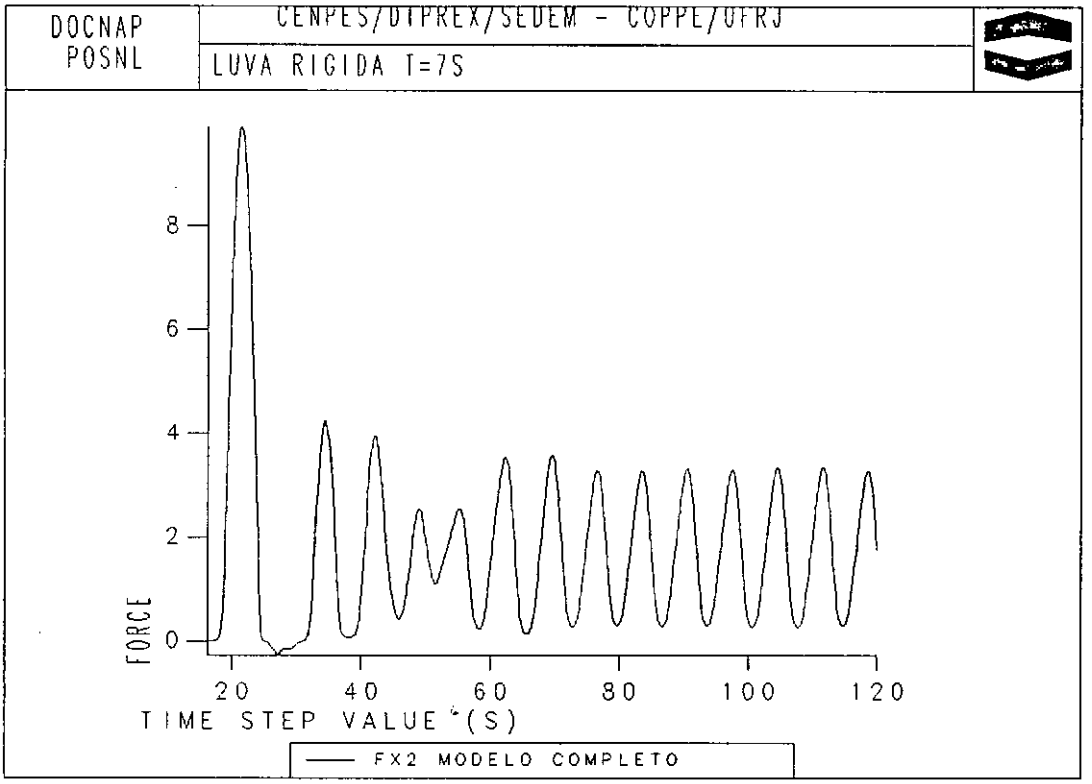


Figura VI.11 - Modelo Completo Luva Rígida



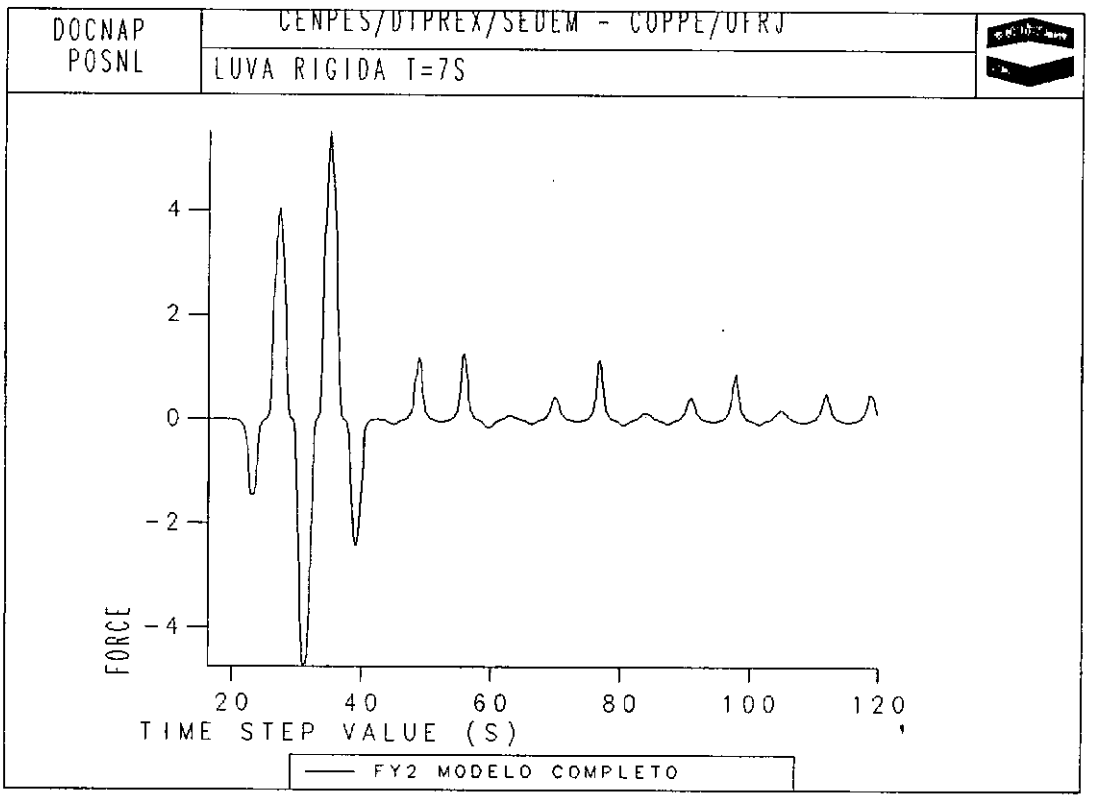


Figura VI.12 - Modelo Completo Luva Rígida

VI.2.2 - LUVA DE DOCAGEM E ESTACA FLEXÍVEIS

VI.2.2.1 - VIBRAÇÕES LIVRES

Os modos e períodos de vibração deste modelo foram obtidos segundo o procedimento descrito no item VI.2.1.1.

Os valores dos períodos obtidos,para a análise com o modelo completo da jaqueta com a estaca, estão mostrados na tabela VI.5 e na tabela VI.6 para a análise da estaca. Os modos de vibração, para a jaqueta com as propriedades da luva alteradas, são mostrados nas figuras VI.13 a VI.17.

Os períodos da jaqueta apenas com seus vínculos superiores são iguais aos do modelo anterior, apresentados na tabela VI.2.

MODO	PERÍODOS (s)	DESCRIÇÃO
1	63.77	Rotação em Z
2	18.64	Pêndulo em YZ
3	16.01	Tombamento em XZ
4	11.70	Tombamento em YZ
5	11.22	Tombamento em XZ
6	1.866	Desloc. Vertical
7	0.6227	Elástico Local
8	0.5776	Elástico Local
9	0.5277	Elástico Local
10	0.5087	Elástico Local

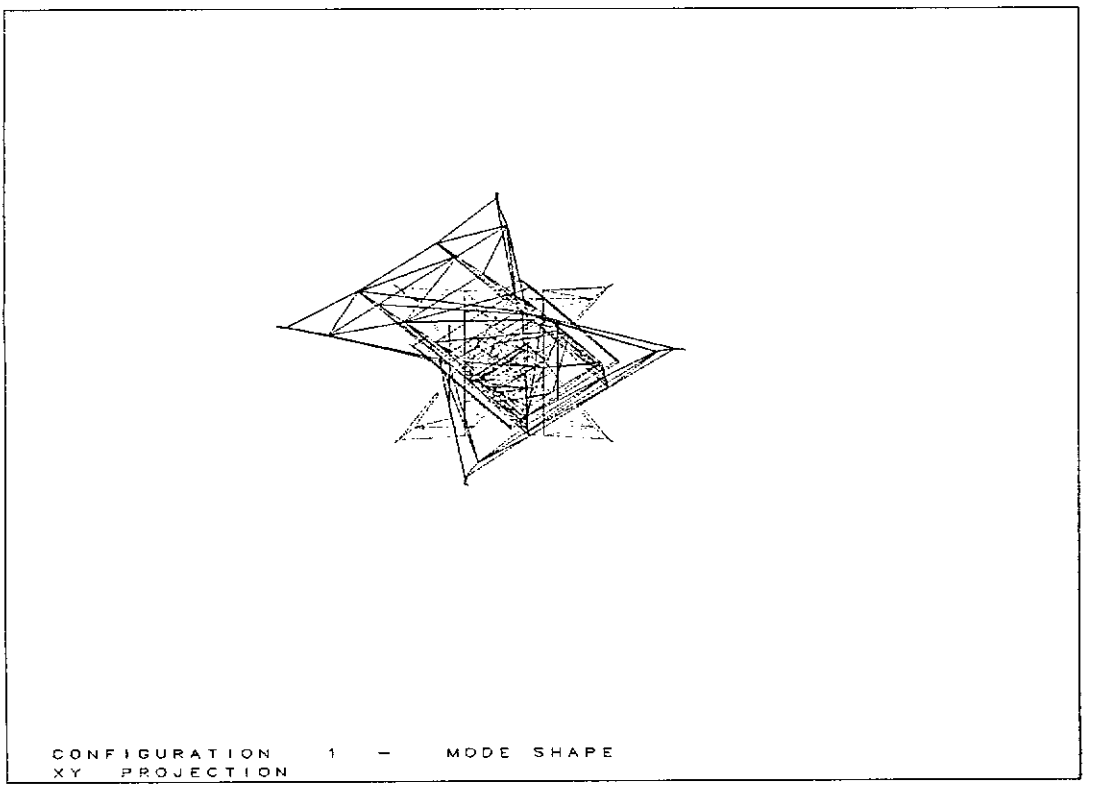
TABELA VI.5 - PERÍODOS E MODOS DE VIBRAÇÃO

JAQUETA CONECTADA A ESTACA

MODO	PERÍODO (s)
1	0.3782
3	0.07250
5	0.02793
7	0.01709

TABELA VI.6 - PERÍODOS E MODOS DE VIBRAÇÃO

ESTACA DE DOCAGEM



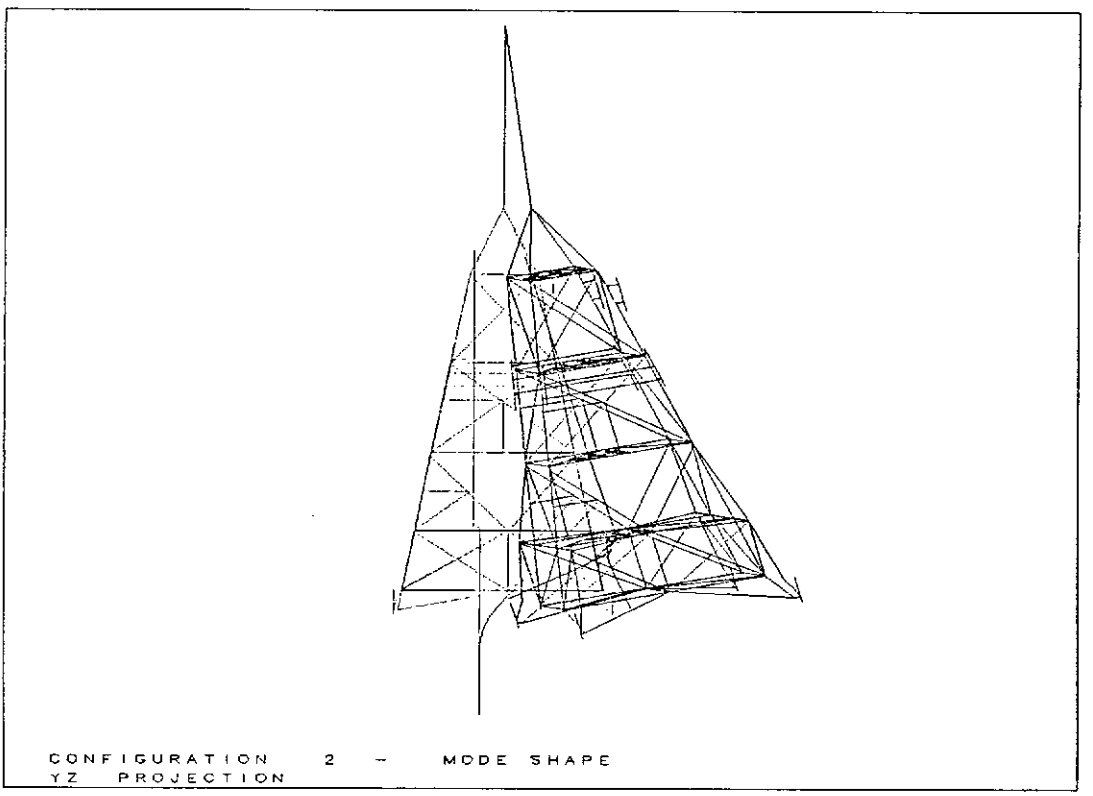
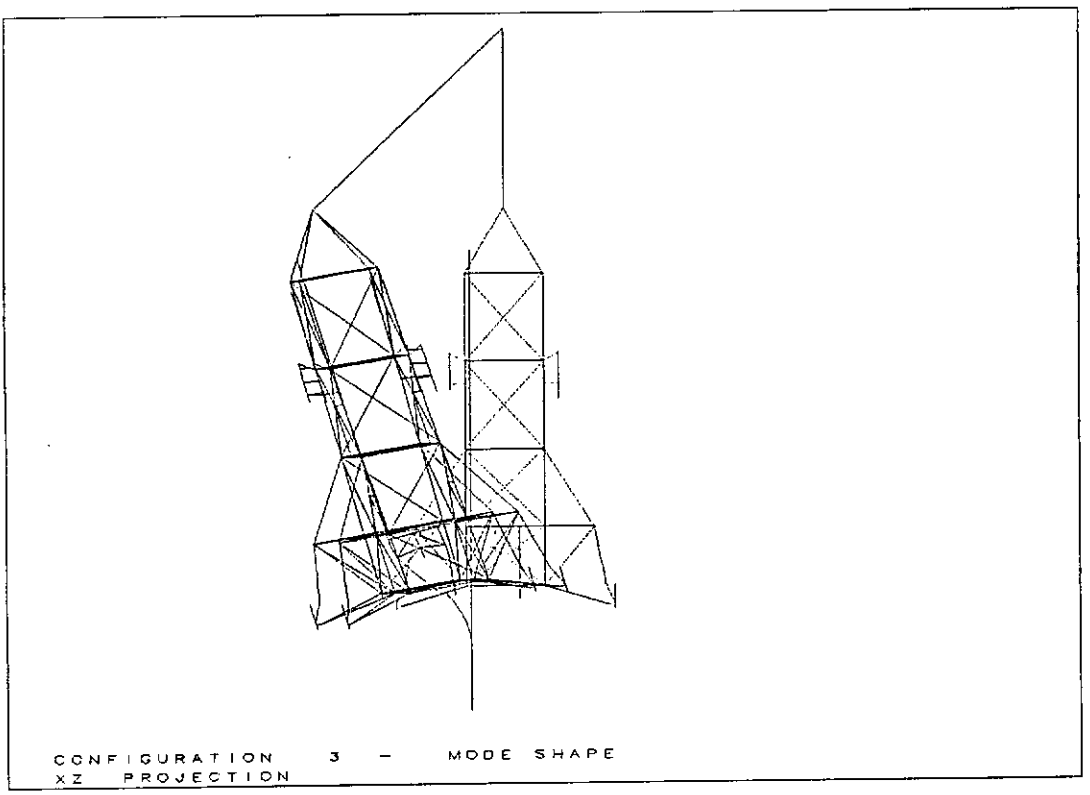


Figura VI.13 - Modos de Vibração 1 e 2



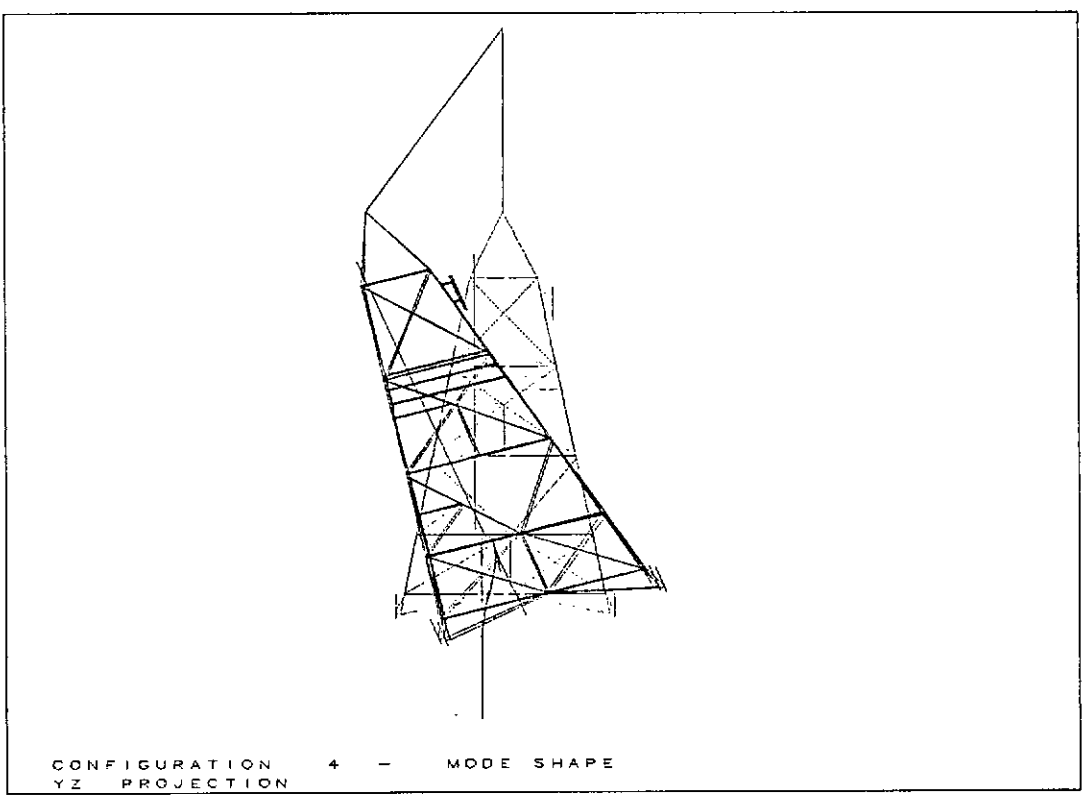
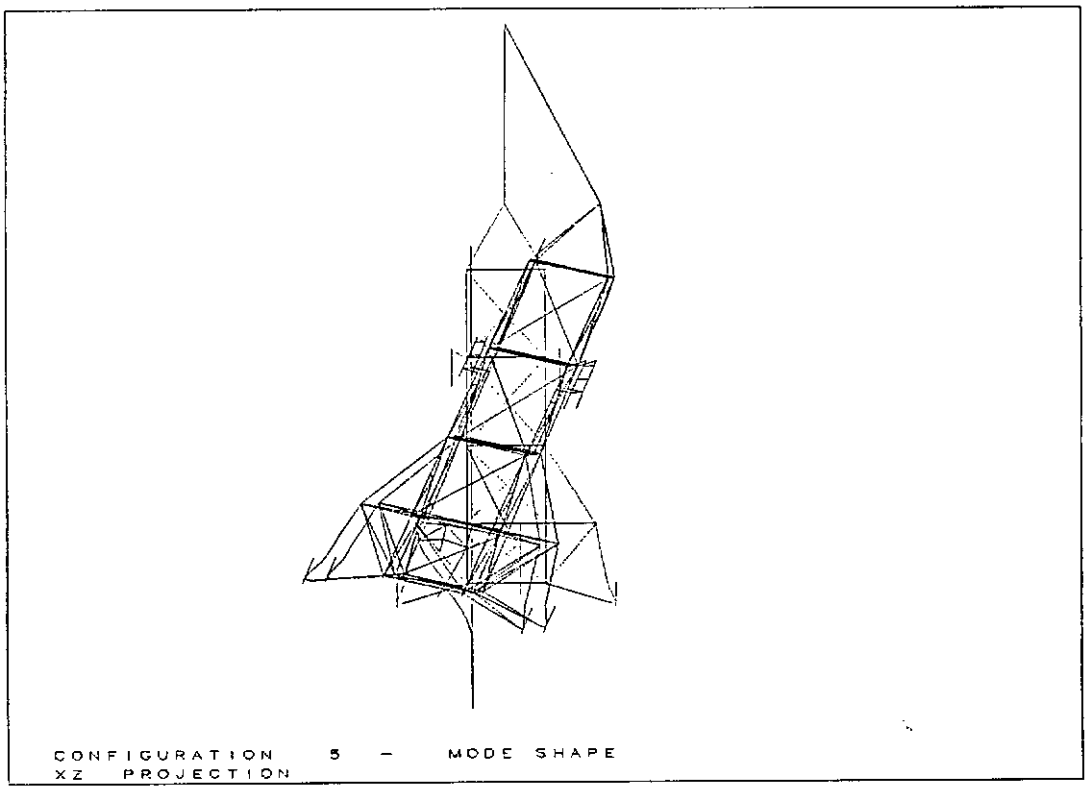


Figura VI.14 - Modos de Vibração 3 e 4



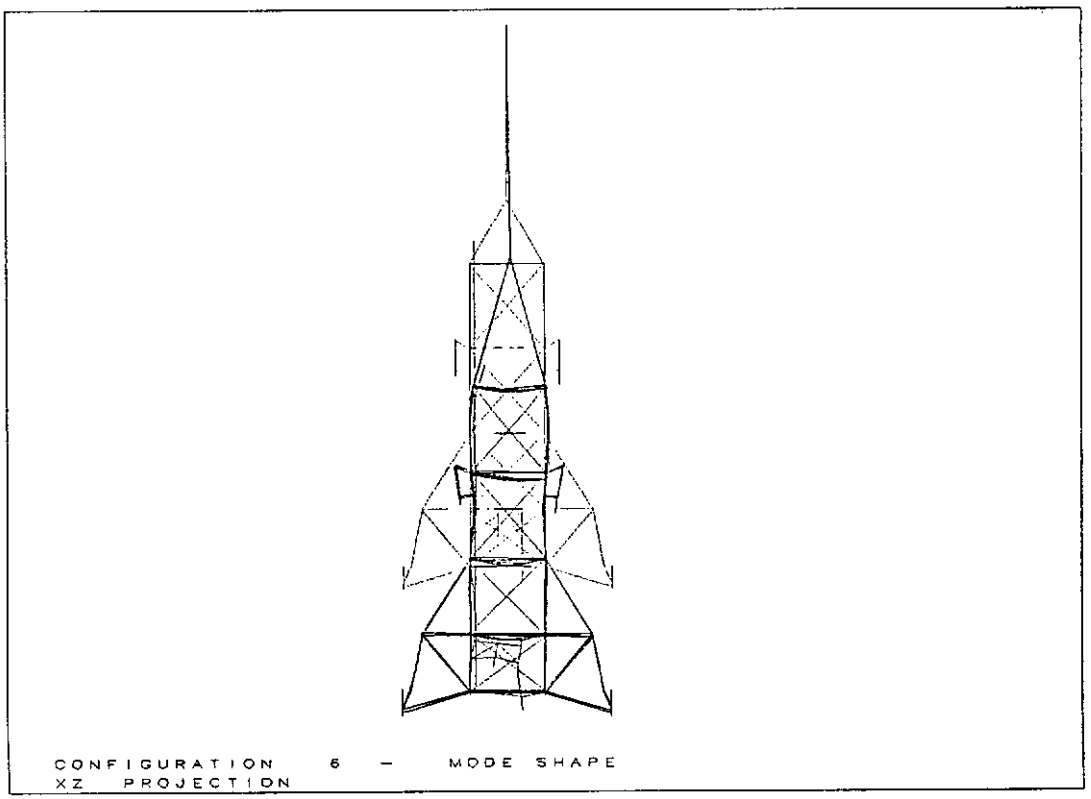
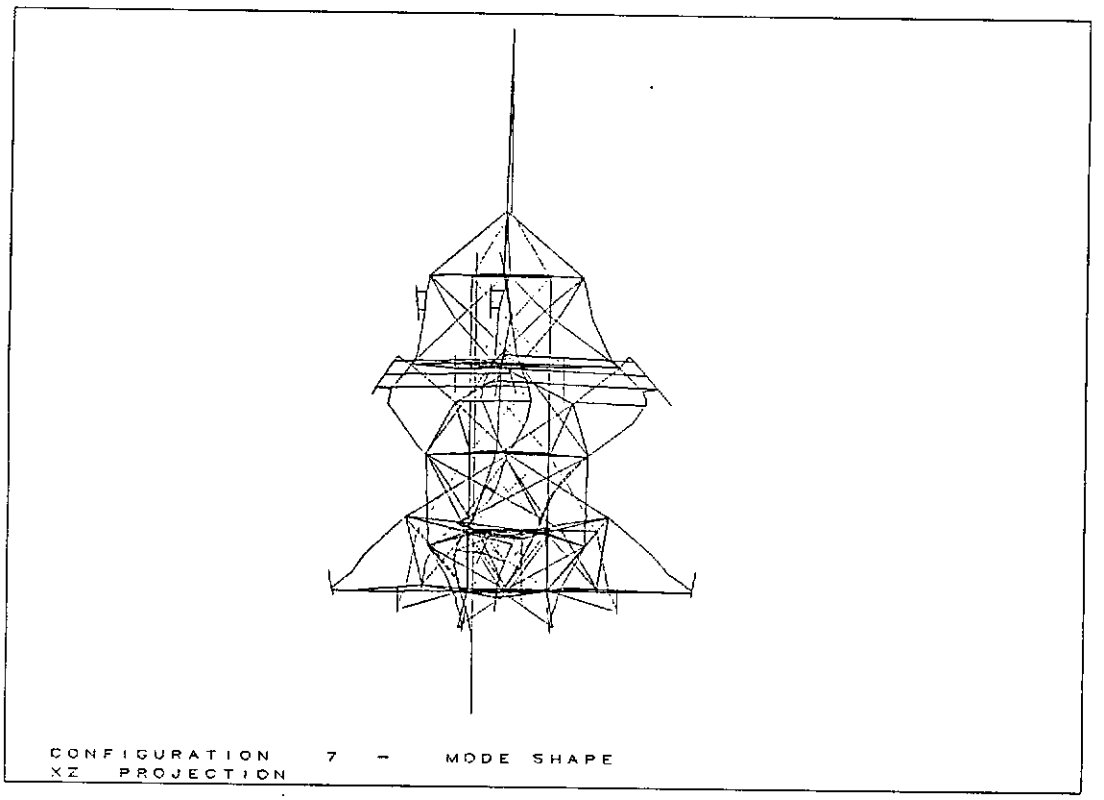


Figura VI.15 - Modos de Vibração 5 e 6



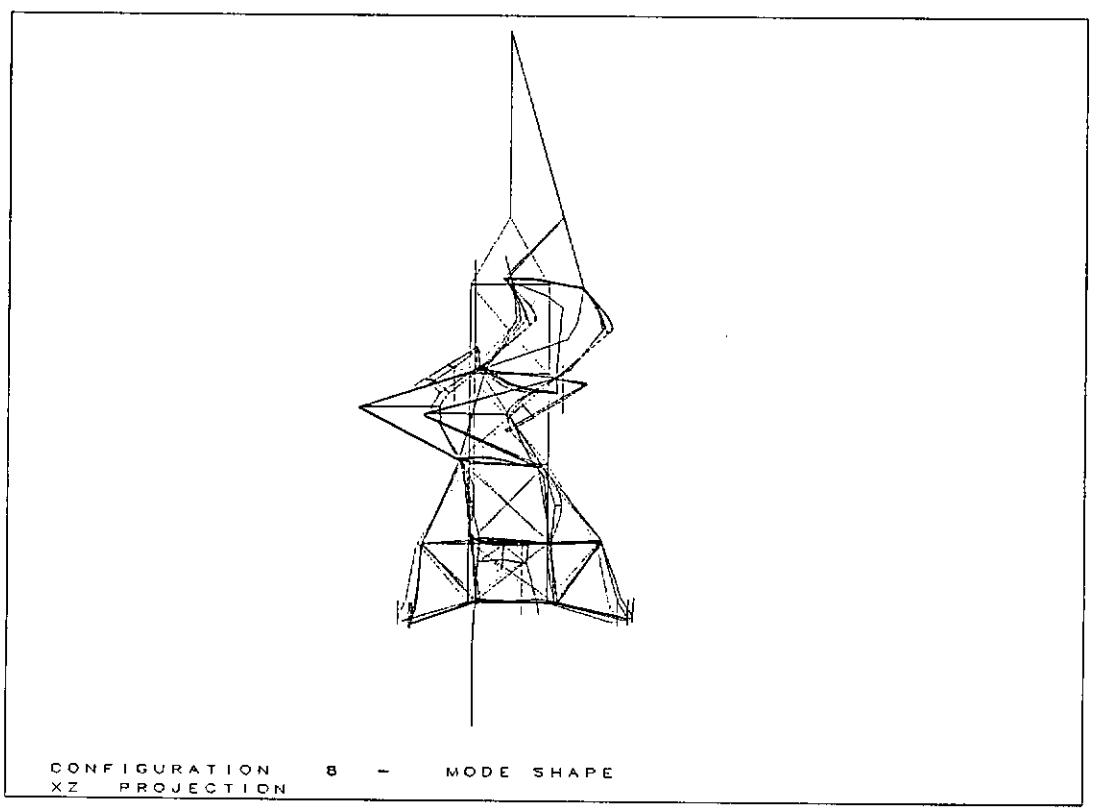
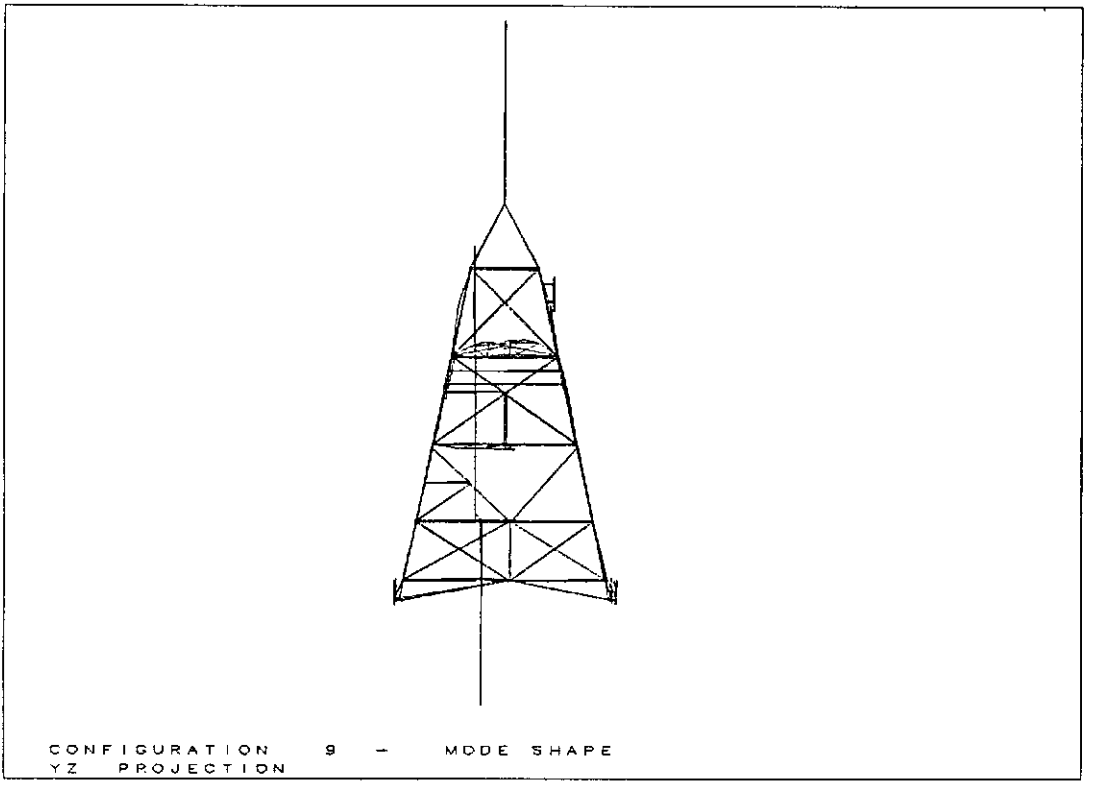


Figura VI.16 - Modos de Vibração 7 e 8



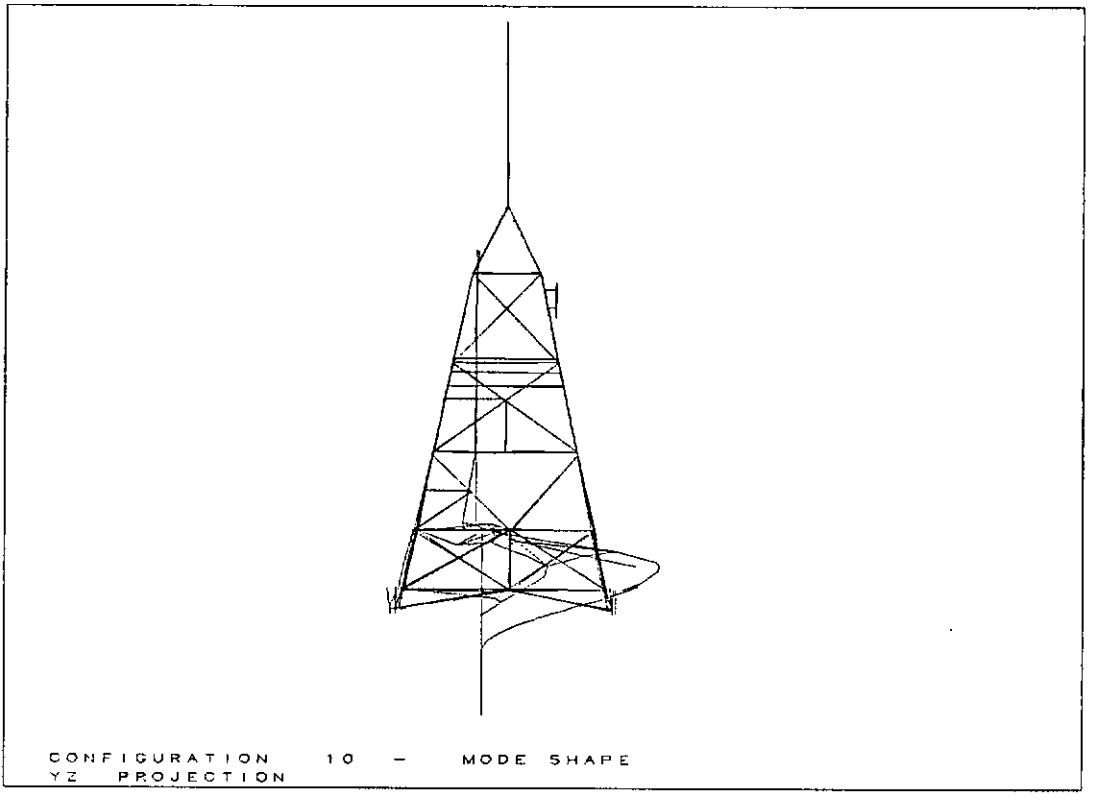


Figura VI.17 - Modos de Vibração 9 e 10

VI.2.2.2 - INTERVALO DE INTEGRAÇÃO

Neste modelo foi adotado o mesmo intervalo de integração adotado no modelo anterior, isto é 0.05 s.

