

**Leandro Vieira da Silva Macedo**

**ANÁLISE ESTRUTURAL DINÂMICA DO CONJUNTO DE  
ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS NO NÚCLEO DE UM  
REATOR NUCLEAR PWR**

**Dissertação apresentada à Escola Politécnica  
da USP para obtenção do título de Mestre  
em Engenharia Mecânica.**

**SÃO PAULO**

**1991**

LEANDRO VIEIRA DA SILVA MACEDO  
Eng. Mecânico, Universidade do Rio Grande, 1985.

ANÁLISE ESTRUTURAL DINÂMICA DO  
CONJUNTO DE ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS  
NO NÚCLEO DE UM REATOR NUCLEAR PWR



Dissertação apresentada à  
Escola Politécnica da USP  
para obtenção do título  
de Mestre em Engenharia  
Mecânica.

Orientador: Prof.Dr. Ronaldo B. Salvagni, Depto. Eng. Mecânica.

São Paulo, 1991

Aos meus pais.

## AGRADECIMENTOS

À Coordenadoria para Projetos Especiais do Ministério da Marinha (COPESP), pelo apoio e incentivo, bem como pelos recursos e facilidades colocadas à disposição para a realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Ronaldo B. Salvagni, pela orientação, pelos conhecimentos transmitidos, pelo seu apoio e incentivo.

Ao Msc. Eng. Nuc. José Augusto Perrotta, pela sugestão do tema, pela leitura e discussão do trabalho, pelo seu apoio e incentivo.

Ao colega Gélson T. Otani, pela codificação das rotinas de pós-processamento para o programa STYCA.

À colega Miriam Medeiros da Silva, pela leitura e revisão de partes do texto.

## RESUMO

Neste trabalho é apresentado um procedimento para a análise estrutural dinâmica do núcleo de reatores nucleares refrigerados a água leve pressurizada.

Na verificação estrutural do projeto mecânico dos elementos combustíveis, a resposta à excitação dinâmica, devida por exemplo a excitações sísmicas ou às provenientes de um acidente de grande perda de refrigerante, precisa ser determinada.

A existência de folgas entre os elementos combustíveis e entre estes e os defletores possibilita a ocorrência de colisões entre os vários componentes como resultado de seus movimentos relativos. Isto torna o problema não-linear e impede a sua solução através de uma análise espectral. Torna-se necessário um histórico da resposta em função do tempo de cada elemento combustível.

O Método de Superposição Modal em conjunto com a integral de Duhamel foi utilizado para a solução do problema.

É apresentado um algoritmo de solução do problema e também resultados obtidos com o programa computacional STYCA, desenvolvido a partir dos procedimentos propostos neste trabalho.

### ABSTRACT

It is presented a procedure for the dynamic structural analysis of a PWR core.

Impacts between fuel assemblies may occur because the existence of gaps between them. Thus, the problem is non-linear and an spectral analysis is avoided. It is necessary a time-history response analysis.

The Modal Superposition Method with the Duhamel integral was used in order to solve the problem.

It is presented an algorithm of solution and also results obtained with the STYCA computer program, developed in the basis of what was proposed here.

ÍNDICE

	Página
AGRADECIMENTOS.....	vi
RESUMO.....	iii
ABSTRACT.....	iv
SIMBOLOGIA.....	vii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABELAS.....	xiv
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO 2 - PESQUISA BIBLIOGRÁFICA.....	12
CAPÍTULO 3 - CARACTERÍSTICAS DINÂMICAS DO ELEMENTO COMBUSTÍVEL.....	19
3.1 - COMPORTAMENTO DAS FREQUÊNCIAS NATURAIS DO ELEMENTO COMBUSTÍVEL.....	20
3.2 - COMPORTAMENTO DO AMORTECIMENTO ESTRUTURAL DO ELEMENTO COMBUSTÍVEL.....	21
CAPÍTULO 4 - O ELEMENTO DE IMPACTO.....	24
4.1 - CARACTERÍSTICAS DA GRADE ESPAÇADORA.....	24
4.2 - O ELEMENTO DE IMPACTO.....	25
CAPÍTULO 5 - FORMULAÇÃO ANALÍTICA.....	33

CAPÍTULO 6 - RESOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES.....	43
6.1 - RESOLUÇÃO NUMÉRICA DAS EQUAÇÕES.....	43
6.2 - ALGORITMO DE SOLUÇÃO.....	44
CAPÍTULO 7 - TESTES DE VERIFICAÇÃO E CASO EXEMPLO.....	49
7.1 - CASO 1.....	49
7.2 - CASO 2.....	54
7.3 - CASO 3.....	58
7.4 - CASO 4.....	68
CAPÍTULO 8 - CONCLUSÃO.....	94
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	96
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	97
APÊNDICE - O PROGRAMA STYCA.....	102
A.1 - DESCRIÇÃO DE STYCA.....	102
A.2 - REGISTROS DE ENTRADA PARA STYCA.....	105

SIMBOLOGIA

c	elemento da matriz de amortecimento
k	elemento da matriz de rigidez
m	massa
$\bar{m}$	massa por unidade de comprimento
t	tempo
y	deslocamento
$\dot{y}$	velocidade
z	deslocamento em coordenada generalizada
$\dot{z}$	velocidade em coordenada generalizada
$\ddot{z}$	aceleração em coordenada generalizada
C	coeficiente de amortecimento
C1	coef. de amortecimento no impacto EC/defletor
C2	coef. de amortecimento no impacto entre ECs adjacentes
E	módulo de Young
EC	elemento combustível
F	força de impacto
FA	força de amortecimento
FE	força elástica
FI	força de inércia
G	folga
GAP1	folga EC/defletor
GAP2	folga entre ECs adjacentes
I	momento de inércia
K	constante elástica de mola, rigidez lateral
L	comprimento
NEC	número de elementos combustíveis na fileira analisada
NNO	número de nós axiais em cada elemento
RIG1	coef. de rigidez no impacto EC/defletor
RIG2	coef. de rigidez no impacto entre ECs

$W$	peso
$\ddot{y}$	aceleração de base
$\underline{y}$	vetor deslocamento
$\dot{\underline{y}}$	vetor velocidade
$\ddot{\underline{y}}$	vetor aceleração
$\underline{P}$	vetor de forças externas
$\underline{C}$	matriz de amortecimento
$\underline{K}$	matriz de rigidez
$\underline{M}$	matriz de massa
$\underline{\Phi}$	matriz modal
$\Delta t$	intervalo de tempo de integração
$\xi$	fator de amortecimento modal
$\nu$	modo
$\omega$	frequência natural
$\omega_D$	frequência natural amortecida

O símbolo:

$\sim$	sob a variável indica que a grandeza é um vetor;
$\underline{\quad}$	sob a variável indica que a grandeza é uma matriz;
$\dot{\quad}$	sobre a variável indica derivação em relação ao tempo;
$\quad^T$	indica operação de transposição.

LISTA DE FIGURAS

	Página
FIGURA 1.1 - Vareta Combustível.....	2
FIGURA 1.2 - Elemento Combustível.....	3
FIGURA 1.3 - Dispositivo de Fixação das Varetas Combustíveis nas Grades Espaçadoras.....	4
FIGURA 1.4 - Reator PWR Típico.....	5
FIGURA 1.5 - Vistas em corte do Núcleo (esquemáticas).....	7
FIGURA 1.6 - Reator PWR Típico - Ilustração dos Movimentos Relativos no Interior do Vaso Submetido a Excitação Dinâmica.....	8
FIGURA 1.7 - Procedimento para Análise Estrutural do Núcleo	11
FIGURA 4.1 - Elemento de Impacto.....	26
FIGURA 4.2 - Deslocamentos Relativos das Varetas Combustíveis no Interior das Células das Grades Espaçadoras.....	27
FIGURA 4.3 - Modelo Estrutural do Núcleo.....	29
FIGURA 6.1 - Fluxograma Simplificado do Programa STYCA.....	48

FIGURA 7.1 - Idealização da estrutura e carregamento de vento. Caso 1.....	51
FIGURA 7.2 - Aceleração de Base ( $\text{ft/s}^2$ ). Caso 1.....	52
FIGURA 7.3 - Deslocamento (ft). Caso 1.....	53
FIGURA 7.4 - Deslocamento (ft). Caso 1 ( $\xi = 0,05$ ).....	53
FIGURA 7.5 - Sistema massa-mola e curva força vs. deflexão da mola não-linear. Caso 2.....	55
FIGURA 7.6 - Modelagem para o programa STYCA e carregamento impusivo. Caso2.....	56
FIGURA 7.7 - Aceleração de Base ( $\text{in/s}^2$ ). Caso 2.....	57
FIGURA 7.8 - Deslocamento (in). Caso 2.....	57
FIGURA 7.9 - Modelagem para o programa STYCA. Caso3.....	58
FIGURA 7.10 - Aceleração de Base ( $\text{m/s}^2$ ). Caso 3.....	63
FIGURA 7.11 - Deslocamento dos nós 1 (m) - STYCA.....	64
FIGURA 7.12 - Deslocamento dos nós 2 (m) - STYCA.....	64
FIGURA 7.13 - Força no Elemento de Impacto - Elemento 1 nó 2 STYCA - (N).....	65

FIGURA 7.14 - Força no Elemento de Impacto - Elemento 2 nó 2 STYCA - (N).....	65
FIGURA 7.15 - Força no Elemento de Impacto - Elemento 3 nó 2 STYCA - (N).....	66
FIGURA 7.16 - Força no Elemento de Impacto - Elemento 4 nó 2 STYCA - (N).....	66
FIGURA 7.17 - Força no Elemento de Impacto - Elemento 5 nós 1 e 2. STYCA - (N).....	67
FIGURA 7.18 - Caso Exemplo - Modelo do Núcleo.....	79
FIGURA 7.19 - Aceleração de Base ( $m/s^2$ ).....	80
FIGURA 7.20 - Deslocamento dos nós 2 - 1ª rodada (m).....	80
FIGURA 7.21 - Deslocamento dos nós 3 - 1ª rodada (m).....	81
FIGURA 7.22 - Deslocamento dos nós 4 - 1ª rodada (m).....	81
FIGURA 7.23 - Deslocamento dos nós 5 - 1ª rodada (m).....	82
FIGURA 7.24 - Deslocamento dos nós 6 - 1ª rodada (m).....	82
FIGURA 7.25 - Deslocamento dos nós 7 - 1ª rodada (m).....	83
FIGURA 7.26 - Força no Elemento de Impacto - Elemento 1 nó 5 - 1ª rodada (N).....	83

FIGURA 7.27 - Força no Elemento de Impacto - Elemento 2 nó 4 - 1ª rodada (N).....	84
FIGURA 7.28 - Força no Elemento de Impacto - Elemento 5 nó 3 - 1ª rodada (N).....	84
FIGURA 7.29 - Deslocamento dos nós 2 - 2ª rodada (m).....	85
FIGURA 7.30 - Deslocamento dos nós 3 - 2ª rodada (m).....	85
FIGURA 7.31 - Deslocamento dos nós 4 - 2ª rodada (m).....	86
FIGURA 7.32 - Deslocamento dos nós 5 - 2ª rodada (m).....	86
FIGURA 7.33 - Deslocamento dos nós 6 - 2ª rodada (m).....	87
FIGURA 7.34 - Deslocamento dos nós 7 - 2ª rodada (m).....	87
FIGURA 7.35 - Força no Elemento de Impacto - Elemento 1 nó 5 - 2ª rodada (N).....	88
FIGURA 7.36 - Força no Elemento de Impacto - Elemento 2 nó 4 - 2ª rodada (N).....	88
FIGURA 7.37 - Força no Elemento de Impacto - Elemento 5 nó 3 - 2ª rodada (N).....	89
FIGURA 7.38 - Deslocamento dos nós 2 - 3ª rodada (m).....	89
FIGURA 7.39 - Deslocamento dos nós 3 - 3ª rodada (m).....	90

FIGURA 7.40 - Deslocamento dos nós 4 - 3ª rodada (m).....	90
FIGURA 7.41 - Deslocamento dos nós 5 - 3ª rodada (m).....	91
FIGURA 7.42 - Deslocamento dos nós 6 - 3ª rodada (m).....	91
FIGURA 7.43 - Deslocamento dos nós 7 - 3ª rodada (m).....	92
FIGURA 7.44 - Força no Elemento de Impacto - Elemento 1 nó 5 - 3ª rodada (N).....	92
FIGURA 7.45 - Força no Elemento de Impacto - Elemento 3 nó 4 - 3ª rodada (N).....	93
FIGURA 7.46 - Força no Elemento de Impacto - Elemento 5 nó 4 - 3ª rodada (N).....	93

LISTA DE TABELAS

	Página
TABELA 7.1 - Comparação entre os deslocamentos obtidos com o programa STYCA e aqueles obtidos por Clough (24).....	50
TABELA 7.2 - Comparação entre os deslocamentos obtidos com o programa STYCA e aqueles obtidos por Clough (24) { $\xi = 0,05$ }.....	52
TABELA 7.3 - Comparação entre os deslocamentos obtidos com o programa STYCA e aqueles obtidos por Thomson (26).....	55
TABELA 7.4 - Frequências naturais das vigas do caso 3.....	59
TABELA 7.5 - Modos das vigas do caso 3.....	59
TABELA 7.6 - Diagonal principal da matriz de massa aglutinada das vigas do caso 3 (kg).....	60
TABELA 7.7 - Forças de impacto - caso 3.....	62
TABELA 7.8 - Frequências Naturais dos Elementos (rad/s)....	70
TABELA 7.9 - Matriz Modal dos Elementos.....	70
TABELA 7.10 - Diagonal Principal da Matriz de Massa Aglutinada (kg).....	71

TABELA 7.11 - Fatores de Amortecimento Modal.....	71
TABELA 7.12 - Características do Elemento de Impacto (RIG = coeficiente de rigidez (N/m); C = coeficiente de amortecimento (Ns/m) ).....	71
TABELA 7.13 - Forças de Impacto - 1ª rodada.....	75
TABELA 7.14 - Forças de Impacto - 2ª rodada.....	76
TABELA 7.15 - Forças de Impacto - 3ª rodada.....	77

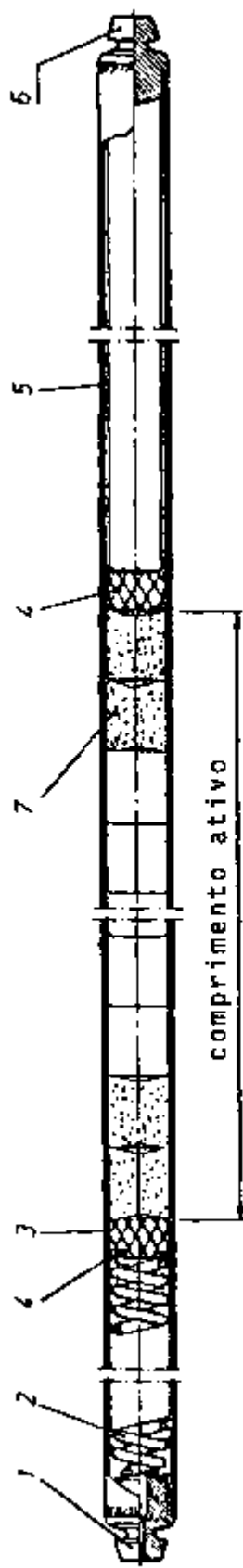
## 1 - INTRODUÇÃO

Os elementos combustíveis típicos de reatores de potência refrigerados a água leve pressurizada (PWR, tipo Angra I, Angra II) são constituídos de um conjunto de varetas combustíveis (fig. 1.1) contendo pastilhas cerâmicas de Urânio enriquecido dispostas de forma reticular.

Essa forma reticular é mantida por uma estrutura composta de tubos guias de varetas de controle, grades espaçadoras e bocais de extremidade (fig. 1.2). Os tubos guias possibilitam a inserção das varetas de controle (absorvedoras de nêutrons que controlam a reatividade do núcleo) dentro do elemento combustível e são soldados de forma rígida às grades espaçadoras e aos bocais de extremidade, formando um conjunto que é denominado esqueleto do elemento combustível.

As varetas combustíveis são fixadas somente às grades espaçadoras por um dispositivo mola-batente existente nas grades (fig. 1.3). Esta forma de fixação permite haver deslizamento da vareta combustível em relação à grade espaçadora, possibilitando desta forma acomodar expansões diferenciais, tanto térmicas quanto produzidas pela irradiação prolongada no reator (crescimento axial dos tubos com a irradiação), entre as varetas combustíveis e o esqueleto combustível.

O núcleo de um reator tipo PWR (fig. 1.4) consiste de um conjunto de elementos combustíveis dispostos lado a lado, com pequenas folgas entre elementos adjacentes e entre os elementos da periferia e os defletores (fig. 1.5).



- 1 : tampão superior
- 2 : mola da vareta combustível
- 3 : tubo de revestimento
- 4 : pastilha isolante de  $Al_2O_3$
- 5 : tubo suporte
- 6 : tampão inferior
- 7 : pastilha combustível de  $UO_2$

FIGURA 1.1 - Vareta Combustível.

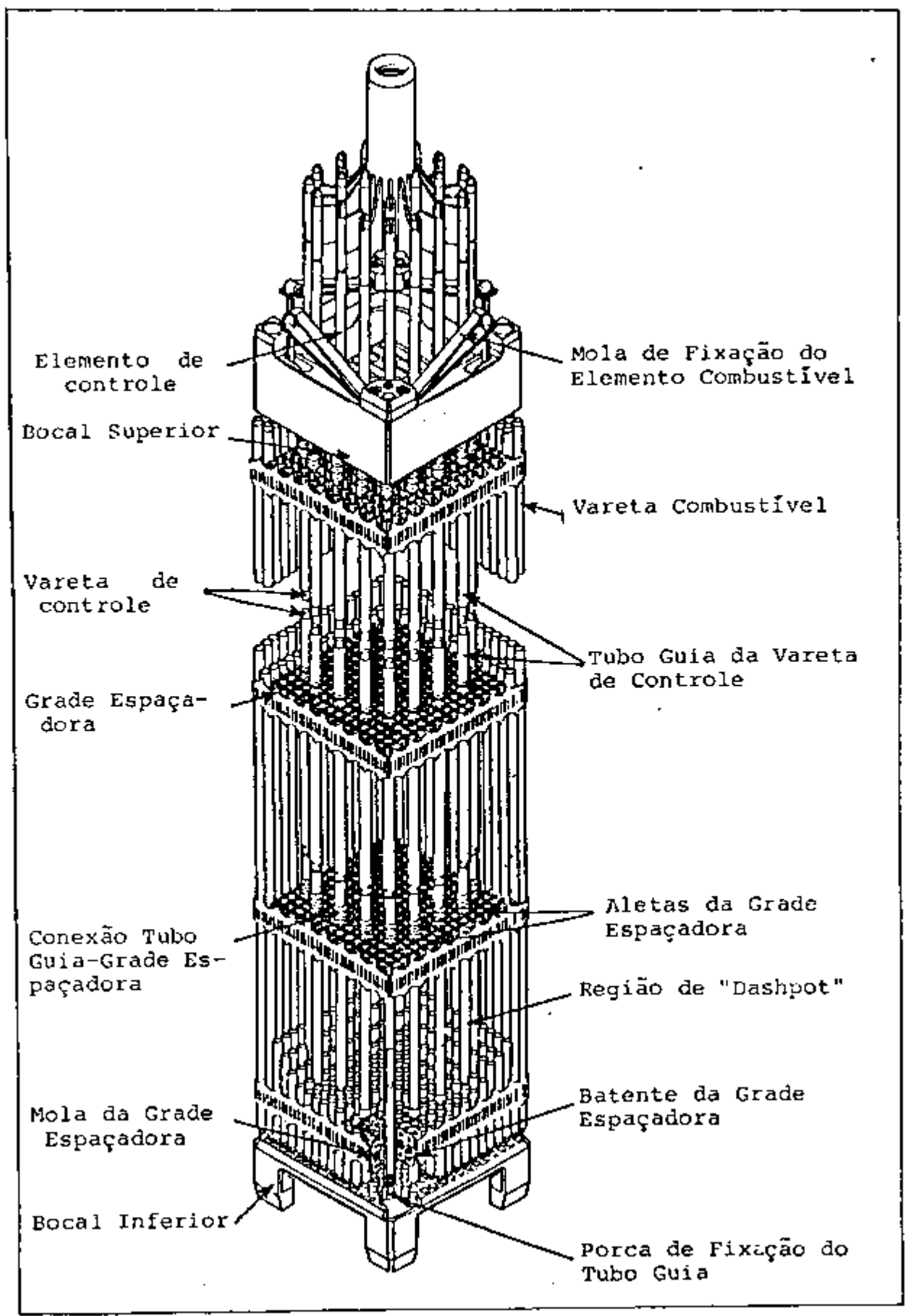


FIGURA 1.2 - Elemento Combustível

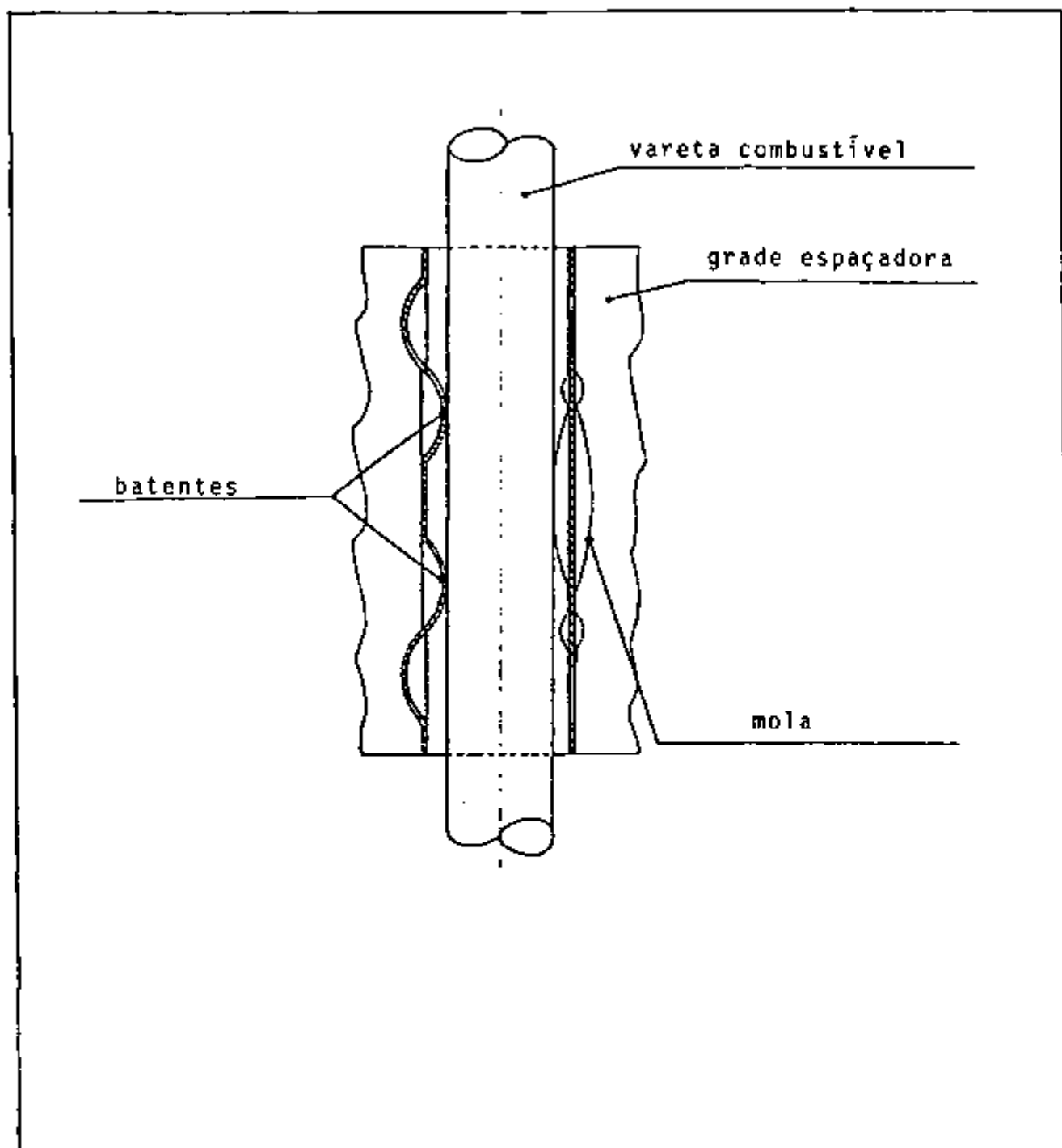


FIGURA 1.3 - Dispositivo de Fixação das varetas Combustíveis nas Grades Espaçadoras.

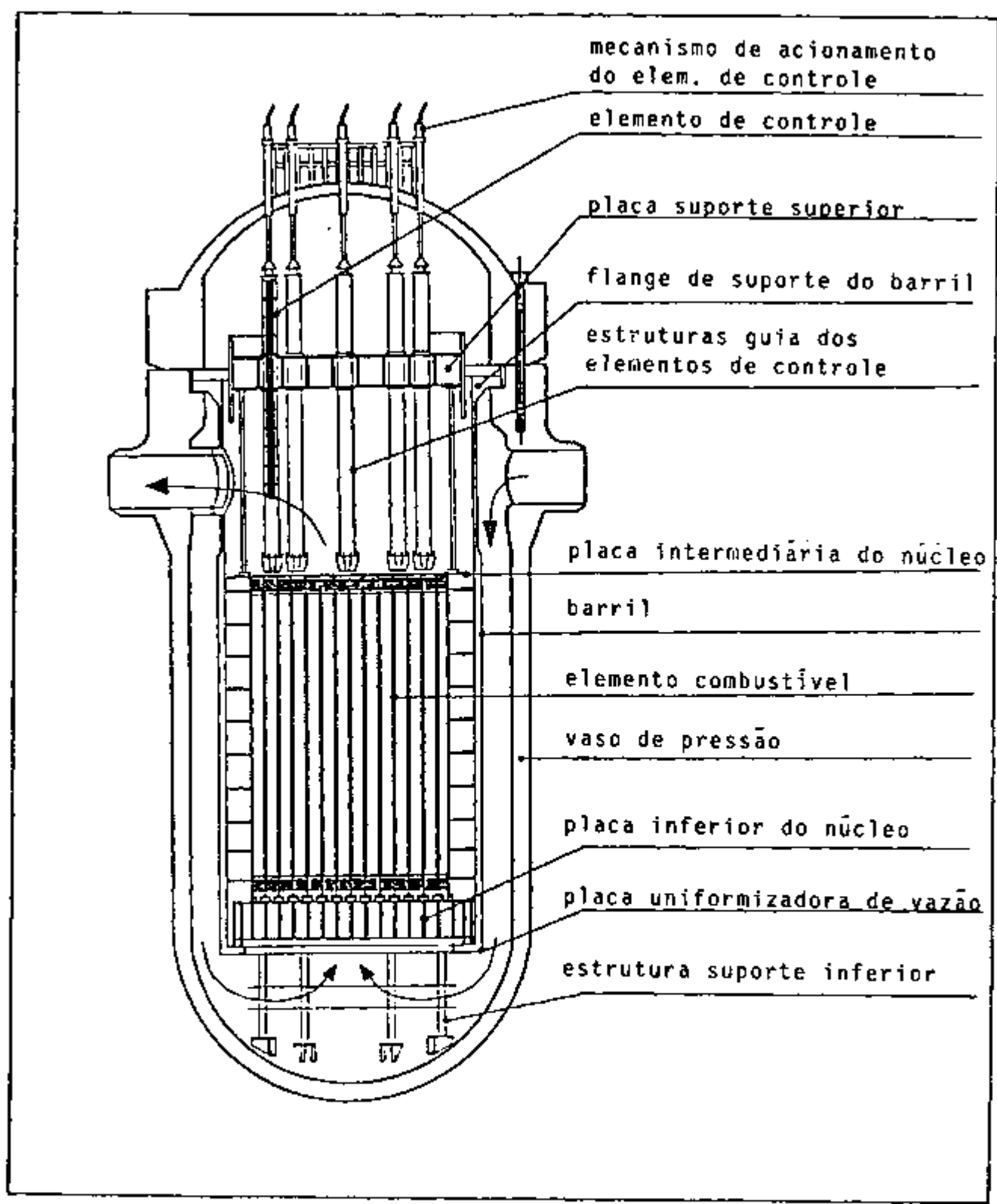


FIGURA 1.4 - Reator PWR Típico.

Na verificação do projeto mecânico dos elementos combustíveis, a resposta à excitação dinâmica precisa ser determinada.

A partir da resposta dinâmica dos elementos combustíveis, investiga-se os requisitos de garantia da inserção dos elementos de controle e garantia da manutenção de uma adequada geometria dos canais entre varetas que possibilite a refrigeração do núcleo, sempre com o objetivo de garantir-se a segurança da instalação.

As excitações dinâmicas podem ser devidas a terremotos, acidente de perda de refrigerante (LOCA - loss of coolant accident), etc...

Tendo em vista a existência das folgas entre os elementos combustíveis e entre estes e os defletores, a componente horizontal de uma excitação qualquer pode induzir à colisão entre os vários componentes como resultado dos seus movimentos relativos (fig. 1.6). No início da excitação dinâmica, esta provem somente das placas intermediária e inferior do núcleo, então todos os elementos combustíveis vibram em paralelo. Entretanto, uma vez que a amplitude do deslocamento do elemento combustível mais externo ultrapasse a folga existente entre ele e o defletor, o impacto acontece, perturbando os movimentos paralelos, prevalecendo então um movimento aleatório.