Esta escolha baseou-se nas suas características semelhantes e na expectativa de que a flexibilidade global da luva de docagem facilitasse a convergência na análise não-linear, o que acabou se confirmando.

VI.2.2.3 - MOLAS DE CONTATO

Para este modelo, em virtude dos melhores resultados em relação a convergência das análises, foi adotada a mola de contato da figura VI.18.

Utilizou-se para o trecho da folga uma reação máxima de 0.1 t e não houve necessidade de se subdividir o trecho da folga na mola.

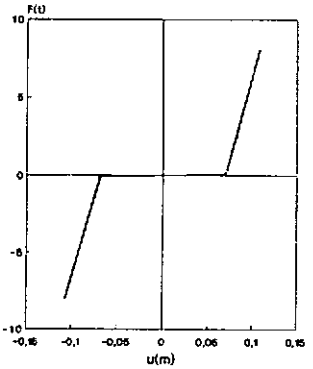


Figura VI.18 - Mola de Contato

VI.2.2.4 - RESULTADOS

Neste item, apresentamos os resultados para as configurações deste modelo, considerando o contato entre a luva e a estaca de docagem através de duas molas:

-Luva de docagem com propriedades originais e ondas com períodos de 7.0 s, na figura VI.19;

-Luva de docagem com propriedades alteradas e ondas com períodos de 7.0 s, na figura VI.20;

-Luva de docagem com propriedades alteradas e ondas com períodos de 8.0 s, nas figuras VI.21 a VI.24.

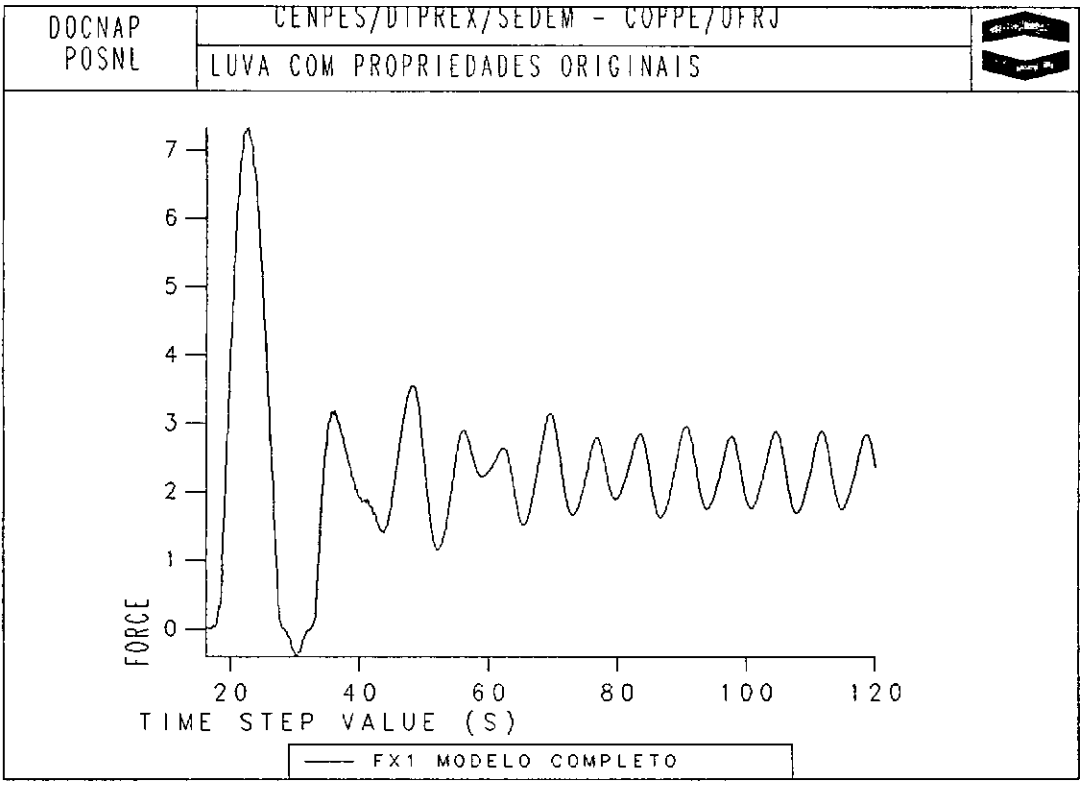
No modelo da luva com propriedades originais, verificou-se, principalmente na mola 2, que o sistema apresenta um comportamento basicamente estático em função da flexibilidade da luva.

No modelo seguinte, com propriedades alteradas com o objetivo de aumentar a rigidez da luva, já verifica-se um comportamento dinâmico nas duas molas. Este fenômeno torna-se mais evidente ainda para ondas com 8.0 s de período.

De acordo com a tabela V.3, uma operação de docagem provavelmente seria realizada somente para ondas com 7.0 s e 8.0 s de período, em função da grande amplitude dos movimentos na ponta da lança do guindaste para ondas com períodos maiores. Logo, nesta situação, ondas com altura de 3.0 m e períodos de 8.0 s apresentam as maiores reações nas estacas de docagem, na prática.

Podemos observar que para ondas com períodos de 7.0 ou 8.0 segundos não foi alcançada a parte não-linear das molas PY e TZ utilizadas no modelo do solo marinho. Portanto, não houve a necessidade de se considerar a histerese do solo. Para os demais períodos, onde foi alcançada a parte não-linear das molas PY e não considerou-se a histerese do solo, podemos verificar o comportamento dos modelos em situações com níveis maiores de carregamento.

Em função da tridimensionalidade das análises realizadas, a interpretação dos resultados necessita ser realizada considerando os esforços nas direções X e Y. No entanto, como as cargas laterais atuam na direção X, provocando forte predominância da resposta, para os dois primeiros modelos só apresentamos resultados nesta direção. Esta simplifição parece razoável por permitir a compreensão do comportamento destes sistemas estruturais.



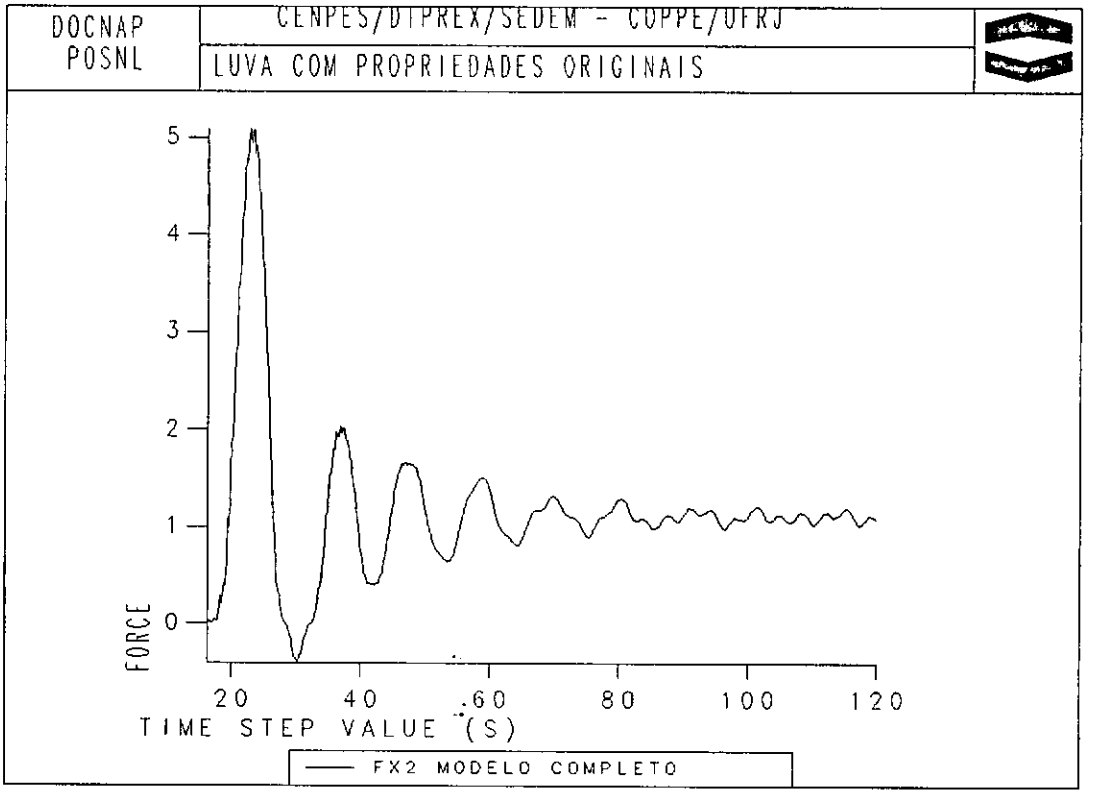
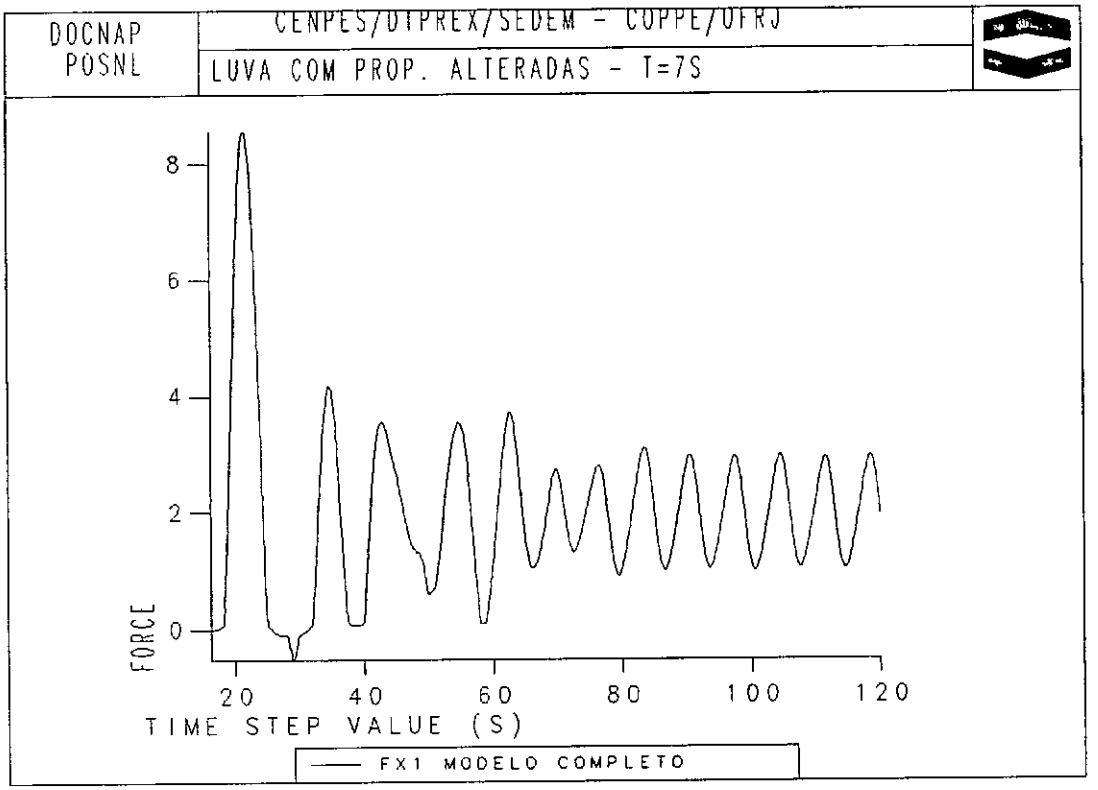


Figura VI.19 - Modelo Completo Luva Flexível Original



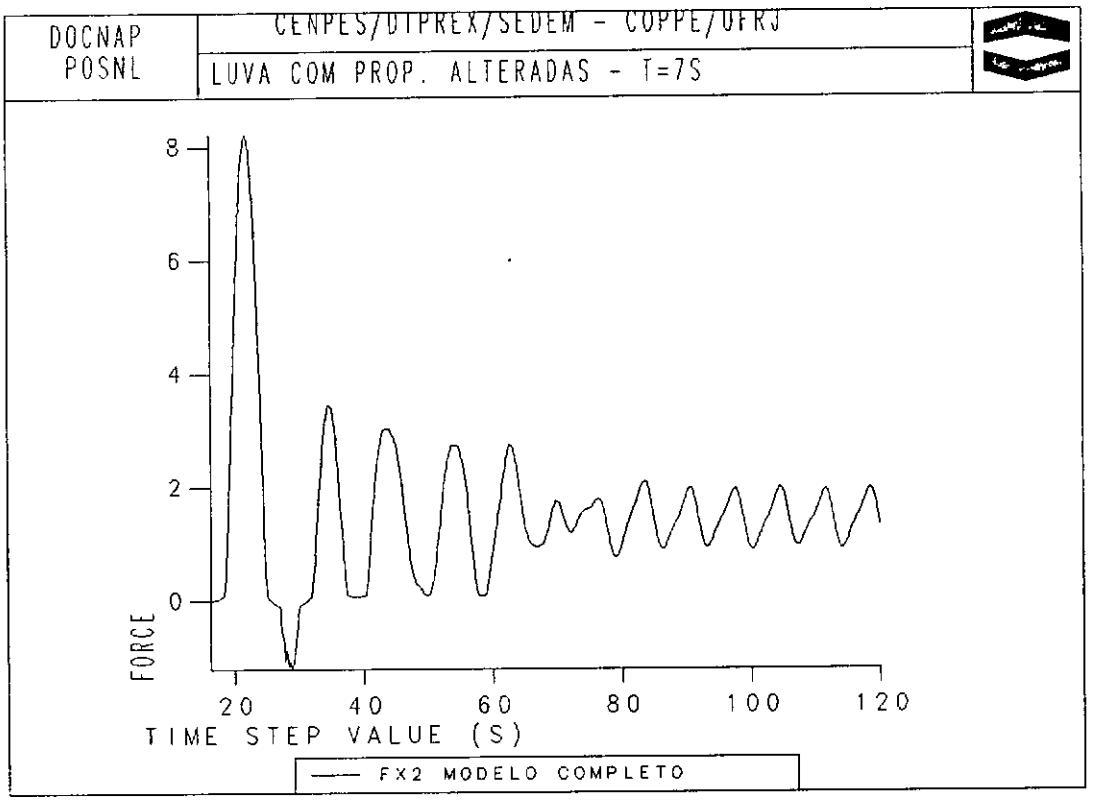


Figura VI.20 - Modelo Completo Luva Flexível Alterada

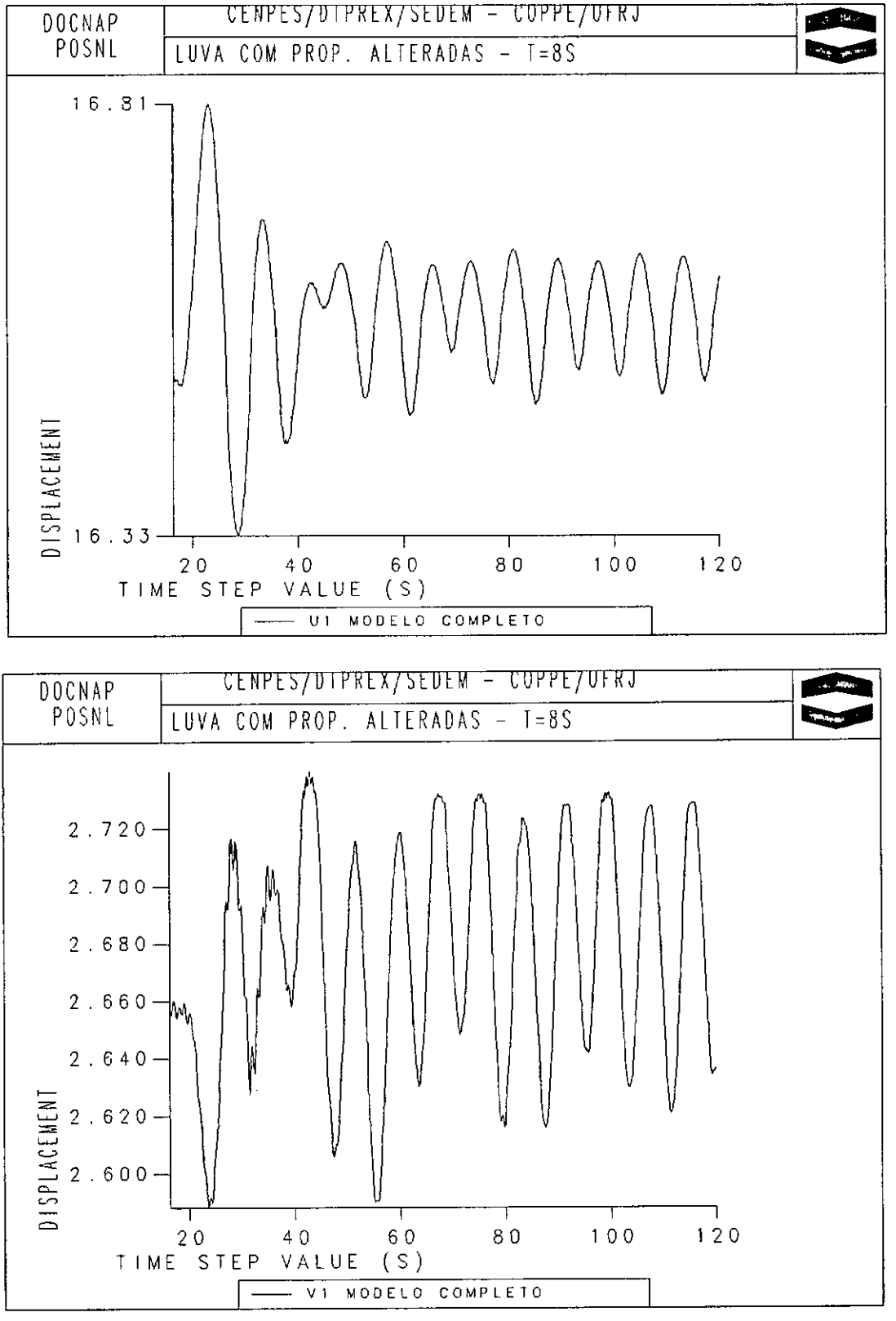
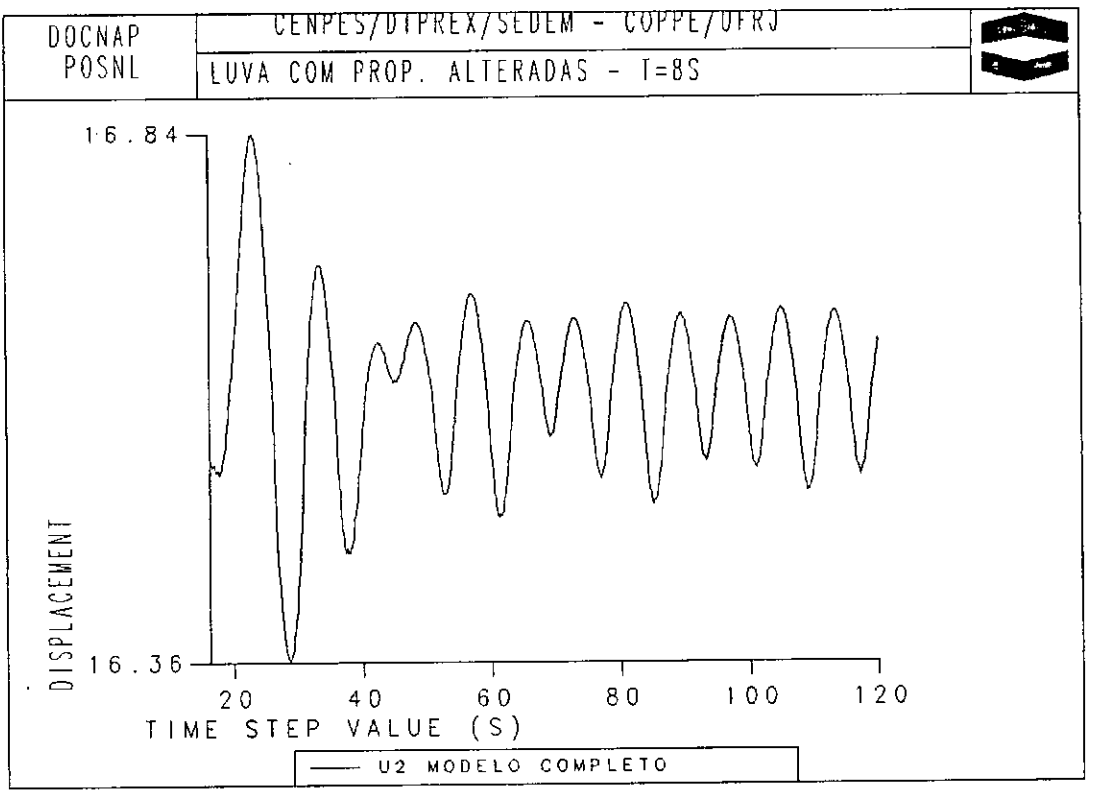


Figura VI.21 - Modelo Completo Luva Flexível Alterada



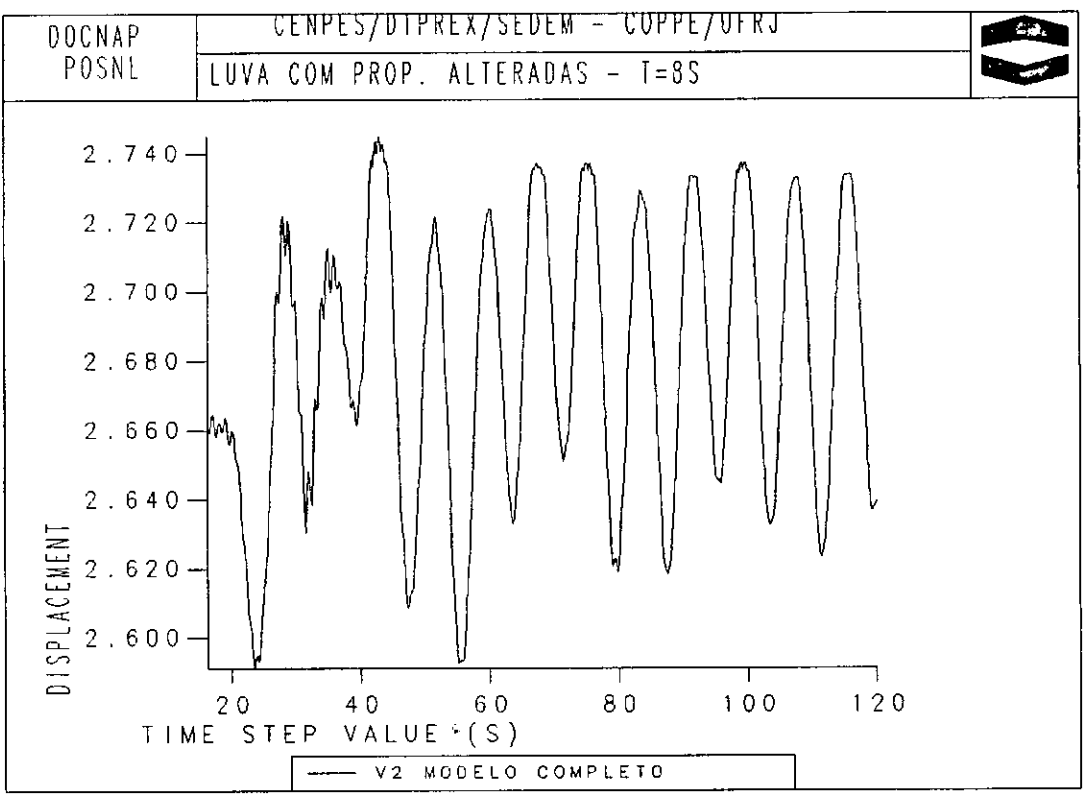
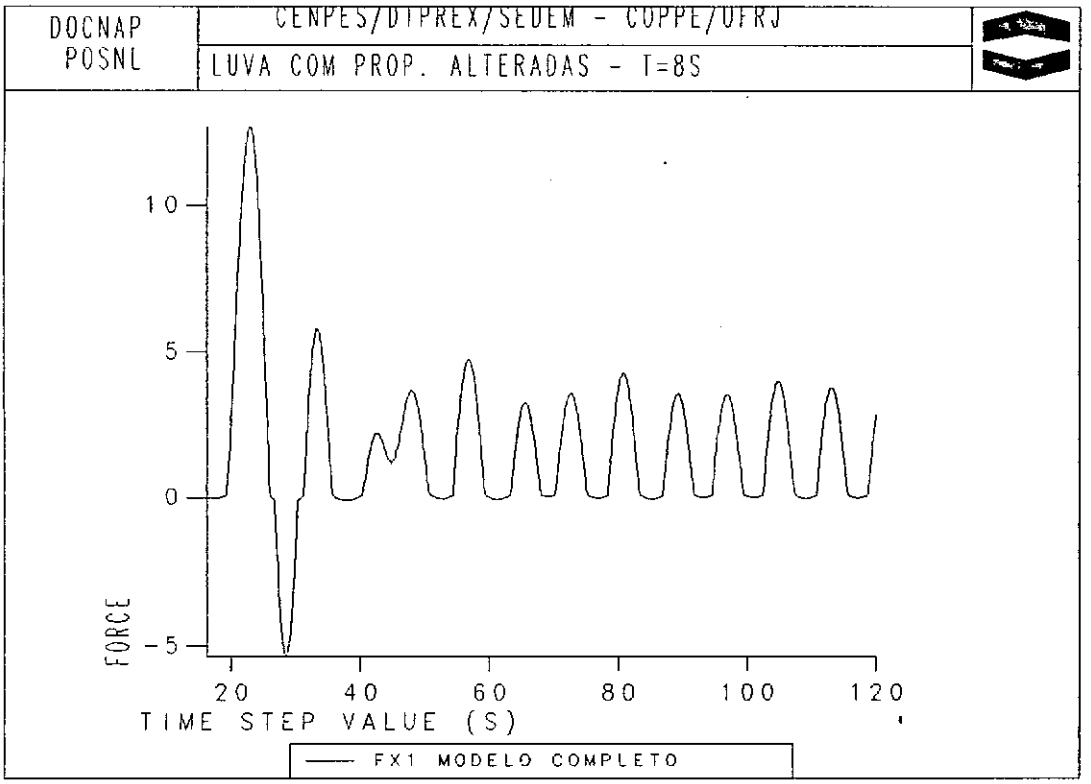


Figura VI.22 - Modelo Completo Luva Flexível Alterada



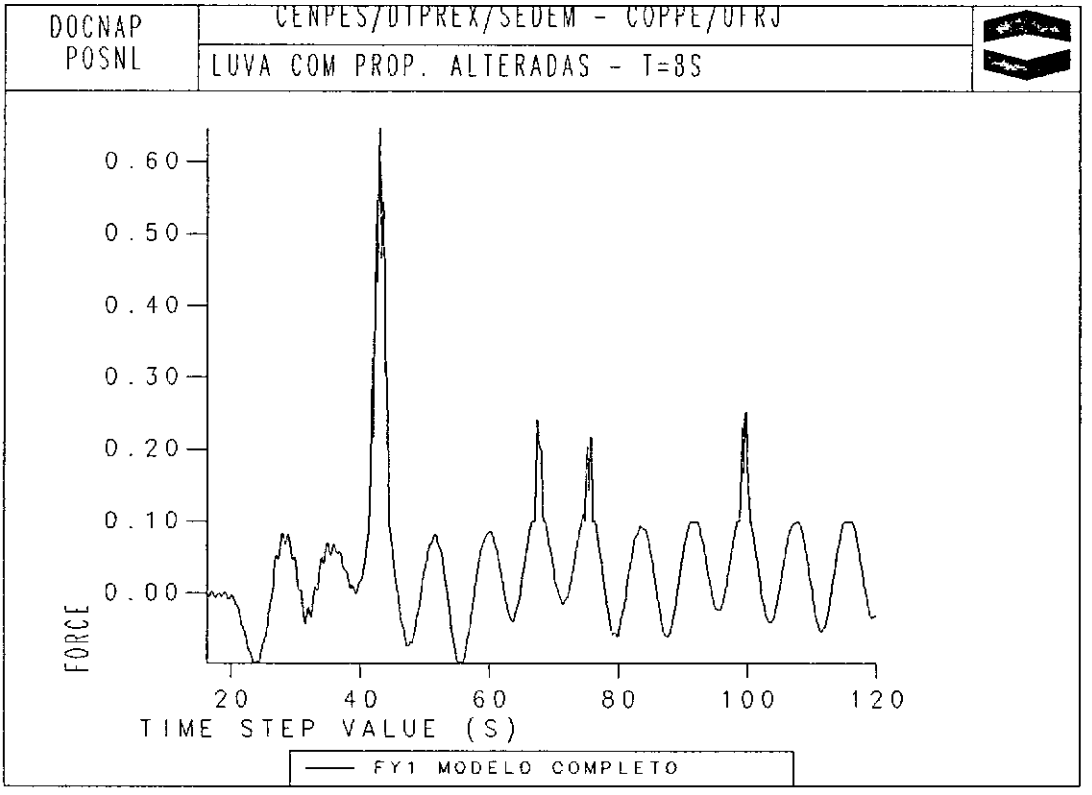
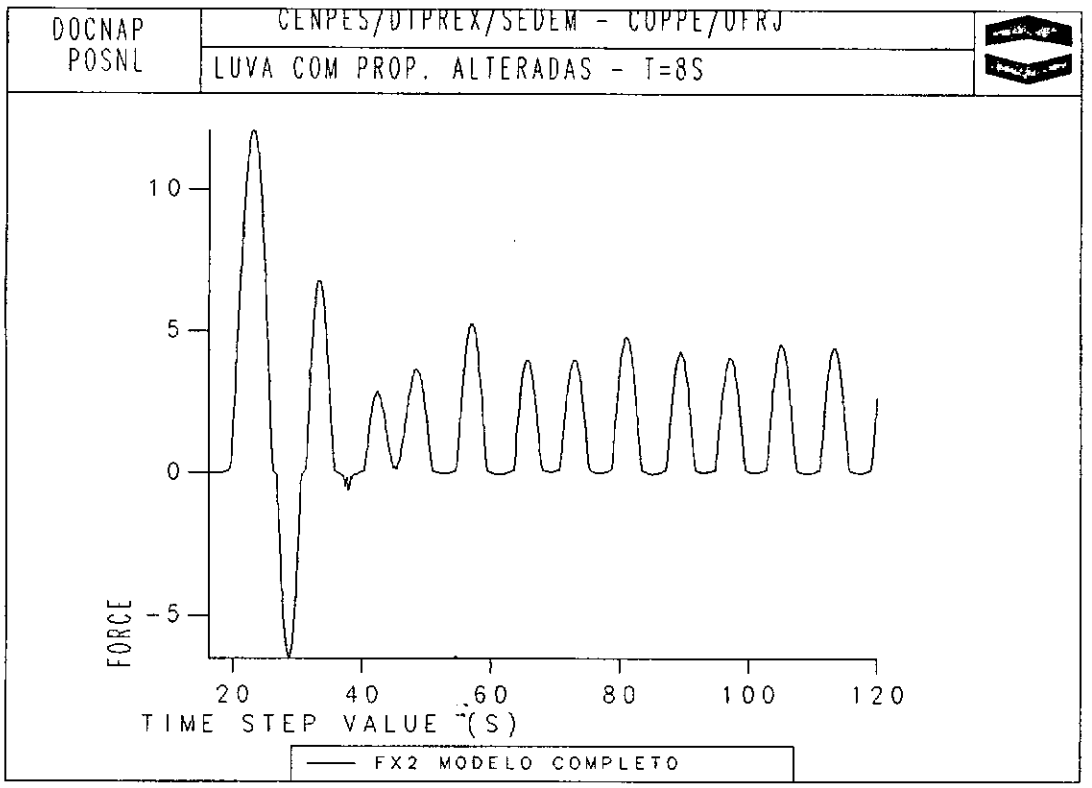


Figura VI.23 - Modelo Completo Luva Flexível Alterada



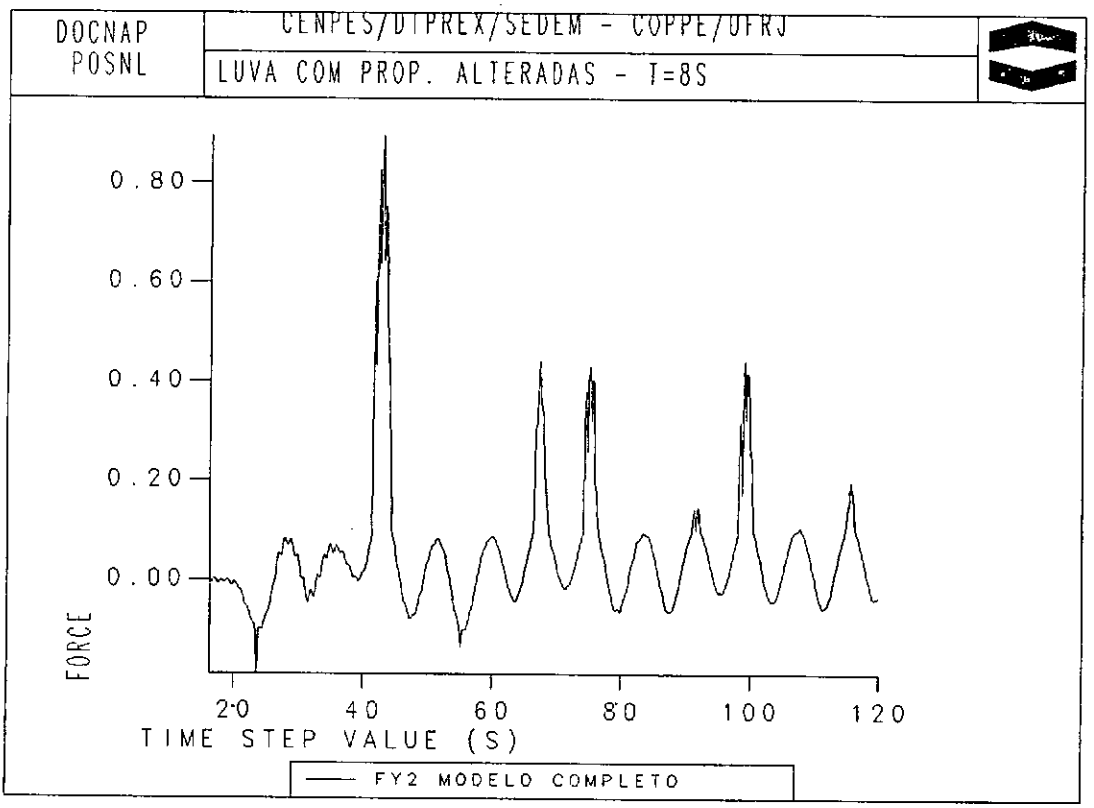


Figura VI.24 - Modelo Completo Luva Flexível Alterada

VI.3 - MODELOS SIMPLIFICADOS

VI.3.1 - LUVA DE DOCAGEM RÍGIDA E ESTACA FLEXÍVEL

VI.3.1.1 - VIBRAÇÕES LIVRES

Os modos e períodos de vibração deste modelo foram obtidos através, basicamente, do procedimento descrito no item VI.2.1.1, acima. As alterações efetuadas foram a substituição da estaca e molas do solo por molas lineares com a rigidez do trecho rígido da mola de docagem deste modelo, ou seja, 90 t/m.

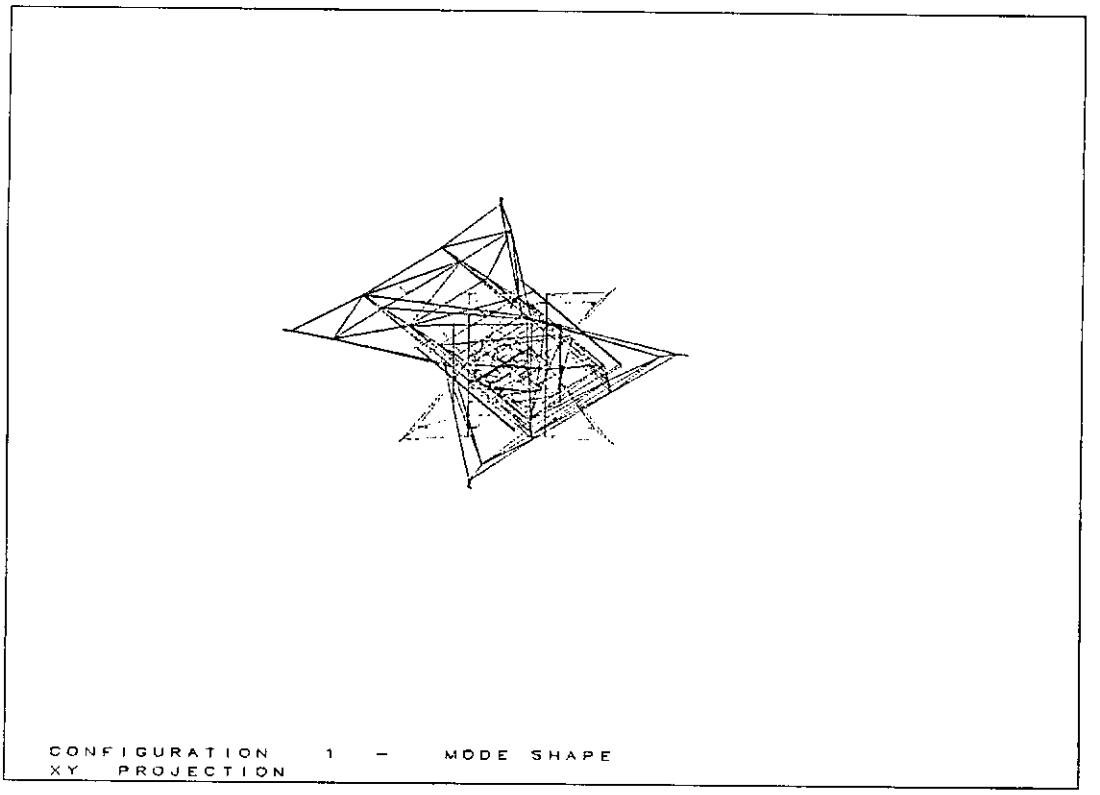
Os valores dos períodos obtidos,para a análise com o modelo da jaqueta com mola de docagem, estão mostrados na tabela VI.7. Os modos de vibração são mostrados nas figuras VI.25 a VI.27.

Verifica-se, pela comparação com a tabela VI.1, que o modelo simplificado representa de maneira satisfatória o comportamento dinâmico observado no modelo completo.

MODO	PERÍODOS (s)	DESCRIÇÃO
1	64.61	Rotação em Z
2	14.52	Tombamento em XZ
3	13.02	Tombamento em YZ
4	7.860	Tombamento em XZ
5	7.473	Tombamento em YZ
6	1.892	Desloc. Vertical
7	0.6298	Elástico Local
8	0.5354	Elástico Local
9	0.5150	Elástico Local
10	0.4840	Elástico Local

TABELA VI.7 - PERÍODOS E MODOS DE VIBRAÇÃO

JAQUETA COM MOLA DE DOCAGEM



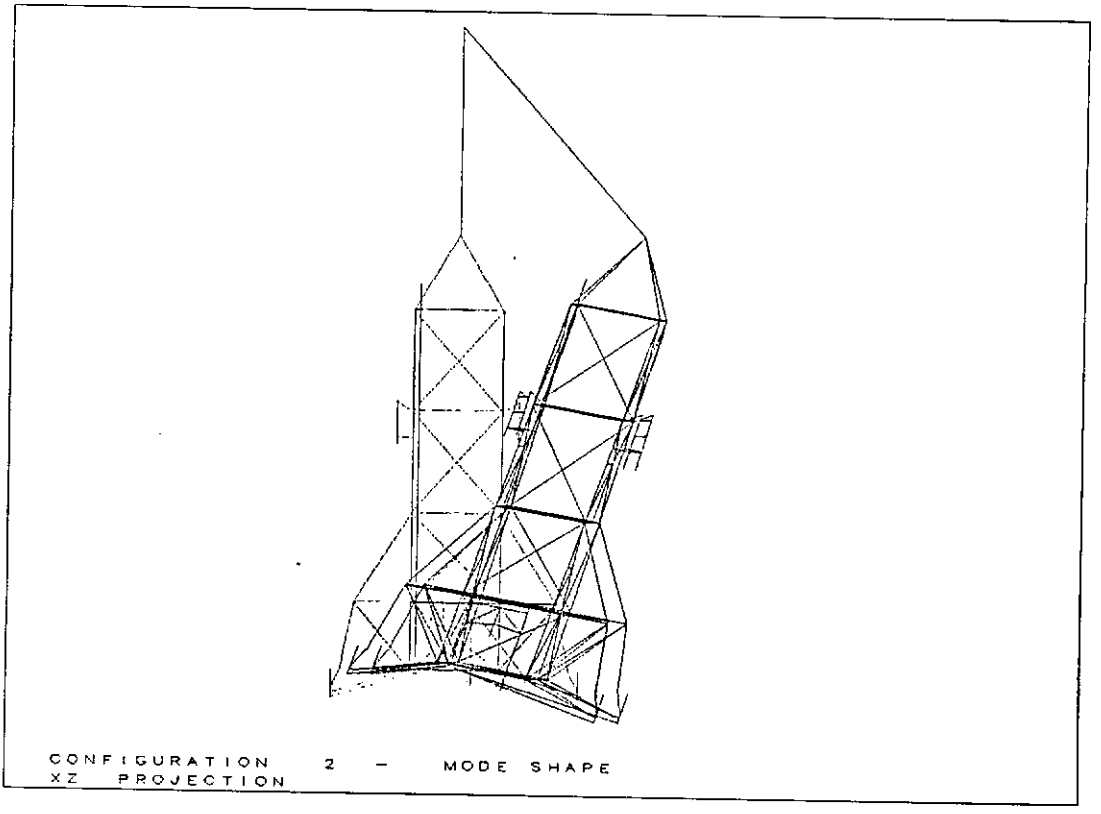
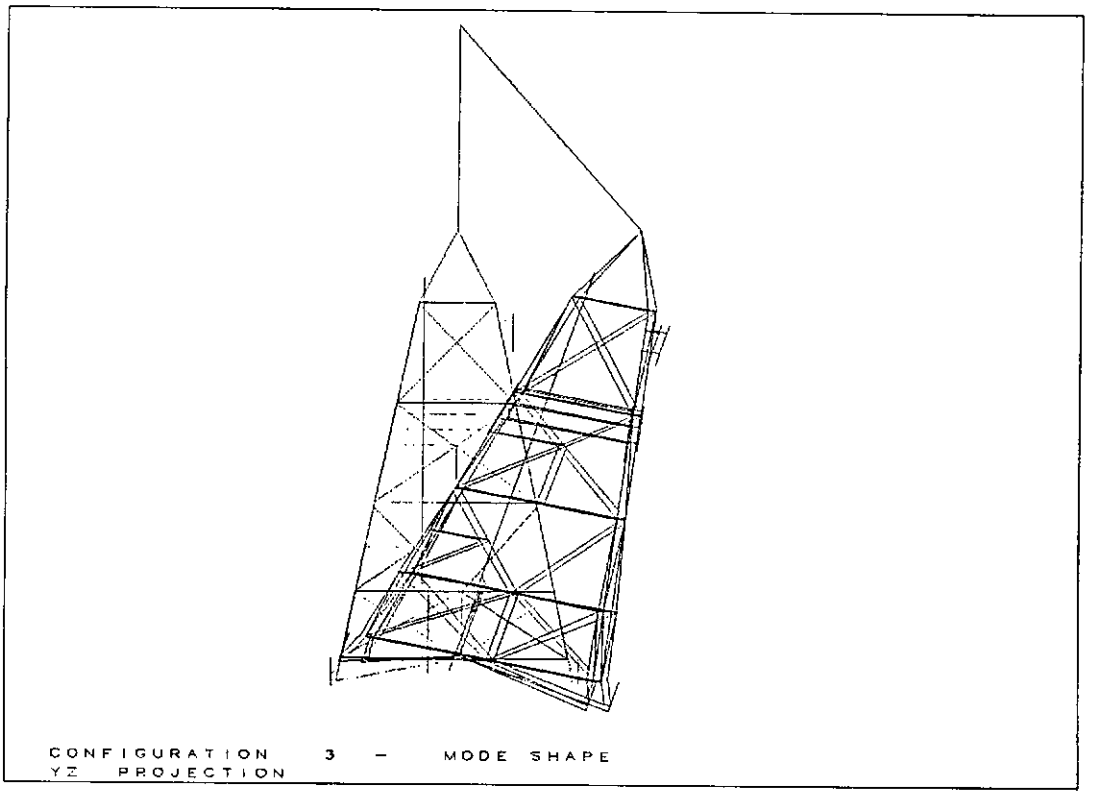


Figura VI.25 - Modos de Vibração 1 e 2



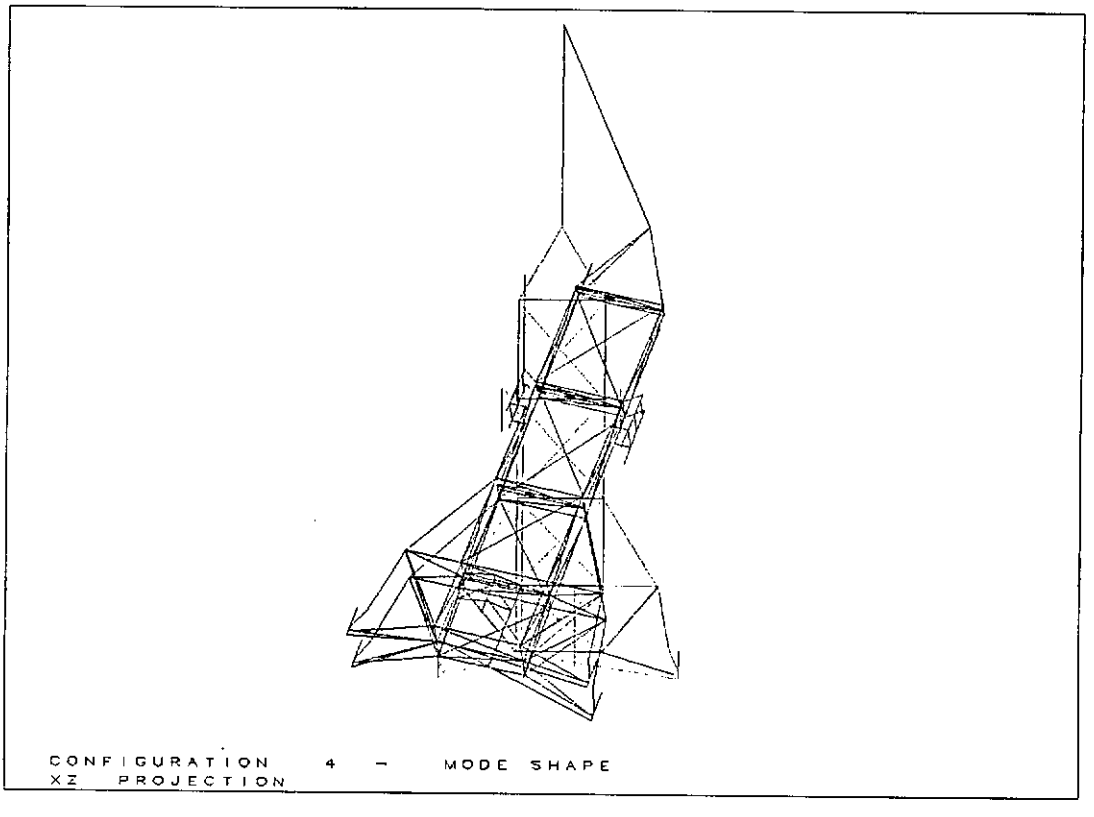
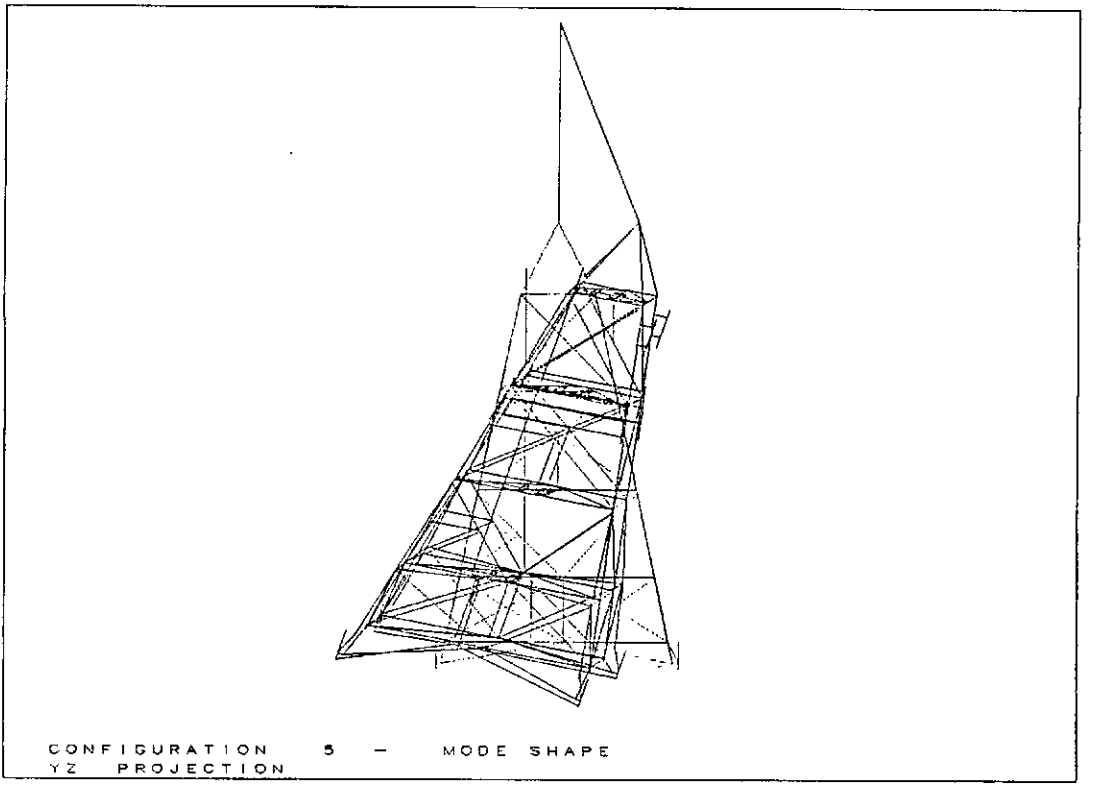


Figura VI.26 - Modos de Vibração 3 e 4



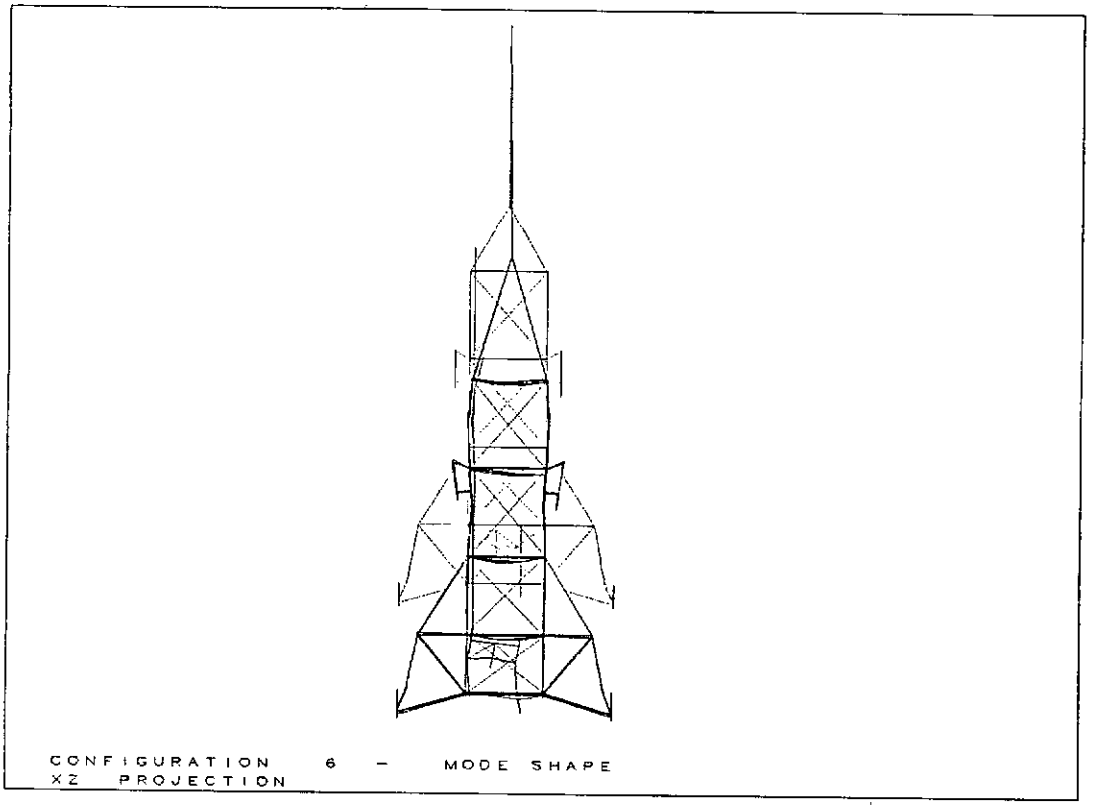


Figura VI.27 - Modos de Vibração 5 e 6

VI.3.1.2 - INTERVALO DE INTEGRAÇÃO

O intervalo de integração para esta análise, a partir da equação VI.2, seria:

$$\Delta t = \frac{T_{mín.}}{10} = \frac{1.892}{10} \cong 0.20 \text{ s}$$

Adotou-se $\Delta t = 0.25$ s em busca de uma maior eficiência computacional, com sacrifício da melhor integração do sexto modo de vibração apresentado na figura VI.27 - deslocamento vertical - uma vez que consideramos este modo de vibração de menor importância para os objetivos desta análise.

VI.3.1.3 - MOLAS DE DOCAGEM

Neste modelo, como previamente descrito, a mola de docagem utilizada substitui apenas a estaca e o solo marinho em virtude da luva de docagem não possuir flexibilidade global por estar com sua extremidade inferior conectada a estrutura da jaqueta.

As seguintes configurações foram analisadas:

- Luva conectada a 1 mola de docagem;

- Luva conectada a 2 molas de docagem.

Os valores para as funções força *versus* deslocamento encontram-se nas tabelas V.7 e V.8. Cabe salientar que a maior reação adotada para o trecho da folga foi de 0.1 t e não foram observados problemas na convergência da análise não-linear.

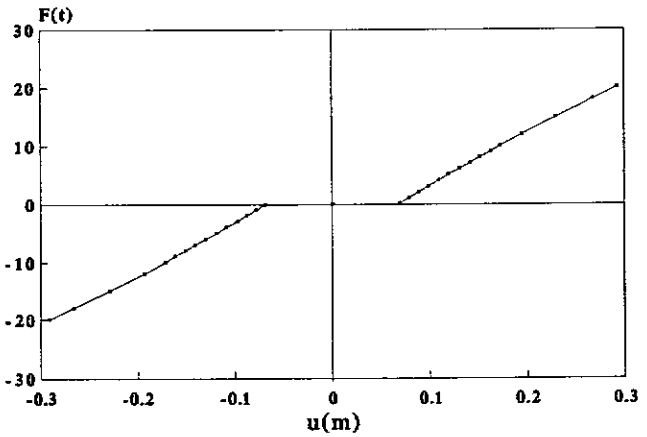


Figura VI.28 - Mola de Docagem

VI.3.1.4 - RESULTADOS

Neste item apresentamos os resultados para a configuração analisada deste modelo com a luva conectada a duas molas de docagem. Na comparação com o modelo completo, verifica-se que o modelo simplificado apresenta bons resultados. No Apêndice 1, são apresentados resultados para este modelo com a mola de docagem conectada ao nó do cone da luva de docagem.