A ocorrência de colisões torna o problema não linear e impede a análise espectral de um único elemento combustível em separado. Torna-se necessário determinar o histórico da resposta em função do tempo de cada elemento combustível, avaliando-se as forças de impacto, entre elementos adjacentes e entre estes e os defletores,

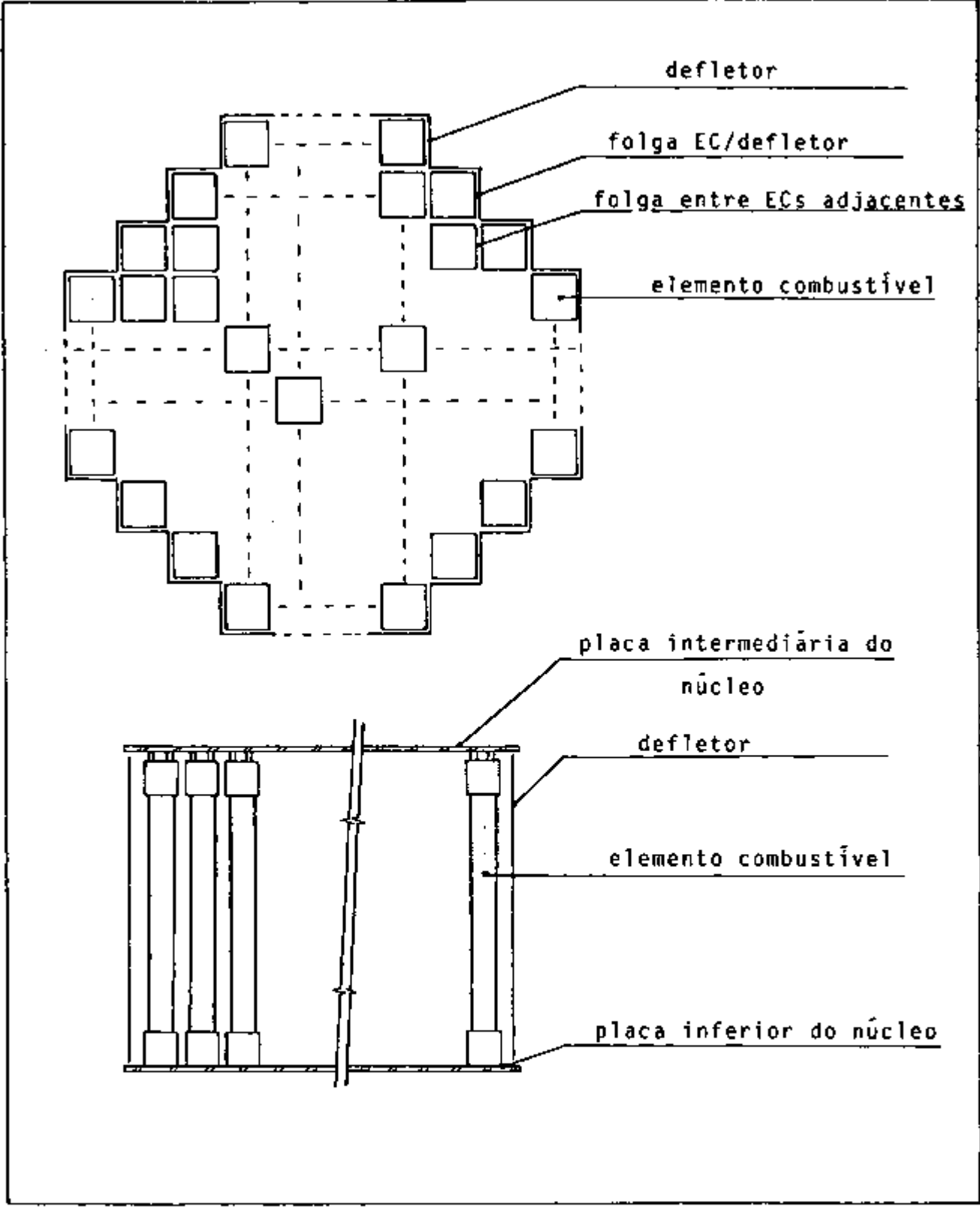


FIGURA 1.5 - Vistas em Corte do Núcleo (esquemáticas).

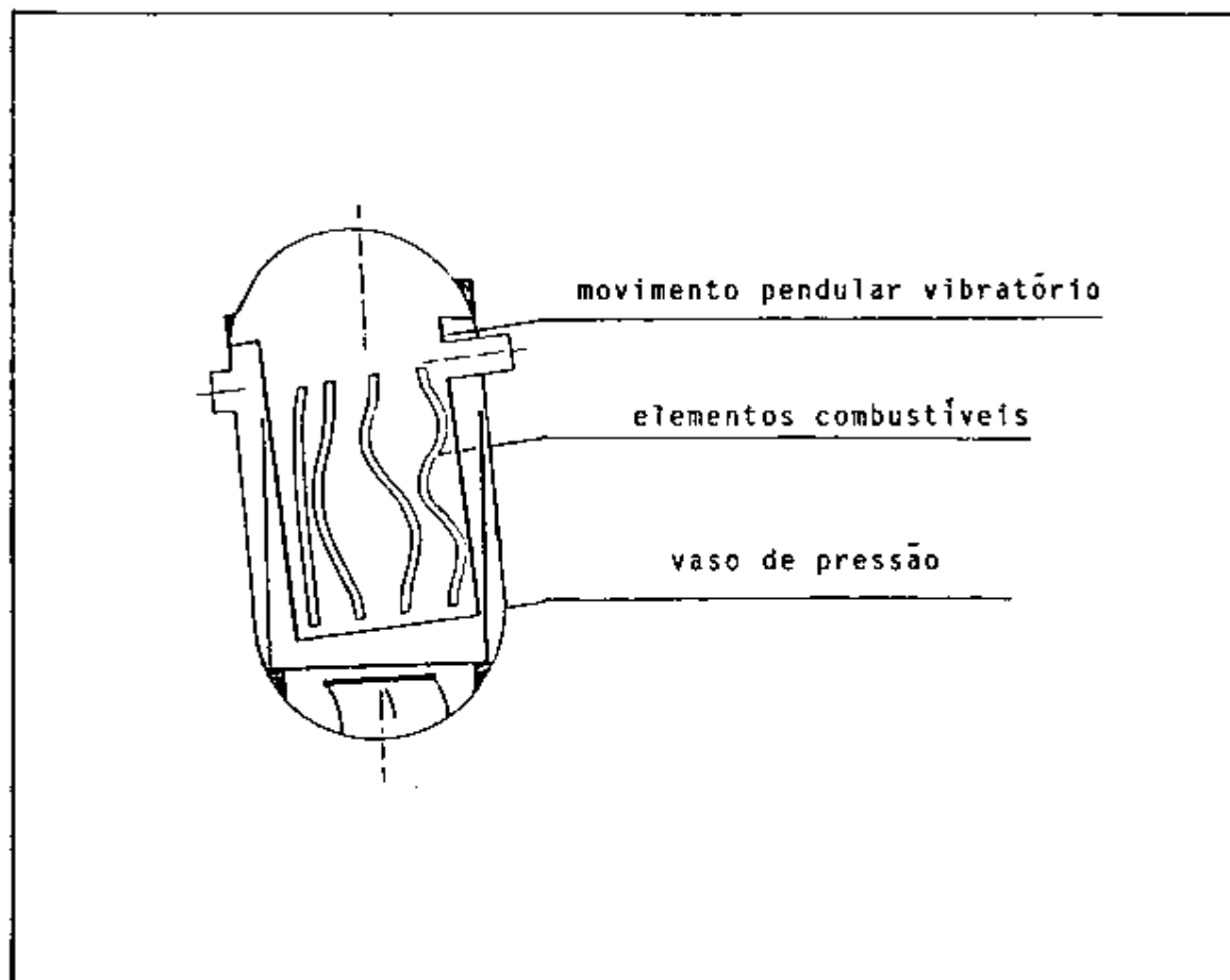


FIGURA 1.6 - Reator PWR Típico - Ilustração dos Movimentos Relativos no Interior do Vaso Submetido a Excitação Dinâmica.

que ocorrem devido ao fechamento das folgas.

Este trabalho apresenta um procedimento e um programa computacional para a determinação da resposta dinâmica lateral não-linear do núcleo de reatores tipo PWR.

O programa computacional desenvolvido pretende ser mais adequado à solução deste problema em particular do que um programa de elementos finitos comercial, tendo em vista ser um programa dedicado, permitindo a utilização de modos e frequências naturais obtidas experimentalmente, utilização de amortecimento estrutural modal, também possível de ser obtido experimentalmente, apresentar um modelo de elemento de impacto mais completo e passível de ser aperfeiçoado o quanto se queira.

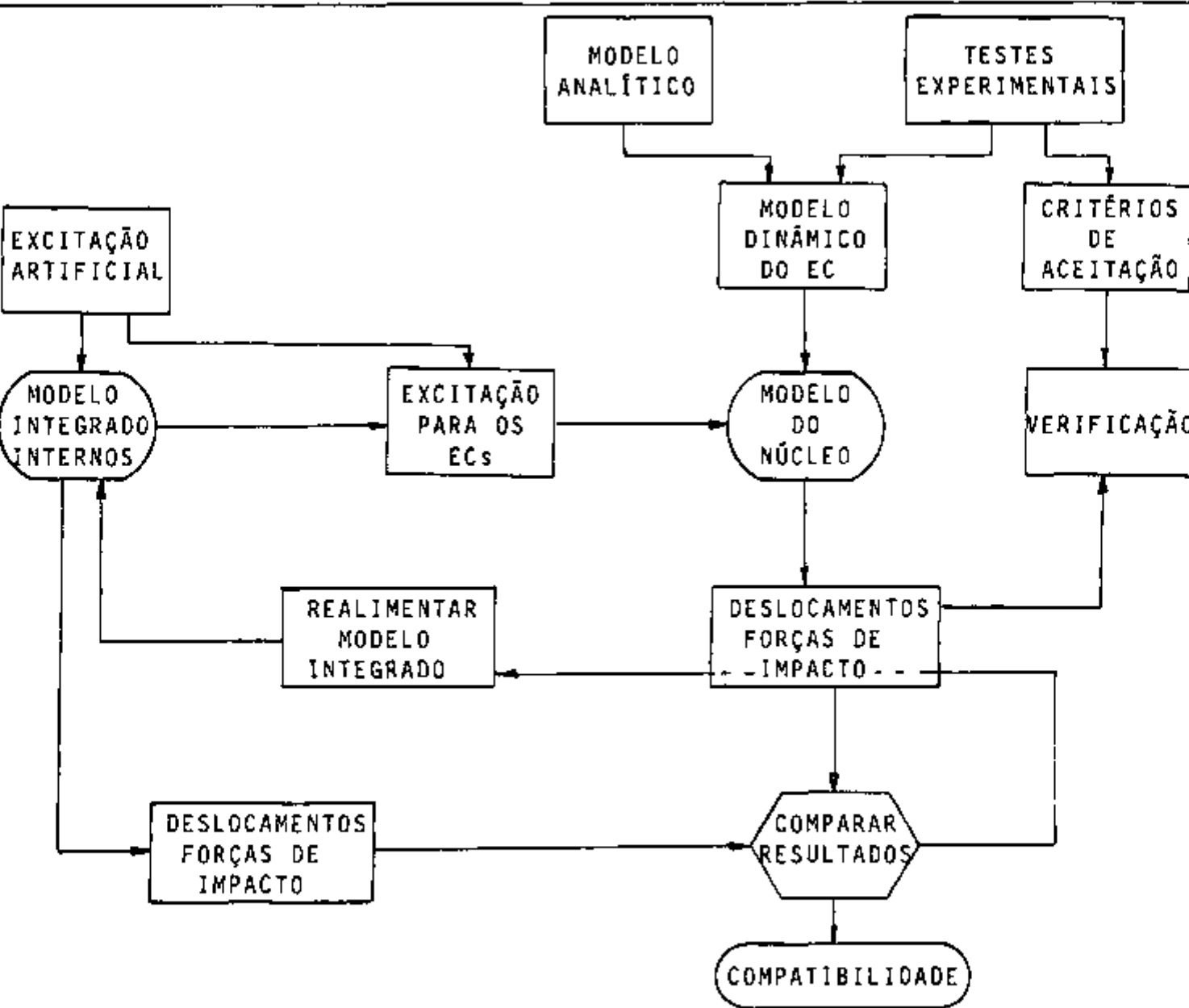
Além disso o programa pretende ser econômico e eficiente tornando-o viável para a realização de parametrizações e estudos amplos de núcleos de reatores, submetidos a excitações dinâmicas de diversas características, sem preocupações com o custo ou viabilidade do processamento computacional.

Este melhor desempenho computacional do programa permite estudos da sensibilidade da resposta para variações em diversos fatores, que podem ser tanto variáveis de projeto como incertezas de fabricação ou mudanças de características dinâmicas do elemento combustível, tais como, características de dissipação de energia nos fenômenos de impacto e características de rigidez lateral do elemento. Permite ainda análise da sensibilidade da resposta para variações em parâmetros que influem na precisão dos resultados devido à metodologia ou aos métodos numéricos empregados, tais como, número de modos empregado na análise, intervalo de tempo de

integração, erro máximo admitido para a convergência.

Este modelo estrutural para análise do núcleo é complementar a um outro possível modelo em elementos finitos do conjunto do vaso do reator e seus internos. O modelo do núcleo pode ser analisado separadamente do modelo dos internos se a resposta do núcleo for comparável para ambos. A própria excitação a ser aplicada neste modelo, qual seja, um histórico de deslocamentos ou acelerações das placas intermediária e inferior do núcleo, pode ser derivada daquele outro.

Para possibilitar a análise separada do núcleo deve ser feito inicialmente um ajuste iterativo dos dois modelos. O modelo aqui apresentado fornecerá características mais apropriadas do comportamento dinâmico dos elementos para o modelo completo. O modelo completo por sua vez fornecerá a excitação de base para aquele. Assim, ambos os modelos analíticos vão sendo realimentados. Verificando-se a semelhança entre os resultados em termos de deslocamentos e magnitude das forças de impacto obtidas dos dois modelos, estará se assegurando a compatibilidade entre eles. Um esquema do procedimento deste ajuste está ilustrado na figura 1.7.



A 1.7 - Procedimento para Análise Estrutural do Núcleo.

## 2 - PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

A análise estrutural dinâmica de reatores PWR teve início com os trabalhos de Bohm e Nahavandi (1,2,3,4). Bohm, em seu primeiro trabalho, estudou a determinação das frequências e modos naturais dos internos de um reator PWR típico, utilizando o método da matriz de transferência (derivado do método de Holzer) (1). Neste trabalho não foram feitas considerações acerca da possibilidade de ocorrência de colisões entre os internos devido a existência de folgas entre estes.

Atentos para a necessidade de consideração do impacto entre os diversos componentes do reator, Bohm e Nahavandi começaram a estudar o problema de vigas submetidas a forças de impacto (2,3). Na referência (2), expressaram a equação diferencial para o movimento de uma viga, incluindo efeito de amortecimento e de forças não-lineares exercidas por obstáculos elásticos. Esta equação foi expressa na forma de diferenças finitas e integrada numericamente. Os resultados apresentados são referentes a um caso exemplo onde a excitação é dada por um deslocamento variando senoidalmente na extremidade superior da viga e o impacto se dá em sua extremidade inferior. Já na referência (3), foram apresentados resultados para dois casos exemplos: primeiramente para duas vigas idênticas excitadas nas extremidades superiores e impactando nas extremidades inferiores, e o outro para duas vigas dissimilares, uma colocada internamente à outra, também excitadas nas extremidades superiores e impactando nas extremidades inferiores.

Em outro trabalho (4), Bohm e Nahavandi realizaram uma análise estrutural dinâmica dos internos de um reator, onde foi empregado o método dos elementos finitos para a modelagem das

estruturas, realizando uma integração numérica no domínio do tempo do sistema de equações diferenciais simultâneas do movimento. Foram utilizados três tipos de elementos estruturais: elementos elásticos, elementos rígidos e articulações, além de elementos de impacto. A interação fluido-estrutura não foi considerada diretamente, mas sim indiretamente aumentando-se as massas nodais. Foram apresentados ainda alguns resultados (deslocamentos nodais e forças de impacto entre componentes) obtidos nas análises. Neste modelo, todos os elementos combustíveis foram condensados em apenas dois grupos.

Gesinski e Chiang (6) utilizaram a modelagem de Bohm e Mahavandi (4) para obter a resposta temporal do comportamento dinâmico dos internos do reator submetido a excitação sísmica. Utilizaram então os deslocamentos das placas do núcleo obtidos como excitação para um modelo mais refinado do núcleo. Este modelo considerado é constituído por uma fileira de elementos combustíveis, representados em elementos finitos por sistemas massa-mola, com elementos de impacto e amortecimento entre eles. O modelo foi ajustado a partir de trabalhos experimentais, para obtenção de características dinâmicas de um elemento combustível isolado e de um conjunto de elementos combustíveis. Com este modelo foram então calculados o histórico temporal dos deslocamentos nodais e forças de impacto entre os componentes.