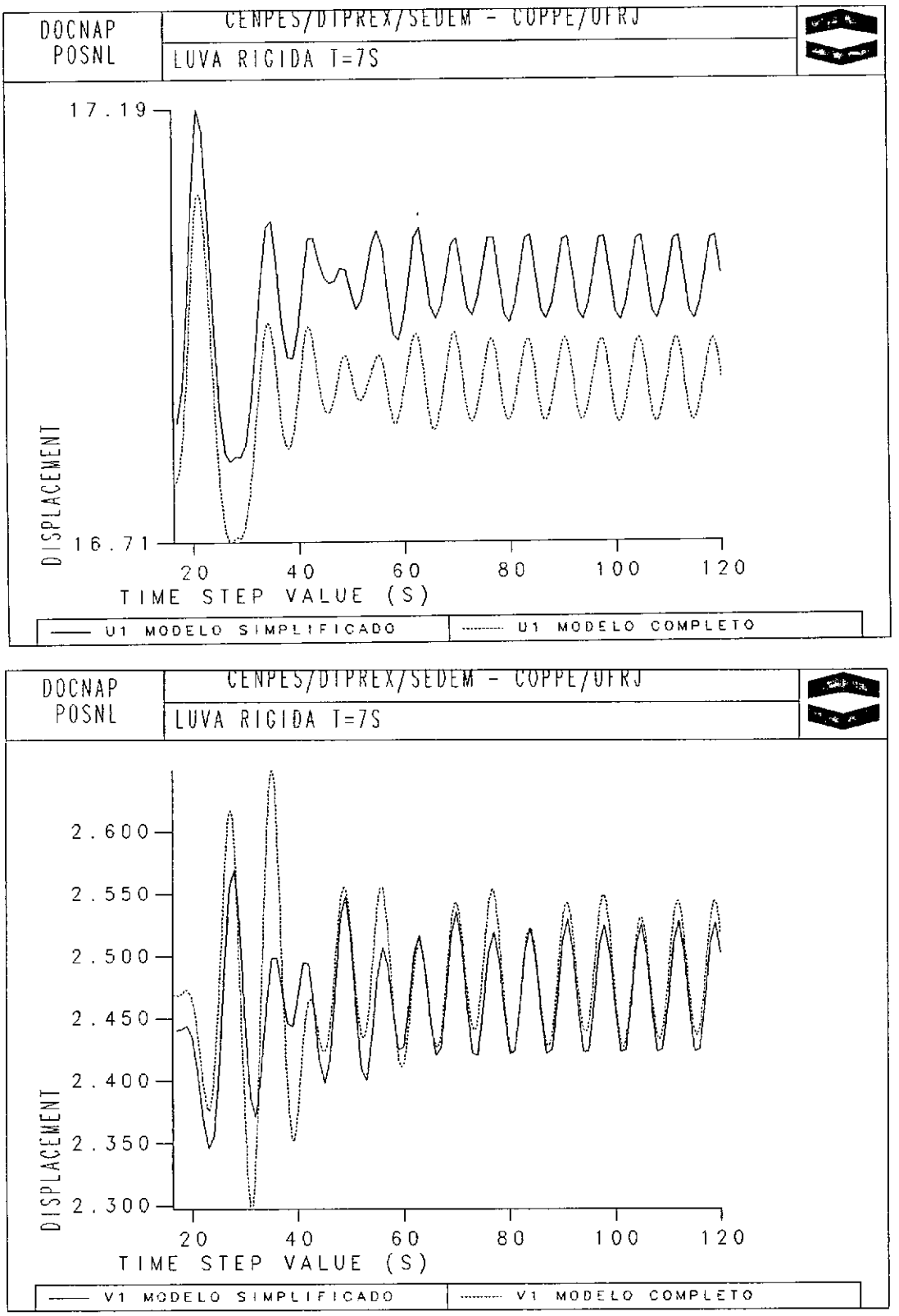
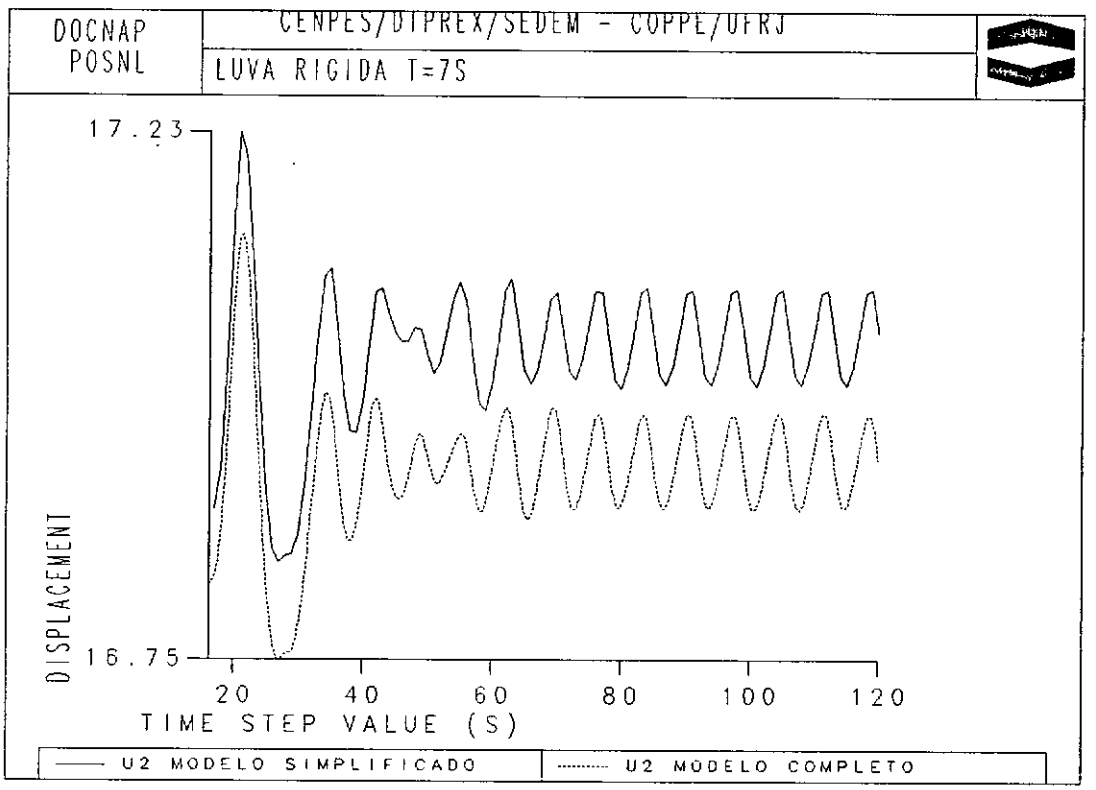


Figura VI.29 - Modelo Simplificado Luva Rígida



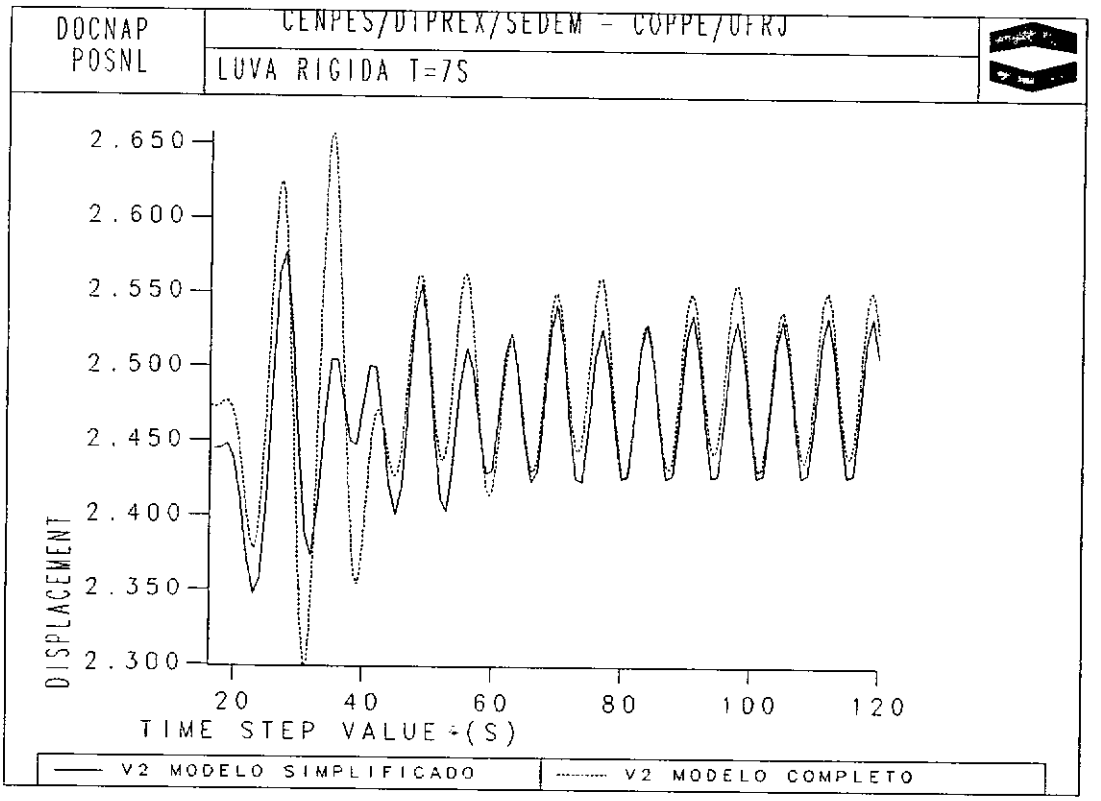
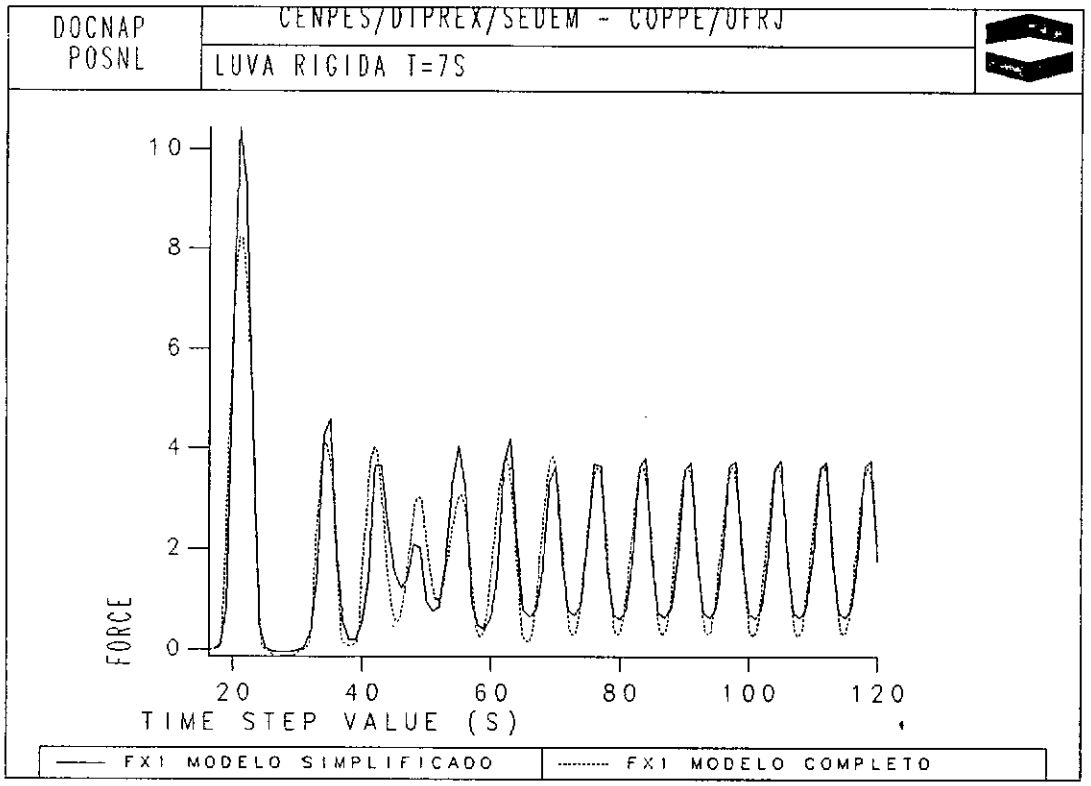


Figura VI.30 - Modelo Simplificado Luva Rígida



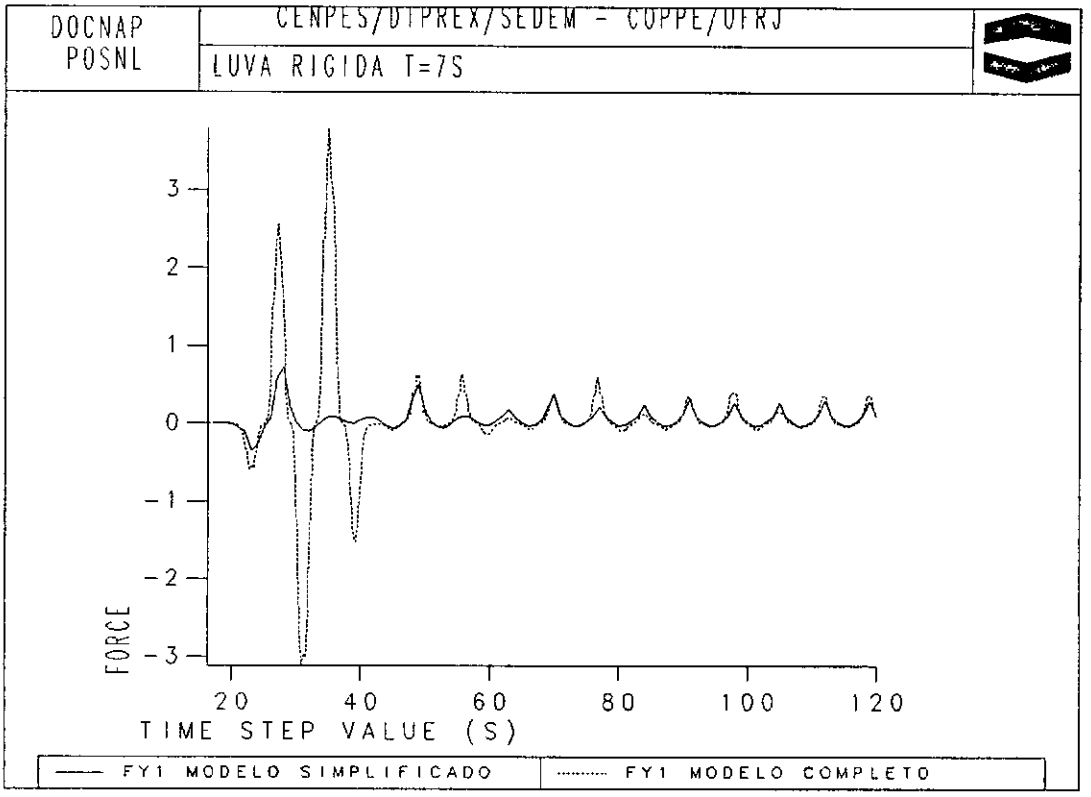
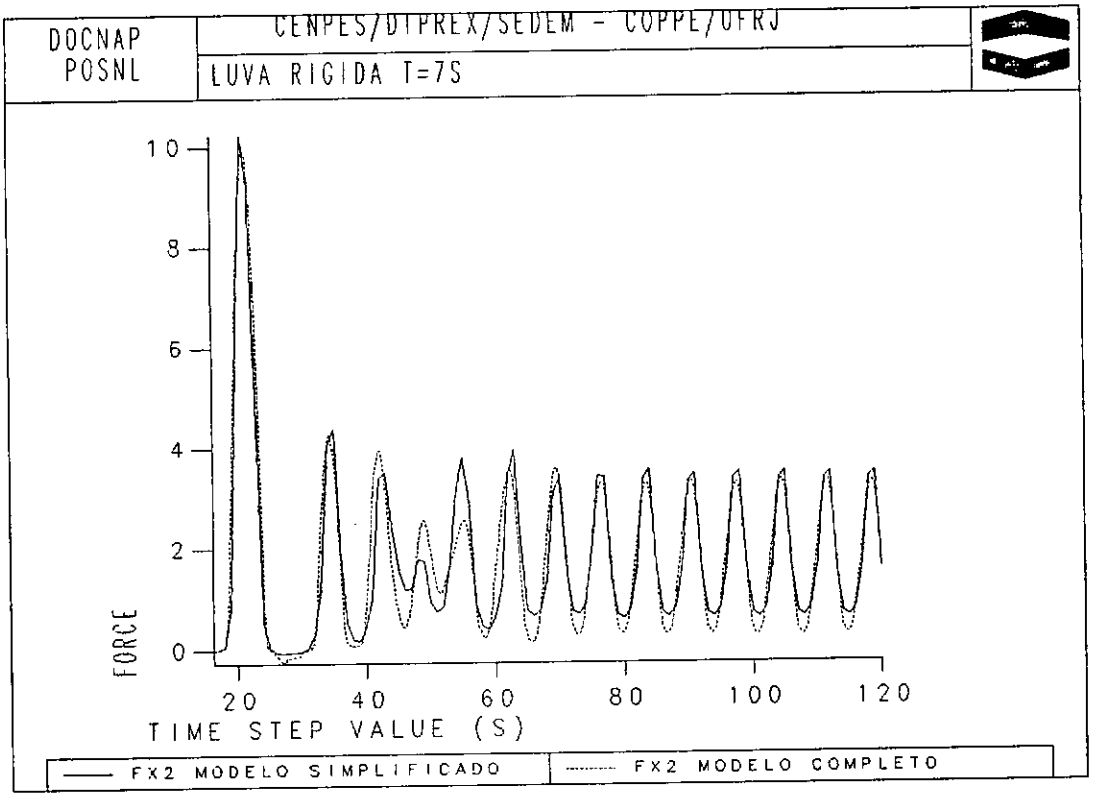


Figura VI.31 - Modelo Simplificado Luva Rígida



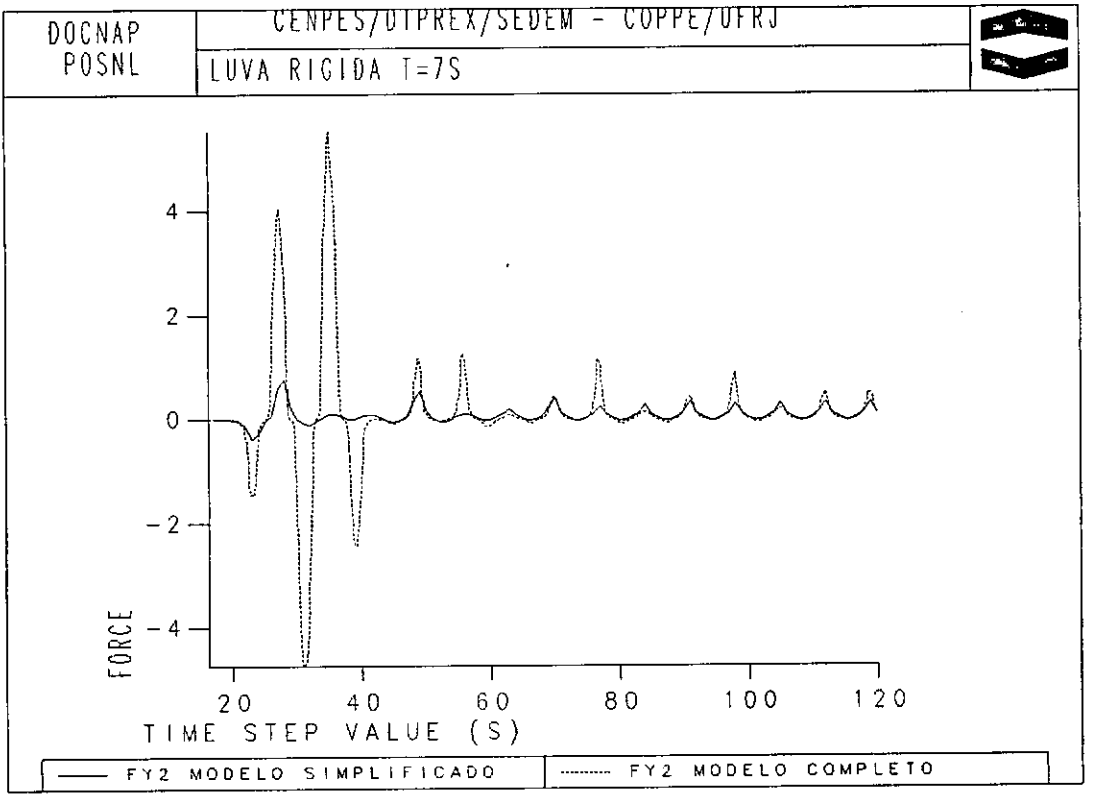


Figura VI.32 - Modelo Simplificado Luva Rígida

VI.3.2 - LUVA DE DOCAGEM E ESTACA FLEXÍVEIS

VI.3.2.1 - PROCEDIMENTO USUAL

Na prática usual em análises de docagem, onde as incógnitas principais são os movimentos e as reações nos vínculos externos, a jaqueta é tratada como corpo rígido [1,2,3,10].

A principal razão para se modelar a jaqueta como um corpo rígido está em eliminar a necessidade de se integrar corretamente o comportamento dinâmico local da luva de docagem, uma vez que ele não é importante para os resultados globais. Desta forma, realiza-se a análise com intervalos de tempo bem maiores que os necessários em uma análise completa - neste estudo chegou-se a valores 4 a 5 vezes maiores.

Para se obter o comportamento da jaqueta como um corpo rígido torna-se necessário travejar a extremidade inferior da luva de docagem. Isto é feito acrescentando-se elementos fictícios - sem massa, peso e empuxo mas com rigidez normal - unindo o nó da extremidade da luva de docagem a pontos rígidos, neste exemplo, as pernas da jaqueta.

VI.3.2.1.1 - MOLAS DE DOCAGEM

A mola de docagem é aplicada na extremidade inferior da luva de e deve representar a flexibilidade do conjunto formado pela luva, estaca de docagem e o solo marinho.

Foram realizadas análises com as três molas de docagem descritas no item V.4.2.

Os valores para as funções força *versus* deslocamento encontram-se nas tabelas V.9 e V.10. Cabe salientar que a maior reação adotada para o trecho da folga foi de 0.1 t e não foram observados problemas na convergência da análise não-linear.

VI.3.2.1.2 - VIBRAÇÕES LIVRES

Foram realizadas análises com molas lineares com rijezas de 86 t/m, 155 t/m e 194 t/m; correspondendo às curvas F x Δ, F x Δ1 e F x Δ2, respectivamente.

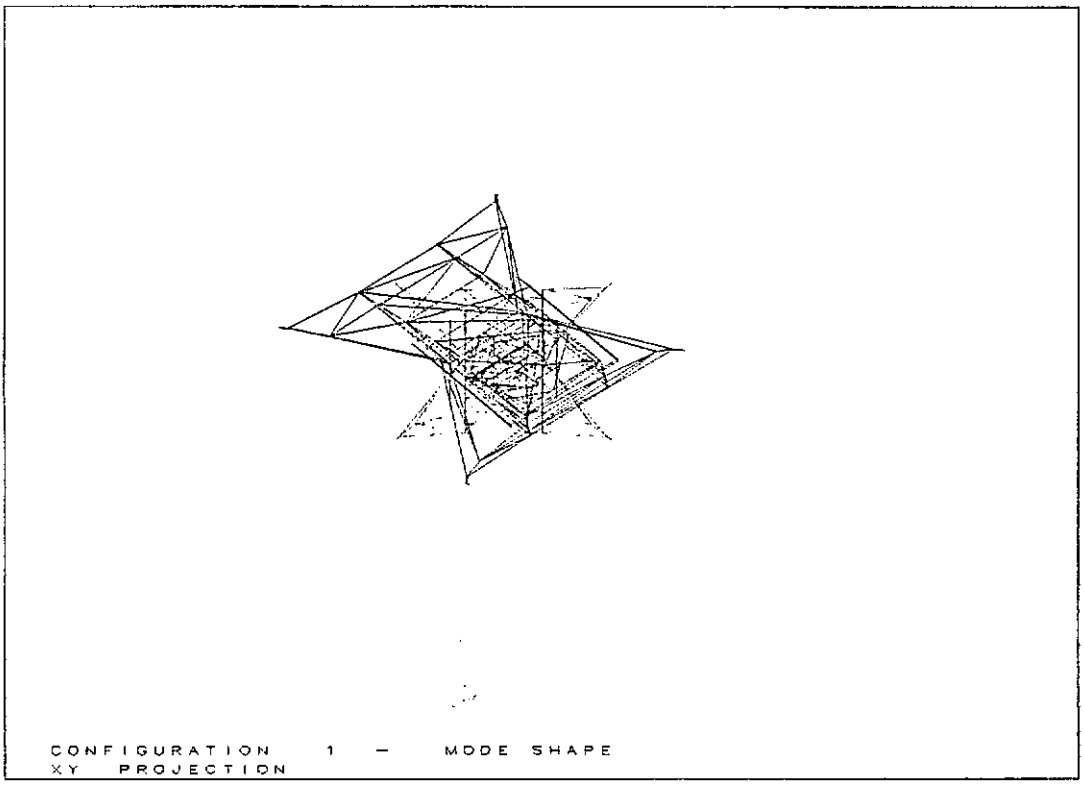
Os valores dos períodos de vibração e descrição dos respectivos modos, obtidos nas três análises, são apresentados na tabela VI.8. São mostrados apenas os modos de vibração do modelo com a mola F x Δ nas figuras VI.33 a VI.35, uma vez que todos os modelos apresentaram comportamento semelhante.

Verifica-se, pela comparação com a tabela VI.5, que nenhum dos modelos simplificados representa de maneira satisfatória o comportamento dinâmico observado no modelo completo nem quantitativamente, pois seus períodos de vibração são diferentes, nem qualitativamente, pois alteraram-se os planos preferenciais de vibração dos modos de corpo rígido.

MODO	PERÍODOS (s)			DESCRIÇÃO
	F x Δ	F x Δ1	F x Δ2	
1	66.14	66.09	66.06	Rotação em Z
2	14.59	14.48	14.45	Tombamento em XZ
3	13.06	12.98	12.96	Tombamento em YZ
4	9.076	6.942	6.186	Tombamento em XZ
5	8.702	6.647	5.926	Tombamento em YZ
6	1.940	1.940	1.940	Desloc. Vertical
7	0.6312	0.6310	0.6309	Elástico Local
8	0.5291	0.5289	0.5288	Elástico Local
9	0.5085	0.5085	0.5085	Elástico Local
10	0.4537	0.4536	0.4536	Elástico Local

TABELA VI.8 - PERÍODOS E MODOS DE VIBRAÇÃO

JAQUETA COM MOLA DE DOCAGEM



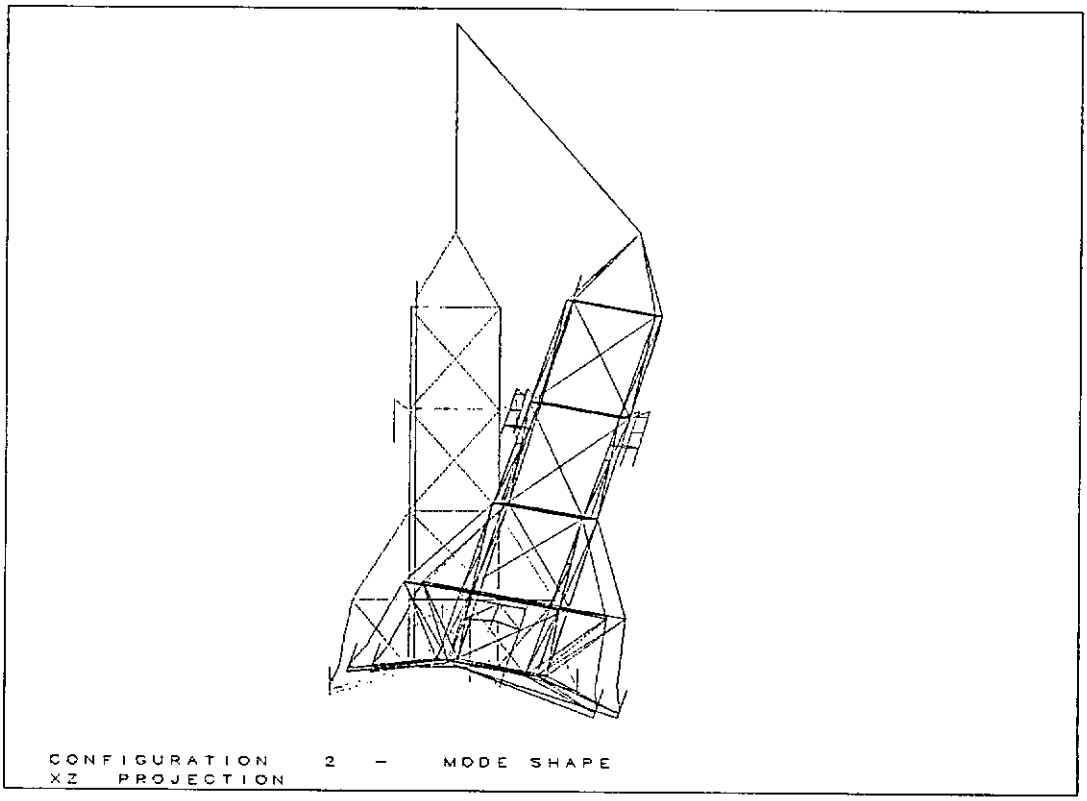
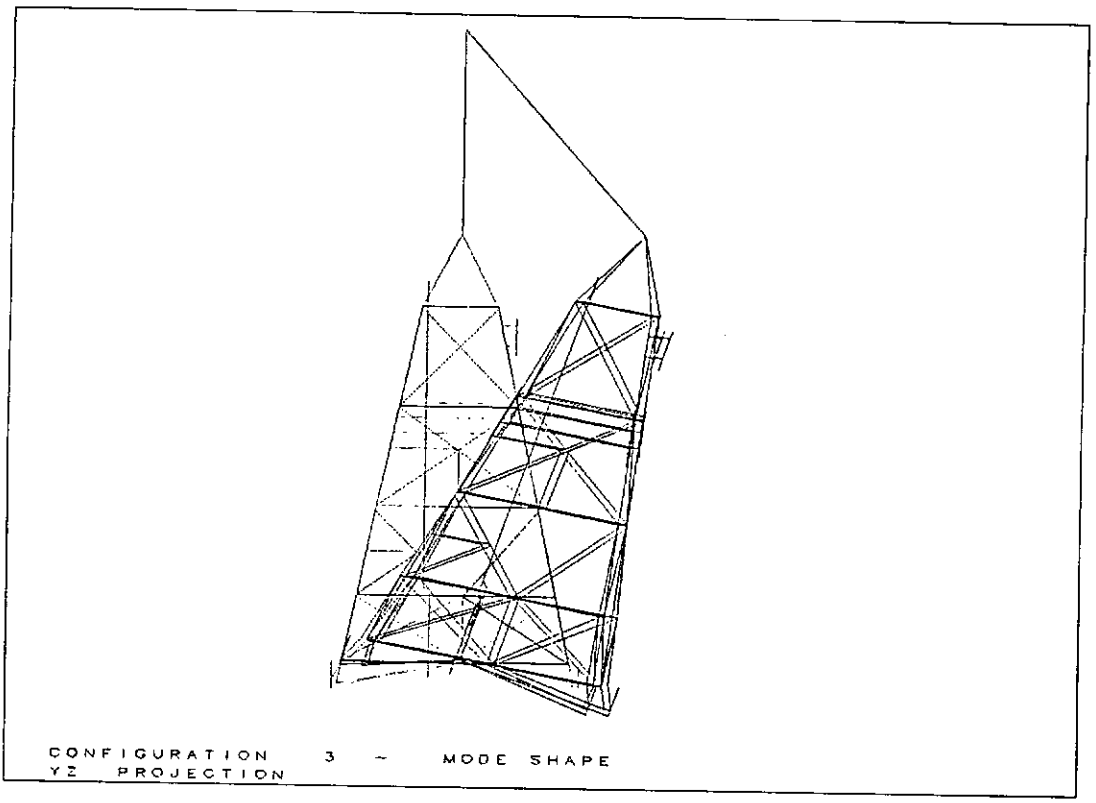


Figura VI.33 - Modos de Vibração 1 e 2



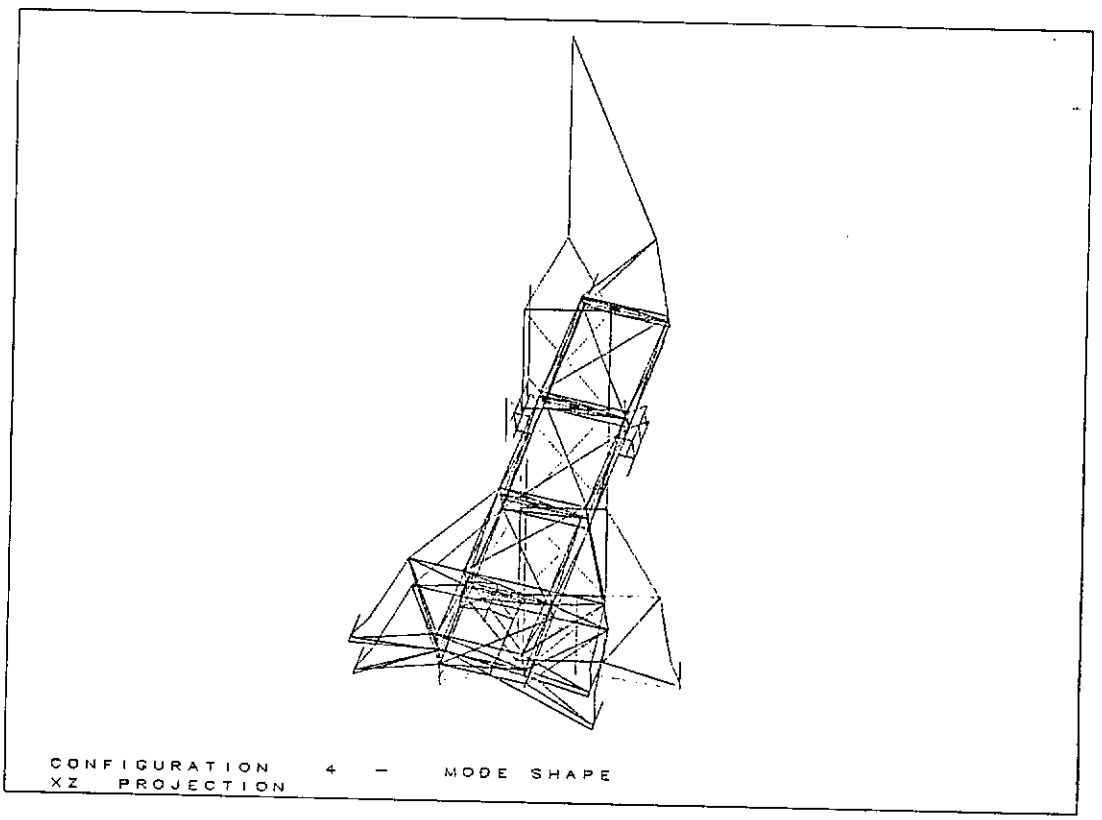
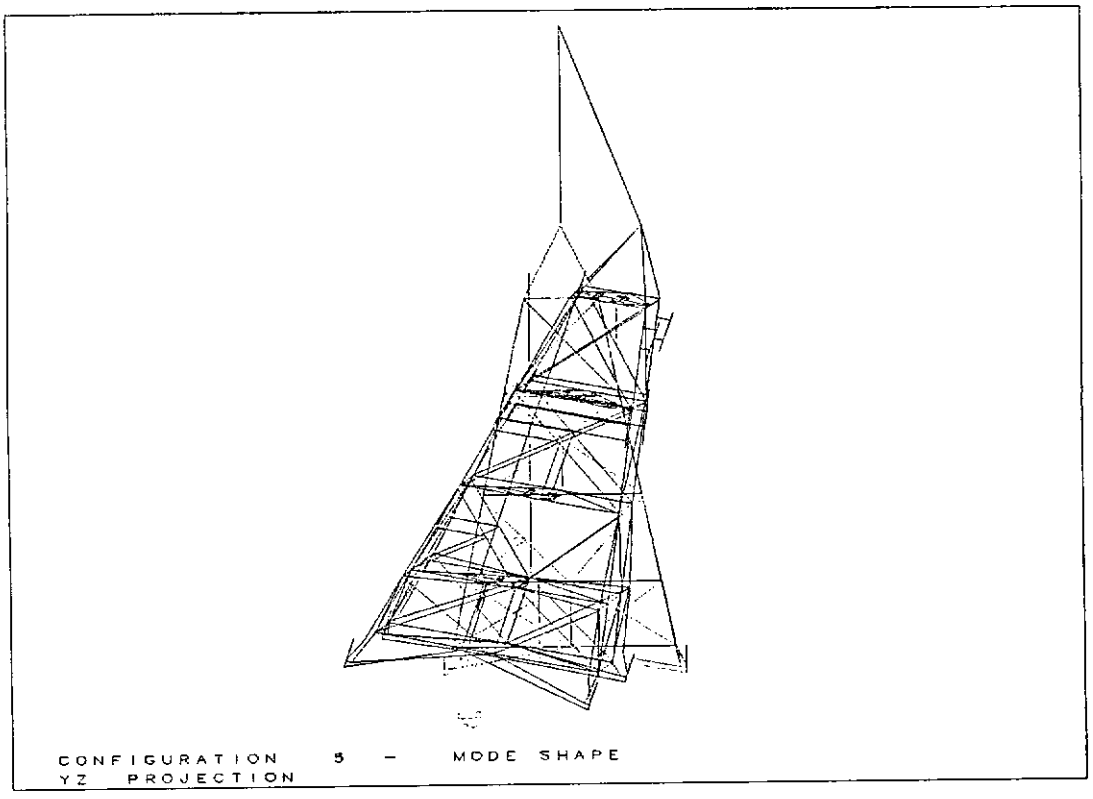


Figura VI.34 - Modos de Vibração 3 e 4



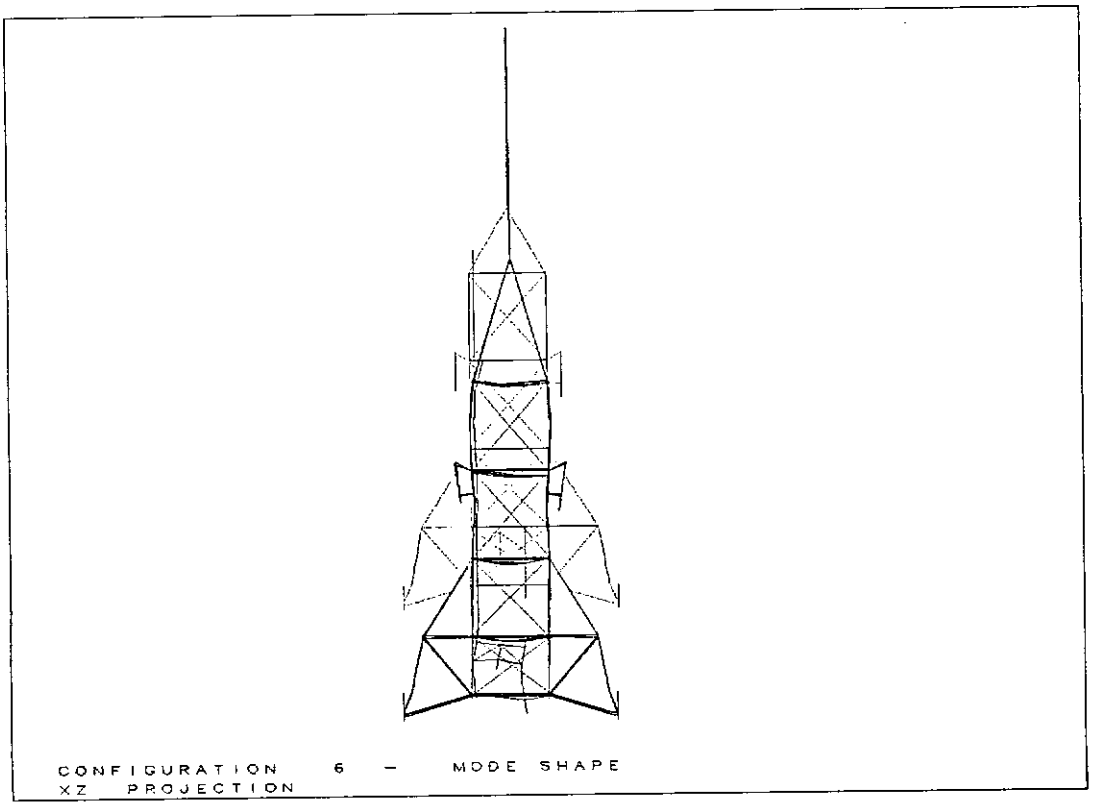


Figura VI.35 - Modos de Vibração 5 e 6

VI.3.2.1.3 - RESULTADOS

Embora tenhamos verificado que o modelo simplificado apresentado não representa de maneira satisfatória o modelo completo, apresentaremos os resultados para as configurações analisadas juntamente com os resultados da proposta 1, analisada a seguir. O intervalo de integração adotado para esta análise foi de 0.25 s.

VI.3.2.2 - PROPOSTA 1

Este modelo foi criado com base na verificação que, em virtude da mola de docagem ter sido aplicada num ponto artificialmente enrijecido da estrutura, seu centro de rotação se deslocou para a elevação inferior da jaqueta provocando a alteração dos seus modos de vibração.

Com o objetivo de obtermos um modelo simplificado que representasse de maneira satisfatória o comportamento dinâmico do modelo completo foi realizada a análise de um modelo com a mola de docagem aplicada na extremidade superior da luva, mantendo-se os membros fictícios de modo a eliminarmos a vibração local da luva de docagem.

VI.3.2.2.1 - MOLAS DE DOCAGEM

A mola de docagem aplicada na extremidade superior da luva deve representar a flexibilidade do conjunto formado pela luva, estaca de docagem e o solo marinho.

Foram realizadas análises com apenas a mola de docagem F x Δ descrita no item V.4.2.

A maior reação adotada para o trecho da folga foi de 0.1 t e não foram observados problemas na convergência da análise não-linear.

VI.3.2.2.2 - VIBRAÇÕES LIVRES

As molas lineares utilizadas nas análises de vibrações livres possuem a rigidez da mola de docagem deste modelo, ou seja, 68 t/m.

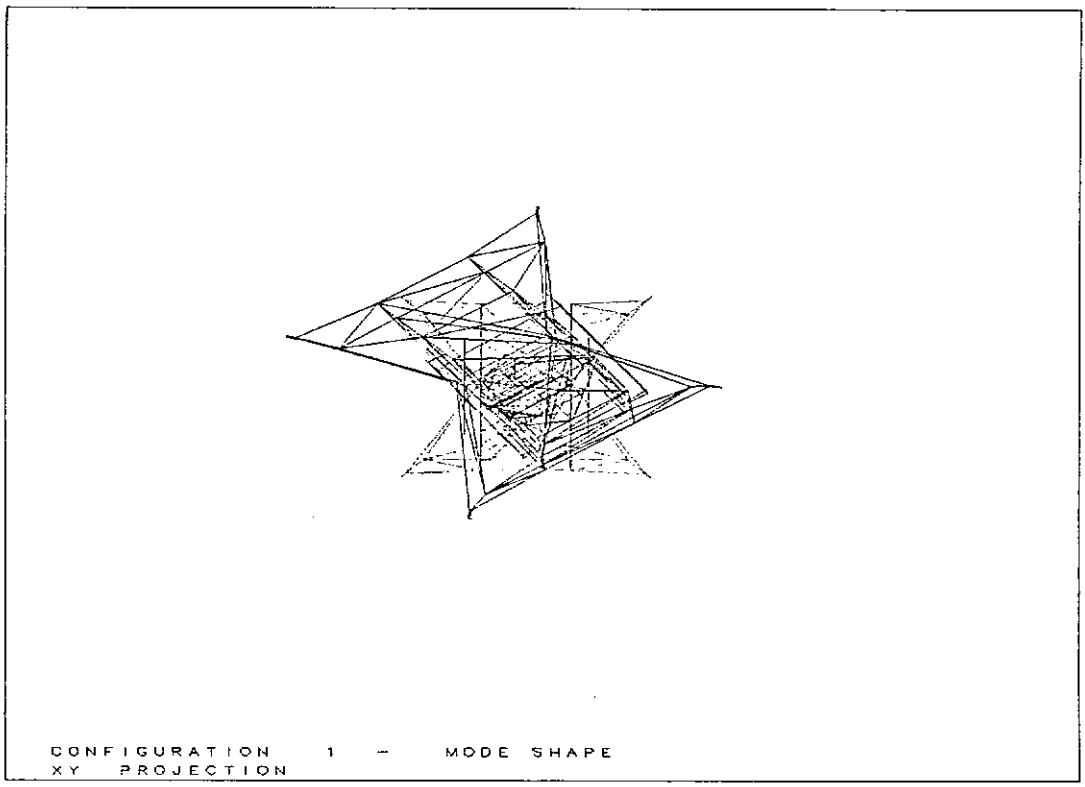
Os valores dos períodos obtidos,para a análise com o modelo da jaqueta com mola de docagem, estão mostrados na tabela VI.9. Os modos de vibração são mostrados nas figuras VI.36 a VI.38.

Verifica-se, pela comparação com a tabela VI.5, que este modelo proposto, também não representa de maneira satisfatória o comportamento dinâmico observado no modelo completo nem quantitativamente, pois seus períodos de vibração são diferentes, nem qualitativamente, pois alteraram-se os planos preferenciais de vibração dos modos de corpo rígido.

MODO	PERÍODOS (s)	DESCRIÇÃO
1	65.86	Rotação em Z
2	14.67	Tombamento em XZ
3	13.33	Tombamento em YZ
4	5.766	Tombamento em XZ
5	5.551	Tombamento em YZ
6	1.940	Desloc. Vertical
7	0.6311	Elástico Local
8	0.5291	Elástico Local
9	0.5083	Elástico Local
10	0.4537	Elástico Local

TABELA VI.9 - PERÍODOS E MODOS DE VIBRAÇÃO

JAQUETA COM MOLA DE DOCAGEM



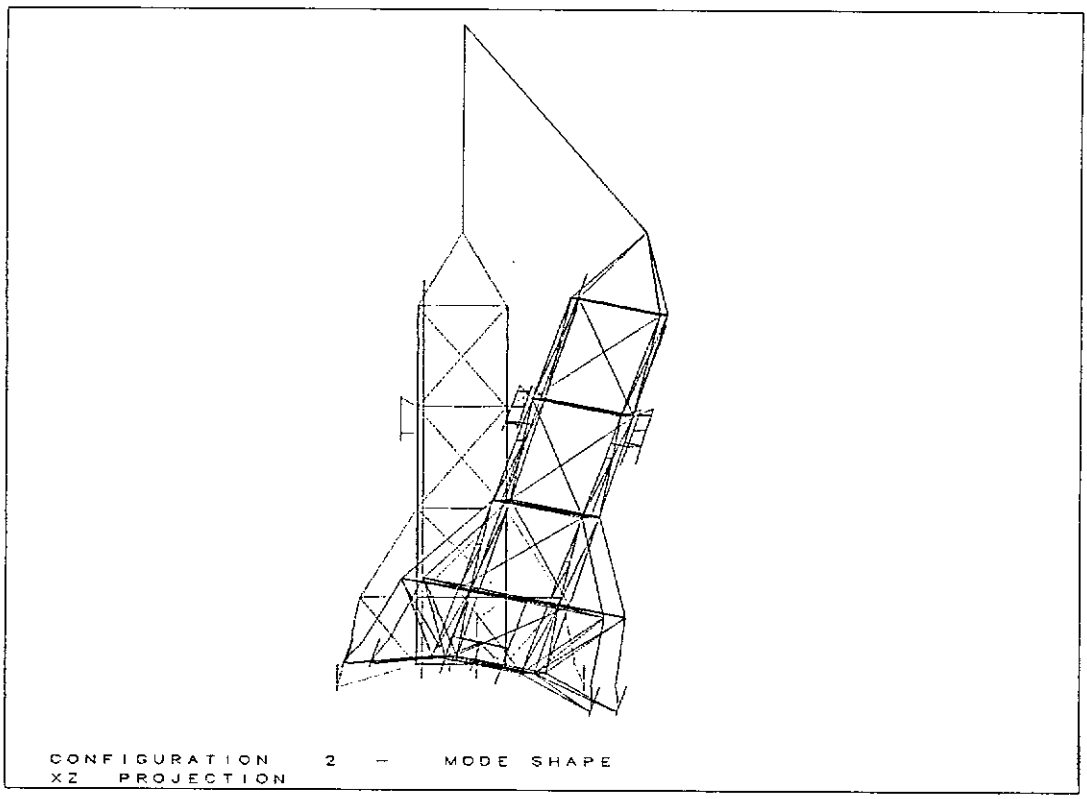
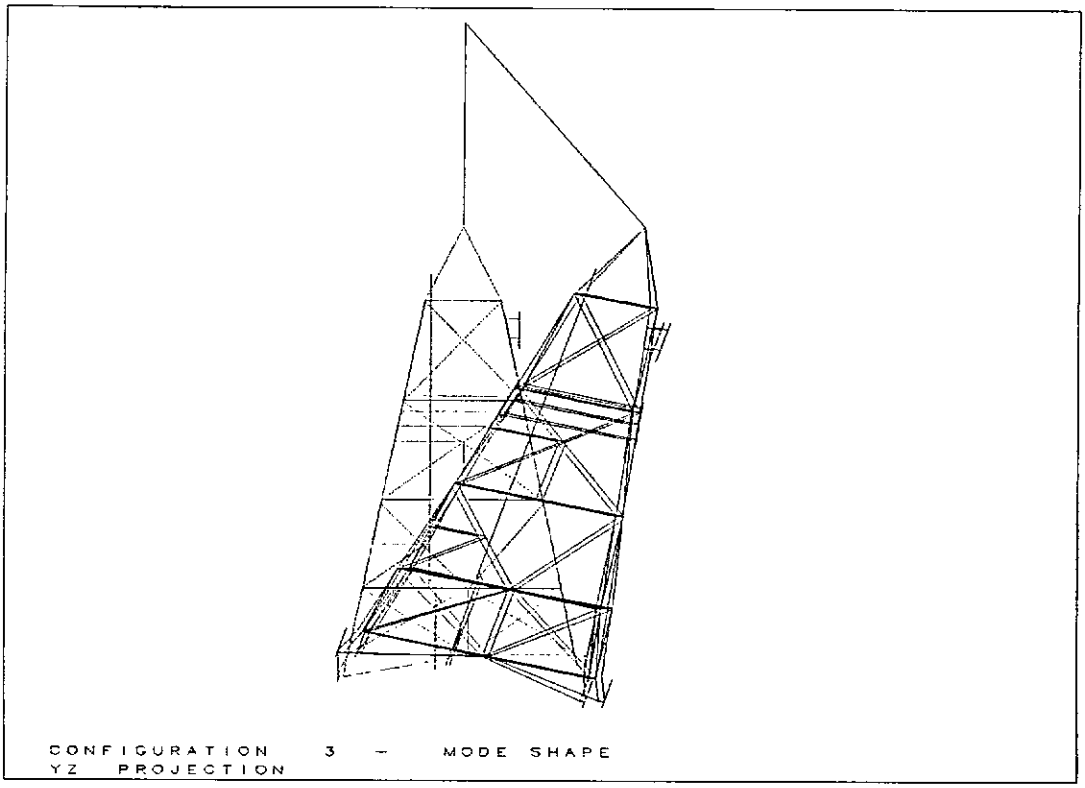


Figura VI.36 - Modos de Vibração 1 e 2



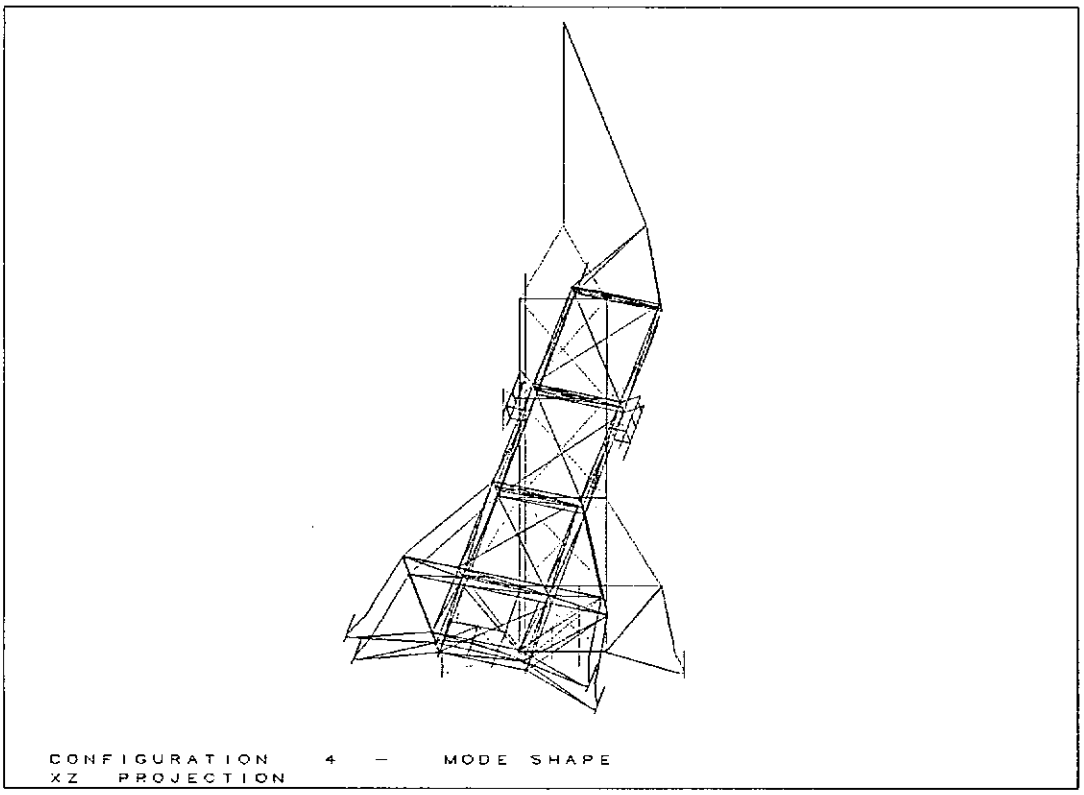
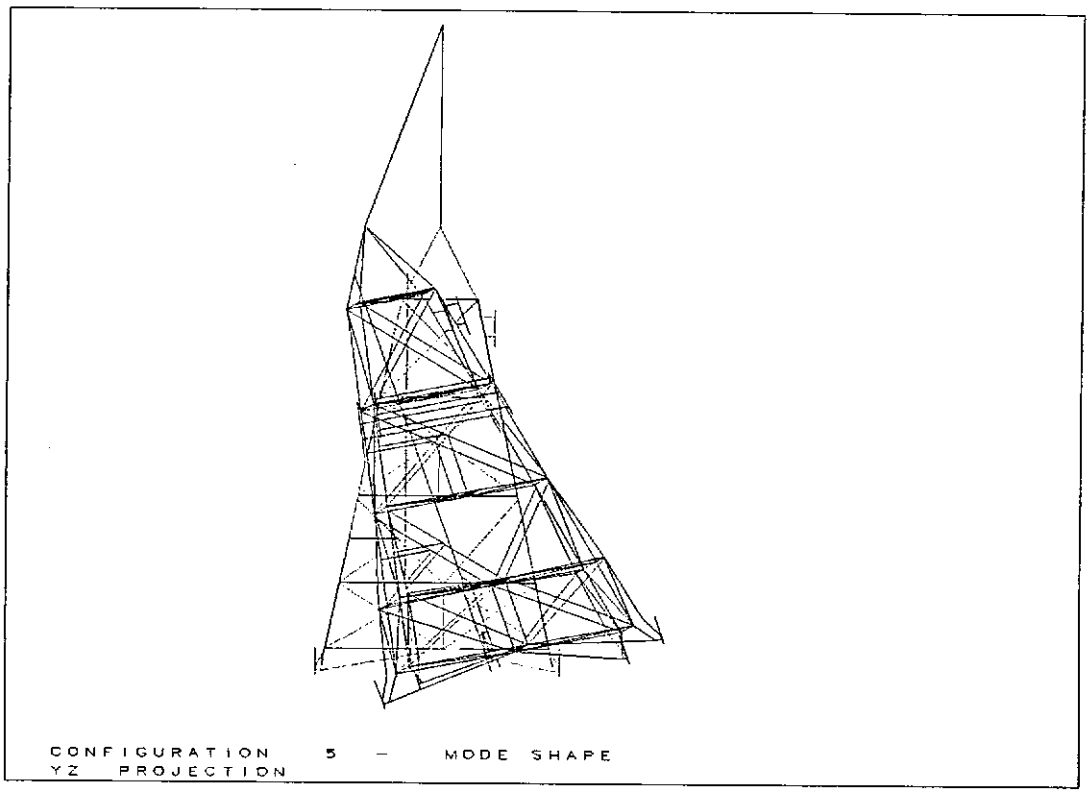


Figura VI.37 - Modos de Vibração 3 e 4



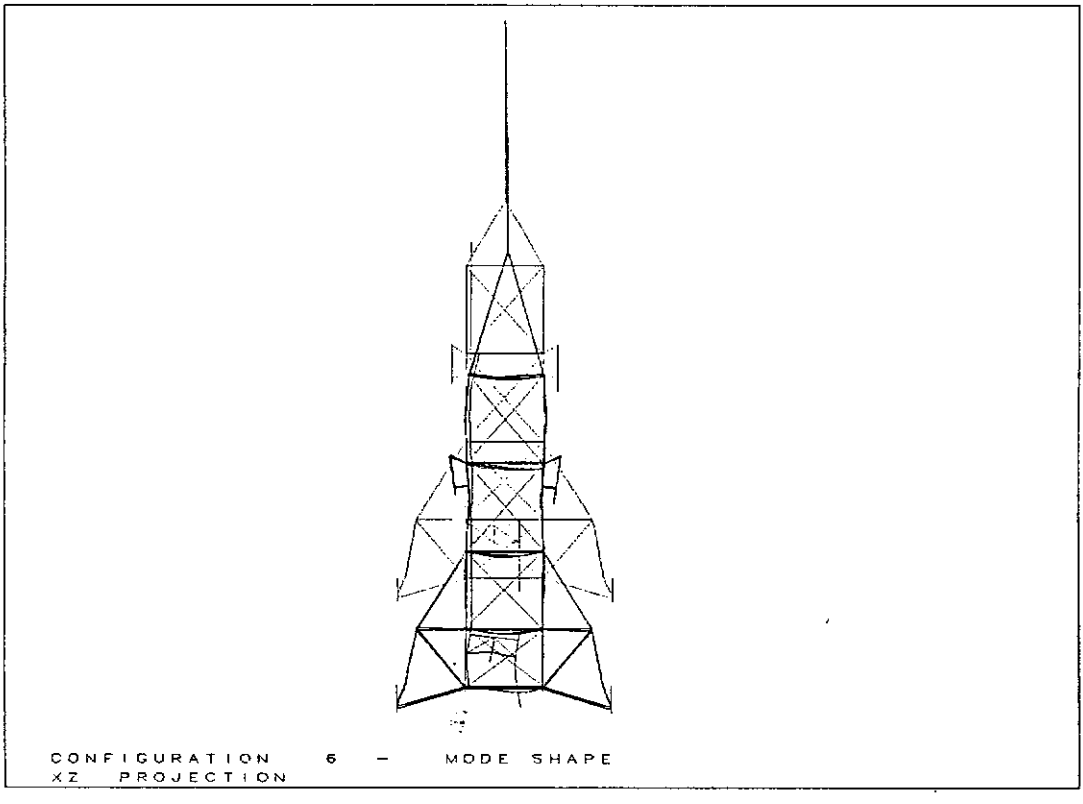
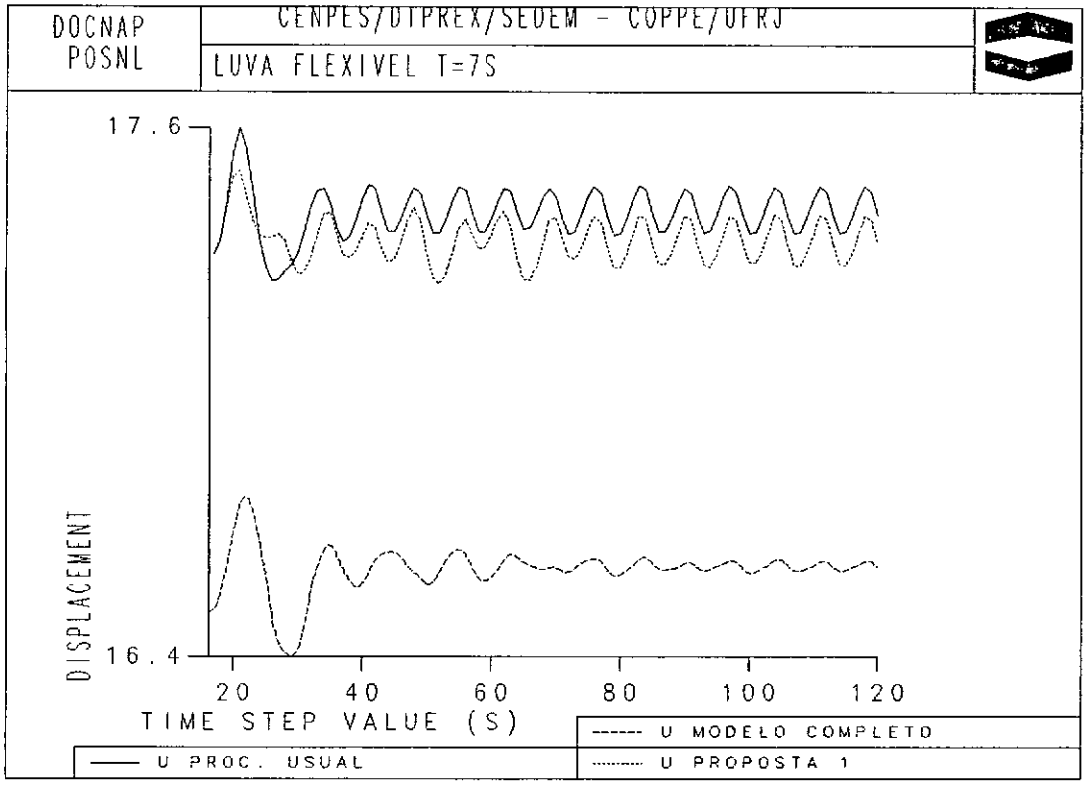


Figura VI.38 - Modos de Vibração 5 e 6

VI.3.2.2.3 - RESULTADOS

A seguir, encontram-se os gráficos que traduzem os resultados em termos de deslocamentos, para os nós da extremidade inferior da luva, e forças atuantes, para na mola de docagem, tanto para o modelo usualmente adotado quanto para o modelo da proposta 1, comparando-os com os resultados obtidos com o modelo completo. Nestas análises, foi adotado um intervalo de integração de 0.25 s.

Através destes gráficos, verifica-se o que havia sido adiantado pela análise preliminar de vibrações livres, ou seja, nem o modelo do procedimento usual, que traduz o atual estado da arte dentro das bibliografias disponíveis, nem o modelo apresentado na proposta 1, representam de maneira satisfatória o modelo completo de uma análise de docagem.