Ramani analisou um conjunto de elementos combustíveis no núcleo de um reator submetido a carregamento sísmico (9). Utilizando elementos de viga, aplicou o método dos elementos finitos para a modelagem das estruturas. Foram apresentados dois modelos, um mais simplificado representando o reator e seus internos, que serviu para obtenção de subsídios (carregamentos)

para o outro modelo, mais refinado, constituído pelo conjunto dos elementos combustíveis suportados pelas placas do núcleo. Foram apresentados ainda gráficos dos carregamentos sísmicos e resultados de deslocamentos e forças de impacto obtidos em uma análise típica.

Nuno et al. analisaram uma fileira de elementos combustíveis dispostos lado a lado, obtendo um histórico em função do tempo de seus deslocamentos laterais (7). Utilizaram o método de superposição modal através de modos e frequências naturais obtidos experimentalmente, tratando as forças de impacto entre elementos combustíveis como forças externas. Os resultados apresentados foram obtidos com o programa FUVIAN, desenvolvido para resolver o problema. Em trabalho posterior (8), Nuno et al. apresentaram o aprimoramento da modelagem do elemento de impacto utilizado em FUVIAN, visando reduzir excesso de conservantismo nos resultados obtidos para as forças de impacto entre elementos combustíveis.

Hotta desenvolveu o programa HORIZON, que amplia a capacidade de FUVIAN, possibilitando a análise simultânea das direções X e Y do núcleo, considerando a possibilidade de ocorrência de impacto entre os cantos dos elementos combustíveis (21).

Preumont desenvolveu um algoritmo para análise de uma fileira de elementos combustíveis no núcleo de um reator PWR (11). A equação diferencial do movimento de cada elemento combustível foi integrada separadamente, utilizando o método de superposição modal e a fórmula de Duhamel. Forças de impacto foram tratadas como forças externas em cada intervalo de integração. Os resultados apresentados foram obtidos para uma análise típica.

O programa computacional FAMREC, desenvolvido por Grubb (12), analisa uma fileira de elementos combustíveis no núcleo de um reator PWR utilizando o método de superposição modal. Para a solução do sistema de equações diferenciais desacopladas foi utilizado o método da transformada de Laplace. Neste programa, modos e frequências naturais necessários para as análises devem ser obtidos experimentalmente ou a partir de algum modelo analítico dos elementos combustíveis. Da mesma forma que em (7, 8, 21 e 11), as forças de impacto entre os elementos foram tratadas como forças externas em cada intervalo de integração.

Kim et al. apresentaram o estudo de uma fileira de 13 elementos combustíveis dispostos lado a lado (conforme montados no núcleo do reator) submetidos a excitação sísmica (17). Foi utilizado um programa de elementos finitos que modela os elementos combustíveis por elementos de viga, com elementos de impacto nas posições de grades espaçadoras. A resposta obtida foi analisada em termos da intensidade das forças de impacto, onde o espectro de excitação foi variado e houve a possibilidade de considerar ou não a deformação elasto-plástica das grades espaçadoras ao ser ultrapassada a força crítica de instabilidade destas.

Leroux apresentou o programa computacional CASAC, baseado no método dos elementos finitos, desenvolvido para a análise dinâmica dos elementos combustíveis (18). A solução das equações diferenciais foi feita utilizando-se o método de predição-correção. O programa utilizou um número limitado de elementos estruturais (elementos de viga, de impacto, de escorregamento, de amortecimento e de interação fluido-estrutura), permitindo a utilização de duas formulações distintas para o amortecimento: amortecimento viscoso constante na biblioteca de elementos do

programa ou amortecimento de Rayleigh. O programa apresenta ainda uma metodologia para levar em consideração a interação fluido-estrutura, que consiste na correção do vetor aceleração calculado em cada intervalo de integração, multiplicando-o por uma matriz especial.

Na referência (19) Leroux et al. realizaram a análise de uma fileira de 15 elementos combustíveis submetidos a carregamento sísmico e carregamento devido a acidente de perda de refrigerante, utilizando-se dos modelos desenvolvidos na referência (18). Os resultados foram apresentados em termos de deslocamentos e forças de impacto, com a análise da sensibilidade dos resultados aos seguintes parâmetros: tamanho das folgas entre elementos combustíveis, rigidez dos elementos combustíveis, características de impacto das grades espaçadoras.

As referências (5,6,10,13 a 16,20,22,23) apresentam trabalhos experimentais para a obtenção de características dinâmicas dos elementos combustíveis e seus componentes, tais como modos e frequências naturais, características de impacto das grades espaçadoras, etc..., úteis na modelagem estrutural dinâmica do núcleo do reator.

Takada e Egusa realizaram um estudo teórico e experimental sobre as frequências naturais laterais de um elemento combustível de um reator PWR para propulsão naval (5). Foram estudadas a primeira frequência do conjunto do elemento combustível e a primeira frequência natural de uma vareta combustível.

Stokes e King desenvolveram um extenso programa experimental para a avaliação das características dinâmicas de um elemento

combustível (10). Foram avaliadas as influências de diversos fatores sobre as frequências naturais e amortecimentos modais do elemento combustível, tais como meio (no ar ou na água), temperatura da água, velocidade do fluxo de refrigerante, amplitude de vibração, direção de vibração e inserção de varetas de controle.

Preumont et al. apresentaram um modelo estrutural de um elemento combustível para análise dinâmica (13,14). Foram apresentados ainda, testes estáticos e de impacto feitos em grades espaçadoras, com a finalidade de obterem-se características de rigidez e de dissipação de energia a serem utilizadas no modelo do núcleo apresentado na referência (11).

Kim et al. desenvolveram um programa experimental de testes dinâmicos de um elemento combustível e de um conjunto de 3 elementos combustíveis em uma fileira (15,16). Os testes foram realizados no ar e na água à temperatura ambiente e alguns dos resultados apresentados foram os modos e frequências naturais, amortecimentos modais e forças de impacto entre elementos combustíveis.

Rigadeau et al. desenvolveram uma modelagem para a determinação da rigidez de uma grade espaçadora ao carregamento no seu plano, a partir de testes de esmagamento dinâmico (testes de impacto) (20).

Queval et al. desenvolveram um programa experimental para obtenção de características dinâmicas (frequências e modos naturais e amortecimentos modais) de elementos combustíveis (22,23). Os testes foram feitos no ar e na água. Foi estudado

também o comportamento do elemento combustível durante impacto (contra uma parede rígida e entre dois elementos). O elemento combustível foi modelado em elementos finitos, ajustando-se os parâmetros através dos testes de obtenção de características dinâmicas, e foram comparados os resultados obtidos com este modelo com aqueles obtidos nos testes de impacto do elemento combustível.

### 3 - CARACTERÍSTICAS DINÂMICAS DO ELEMENTO COMBUSTÍVEL

No modelo apresentado neste trabalho são de interesse apenas os deslocamentos do conjunto do elemento combustível. Em todas as referências estudadas seus autores utilizaram nos seus modelos analíticos elementos de viga ou então os deslocamentos dos nós axiais dispostos ao longo da altura do elemento combustível para descrever o movimento deste. Portanto vibração individual das varetas não é considerada. Entretanto, sabe-se que o comportamento vibracional de cada vareta combustível pode ser bem representado por um modelo de viga de massa igual a soma das pastilhas combustíveis e do tubo de revestimento, com as pastilhas não contribuindo para a rigidez da vareta (13).

A vibração lateral do elemento combustível como um todo pode ser considerada como o de uma viga simples. Esta conclusão pode ser obtida de diversos autores (5,6,10,13,14,15,16,20,22,23). Obtidos experimentalmente, os modos do elemento combustível são indicativos de um comportamento de viga engastada em ambas as extremidades. Estudos de ambas as direções, lateral e diagonal, produzem as mesmas frequências naturais (10).

A rigidez à flexão do elemento combustível diminui com o aumento da deflexão lateral, indicando um comportamento não-linear (7,9,10,13,14). Isto é devido à forma de fixação das varetas combustíveis nas grades espaçadoras, que é feita através de um vínculo não linear, o qual permite o escorregamento relativo entre a vareta e a grade, como já foi visto no capítulo introdutório. No entanto este comportamento não é levado em conta no modelo aqui apresentado, em concordância com os modelos das referências estudadas. Isto porque introduziria um refinamento nos modelos

analíticos que aumentaria em muito as dificuldades do processamento computacional, e também porque pode ser obtida boa concordância com resultados experimentais utilizando-se modelos lineares para descrever o movimento de cada elemento combustível em separado. Um modelo linear para o elemento combustível é válido até uma determinada amplitude do seu deslocamento lateral. Obviamente esta amplitude é dependente do projeto de cada elemento combustível em particular.

### 3.1 - Comportamento das frequências naturais do elemento combustível.

As frequências naturais do elemento combustível são influenciadas por diversos fatores.

O meio circundante onde são realizados os testes de análise modal, ar ou água (que é a condição real no reator), modifica as frequências obtidas (5,8,10,14). A mudança do meio ar para a água (diminuição aproximada de 10 a 15%) é devida à massa de água adicional acrescentada à massa do elemento. Devido à inexistência de um tubo envoltório no elemento, o fluido pode escoar de um lado para outro através deste, ao invés de ao redor. Portanto, o comportamento do elemento combustível em um canal não difere significativamente de seu comportamento teórico em um fluido infinito (11,14). Portanto, nos modelos analíticos não é considerada interação fluido-estrutura; o efeito do fluido é usualmente considerado apenas adicionando-se massa aos nós.

A temperatura e conseqüente mudança na densidade e viscosidade da água não têm efeito aparente nas frequências do elemento (10,14). As frequências naturais deveriam aumentar devido

ao aumento na temperatura da água porque a densidade desta diminui. Isto não é verificado experimentalmente. Segundo Stokes (10), provavelmente isto é devido a que a diminuição da massa virtual de água adicionada ser compensada por uma diminuição da rigidez do elemento devido à temperatura.

As frequências do conjunto do elemento combustível não são influenciadas por vibrações induzidas por fluxo do refrigerante, desde que a resposta em fluxo estagnado é semelhante àquela para condições de fluxo (10).

Resumindo, temos que as frequências naturais:

- (i) diminuem com o aumento da amplitude de vibração;
- (ii) diminuem com a diminuição das forças de mola do vínculo da vareta combustível com as grades espaçadoras;
- (iii) são independentes da direção de vibração (lateral ou diagonal);
- (iv) diminuem na água (em relação ao ar);
- (v) são independentes da velocidade do fluxo;
- (vi) são minimamente afetadas pela temperatura da água.

### 3.2 - Comportamento do amortecimento estrutural do elemento combustível.

O amortecimento estrutural do elemento combustível é influenciado por diversos fatores (8,9,10,14).

O amortecimento aumenta com a amplitude de vibração, devido ao escorregamento das varetas nas posições de grades. Adicionalmente a redução da rigidez à flexão do elemento no final

de sua vida útil no reator resulta em um aumento de 25 a 100% no amortecimento (10,14). A exposição do elemento às condições de operação no reator contribui para aumentar o amortecimento devido a: (i) relaxação das molas das grades; (ii) desgaste nas faces das molas; (iii) formação de filme de óxido sobre os materiais (10).

Do ar para a água há um aumento aproximado de 120% no amortecimento, devido à maior densidade e viscosidade da água (8,10,14).

Segundo alguns pesquisadores (10,14) o fluxo de água contribui significativamente para o amortecimento do elemento combustível. O amortecimento aumenta de 60 a 400% da condição de fluxo estagnado para a condição de presença de fluxo (10,14).

A principal forma de amortecimento no elemento combustível é o deslizamento das varetas combustíveis nas posições de grade. O amortecimento devido ao fenômeno de deslizamento é tão mais significativo que pequenas variações devido, por exemplo, a mudanças na viscosidade do meio (efeito de temperatura), não são possíveis de serem constatadas na prática (10,14).

Resumindo, temos que o amortecimento estrutural:

- (i) aumenta com o aumento da amplitude de vibração;
- (ii) aumenta com a diminuição das forças de mola do vínculo da vareta combustível com as grades espaçadoras;
- (iii) é aproximadamente independente da direção de vibração (lateral ou diagonal);
- (iv) aumenta na água (em relação ao ar);
- (v) é fortemente dependente da velocidade do fluxo;

(vi) é minimamente afetada pela temperatura da água.

#### 4 - O ELEMENTO DE IMPACTO

O impacto entre elementos combustíveis adjacentes e entre os elementos combustíveis mais externos e os defletores será considerado apenas nas elevações correspondentes às grades espaçadoras, onde os elementos apresentam sua maior largura. Portanto, no modelo estrutural são colocados elementos de impacto nestas elevações que representam as características dinâmicas locais correspondentes ao fenômeno de impacto, quais sejam, características de rigidez entre os elementos impactando e características de dissipação de energia.

##### 4.1 - Características das grades espaçadoras.

Em termos estruturais as grades espaçadoras não devem sofrer fratura nem deformações plásticas que excedam a um valor definido, condição necessária para garantir-se a inserção dos elementos de controle e garantir-se também uma adequada geometria dos canais entre varetas combustíveis que possibilite a refrigeração do núcleo.

O critério a ser utilizado nas análises é que as forças de impacto calculadas pelo programa estejam abaixo de um valor limite, determinado em testes experimentais, que provoque deformação plástica excessiva ou falha por instabilidade elástica das grades espaçadoras.

Testes têm sido realizados para determinar-se a rigidez de grades espaçadoras submetidas a carregamento no seu plano, e também a carga crítica de flambagem sob forças de impacto

compressivas (6,13,14,20,22,23). Comprimentos parciais de tubos das varetas combustíveis são inseridos nas grades para simular a condição real no interior do reator. Dispositivos pendulares são utilizados para simular as cargas de impacto. O peso do martelo de impacto é determinado baseando-se no peso de um trecho do elemento combustível entre duas grades espaçadoras consecutivas. Células de carga montadas em série com a grade medem a força de impacto e sua duração. A partir destes testes são obtidos valores de rigidez e coeficientes de restituição a serem utilizados no modelo analítico.

A falha típica por instabilidade da grade, que se obtém de testes de impacto dinâmicos, se dá por deformação local das fileiras e células mais externas. Este tipo de modo de falha pode ser vantajoso, desde que as posições de tubos guias não sofrem distorção por serem mais internas (6,13). Portanto, o critério de aceitação a ser utilizado nas análises pode tolerar um certo nível de distorção das grades.

#### 4.2 - O elemento de impacto.

A característica real das grades espaçadoras é não linear. A rigidez desta ao carregamento no seu plano é dependente do nível de deformação, além disso, ultrapassado o limite elástico da grade, o coeficiente de restituição depende da velocidade inicial de impacto e do histórico do número de impactos precedentes (13).

O elemento de impacto como codificado no programa consta de um elemento elástico (mola) e de um elemento dissipador de energia (modelado por um amortecedor viscoso ou um elemento de histerese), conforme mostra a figura 4.1.