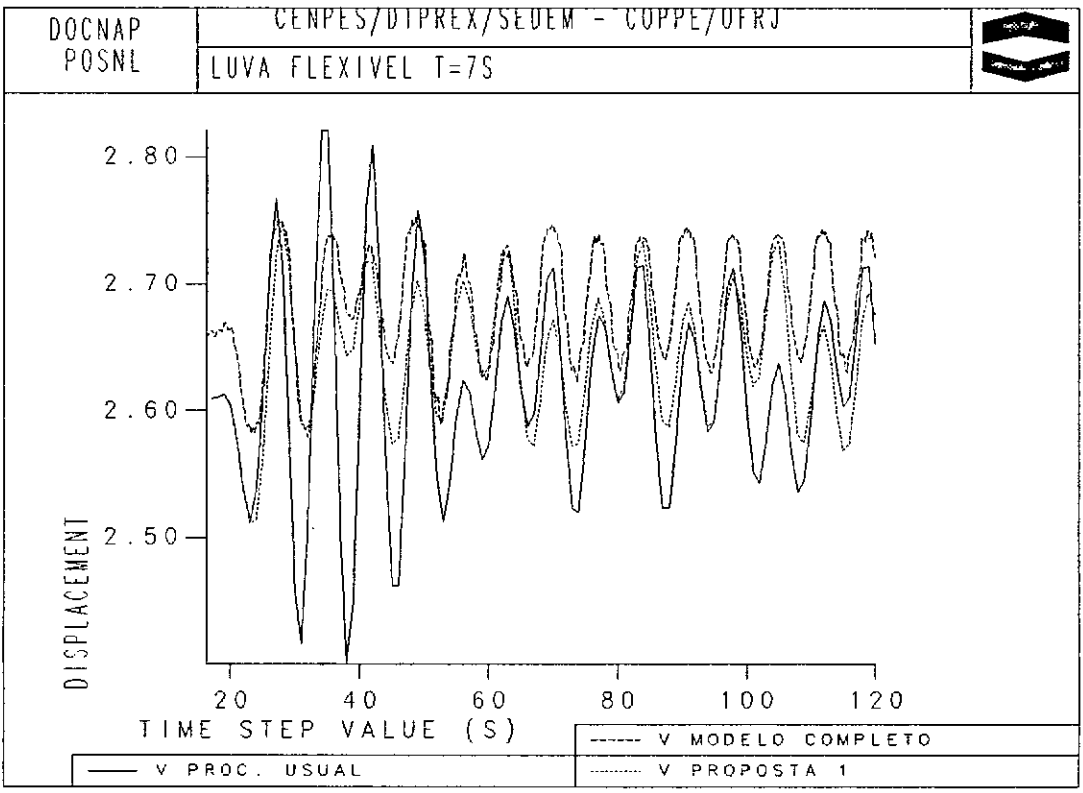
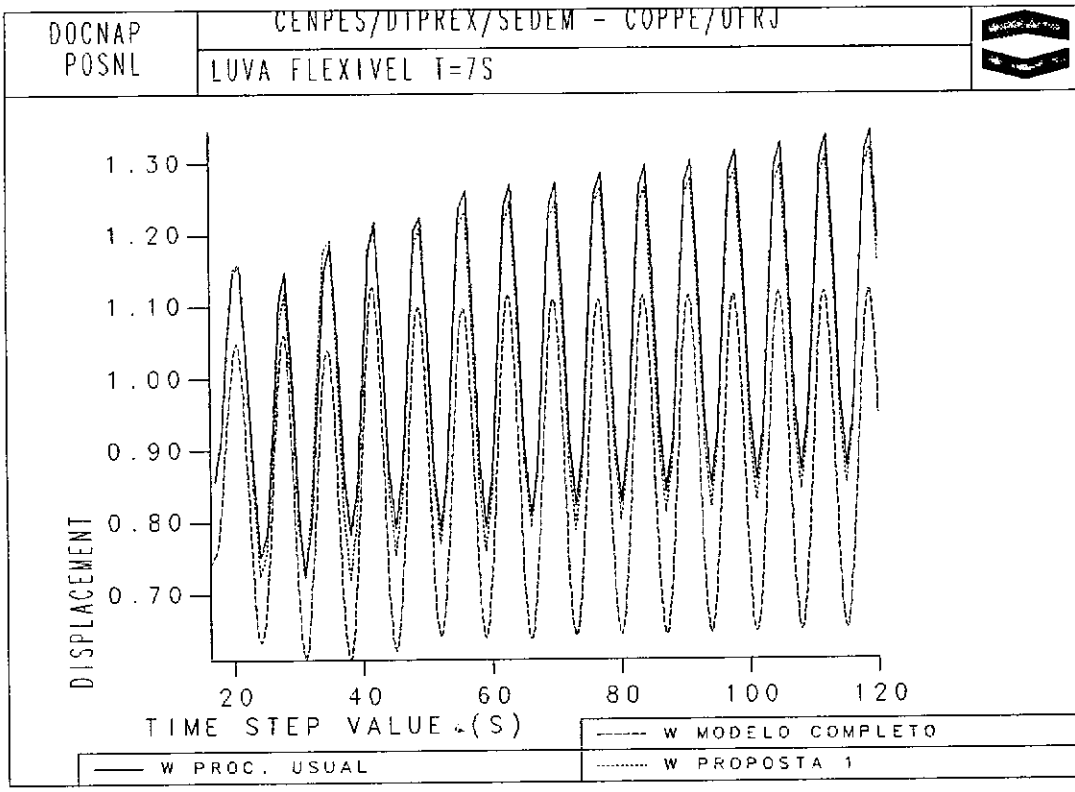


Figura VI.39 - Modelos Simplificados Luva Flexível



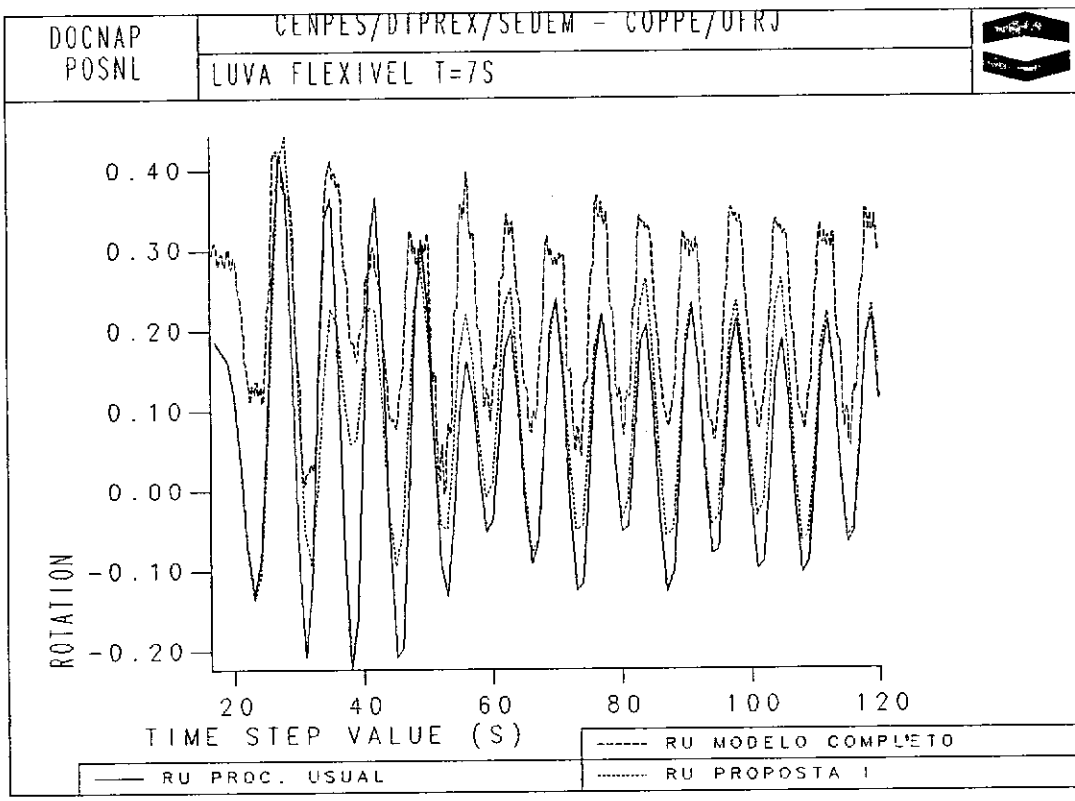
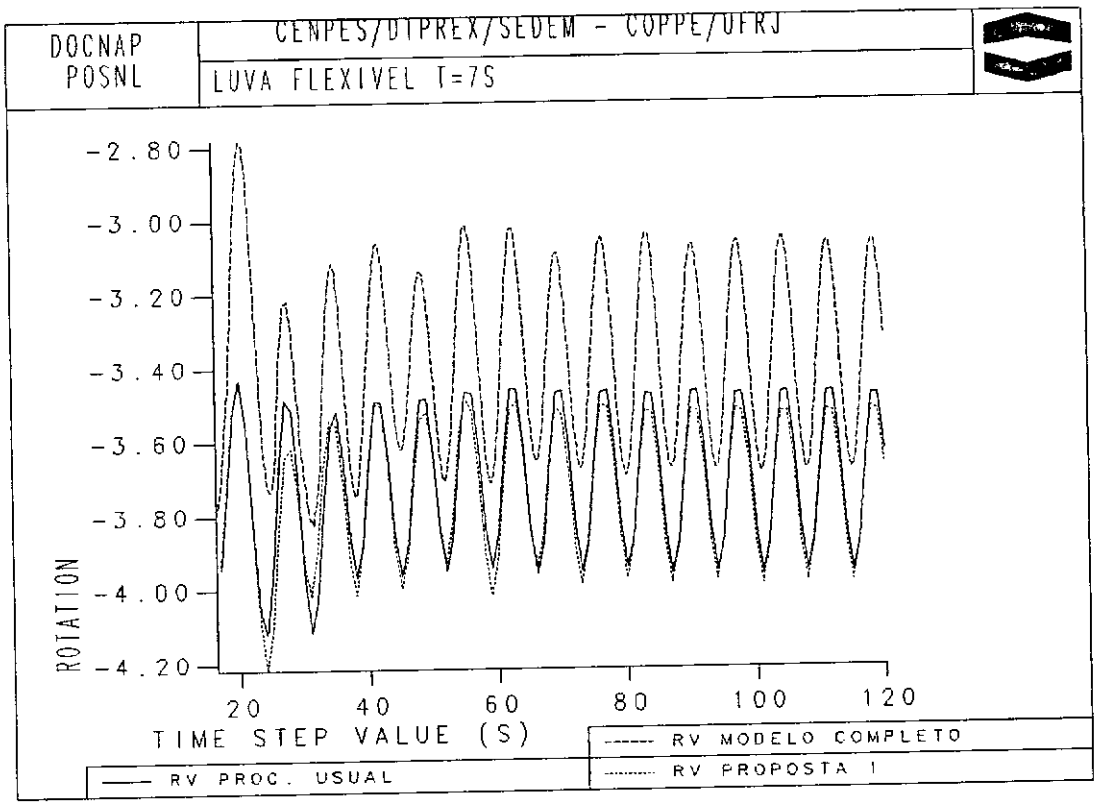


Figura VI.40 - Modelos Simplificados Luva Flexível



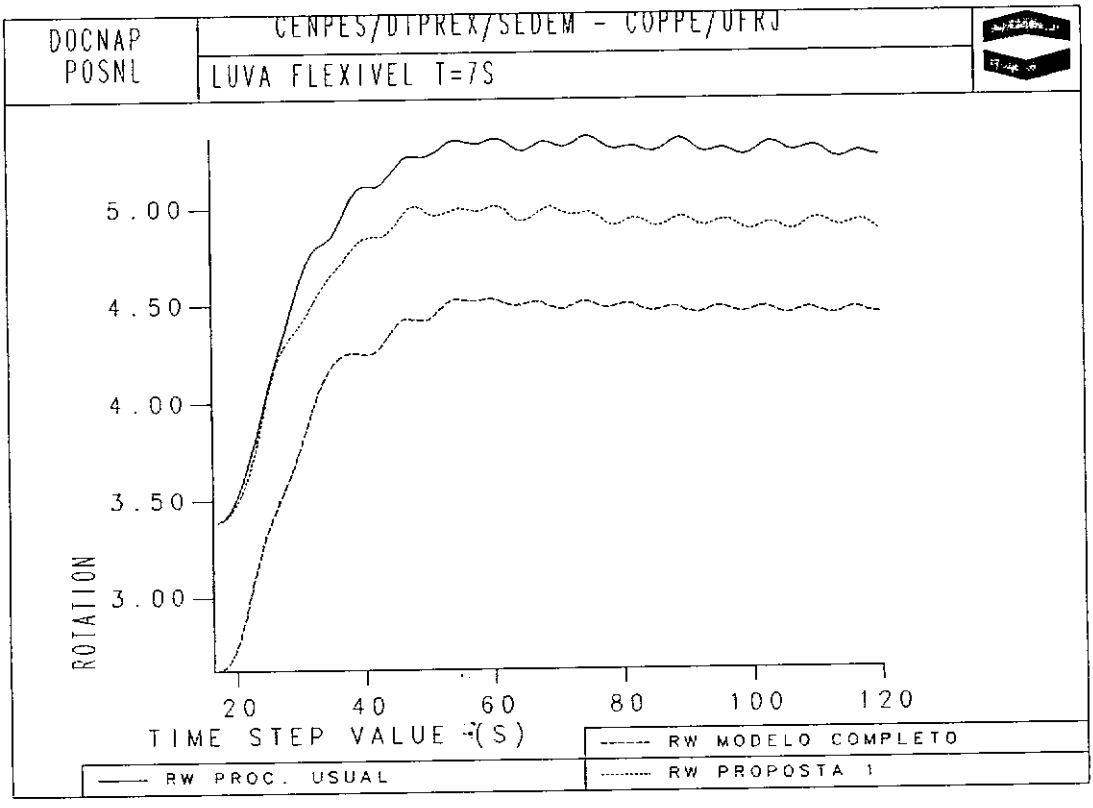
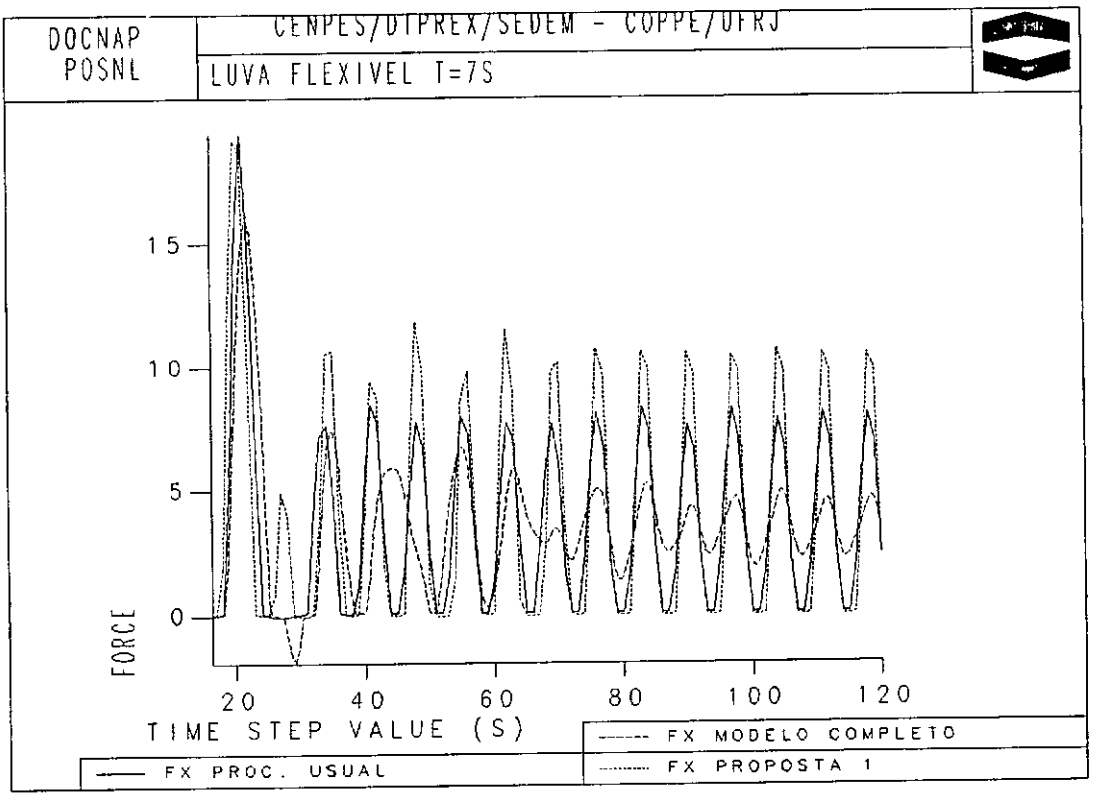


Figura VI.41 - Modelos Simplificados Luva Flexível



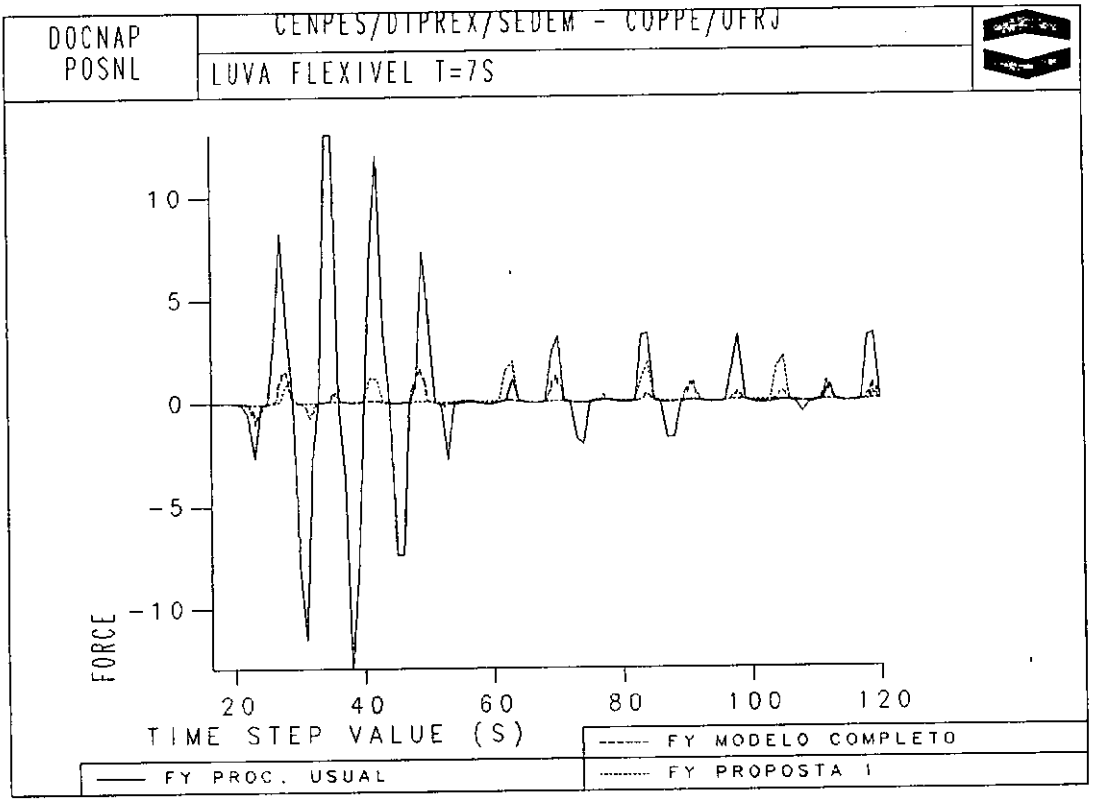


Figura VI.42 - Modelos Simplificados Luva Flexível

VI.3.2.3 - PROPOSTA 2

Como verificado na proposta anterior, a aplicação da mola de docagem na extremidade superior da luva de docagem também não apresentou bons resultados.

Para que o comportamento dinâmico do modelo completo esteja bem representado, a mola de docagem deve ser aplicada na extremidade inferior da luva, devendo ser considerada a rigidez da luva de docagem.

A simples aplicação de uma mola de docagem, representando apenas a estaca e o solo marinho, em um modelo com a luva de docagem modelada com elementos de pórtico, nos obriga a adotar intervalos de integração de 0.05 s pois, para que se obtenha a convergência na análise não-linear, a dinâmica local da luva tem de ser integrada.

A utilização do Método de Guyan permite que a luva de docagem seja incluída na subestrutura do último andar da jaqueta, restringindo o comportamento dinâmico local da luva de docagem ao mesmo tempo em que se elimina a necessidade de acrescentar os membros fictícios.

A rigidez da luva de docagem estará representada na matriz de rigidez da estrutura condensada. Sua massa estará representada no nó de contorno da subestrutura.

Consequentemente, a mola de docagem necessita simular apenas a estaca e o solo marinho estando aplicada na extremidade inferior da luva de docagem.

VI.3.2.3.1 - MOLAS DE DOCAGEM

A mola de docagem é aplicada no nó de contorno da subestrutura, localizado na extremidade inferior da luva, e deve representar a flexibilidade da estaca de docagem e o solo marinho.

Inicialmente, procurou-se modelar a mola de contato entre a luva e a estaca de docagem utilizando-se para o trecho da folga anular uma reação máxima de 0.5 t. Esta mola de contato apresentou problemas de convergência, não sendo possível completar as análises.

Como o Δt adotado é suficientemente pequeno para obtermos as respostas de interesse, foram realizadas variações nos valores das rijezas envolvidas procurando-se soluções a partir do adoçamento da mola de docagem. Este procedimento foi adotado para se evitar a variação brusca nos valores das rijezas de modo a evitar os problemas na convergência da análise não-linear e se permanecer com o

mesmo intervalo de integração adotado nos modelos simplificados apresentados anteriormente, isto é, 0.25 s.

Para isto, o trecho da folga na mola foi subdividido chegando-se a mola de docagem, para esta análise, apresentada na tabela VI.10 e figura VI.43.

FORÇA (t)	DESLOCAMENTO (m)
-0.15E+4	-10.069
-1.500	-0.069
-0.550	-0.050
-0.200	-0.030
0.0	0.0
0.200	0.030
0.550	0.050
1.500	0.069
0.15E+4	10.069

TABELA VI.10 - Mola de Docagem

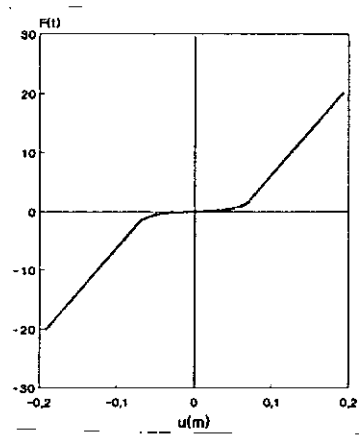


Figura VI.43 - Mola de Docagem

VI.3.2.3.2 - VIBRAÇÕES LIVRES

As molas lineares utilizadas nas análises de vibrações livres possuem a rigidez do trecho rígido da mola de docagem deste modelo apresentada na tabela V.11, ou seja, 150 t/m.

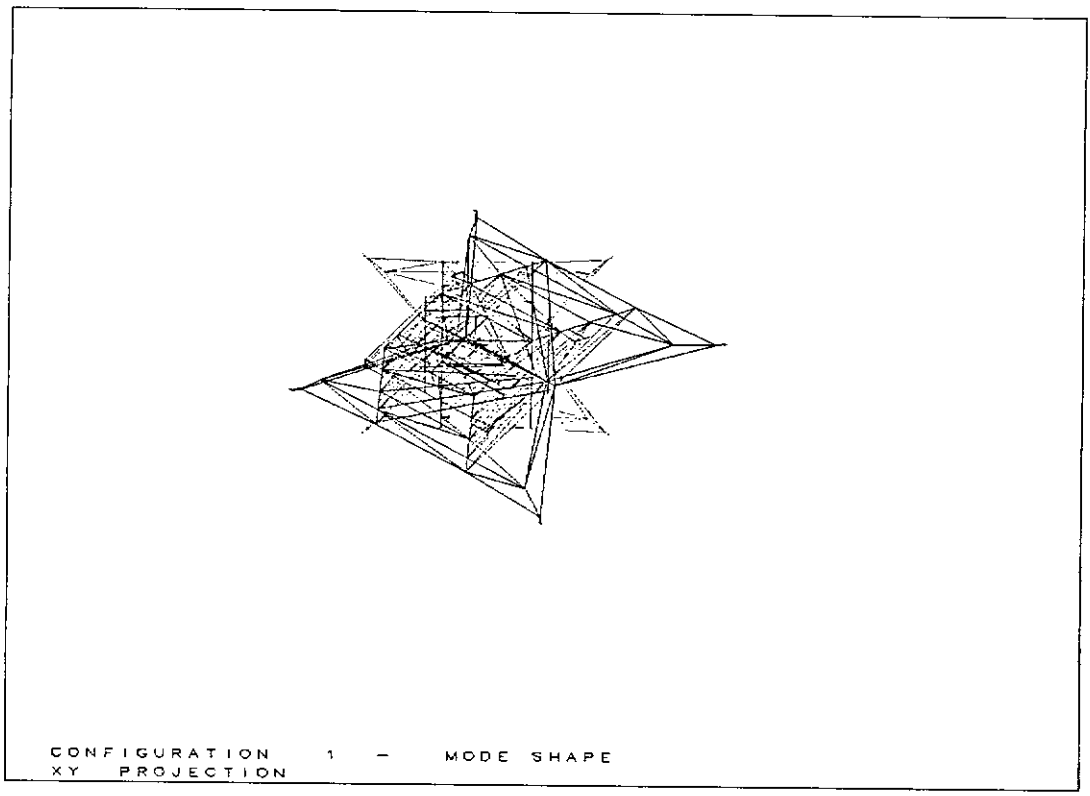
Os valores dos períodos obtidos,para a análise com o modelo da jaqueta com mola de docagem, estão mostrados na tabela VI.11. Os modos de vibração são mostrados nas figuras VI.44 a VI.46.

Verifica-se, pela comparação com a tabela VI.5, que este modelo proposto, representa de maneira satisfatória o comportamento dinâmico observado no modelo completo tanto quantitativamente, pois seus períodos de vibração são semelhantes, quanto qualitativamente, pois são mantidos os planos preferenciais de vibração dos modos de corpo rígido.

MODO	PERÍODOS (s)	DESCRIÇÃO
1	64.11	Rotação em Z
2	20.36	Pêndulo em YZ
3	16.08	Pêndulo em XZ
4	11.69	Tombamento em YZ
5	11.03	Tombamento em XZ
6	1.866	Desloc. Vertical
7	0.6226	Elástico Local
8	0.5277	Elástico Local
9	0.5085	Elástico Local
10	0.4795	Elástico Local

TABELA VI.11 - PERÍODOS E MODOS DE VIBRAÇÃO

JAQUETA COM MOLA DE DOCAGEM



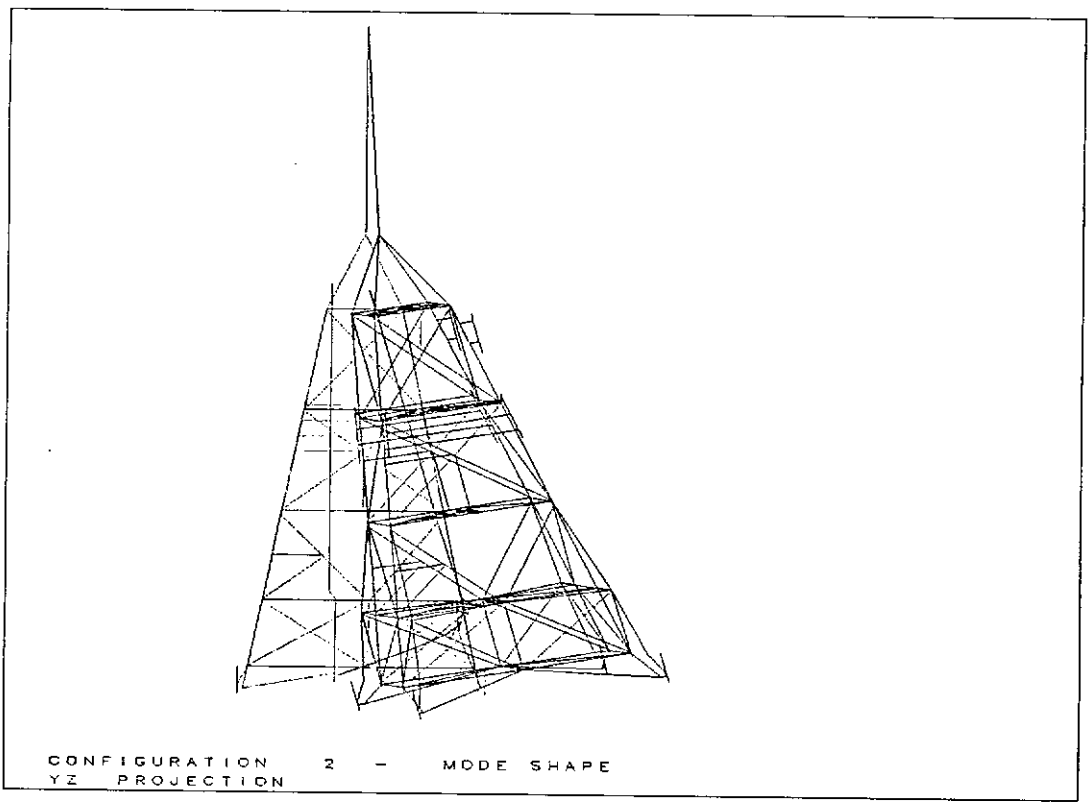
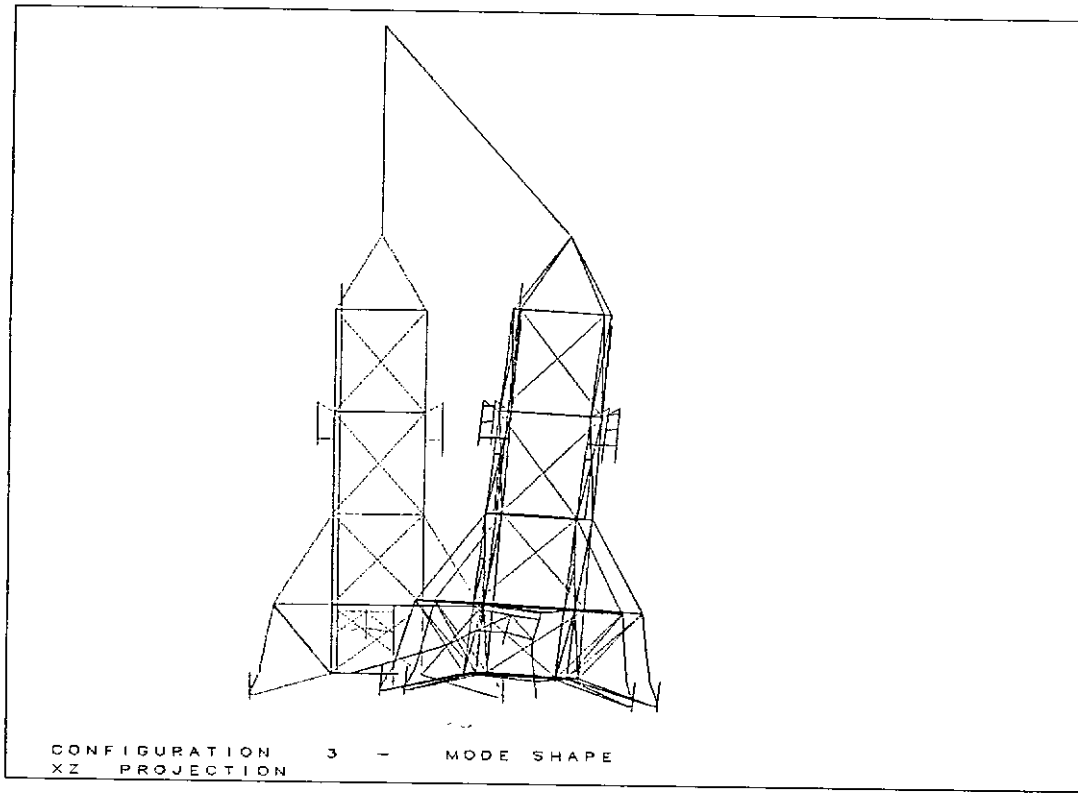