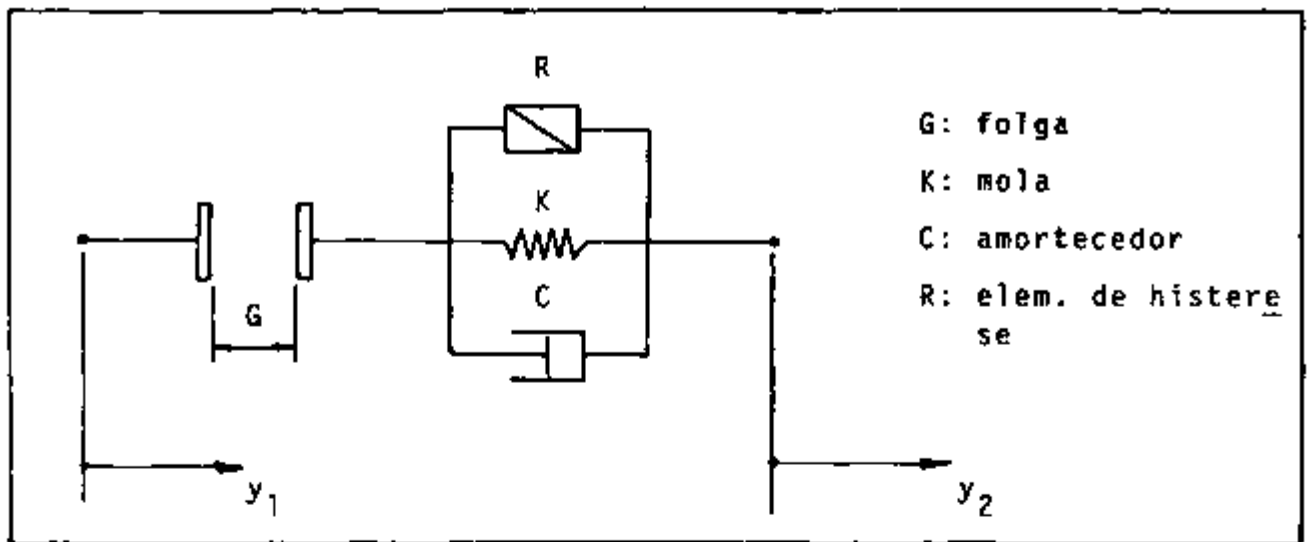


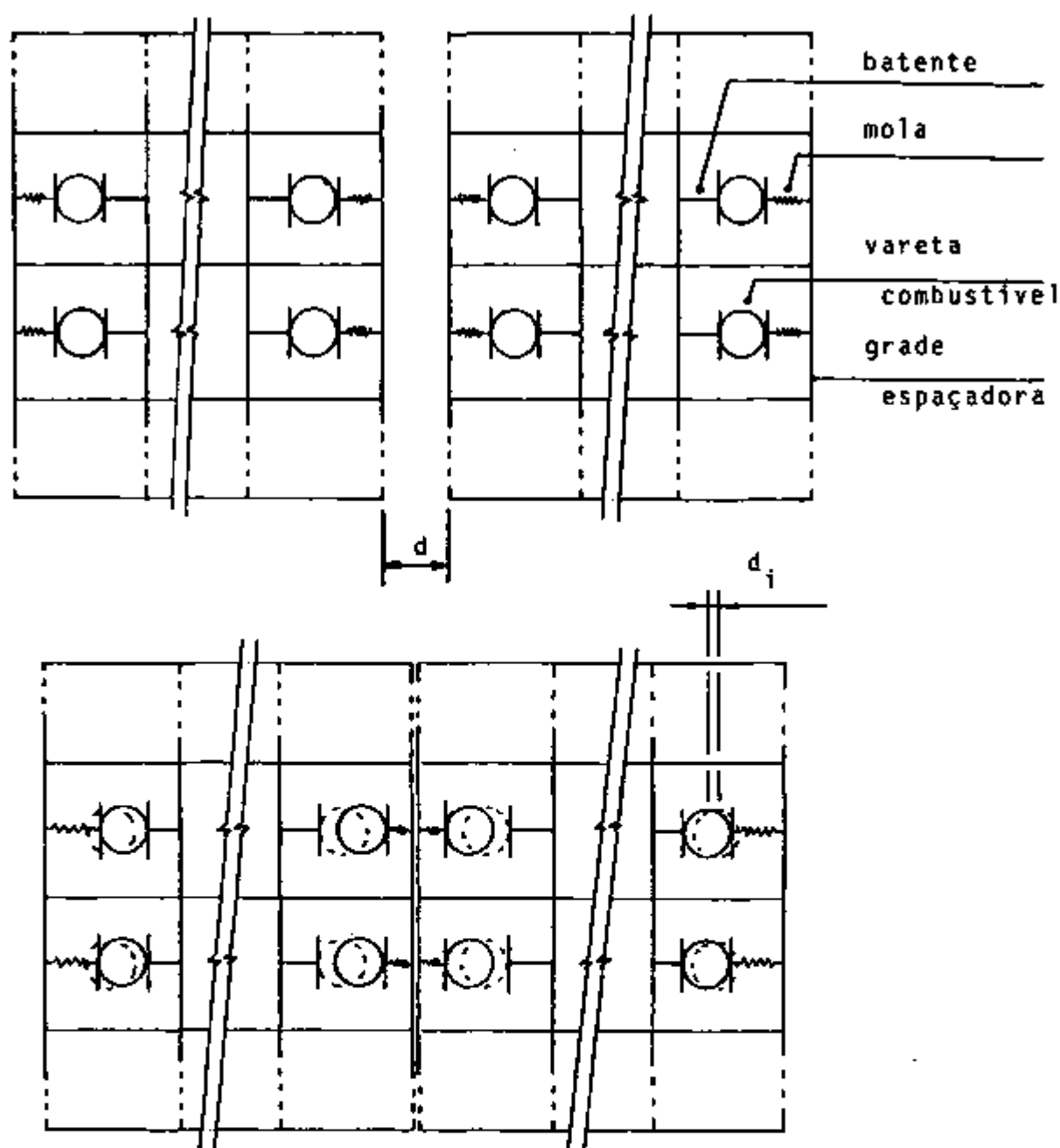
FIGURA 4.1 - Elemento de Impacto

Este elemento de impacto representa o comportamento em termos de rigidez do conjunto molas do vínculo vareta-grade e rigidez ao carregamento no seu plano da própria grade.

Deve-se observar que o centro de massa do sistema, onde está concentrada sua inércia, não deve coincidir com o centro geométrico da grade quando da ocorrência de um impacto.

Quando do fechamento da folga geométrica entre duas grades adjacentes, o centro de massa do conjunto continua a se deslocar, pois as varetas combustíveis, onde está concentrada praticamente a totalidade da inércia do sistema, continuam a se deslocar individualmente no interior das células das grades espaçadoras, deflexionando as molas, como mostrado esquematicamente na figura 4.2.

Este deslocamento adicional do centro de massa do conjunto pode se dar até o limite em que todas as varetas tenham defletido ao máximo suas molas e encostado na face da tira da célula.



$d$  : folga entre ECs adjacentes.

$d_i$  : deslocamento individual de cada vareta em relação à grade espaçadora.

FIGURA 4.2 - Deslocamentos Relativos das Varetas Combustíveis no Interior das Células das Grades Espaçadoras.

Obviamente esta é uma condição limite que não deve ser tolerada como condição de trabalho normal das molas, pois nesta condição as molas sofrem deformação plástica e perdem sua função de sustentação das varetas.

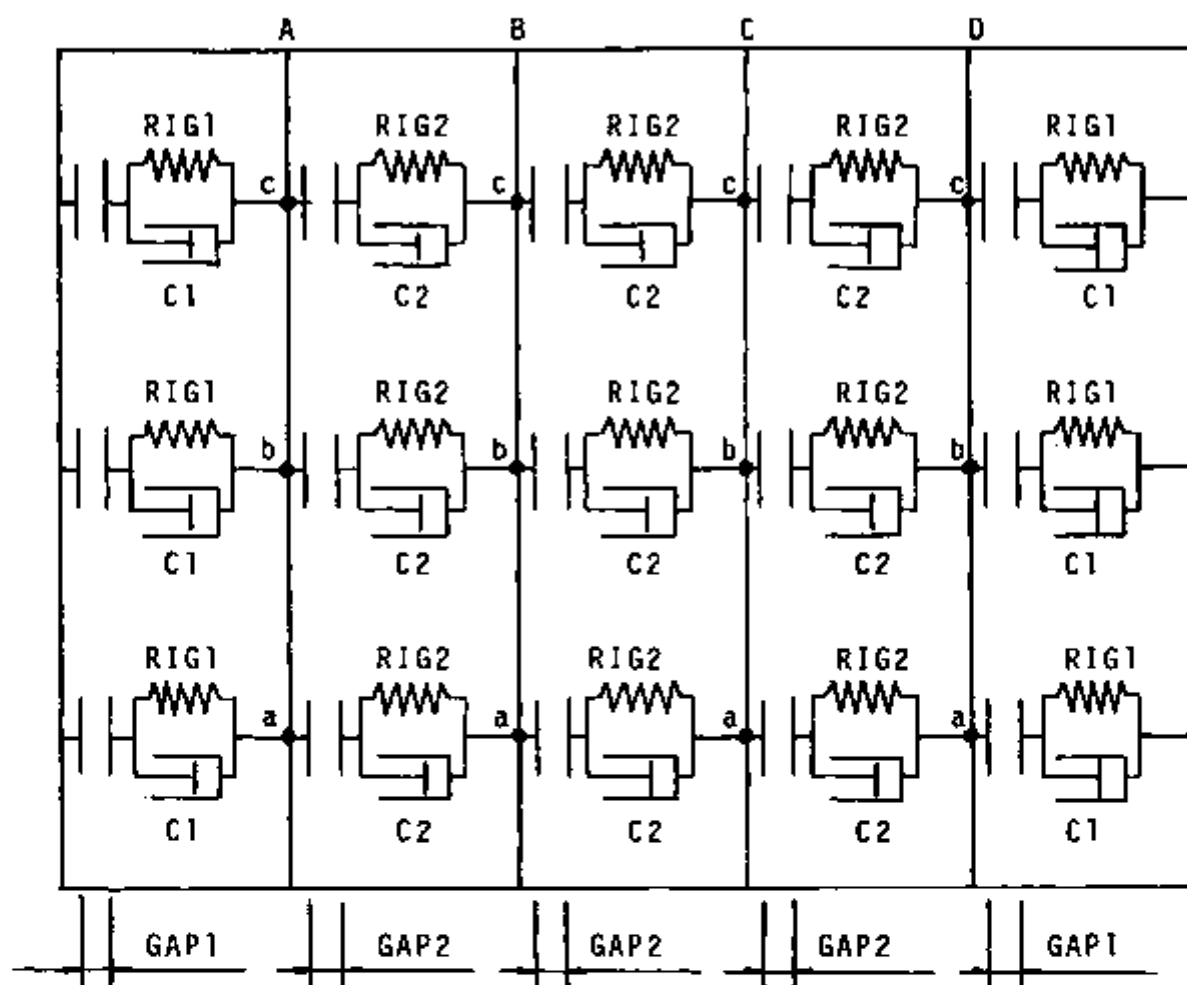
Ao analisar-se as interpenetrações entre nós adjacentes, quando da avaliação dos resultados fornecidos pelo programa, deve-se levar em conta o deslocamento adicional do centro de massa do sistema além do simples fechamento da folga. Assim, evita-se concluir erradamente que esteja havendo interpenetrações excessivas.

Inicialmente, não está se considerando não linearidades no modelo das grades espaçadoras, nem deformação elasto-plástica das grades, nem deslocamentos relativos de cada vareta combustível no interior de uma célula da grade espaçadora em relação a esta.

A sofisticação do elemento de impacto pode ser implementada facilmente nas subrotinas do programa, e o estudo da necessidade de maior sofisticação e a determinação de um modelo mais representativo são sugeridas para trabalhos futuros.

Em cada posição entre grades espaçadoras de elementos adjacentes e entre os elementos mais externos e os defletores há um elemento de impacto, conforme mostra a figura 4.3.

Obtida a resposta em termos de deslocamentos de todos os nós de todos os elementos combustíveis em um determinado instante de tempo, verifica-se a ocorrência de colisões entre componentes, comparando-se os deslocamentos de nós adjacentes com as folgas pré-existentes. Se as folgas foram excedidas, calculam-se as



RIG1      coef. de rigidez no impacto EC/defletor  
RIG2      coef. de rigidez no impacto entre ECs adjacentes  
C1        coef. de amortec. no impacto EC/defletor  
C2        coef. de amortec. no impacto entre ECs adjacentes  
GAP1      folga EC/defletor  
GAP2      folga entre ECs adjacentes  
elementos:    A , B , C , D  
nós        :        a , b , c

FIGURA 4.3 - Modelo Estrutural do Núcleo.

interpenetrações entre os nós adjacentes. Com as interpenetrações, velocidade relativa dos nós impactando, rigidez e coeficiente de restituição no fenômeno do impacto, calcula-se a força resultante em cada nó durante este fenômeno.

A força de mola (elemento elástico) permanece sempre com o mesmo sinal durante todo o impacto, partindo de um valor nulo, atingindo um máximo e voltando a anular-se. A mola é portanto um elemento que não apresenta nenhuma singularidade durante o impacto.

Os elementos dissipadores de energia apresentam troca de sinal durante o impacto, introduzindo portanto uma singularidade possível de levar a instabilidade momentânea.

Quando o contato está fechando, os elementos dissipadores de energia opõem-se a este fechamento, portanto, a força no elemento dissipador de energia está com o mesmo sinal da força de mola. Quando o contato está abrindo, os elementos opõem-se a esta abertura, invertendo seu sinal.

O amortecedor viscoso apresenta ainda outra singularidade tendo em vista que a força nele disponível não parte de um valor nulo. Genericamente ela parte de um valor elevado, proporcional à velocidade dos nós impactando, em seguida anula-se, quando o contato está na iminência de abrir, e recomeça a crescer, com sinal invertido, até atingir um outro pico e então anula-se bruscamente com o descolamento total dos nós.

No elemento de histerese a força disponível parte de um valor nulo, atinge um máximo e então inverte instantaneamente seu sinal;

em seguida começa a decrescer até anular-se com o descolamento dos nós.

A formulação da força de impacto  $F$  utilizando a notação da figura 4.1 é a seguinte:

Se  $y_1 - y_2 \leq G$ , sendo  $y_1$  e  $y_2$  os deslocamentos de dois nós pertencentes a elementos adjacentes, não temos interferência e portanto  $F = 0$ .

Se  $y_1 - y_2 > G$ , temos interferência, e a força de impacto é calculada através da seguinte expressão:

$$F = [K + R \cdot \text{sinal}(\dot{y}_1 - \dot{y}_2)](y_1 - y_2 - G) + C(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) \quad (4.1)$$

A função  $\text{sinal}(\dot{y}_1 - \dot{y}_2)$  fornece apenas o sinal da expressão algébrica  $(\dot{y}_1 - \dot{y}_2)$ , onde  $\dot{y}_1$  e  $\dot{y}_2$  são as velocidades dos nós impactando (o ponto sobre a variável indica derivação em relação ao tempo).

Quando o contato está fechando ( $\dot{y}_1 > \dot{y}_2$ ), todas as forças são de mesmo sinal, opondo-se ao fechamento do contato.

Quando o contato está abrindo ( $\dot{y}_1 < \dot{y}_2$ ), a força no elemento elástico tem sinal contrário às forças nos elementos dissipadores de energia. A força elástica tende a abrir o contato enquanto as forças nos elementos dissipadores de energia opõem-se a esta abertura.

A decisão de qual elemento dissipador de energia é mais adequado dependerá de testes a serem realizados com o programa, procurando identificar qual deles apresenta melhor adequação com eventuais resultados experimentais. Na versão atual do programa STYCA, com que foi rodado o caso exemplo mostrado no capítulo 7, está implementado o modelo de amortecimento viscoso.

## 5 - FORMULAÇÃO ANALÍTICA

As equações do movimento de qualquer sistema dinâmico representam expressões da segunda lei de Newton, a qual estabelece que a taxa de variação da quantidade de movimento de qualquer massa  $m$  é igual à força atuante sobre ela. Esta relação pode ser expressa matematicamente pela seguinte equação diferencial:

$$\underline{\tilde{p}}(t) = \frac{d}{dt} \left( m \frac{d\underline{y}}{dt} \right) \quad (5.1)$$

O símbolo  $\sim$  sob a variável indica que a grandeza é um vetor.

O termo  $\underline{\tilde{p}}(t)$  é o vetor de forças externas aplicadas e  $\underline{y}(t)$  é o vetor posição da massa  $m$ . Para a maioria dos problemas em dinâmica de estruturas, e inclusive no nosso caso em especial, pode-se admitir que a massa não varia com o tempo. Portanto a equação (5.1) pode ser reescrita:

$$\underline{\tilde{p}}(t) = m \frac{d^2 \underline{y}}{dt^2} = m \ddot{\underline{y}}(t) \quad (5.2)$$

Os pontos sobre a variável representam diferenciação em relação ao tempo.

O termo  $m \ddot{\underline{y}}(t)$  é chamado força de inércia resistindo à aceleração da massa.

O conceito de que uma massa desenvolve uma força proporcional a sua aceleração e opondo-se a ela é conhecido como o princípio de d'Alembert.

A força  $\underline{P}(t)$  pode incluir diversos tipos de forças atuando sobre a massa: forças elásticas que se opõe a deslocamentos, forças viscosas que resistem às velocidades e forças externas definidas de forma independente.

Portanto, uma maneira direta e conveniente de se formular as equações do movimento de um sistema dinâmico é expressar o equilíbrio das forças associadas com cada um de seus graus de liberdade.

O estudo do movimento lateral do elemento combustível pode ser abordado através da idealização da sua estrutura como uma "viga equivalente". Nesta viga são de interesse os deslocamentos laterais de certos pontos discretos ao longo de sua altura. Estes pontos do modelo idealizado coincidiriam com pontos do eixo geométrico central do elemento combustível correspondentes às elevações dos bocais de extremidade e das grades espaçadoras.

A cada ponto do modelo idealizado está associado um grau de liberdade, que é o seu deslocamento lateral.

Quatro tipos de forças estarão envolvidas em cada ponto genérico  $i$ : as forças externas aplicadas  $P_i(t)$ , as forças de inércia  $FI_i$ , de amortecimento  $FA_i$  e elásticas  $FE_i$ .

Logo, para cada grau de liberdade, a equação de equilíbrio dinâmico pode ser escrita por:

$$\begin{aligned} FI_1 + FA_1 + FE_1 &= P_1(t) \\ FI_2 + FA_2 + FE_2 &= P_2(t) \\ FI_3 + FA_3 + FE_3 &= P_3(t) \\ \dots & \end{aligned} \tag{5.3}$$

Utilizando notação matricial, onde o traço ( ) sob a variável indica que a grandeza é uma matriz:

$$\underline{FI} + \underline{FA} + \underline{FE} = \underline{P}(t) \tag{5.4}$$

Cada uma destas forças pode ser expressa de forma mais conveniente por meio de um conjunto apropriado de coeficientes de influência. Considerando, por exemplo, a força elástica desenvolvida no ponto 1, ela em geral depende do deslocamento de todos os pontos da estrutura:

$$FE_1 = k_{11}y_1 + k_{12}y_2 + k_{13}y_3 + \dots + k_{1N}y_N \tag{5.5}$$

De modo similar, a força elástica correspondente ao ponto 2 é:

$$FE_2 = k_{21}y_1 + k_{22}y_2 + k_{23}y_3 + \dots + k_{2N}y_N \tag{5.6}$$

Generalizando, temos:

$$FE_i = k_{i1}y_1 + k_{i2}y_2 + k_{i3}y_3 + \dots + k_{iN}y_N \quad (5.7)$$

Nas expressões acima admitiu-se implicitamente que o comportamento da estrutura é linear, e que portanto o princípio da superposição é aplicável.

O significado físico dos coeficientes  $k_{ij}$  é o seguinte:

$k_{ij}$  = força correspondente à coordenada  $i$  devido a um deslocamento unitário da coordenada  $j$ .

Escrevendo o conjunto completo das forças elásticas na forma matricial:

$$\begin{pmatrix} FE_1 \\ FE_2 \\ \dots \\ FE_i \\ \dots \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & \dots & k_{1i} & \dots & k_{1N} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & \dots & k_{2i} & \dots & k_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_{i1} & k_{i2} & k_{i3} & \dots & k_{ii} & \dots & k_{iN} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_i \\ \dots \end{pmatrix} \quad (5.8)$$

Utilizando a notação adotada:

$$\underline{FE} = \underline{Ky} \quad (5.9)$$

A matriz dos coeficientes  $\underline{K}$  é chamada matriz de rigidez da estrutura.

Admitindo-se que o amortecimento depende da velocidade, isto é, que ele é do tipo viscoso, as forças de amortecimento correspondentes aos graus de liberdade selecionados podem ser expressas por intermédio de coeficientes de influência, de uma maneira similar àquela utilizada para a determinação das forças elásticas.

Por analogia com a equação (5.9), o conjunto das forças de amortecimento é dado por:

$$\underline{FA} = \underline{C}\dot{\underline{y}} \quad (5.10)$$

O significado físico dos coeficientes  $c_{ij}$  da matriz  $\underline{C}$ , chamada matriz de amortecimento, é o seguinte:

$c_{ij}$  = força correspondente à coordenada  $i$  devido a uma velocidade unitária da coordenada  $j$ .

As forças de inércia também podem ser expressas por um conjunto de coeficientes de influência. Estes representam a relação entre as acelerações dos graus de liberdade e as resultantes forças de inércia. Por analogia com a equação (5.9), o conjunto das forças de inércia é dado por:

$$\underline{F} = \underline{M}\ddot{\underline{y}} \quad (5.11)$$

O significado físico dos coeficientes  $m_{ij}$  da matriz  $\underline{M}$ , chamada matriz de massa, é o seguinte:

$m_{ij}$  = força correspondente à coordenada  $i$  devido a uma aceleração unitária da coordenada  $j$ .

Substituindo as equações (5.9), (5.10) e (5.11) na equação (5.4), obtemos a equação de equilíbrio dinâmico da estrutura:

$$\underline{M}\ddot{\underline{y}} + \underline{C}\dot{\underline{y}} + \underline{K}\underline{y} = \underline{P}(t) \quad (5.12)$$

A equação (5.12) expressa as "n" equações do movimento (onde "n" é o número total de graus de liberdade considerado) que servem para definir a resposta dinâmica da estrutura.

As seguintes hipóteses foram admitidas para simplificar nosso modelo analítico:

a) considera-se apenas movimento lateral no plano, não sendo considerados movimentos axiais nem torsionais; assim a cada ponto discretizado do nosso modelo está associado um único grau de liberdade que é o seu deslocamento lateral;

b) a resposta a ser obtida corresponde a uma única fileira de elementos combustíveis ao longo do diâmetro do núcleo; assim estamos analisando um problema plano, desconsiderando

interferências de elementos fora do plano analisado. O estudo do problema tridimensional é sugerido para trabalhos futuros.

c) o comportamento de cada elemento é considerado linear, sendo a não-linearidade do problema devida somente aos impactos entre elementos adjacentes; esta consideração permite a utilização do método de superposição modal;

d) o impacto é admitido apenas nas elevações correspondentes às grades espaçadoras; assim estamos discretizando o problema;

e) os defletores e as placas intermediária e inferior do núcleo são admitidas rígidas.

A excitação sobre os ECs é na forma de movimento de base, no caso, das placas inferior e intermediária do núcleo.

O movimento relativo das placas superior e inferior do núcleo é pequeno em comparação com o movimento de translação total do reator, como resultado, pode-se admitir que as placas do núcleo transladam horizontalmente como um corpo rígido. Os movimentos das placas do núcleo, obtidos a partir da análise de conjunto dos internos do reator, não verificados experimentalmente, podem vir a ser a maior fonte de erro nas análises.

O algoritmo de solução adotado utiliza-se do método de superposição modal para a obtenção da resposta temporal do movimento lateral de cada EC. Para a integração da equação diferencial de cada modo utiliza-se a integral de Duhamel em conjunto com o processo de integração numérica de Simpson.

As forças de impacto entre os ECs adjacentes e entre estes e os defletores são tratadas como forças externas.

Formulando o problema, sendo  $y$  os deslocamentos laterais dos nós do elemento combustível, expressos nas coordenadas originais, a equação do movimento de cada elemento combustível é definida pela seguinte equação diferencial matricial para os "n" graus de liberdade (deslocamentos laterais de "n" nós do elemento combustível):

$$\underline{M}\ddot{y} + \underline{C}\dot{y} + \underline{K}y = \underline{P}(t) , \quad (5.13)$$

onde :

$\underline{M}$	matriz de massa
$\underline{C}$	matriz de amortecimento
$\underline{K}$	matriz de rigidez
$\ddot{y}$	vetor aceleração
$\dot{y}$	vetor velocidade
$y$	vetor deslocamento
$\underline{P}(t)$	vetor carregamento

O vetor carregamento  $\underline{P}$  pode ser decomposto em dois outros vetores, um correspondente às forças de inércia devidas ao movimento de base  $\underline{M}\ddot{r}$ , sendo  $\underline{M}$  diagonal, e outro correspondente às forças de impacto que surgem entre elementos combustíveis adjacentes e entre os elementos da periferia e os defletores  $\underline{F}$ .

$$\underline{P} = \underline{F} - \underline{M}\ddot{r} \quad (5.14)$$

Fazendo-se uma transformação de coordenadas utilizando-se da matriz modal  $\underline{\Phi}$ , ortonormalizada em relação à matriz de massa, desacoplam-se os termos em massa e rigidez na equação matricial (5.13). Fazendo-se também a hipótese de que o amortecimento estrutural é a soma dos amortecimentos individuais em cada modo, isto é, que a ortogonalidade dos modos também existe em relação à matriz de massa  $\underline{C}$ , passamos do sistema de "n" equações diferenciais acopladas (5.13) para um sistema de "n<sub>1</sub>" equações diferenciais desacopladas nas coordenadas generalizadas z, onde "n<sub>1</sub>" é o número de modos considerados na análise.

Uma equação genérica "i" é dada pela seguinte expressão:

$$\ddot{z}_i + 2w_i \xi_i \dot{z}_i + w_i^2 z_i = P_i^* \quad (5.15)$$

onde:

$w_i$	freqs. naturais do sistema não amortecido
$\xi_i$	fatores de amortecimento modais
$\ddot{z}_i$	aceleração em coordenada generalizada
$\dot{z}_i$	velocidade em coordenada generalizada
$z_i$	deslocamento em coordenada generalizada
$P_i^* = \underline{\varphi}_i^T \underline{P} = \underline{\varphi}_i^T \underline{F} - \underline{\varphi}_i^T \underline{M} \ddot{\underline{r}}$	força em coordenada generalizada
$\underline{\varphi}_i^T$	modo transposto

Obtida a resposta em termos de deslocamentos e velocidades em coordenadas generalizadas, a resposta nas coordenadas originais pode ser obtida efetuando-se a superposição modal:

$$\underline{y} = \underline{\Phi}^T \underline{z}$$

$$\underline{\dot{y}} = \underline{\Phi}^T \underline{\dot{z}}$$

(5.16)

## 6 - RESOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES

### 6.1 - Resolução numérica das equações.

A solução numérica da resposta, já aplicada a regra de Simpson para resolução da integral de Duhamel é a seguinte (24):

$$z(t) = A(t)\text{sen}(w_0 t) - B(t)\text{cos}(w_0 t), \quad (6.1)$$

onde

$$A(t) = \frac{\Delta z}{3w_0} \sum^A (t), \quad (6.2)$$

$$B(t) = \frac{\Delta z}{3w_0} \sum^B (t), \quad (6.3)$$

$$\begin{aligned} \sum^A (t) = & \sum^A (t-2\Delta z) + P^*(t-2\Delta z)\text{cos}(w_0(t-2\Delta z)) e^{-2\xi w\Delta z} + \\ & + 4P^*(t-\Delta z)\text{cos}(w_0(t-\Delta z)) e^{-\xi w\Delta z} + P^*(t)\text{cos}(w_0 t), \end{aligned} \quad (6.4)$$

$$w_0 = \sqrt{1-\xi^2} w \quad (6.5)$$

O termo  $\sum^B (t)$  é dado por uma expressão similar envolvendo funções seno.

O termo  $\sum^A (t-2\Delta\tau)$  representa o valor do somatório determinado no intervalo de tempo precedente  $(t-2\Delta\tau)$ .

A expressão (6.1) é calculada em instantes de tempo discretos,  $t_1 = 2\Delta\tau$ ,  $t_2 = 4\Delta\tau$ ,  $t_3 = 6\Delta\tau$ , e assim por diante, (em intervalos iguais a  $2\Delta\tau$ ), correspondendo ao esquema de integração numérica de Simpson adotado.

Na primeira vez que a expressão (6.1) é calculada, que corresponde ao instante  $t_1 = 2\Delta\tau$ , a expressão (6.4) se reduz a:

$$\begin{aligned} \sum^A (2\Delta\tau) = & P^*(0) \cdot e^{-2\xi w_0 \Delta\tau} + 4P^*(\Delta\tau) \cos(w_0 \Delta\tau) e^{-\xi w_0 \Delta\tau} + \\ & + P^*(2\Delta\tau) \cos(w_0 \cdot 2\Delta\tau) \end{aligned} \quad (6.6)$$

Da segunda vez em diante a expressão (6.4) original é utilizada.

A resposta em termos de velocidade em coordenada generalizada é dada pela seguinte expressão:

$$\dot{z}(t) = w_0 B(t) \text{sen} w_0 t + w_0 A(t) \text{cos} w_0 t - \xi w z(t) \quad (6.7)$$

## 6.2 - Algoritmo de solução.

O escopo do programa computacional desenvolvido é:

(i) a solução das " $n_1$ " equações diferenciais desacopladas (5.15) para os " $N$ " elementos combustíveis da fileira analisada;

(ii) a superposição modal, obtendo-se a resposta em termos de velocidade e deslocamentos laterais nas coordenadas  $y$  originais;

(iii) a avaliação das interpenetrações entre nós de elementos combustíveis adjacentes e entre os nós dos elementos da periferia e os defletores, que ocorrem em cada instante de tempo;

(iv) a determinação das consequentes forças de impacto entre nós adjacentes, a serem aplicadas como forças externas no intervalo de tempo de integração seguinte.

As informações necessárias para a solução do problema são as seguintes:

- $w$  . frequências naturais
- $\xi$  . amortecimentos modais
- $\ddot{r}$  . movimento de base
- $\varphi$  . modos (matriz modal)
- $K, C$  . características do fenômeno de impacto.

O primeiro passo no programa é a obtenção da força total generalizada no determinado intervalo (instante) de integração:

$$P_i^*(t) = \varphi_i^T F(t-2\Delta z) - \varphi_i^T M \ddot{r}(t) \quad (6.8)$$

O termo  $F(t-2\Delta t)$  é o vetor de forças de impacto obtido no intervalo de tempo imediatamente anterior ( $2\Delta t$  é devido ao processo de integração numérica de Simpson que é utilizado).

Obtida esta força, chama-se o procedimento DUHAMEL. Este procedimento realiza o cálculo numérico da integral de Duhamel através da regra de Simpson, fornecendo-nos o deslocamento em coordenada generalizada.

Repetidos estes procedimentos para todos os modos de todos os ECs, calcula-se a resposta nas coordenadas originais efetuando-se a superposição modal.

Obtida a resposta nas coordenadas originais, verifica-se a ocorrência de colisões entre componentes, comparando-se os deslocamentos de nós adjacentes com as folgas pré-existentes. Se as folgas foram excedidas, calcula-se as interpenetrações entre os nós adjacentes. Isto é feito no procedimento PENETRA.

Com as interpenetrações, velocidade relativa entre os nós impactando, rigidez e coeficiente de restituição no fenômeno do impacto, chama-se o procedimento IMPACTO que calcula a força resultante em cada nó durante este fenômeno.

No entanto, no cálculo da resposta em um determinado instante de tempo, utiliza-se como excitação a força de inércia correspondente àquele instante e a força de impacto correspondente ao instante anterior, já que esta força é desconhecida a priori

pois é dependente da resposta. Ao final do intervalo de integração, calcula-se a nova força de impacto a ser aplicada, em princípio, no intervalo de integração seguinte.