Figura VI.44 - Modos de Vibração 1 e 2



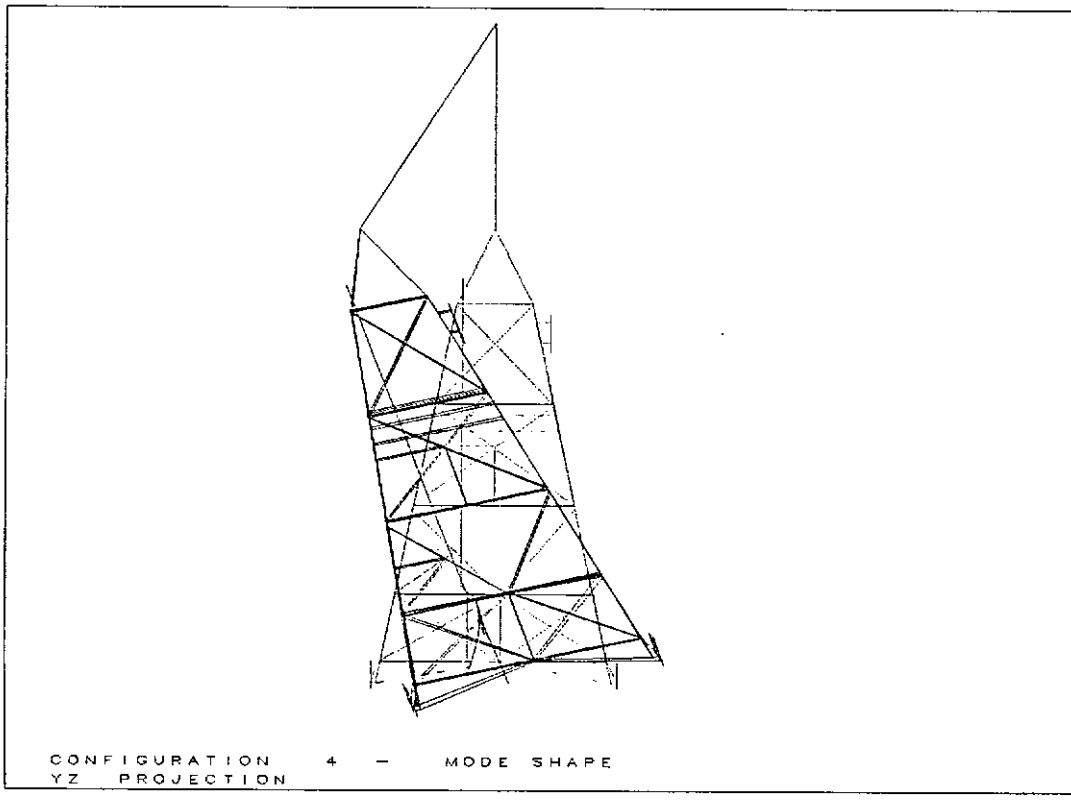
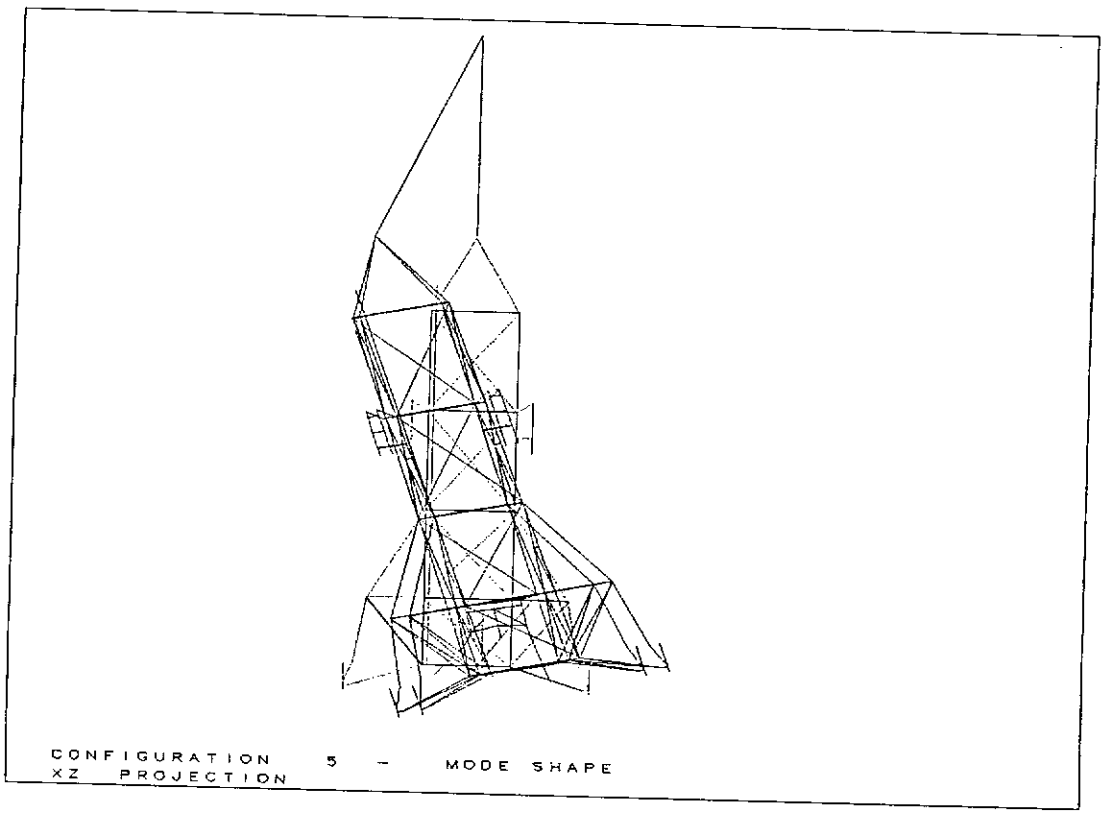


Figura VI.45 - Modos de Vibração 3 e 4



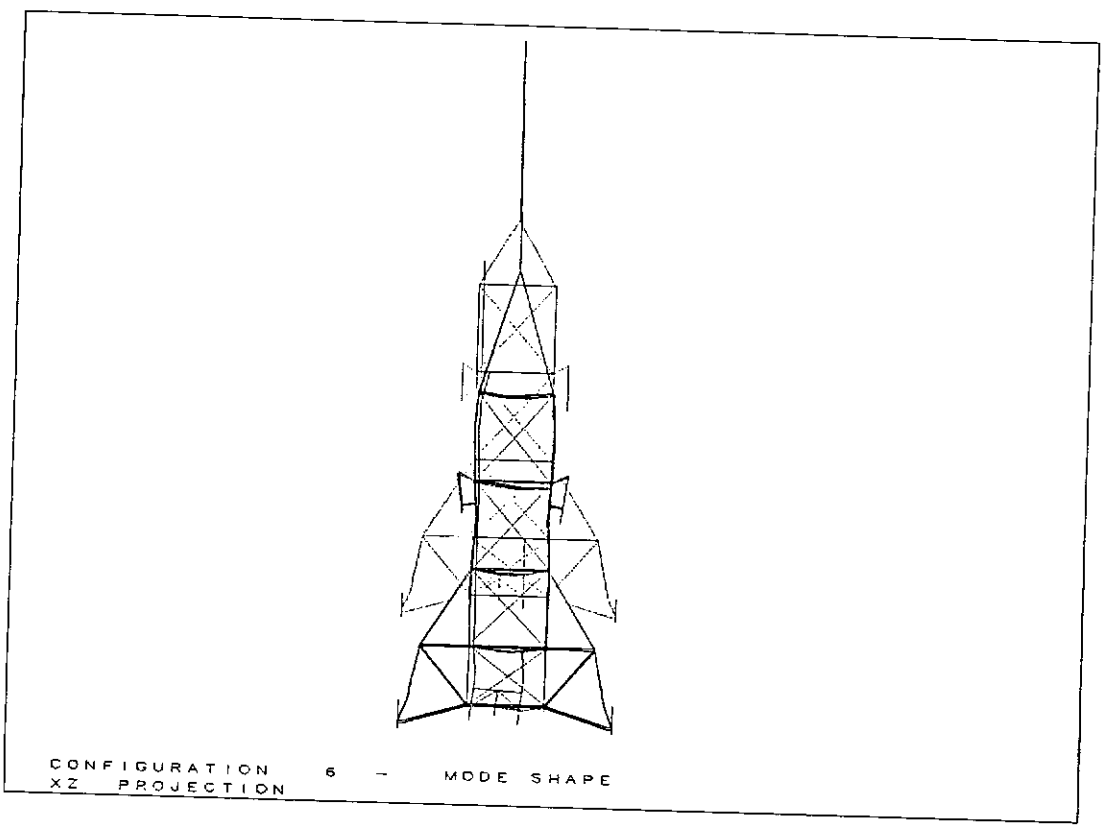


Figura VI.46 - Modos de Vibração 5 e 6

VI.3.2.3.3 - INTERVALOS DE INTEGRAÇÃO

Para este modelo, o intervalo de integração, pela equação VI.2, seria de 0.20 s. Como em VI.3.1.2, procurou-se adotar o intervalo de 0.25 s, em todas as análises com modelos simplificados, em busca de uma maior eficiência computacional.

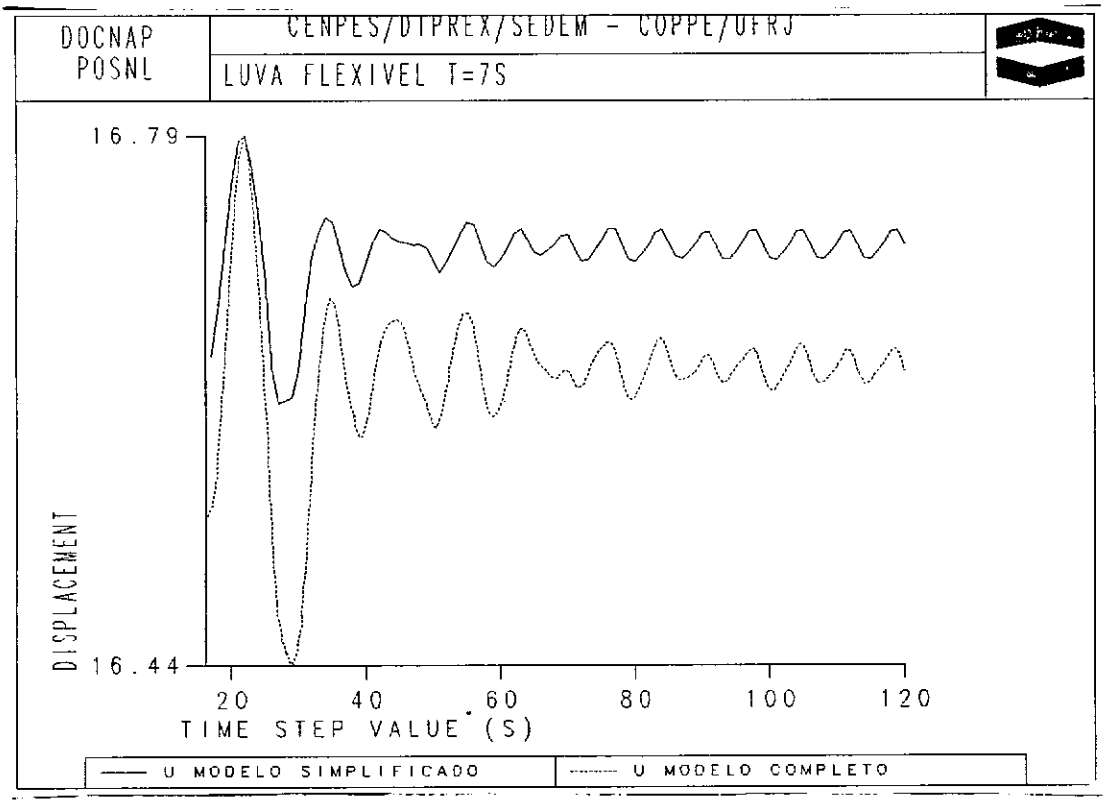
Entretanto, só foi possível adotar este intervalo nas análises com ondas com períodos de 7.0 s e 8.0 s. Para as ondas com maiores períodos - 9.0 s a 13.0 s - a convergência da análise não-linear só foi obtida com a redução do intervalo de integração para 0.20 s.

VI.3.2.3.4 - RESULTADOS

Neste item, apresentamos os resultados para as configurações analisadas e realizamos comparações com o modelo completo, variando os períodos para as cargas de ondas impostas. Através destes gráficos, confirma-se o comportamento plenamente satisfatório do modelo desta proposta 2.

Por simplificação, são apresentados os resultados para os modelos, completo e simplificado, com apenas um ponto de contato, e consequentemente uma mola, entre a luva e a estaca de docagem.

Comparando-se os resultados do modelo completo com dois pontos de contato, apresentados no item VI.2.2, com os resultados do modelo completo com apenas um ponto de contato, apresentados a seguir, verifica-se que, nesta estrutura, apenas uma mola se mostrou suficiente para representar o comportamento da ligação entre a luva e a estaca de docagem.



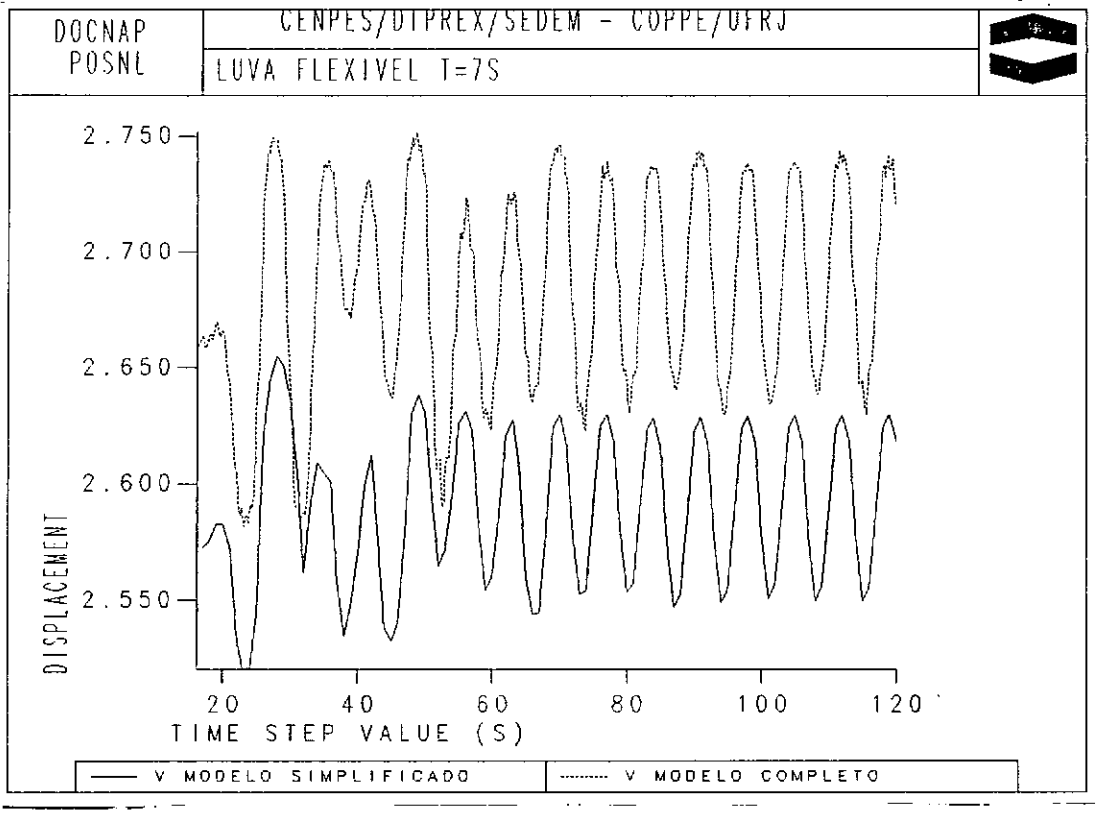
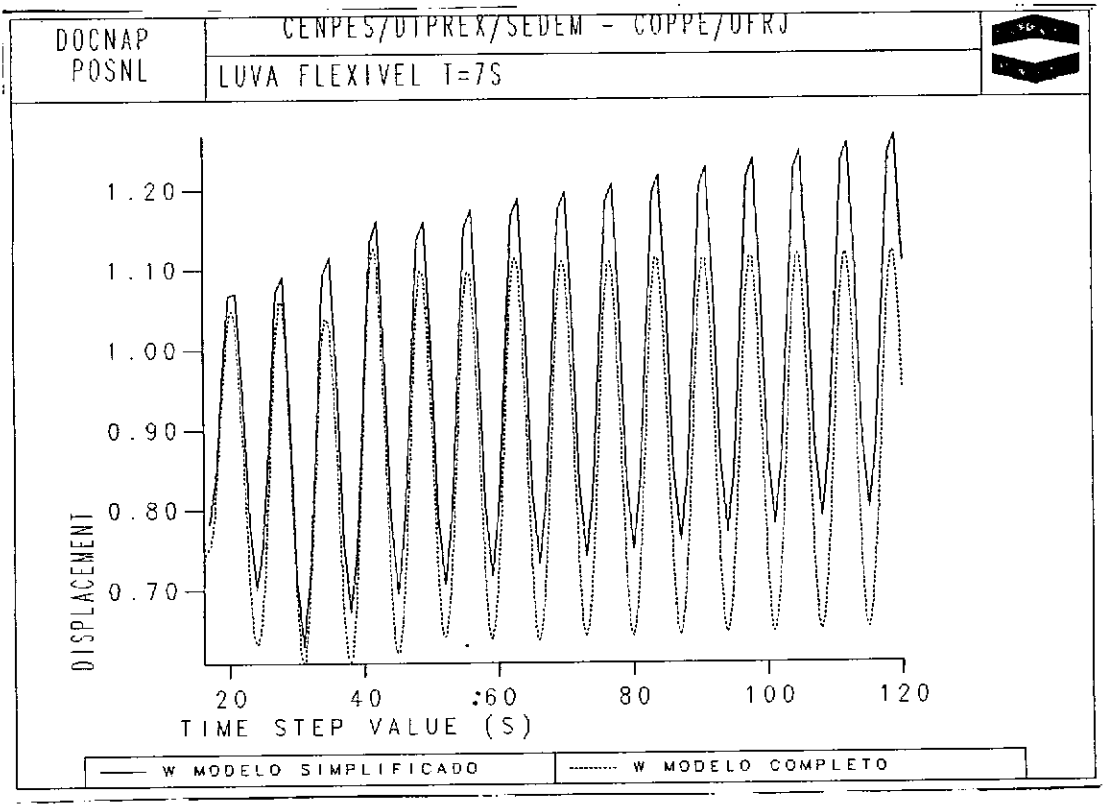


Figura VI.47 - Modelo Simplificado Proposta 2



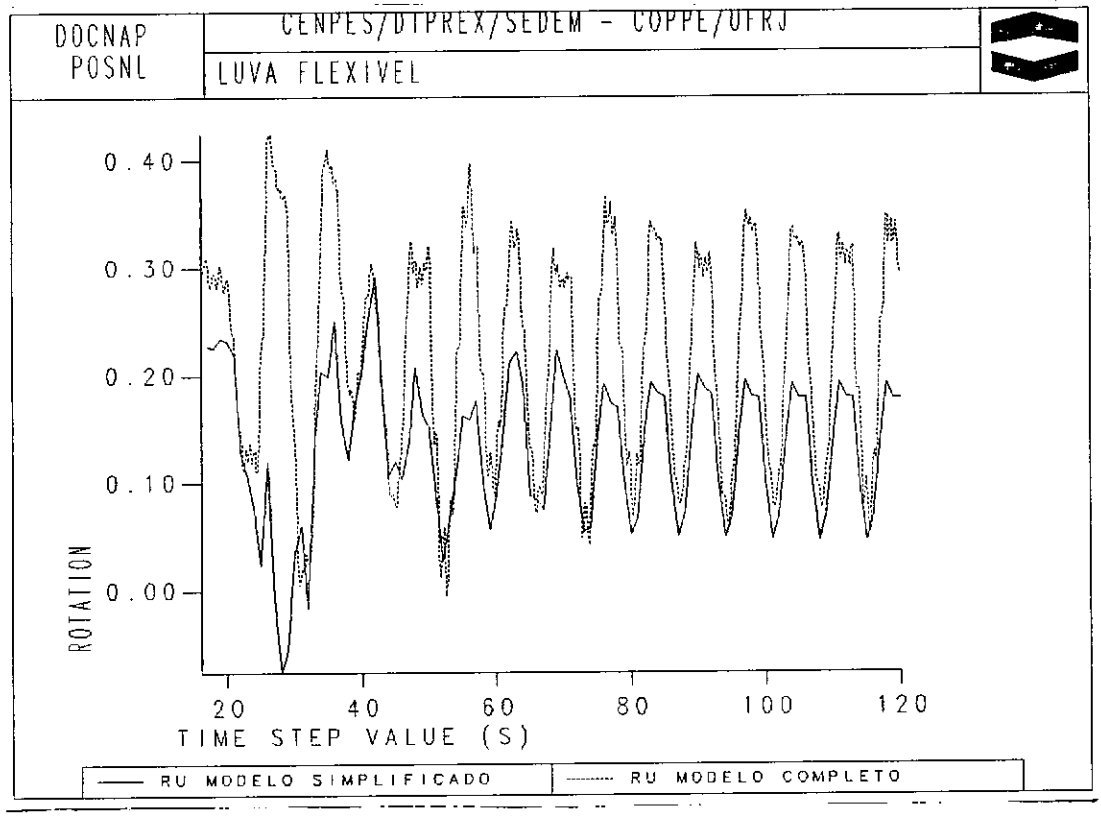


Figura VI.48 - Modelo Simplificado Proposta 2

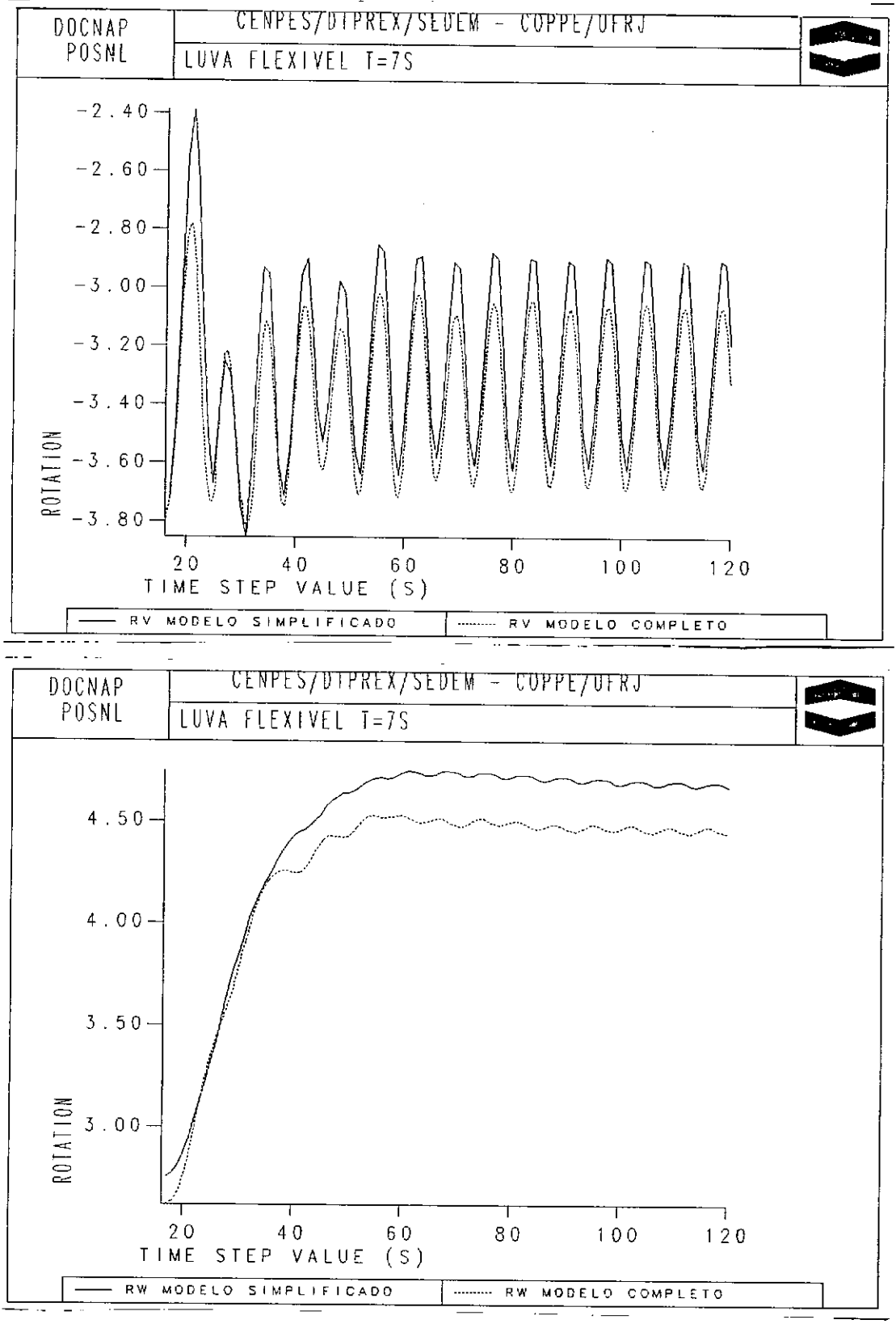
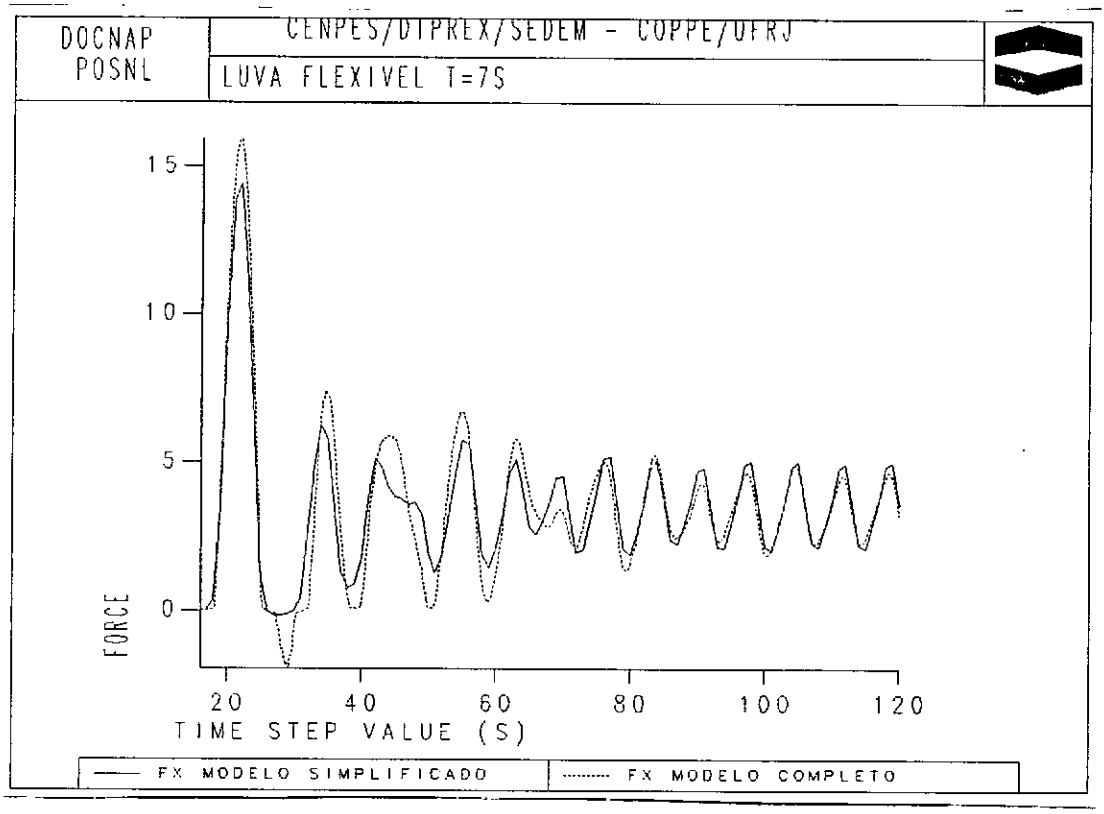