Entretanto, se o erro entre a nova força de impacto calculada e aquela inicialmente aplicada naquele intervalo de tempo, for maior do que um erro máximo admissível, o algoritmo entra em um procedimento iterativo. A resposta é recalculada com a nova força total obtida (apenas para aqueles elementos que estejam impactando) até que a solução convirja.

Na figura (6.1) apresenta-se um fluxograma simplificado do algoritmo do programa STYCA, desenvolvido a partir dos procedimentos aqui propostos.

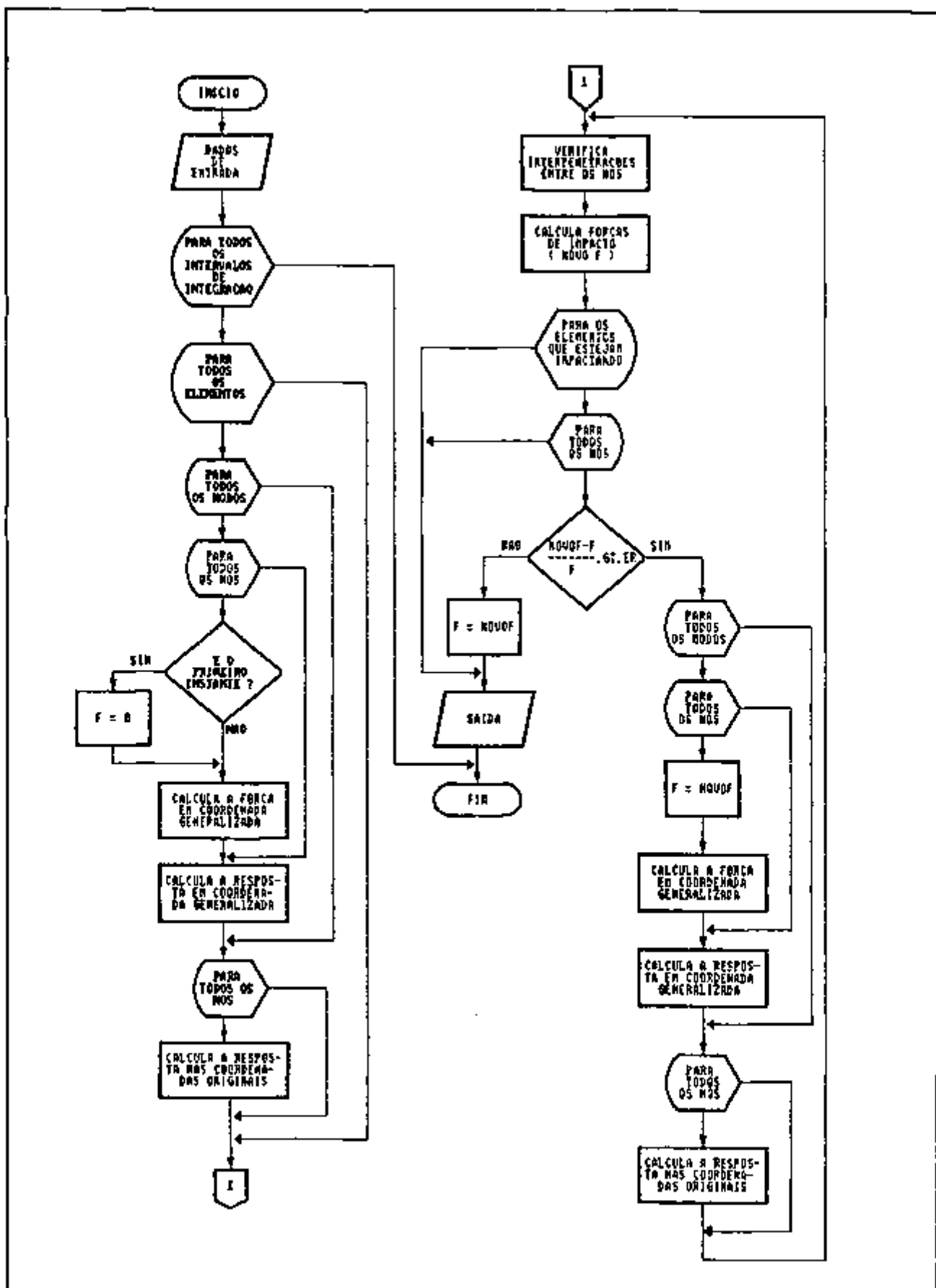


FIGURA 6.1 - Fluxograma Simplificado do Programa STYCA.

## 7 - TESTES DE VERIFICAÇÃO E CASO EXEMPLO

Neste capítulo são descritos alguns dos testes de verificação realizados com o programa STYCA, atestando assim a efetiva implementação computacional dos procedimentos estabelecidos neste trabalho, bem como demonstrando o nível de precisão e o grau de acurácia alcançados pelo programa.

### 7.1 - Caso 1:

A resposta dinâmica de uma caixa d'água submetida a um carregamento devido a uma rajada de vento foi calculada para ilustrar a avaliação numérica da integral de Duhamel.

Para o programa STYCA o carregamento de vento deve ser transformado em aceleração de base, da seguinte forma:

$$\ddot{r}(t) = - P(t)/m \quad (7.1)$$

Ainda para compatibilizar o problema com a metodologia do programa deve-se fornecer um valor para o modo. Isto é feito utilizando-se a condição de ortonormalidade dos modos em relação à matriz de massa:

$$\varphi = \sqrt{1/m} \quad (7.2)$$

A idealização da estrutura e o carregamento de vento estão

mostrados na figura 7.1. A aceleração de base correspondente e o histórico temporal do deslocamento lateral obtido com o programa STYCA estão mostrados nas figuras 7.2 e 7.3 respectivamente.

Na tabela 7.1 estão mostrados resultados obtidos com o programa STYCA comparados àqueles fornecidos por Clough (24).

Tabela 7.1: Comparação entre os deslocamentos obtidos com o programa STYCA e aqueles obtidos por Clough (24).

TEMPO (s)	CLOUGH (ft)	STYCA (ft)
0,00	0,0	0,0
0,01	0,0002	0,00021
0,02	0,0017	0,00169
0,03	0,0055	0,00558
0,04	0,0114	0,01153
0,05	0,0176	0,01770

A análise deste sistema foi recalculada utilizando-se um fator de amortecimento  $\xi = 0,05$ .

Na tabela 7.2 estão mostrados resultados obtidos com o programa STYCA comparados àqueles fornecidos por Clough (24).

O histórico temporal do deslocamento lateral obtido com o programa STYCA está mostrado na figura 7.4.

O intervalo de tempo de integração utilizado por Clough e em STYCA foi de 0,005 s.

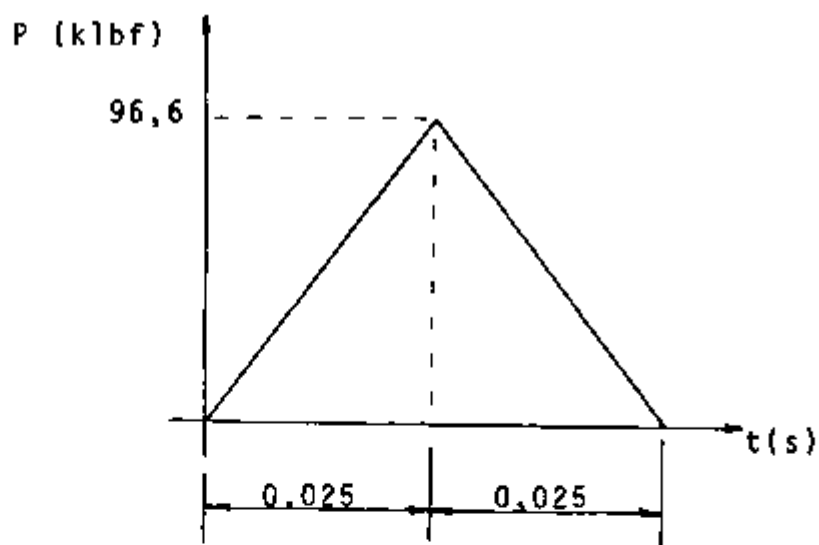
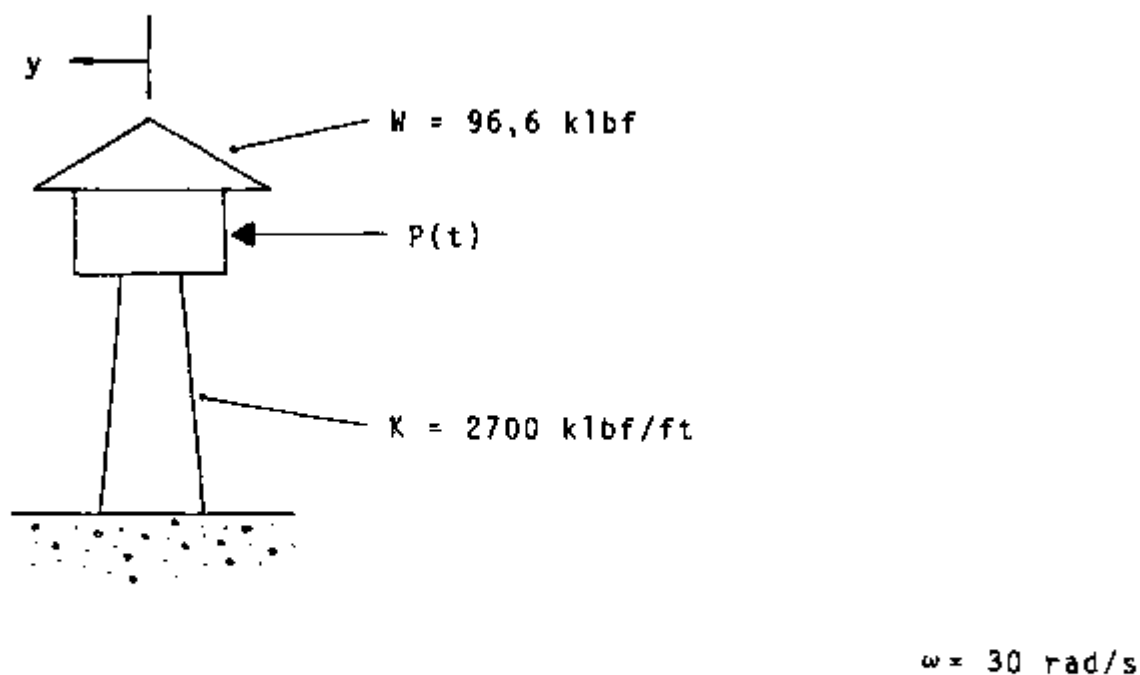


FIGURA 7.1 - Idealização da estrutura e carregamento de vento.  
Caso 1.

Tabela 7.2: Comparação entre os deslocamentos obtidos com o programa STYCA e aqueles obtidos por Clough (24). ( $\xi = 0,05$ )

TEMPO (s)	CLOUGH (ft)	STYCA (ft)
0,00	0,0	0,0
0,01	0,0002	0,00021
0,02	0,0016	0,00167
0,03	0,0054	0,00546
0,04	0,0111	0,01117
0,05	0,0169	0,01697

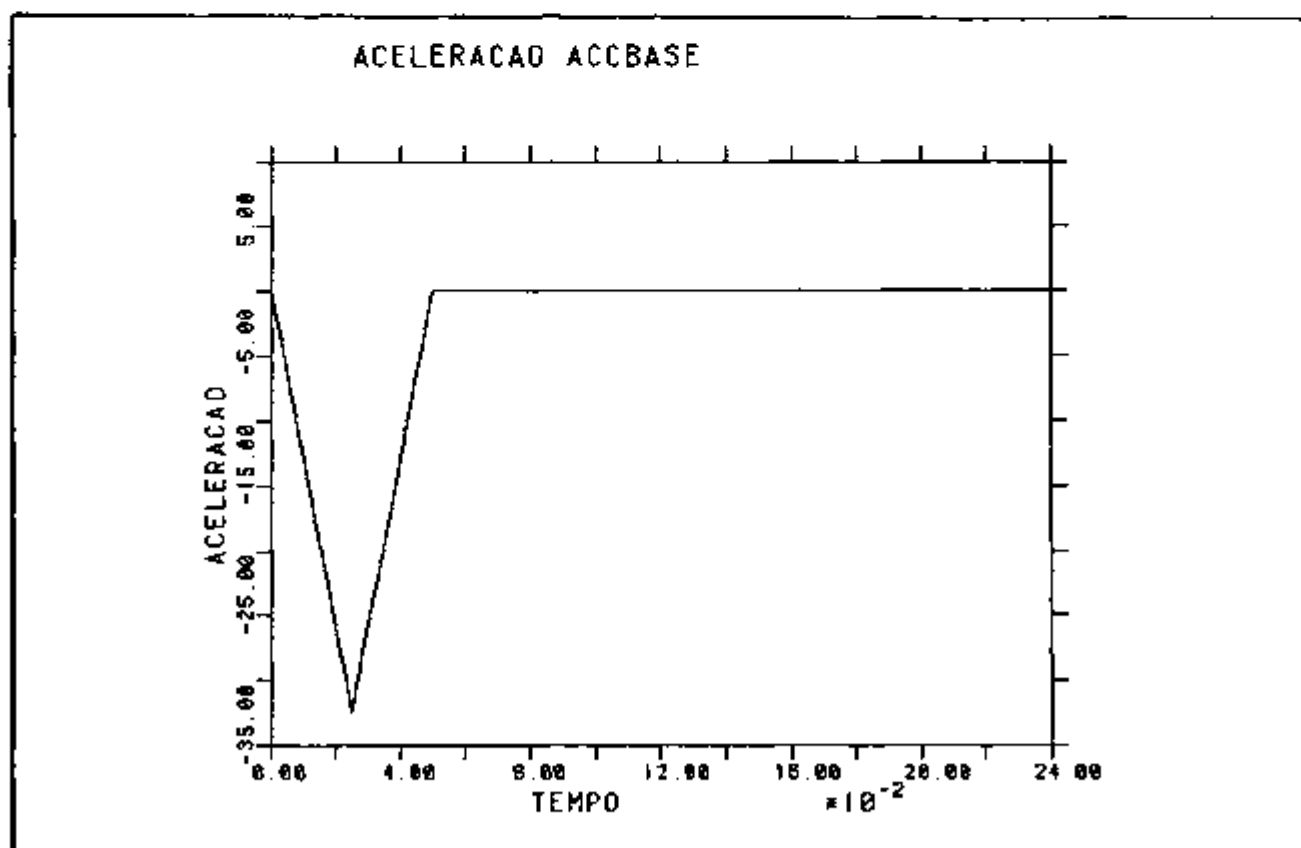


FIGURA 7.2 - Aceleração de Base ( $\text{ft/s}^2$ ). Caso 1.