Figura VI.49 - Modelo Simplificado Proposta 2



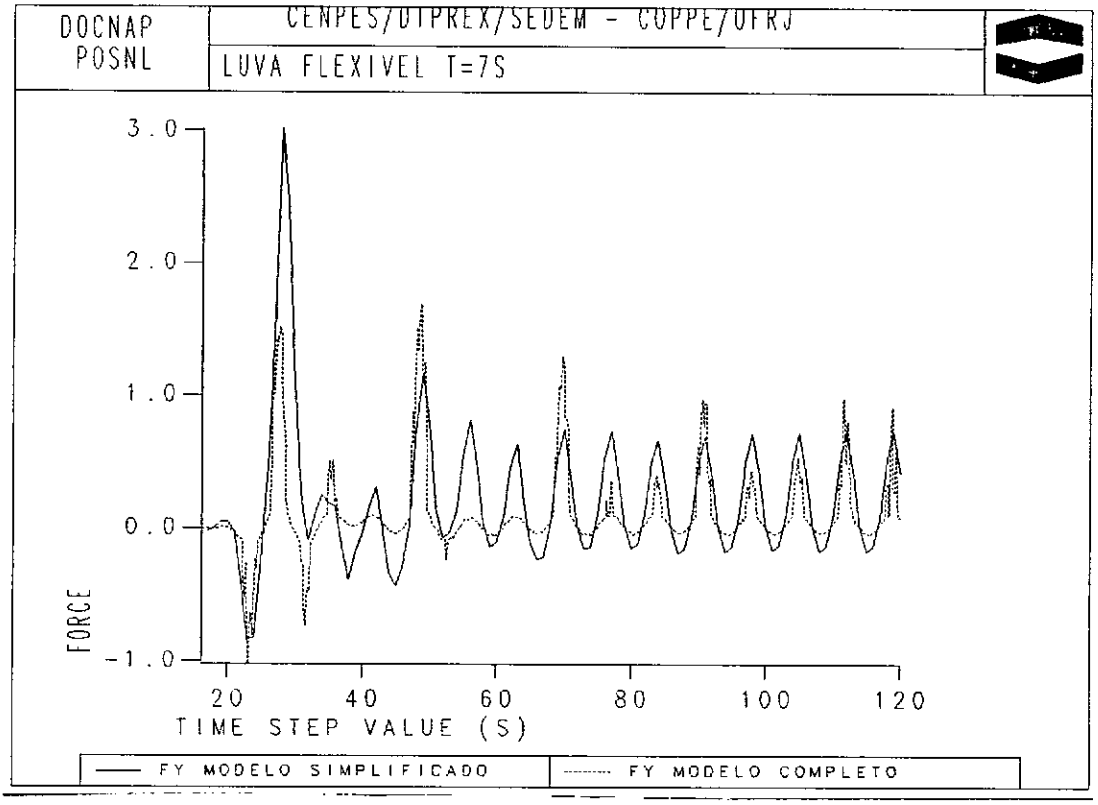


Figura VI.50 - Modelo Simplificado Proposta 2

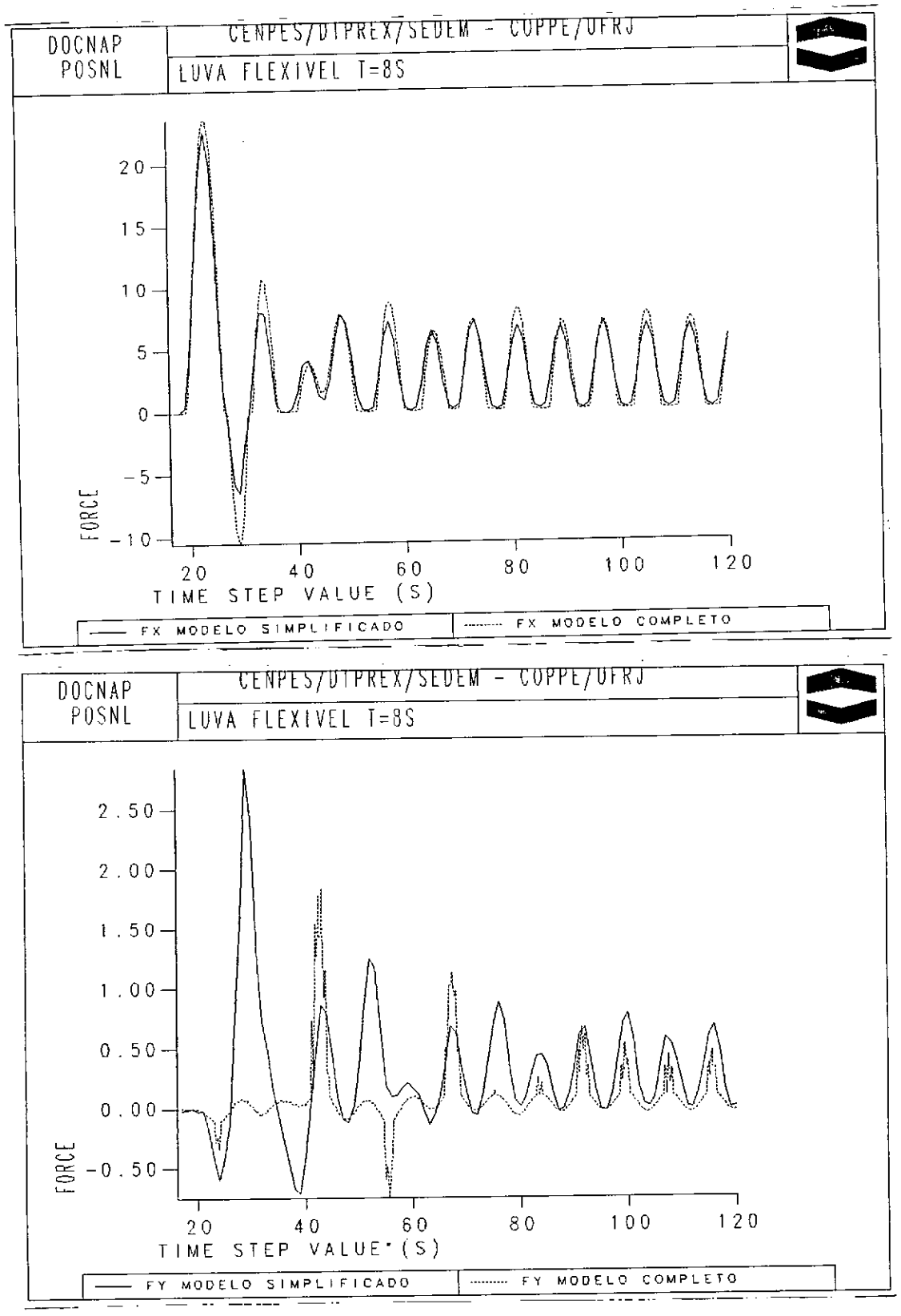


Figura VI.51 - Modelo Simplificado Proposta 2

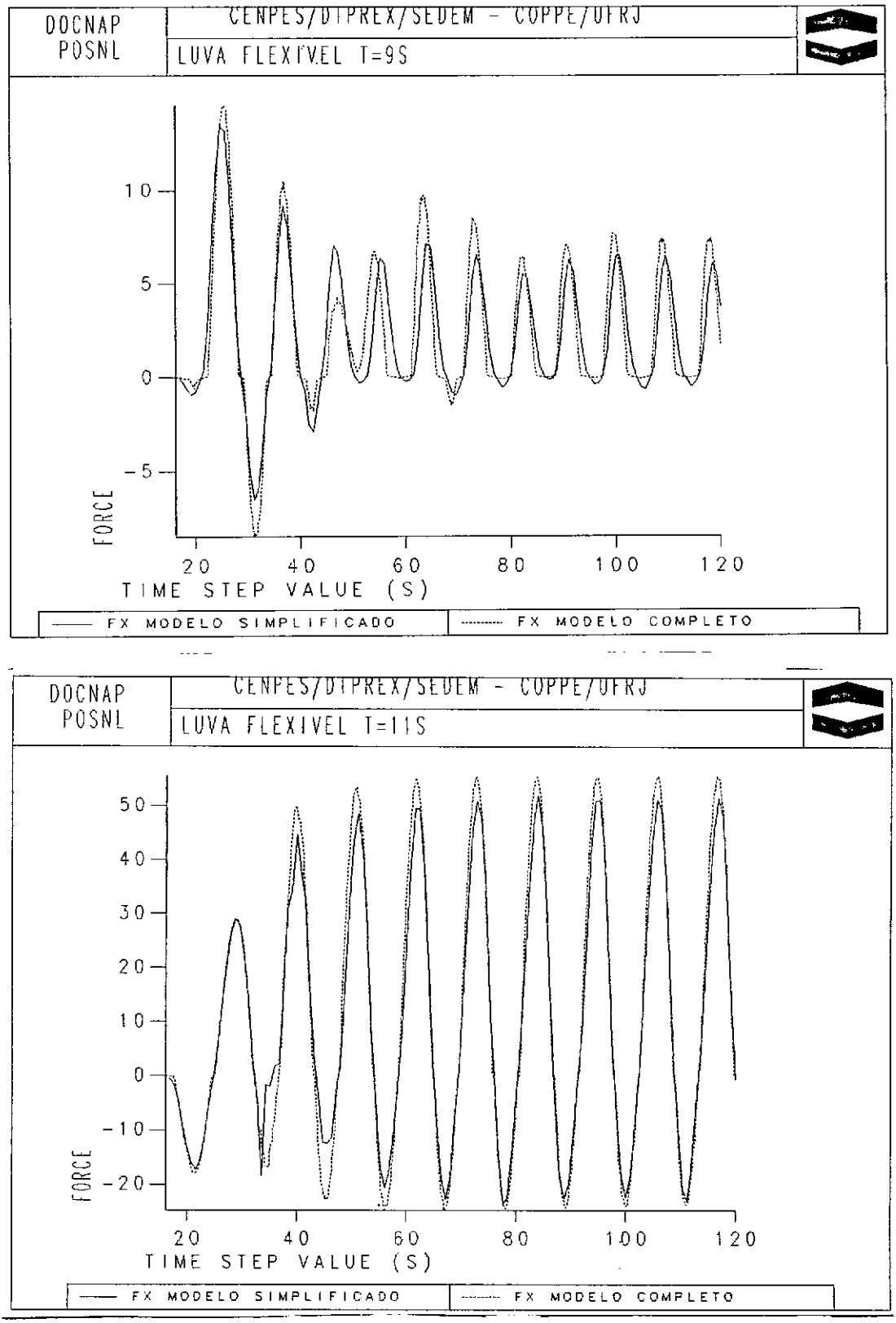
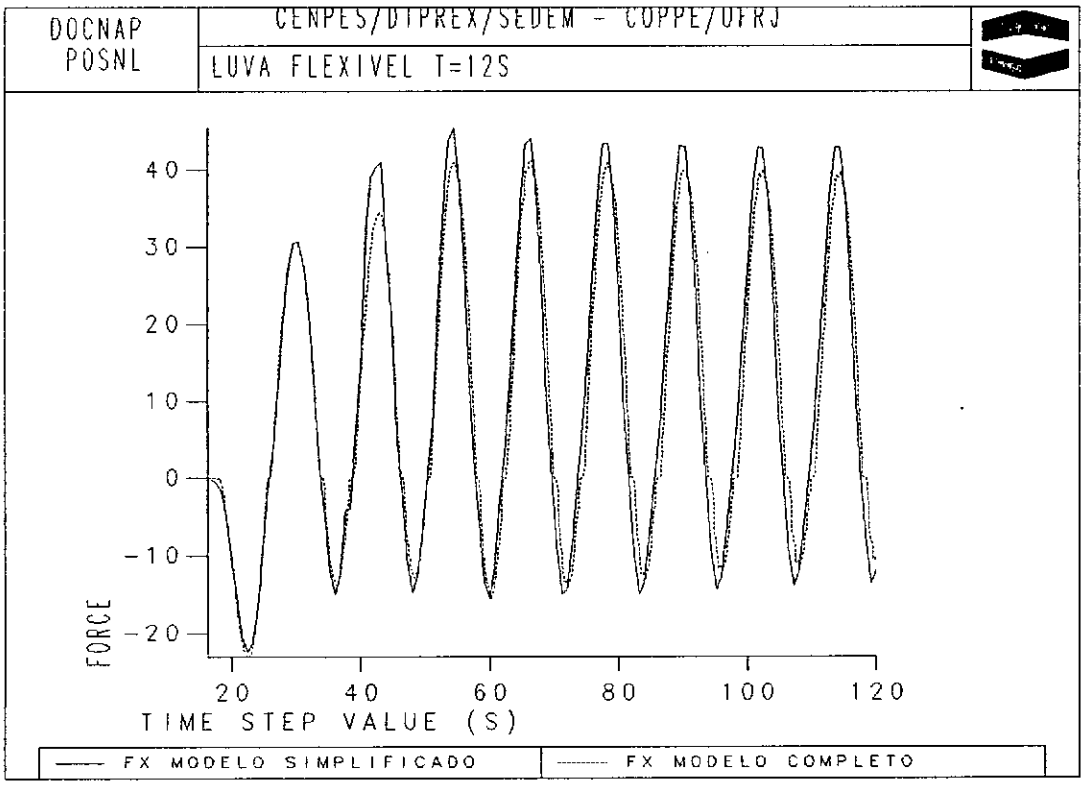


Figura VI.52 - Modelo Simplificado Proposta 2



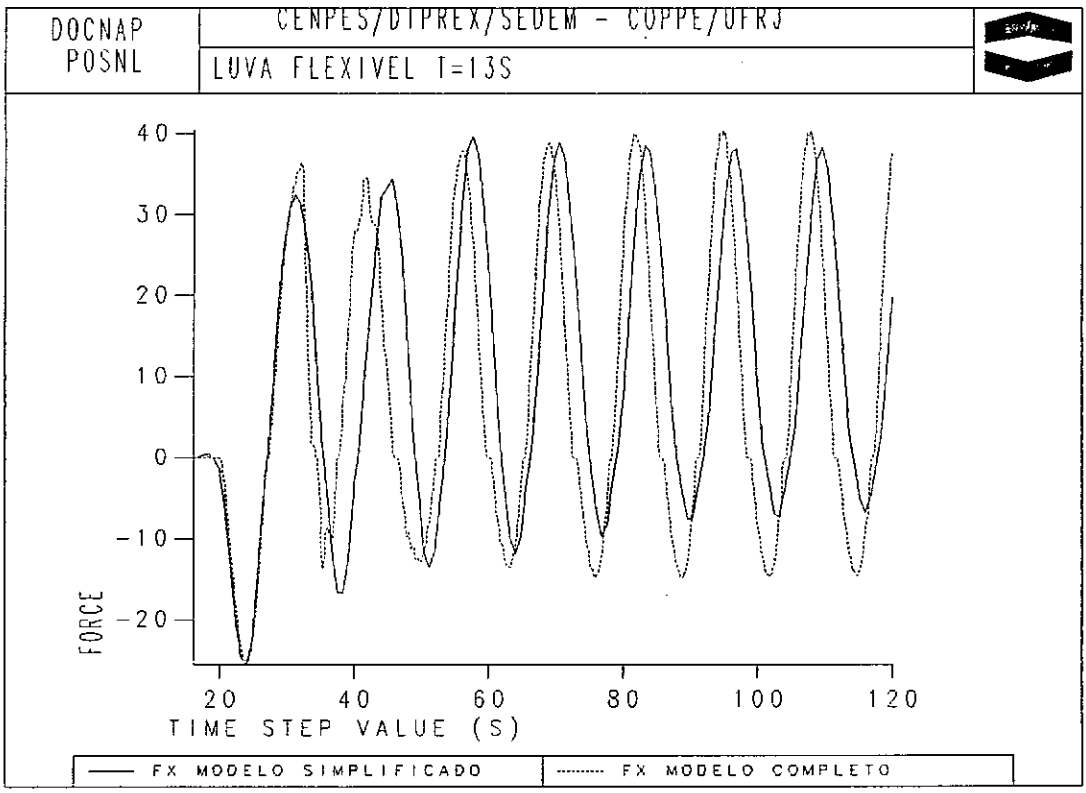


Figura VI.53 - Modelo Simplificado Proposta 2

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES

De acordo com o mencionado na Introdução, a motivação para este estudo, de modelos do conjunto luva-estaca na operação de docagem de jaquetas, surgiu das incertezas existentes em relação às simplificações usualmente adotadas.

Procurando responder a esta questão, foram realizadas análises de docagem de jaquetas com modelos possuindo alto grau de detalhamento, onde foram incluídos os modelos da estaca de docagem e do solo marinho.

Ao longo destas análises foram encontradas dificuldades na convergência da solução não-linear durante a passagem do trecho da folga anular entre a luva e a estaca para o trecho rígido simulando o contato. Estas dificuldades foram superadas com a utilização de rijezas variáveis ao longo do trecho da folga . Estas análises, além de representar um ganho na validação dos modelos simplificados, apresentaram um tempo de processamento inferior a previsão inicial, conforme mostrado na tabela

VII.1, permitindo sua utlização em análises com modelos menores ou mesmo em estruturas cuja configuração suscite dúvidas em relação ao seu comportamento.

Para os modelos simplificados, foi observado que o procedimento usualmente adotado, representando o estado da arte pelas bibliografias disponíveis, não apresentou bons resultados, quando comparado com o modelo completo.

Através das análises de vibrações livres, cuja realização preliminar mostrou-se de fundamental importância na validação dos modelos simplificados, verificou-se que seu comportamento dinâmico não representava o do modelo completo.

O modelo apresentado na proposta 1 não apresentou bons resultados, com seu comportamento dinâmico também alterando os planos preferenciais de vibração em relação ao modelo completo.

O modelo simplificado da proposta 2 mostrou-se superior aos demais, pois verificou-se que seu comportamento dinâmico representou de maneira bastante boa o do modelo completo. Os seus resultados nas análises de docagem confirmam seu bom desempenho. Este procedimento também apresenta maior simplicidade na sua modelação, pois

não há mais necessidade de introdução dos elementos fictícios, freqüente fonte de erros neste tipo de análises. Como limitação deste procedimento, temos a necessidade de um programa de computador com subestruturação dinâmica para permitir que a análise do modelo simplificado se realize com economia no tempo de processamento.

A tabela VII.1, apresentada a seguir, nos permite comparar os tempos de processamento, em um computador IBM 3090, dos modelos completos e simplificados da proposta 2, para carregamentos com 7.0 segundos de período.

MODELO (T=7s)	Δt (s)	TEMPO DE CPU (min)	NÚMERO DE NOS DE CONTORNO
LUVA RÍGIDA COMPLETO	0.05	74	59
LUVA RÍGIDA SIMPLIFICADO	0.25	14	41
LUVA FLEXÍVEL COMPLETO	0.05	68	63
LUVA FLEXÍVEL SIMPLIFICADO	0.25	13	39
LUVA FLEXÍVEL SIMPLIFICADO	0.20	16	39

TABELA VII.1 - TEMPOS DE PROCESSAMENTO

Verifica-se que o modelo simplificado adotado na proposta 2 além de reproduzir de maneira plenamente satisfatória e confiável o modelo completo, como demonstrado nas figuras VI.45 a VI.50, também representa um ganho de eficiência em relação ao tempo de processamento necessário às análises.

Como sugestão para estudos futuros, poderiam ser aprofundadas as análises para o impacto da jaqueta na estaca de docagem, causado por uma falha na operação de docagem. Na área da análise numérica, seria interessante a implementação de um algoritmo que permitisse a variação do intervalo de integração para as análises com o modelo completo. Através deste recurso, o trecho da folga na luva de docagem seria integrado utilizando-se um Δt pequeno e o restante da análise se realizaria com um Δt maior. Também nesta área, seria interessante a implementação de molas PY e TZ que contemplassem a histerese do solo. Além destas sugestões, este estudo poderia ser realizado com a consideração de mar aleatório.

Espero que este estudo contribua para uma melhor compreensão dos problemas da análise de uma operação de docagem de jaquetas, possibilitando sua realização com maior segurança.

APÊNDICE 1

RESULTADOS PARA MOLA DE DOCAGEM APLICADA NA EXTREMIDADE INFERIOR DO CONE DA LUVA DE DOCAGEM

Neste apêndice, apresentamos uma configuração de modelo simplificado com a luva de docagem rígida e estaca flexível, onde a mola de docagem encontra-se aplicada no nó do cone da luva de docagem (3) e não no nó da luva (2), devido a um engano cometido na elaboração deste modelo, como pode ser visto na figura A1.1 abaixo.

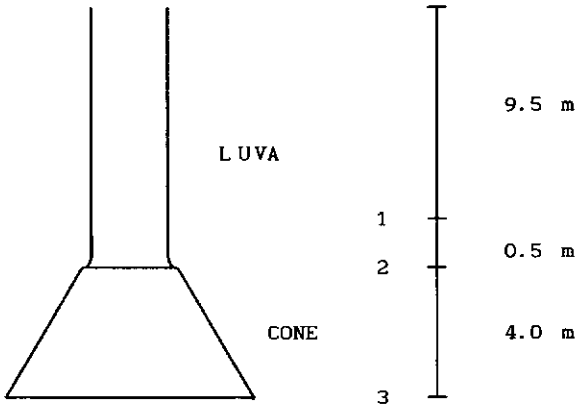
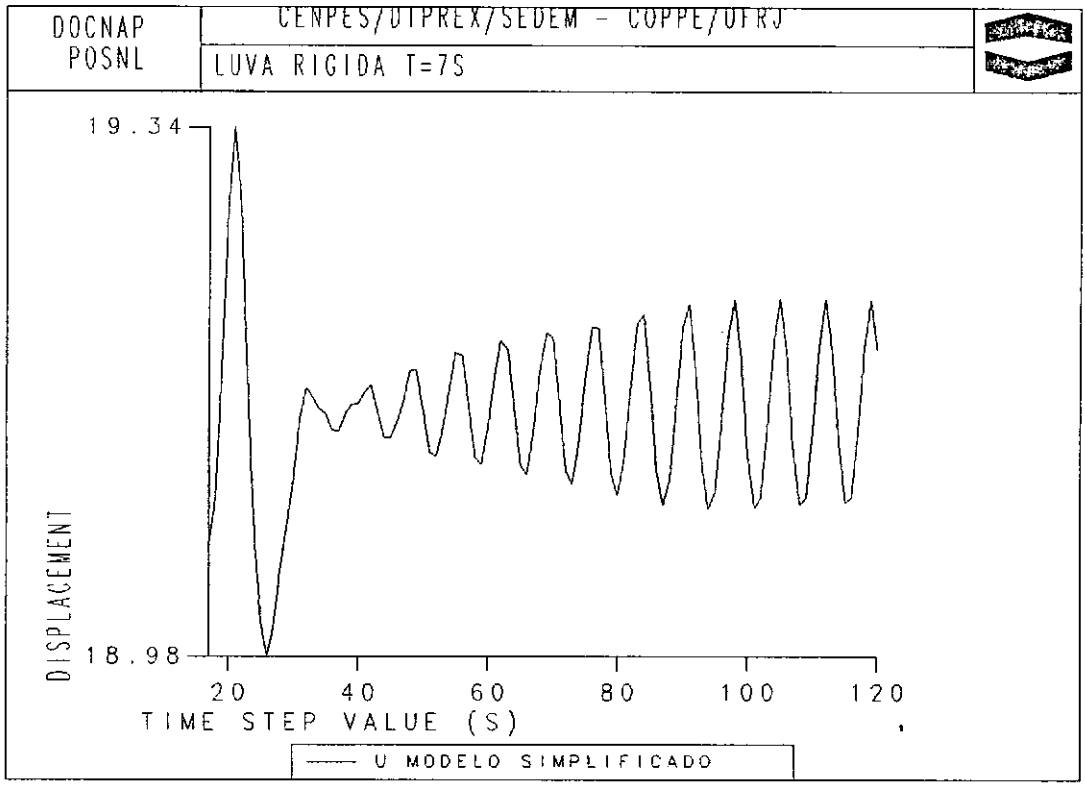


Figura A1.1 - Modelo da Luva de Docagem

Consequentemente, a luva de docagem teve seu comprimento acrescido em 4.0 m, provocando alterações, principalmente, nos modos de vibração de corpo rígido da estrutura.

Os resultados, obtidos para cargas de ondas com períodos iguais a 7.0 s, para este modelo e para o modelo completo, podem ser visualizados através das figuras A1.2 e A1.3, onde são apresentados os deslocamentos do nó 3 do cone da luva de docagem e forças nas molas de docagem.

Verifica-se que este erro no modelo em análise provocou respostas ressonantes do sistema, limitadas apenas pela presença do amortecimento [6]. Cabe ressaltar que na direção Y, onde os efeitos são mais acentuados, temos apenas cargas devido aos movimentos na ponta da lança do guindaste.



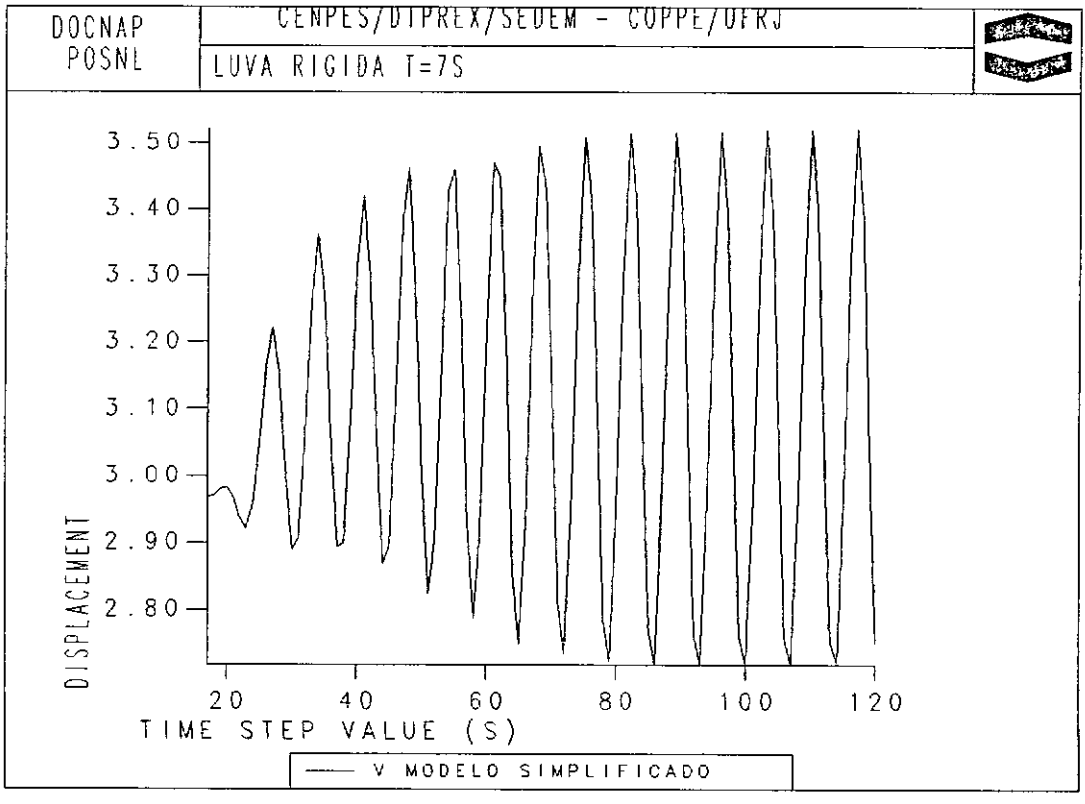
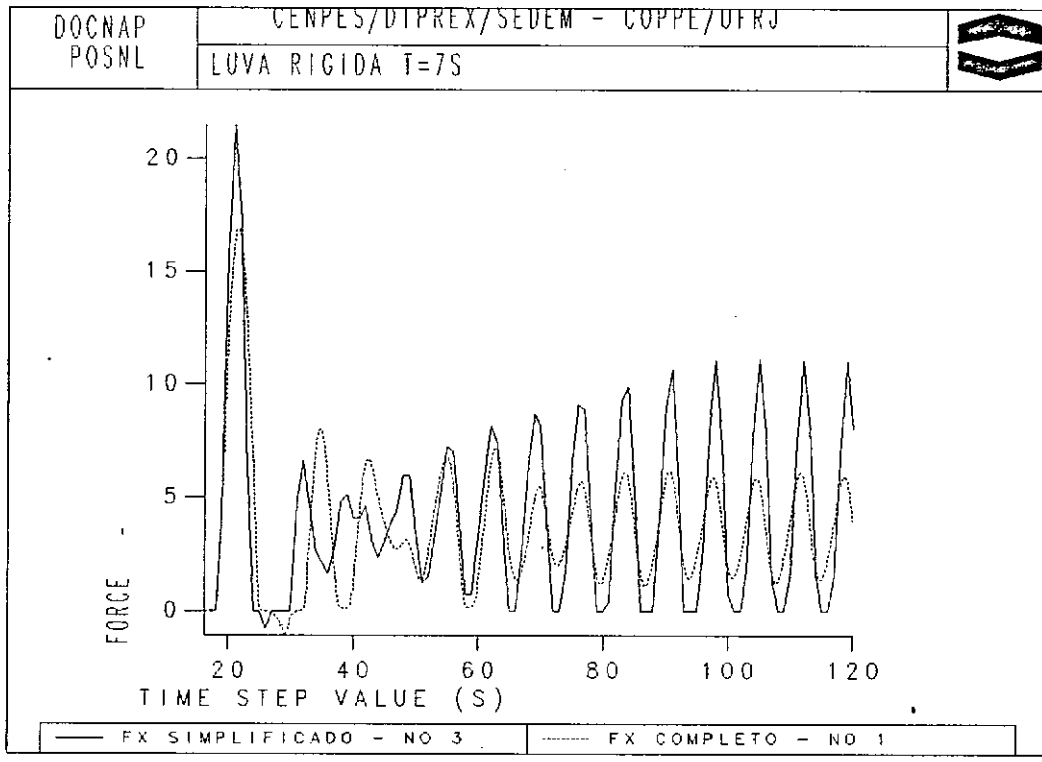


Figura A1.2 - Modelo Simplificado Mola Nó 3



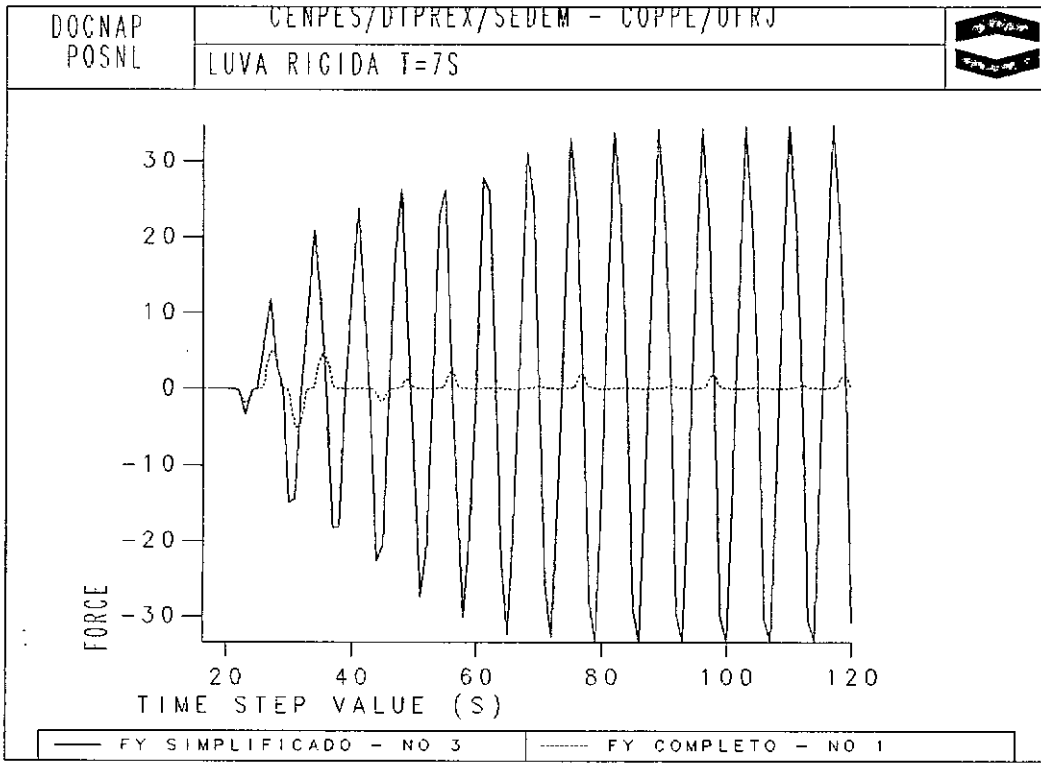


Figura A1.3 - Modelo Simplificado Mola Nó 3

Com o objetivo de se confirmar o motivo para o comportamento tão discrepante entre os modelos, recorremos às análises de vibrações livres onde verificamos que o 5º modo de vibração, tombamento no plano YZ, apresenta período natural muito próximo da excitação. O 4º modo, tombamento no plano XZ, também se apresenta próximo do período da excitação, confirmando a ocorrência de ressonância no sistema, como apresentado na tabela A1.1.

MODOS	PERÍODOS (s)	DESCRIÇÃO
1	64.39	Rotação em Z
2	14.81	Tombamento em XZ
3	13.31	Tombamento em YZ
4	7.307	Tombamento em XZ
5	7.003	Tombamento em YZ
6	1.892	Desloc. Vertical

TABELA AI.1 - PERÍODOS E MODOS DE VIBRAÇÃO

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] RAMZAN F.A. e ROBINSON R.W. "Prediction of Jacket to Template Docking Forces During Installation". OTC 5915, 1989.

[2] MOURELLE M.M. E GARCIA C.H.P. "Desenvolvimento de Metodologia para Análise de Docagem de Jaquetas". Petrobras/Cenpes, 1990.

[3] DUNCAN P.E., DRAKE K.R., WINDLE D. "Jacket to Template Docking Forces: Predicting Full Scale Loads from Results of Physical and Computational Models". BOSS'88, 1988.

[4] GIULIANO V., PITTALUGA A., SIGNORELLI P. "Nonlinear Analysis and Tests Comparison of Motion and Structural Response for Two Gravity Platforms in Floating Conditions". OTC 2053, 1974.

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

[6] CLOUGH R.W. e PENZIEN J. "Dynamics of Structures". McGraw-Hill International Book Company, 1982.

[7] ZIENKIEWICZ O.C. "The Finite Element Method in Engineering Science". McGraw-Hill, London, 1971.

[8] O'NEILL M.W., REESE L.C. e COX W.R. "Soil Behavior for Piles Under Lateral Loading". OTC 6377, 1990.

[9] BAUR M.P.,CLARK H.H. e LEE M.S. "The First Docking Operation of a Large North Sea Platform Over a Subsea Template". OTC 4214, 1982.

[10] LENIHAN J.E., AUSTIN R.T.C. e FLANAGAN P.J. "The Rapid Installation of a Large North Sea Jacket Over a Subsea Template". OTC 4759, 1984.

[11] WEBB C.M., GALGOUL N.S. e ROMANI D. "Comments on a Detailed Analysis Performed for the Installation of the Carapeba 2 Jacket". Brazil Offshore, 1989.

[12] SILVA S. e HIRATA K. "Full Scale and Model Tests of a Jacket Docking". Brazil Offshore, 1989.

[13] MOURELLE M.M. e CASAPRIMA E.G. "Curso de Utilização do Programa Anflex". Petrobras/Cenpes, 1991.

[14] "Programa Docnap Manuais de Utilização". Petrobras/Cenpes, 1990.

[15] "ADEP/ANCAB - Non-Linear Static and Dynamic Analysis User's Manual". Petrobras/Cenpes, 1987.

[16] VERLANGIERI G.S. "Transporte de Estruturas Offshore Sobre Balsa". Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, 1992.

[17] SATTAMINI S.R. "Análise de Instalação e Desconexão de Risers". Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, 1992.

[18] CHAJES A. e CHURCHILL J.E. "Nonlinear Frame Analysis by Finite Element Methods". Journal of Structural Engineering", Vol.113, Nº 6, pág. 1221-1234, 1987.

[19] BENJAMIN A.C. "Análise Não-Linear Geométrica de Pórticos Tridimensionais pelo Método dos Elementos Finitos". Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, 1982.

[20] "ADEP/DINA - Dynamic Analysis and Design - User's Manual".Petrobras/Cenpes, 1987.

[21] MARQUES O.A. "Solução de Problemas de Autovalor Generalizados Através do Método de Iteração por Subespaços em Blocos e do Algoritmo de Lanczos com Ortogonalização Seletiva". Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, 1986.

[22] API RP 2A - "Recommended Pratice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms", 18th Edition, September, 1989.

[23] "ADEP - Analysis and Design of Offshore Structures User's Manual". Petrobras/Cenpes, 1987.

[24] SANTOS C.L.N. e MOREIRA L.F.R. "POSNL - Pós-Processador Gráfico para Análises Não-Lineares - Manual de Utilização". Petrobras/Cenpes, 1989.

[25] "Reference Manual for MOSES - Multi-Operational Structural Engineering Simulator", Ultramarine, Inc., 1992.