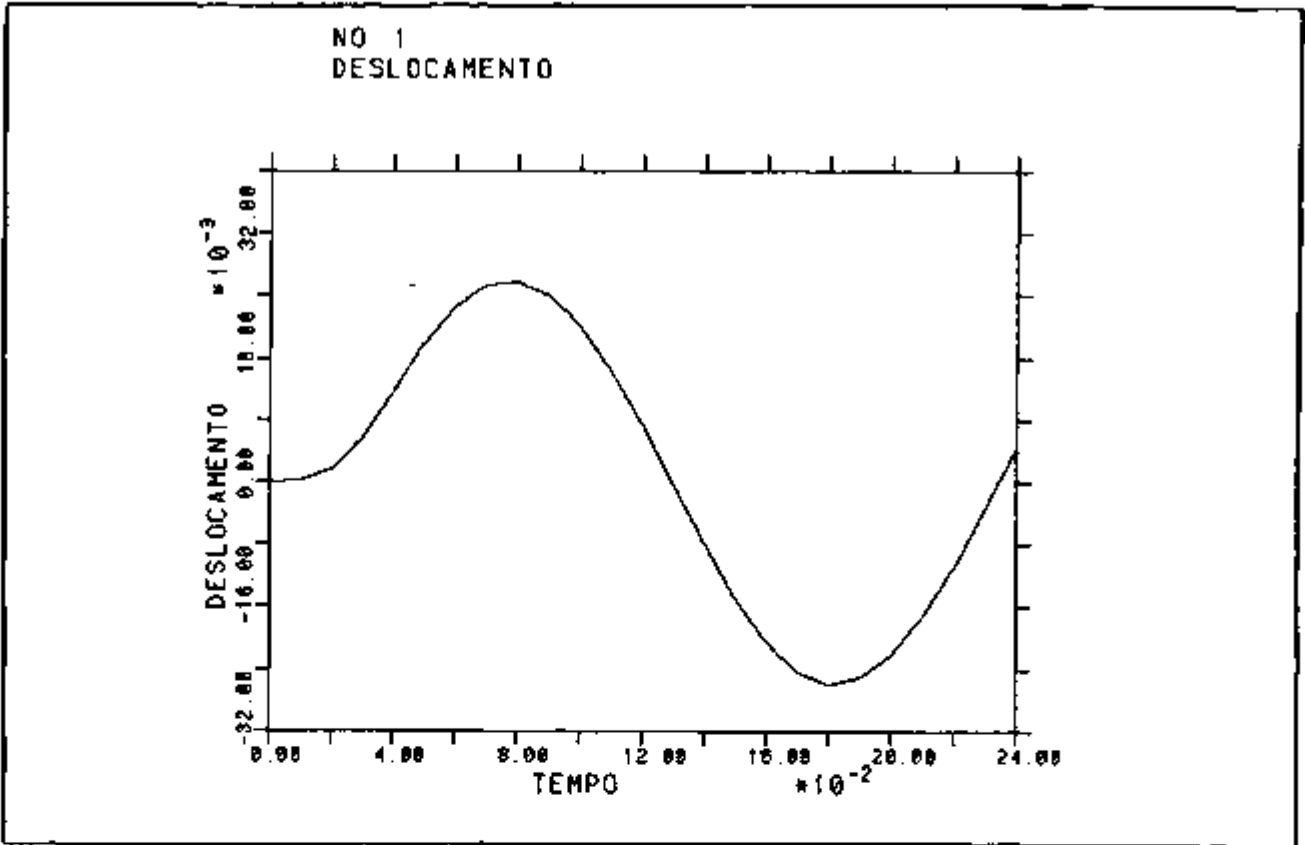


FIGURA 7.3 - Deslocamento (ft). Caso 1.

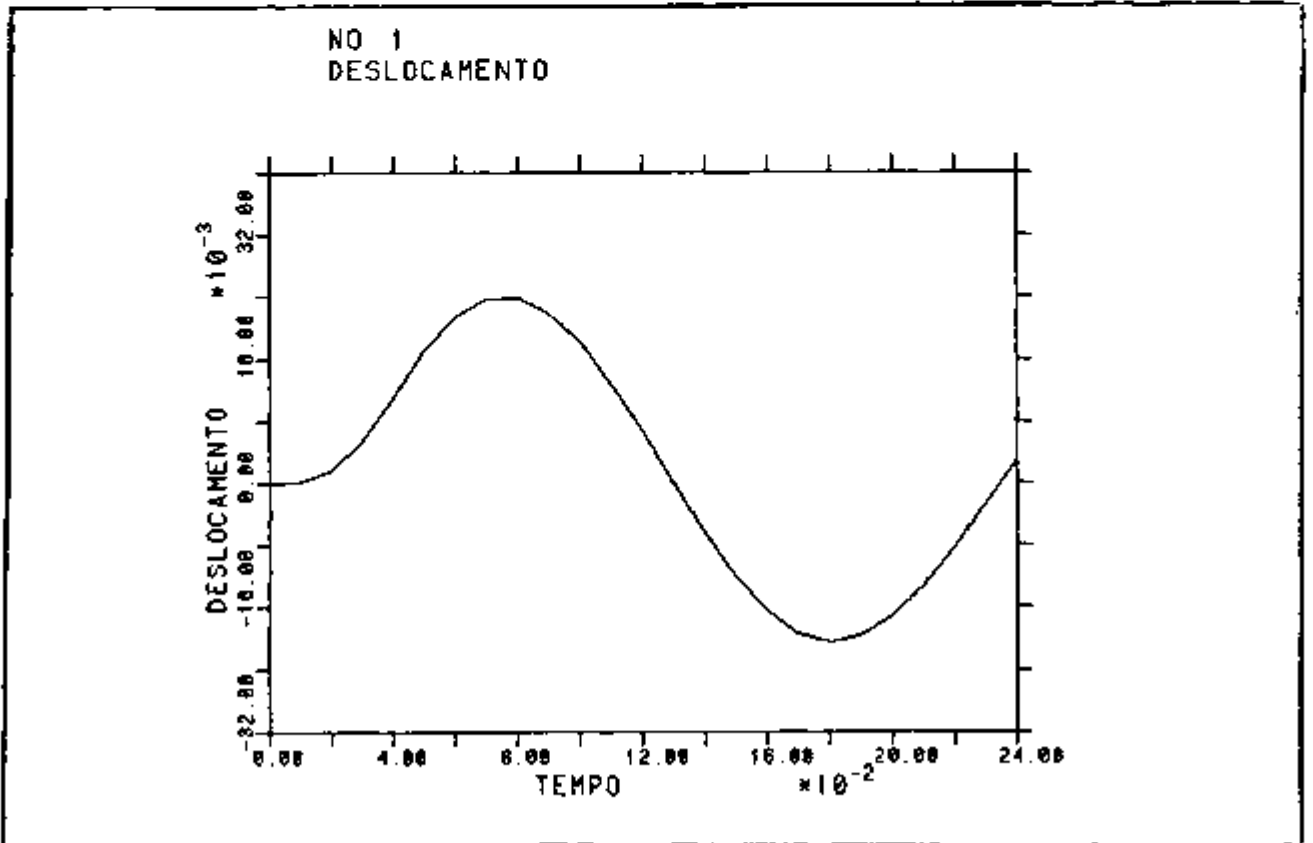


FIGURA 7.4 - Deslocamento (ft). Caso 1 ( $\xi = 0,05$ ).

## 7.2 - Caso 2:

Neste caso foi calculada a resposta de um sistema massa-mola não linear submetido a carregamento impulsivo e após permanecendo em vibração livre.

São determinadas a deflexão máxima e o correspondente instante de tempo.

Este caso está presente no manual do programa de elementos finitos ANSYS (25) como um de seus problemas de verificação.

Para compatibilizar o problema com a metodologia do programa, o carregamento impulsivo foi transformado em aceleração de base e foi fornecido um valor para o modo seguindo o mesmo procedimento do caso 1.

O modelo massa-mola e a curva força vs. deflexão da mola não linear estão mostrados na figura 7.5. O modelo para o programa STYCA e o carregamento impulsivo estão mostrados na figura 7.6. A aceleração de base correspondente e o histórico temporal do deslocamento obtido com o programa STYCA estão mostrados nas figuras 7.7 e 7.8 respectivamente.

Na tabela 7.3 estão mostrados resultados obtidos com o programa STYCA comparados àqueles obtidos com o programa ANSYS e àqueles apresentados por Thomson (26), pág. 150, figura 5.6-1.

O intervalo de tempo de integração utilizado no ANSYS foi de 0,0025 s. Em STYCA utilizou-se 0,000125 s.

Tabela 7.3: Comparação entre os deslocamentos obtidos com o programa STYCA e aqueles obtidos por Thomson (26).

	TEMPO P/ YMÁX (s)	YMÁX (in)	ERRO (%)	
			TEMPO	YMÁX
THOMSON	0,09	-1,041666	----	----
ANSYS	0,09	-1,0374	----	0,4
STYCA	0,08925	-1,06398	0,008	2,1

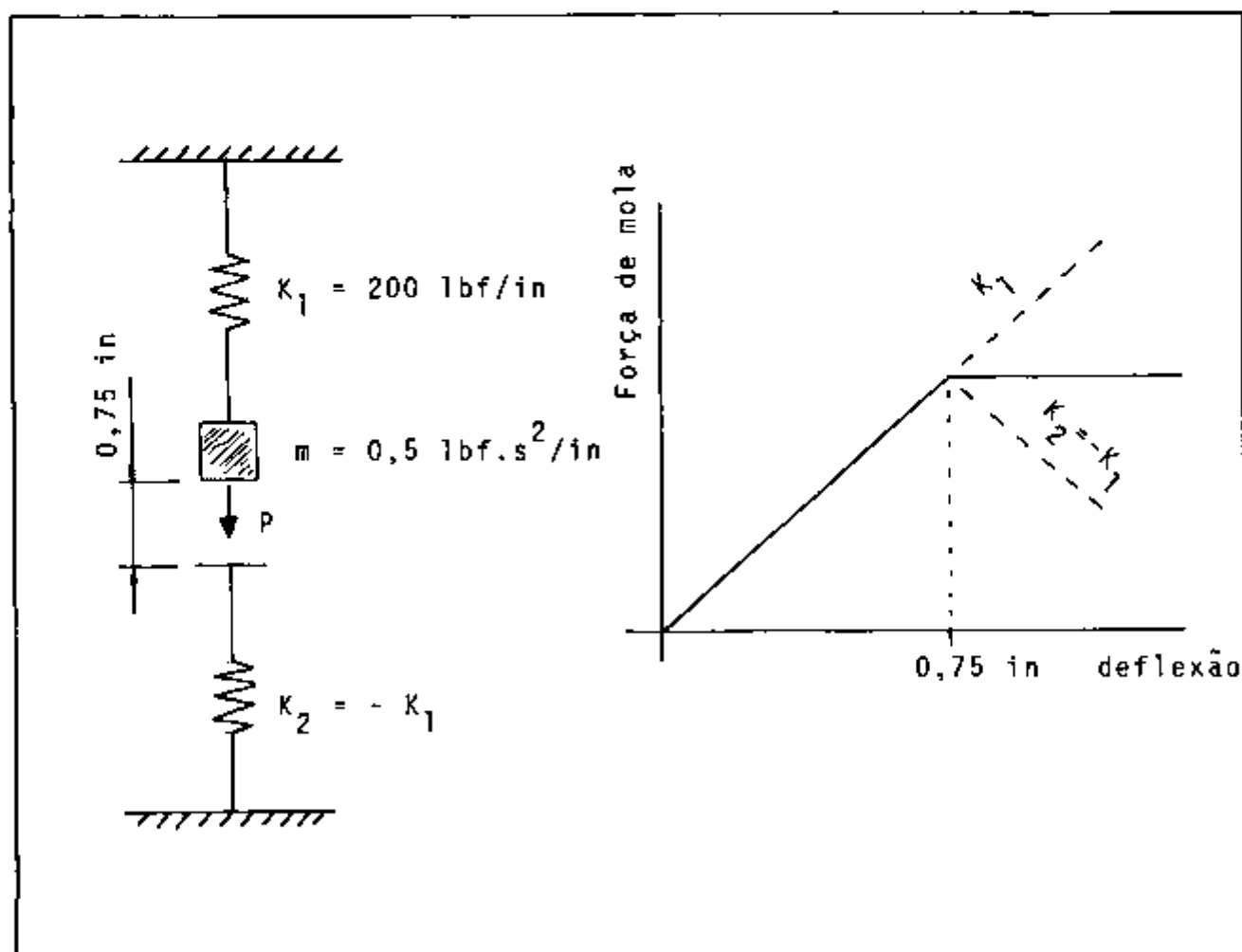


FIGURA 7.5 - Sistema massa-mola e curva força vs. deflexão da mola não-linear. Caso 2.

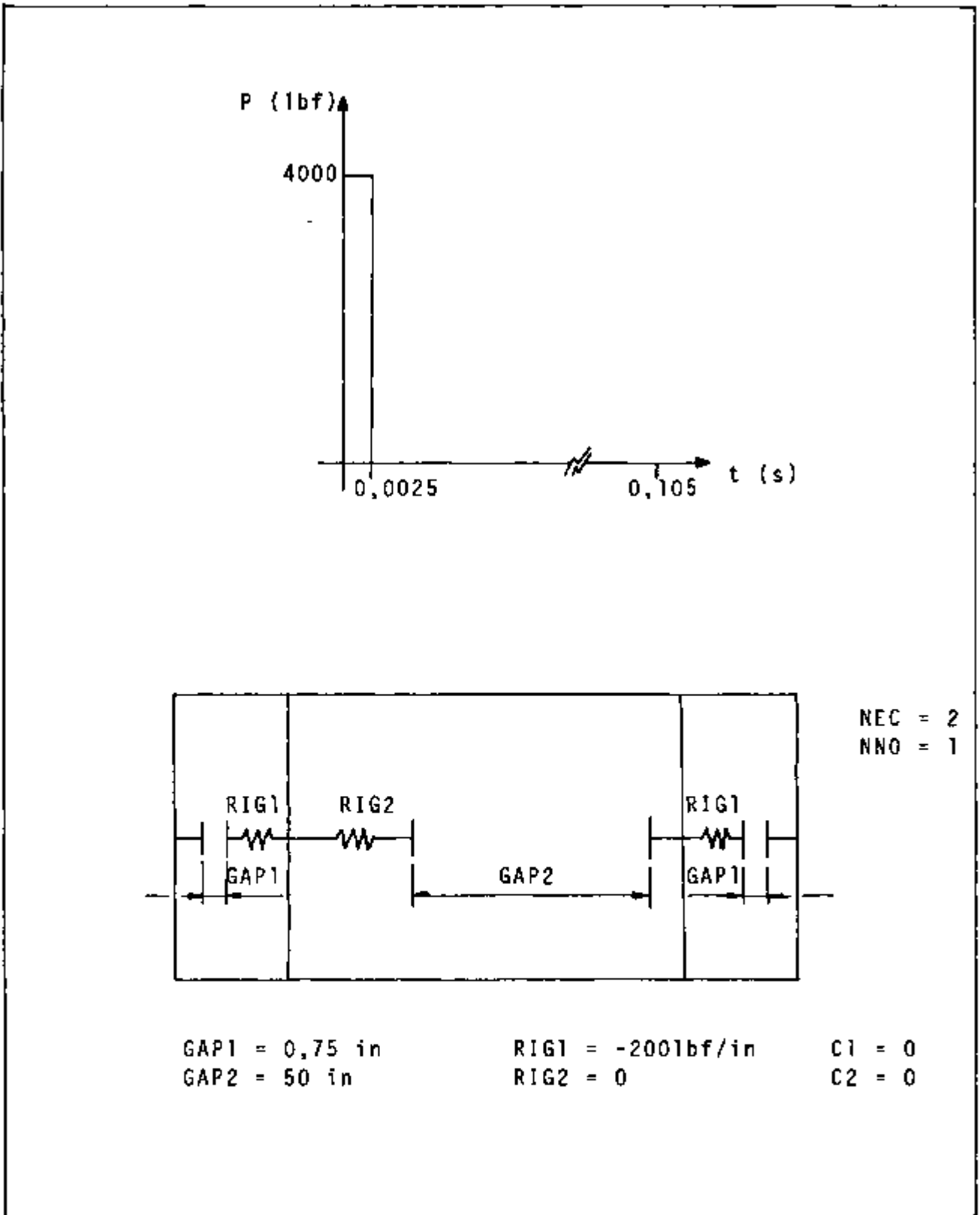


FIGURA 7.6 - Modelagem para o programa STYCA e carregamento impulsivo. Caso 2.

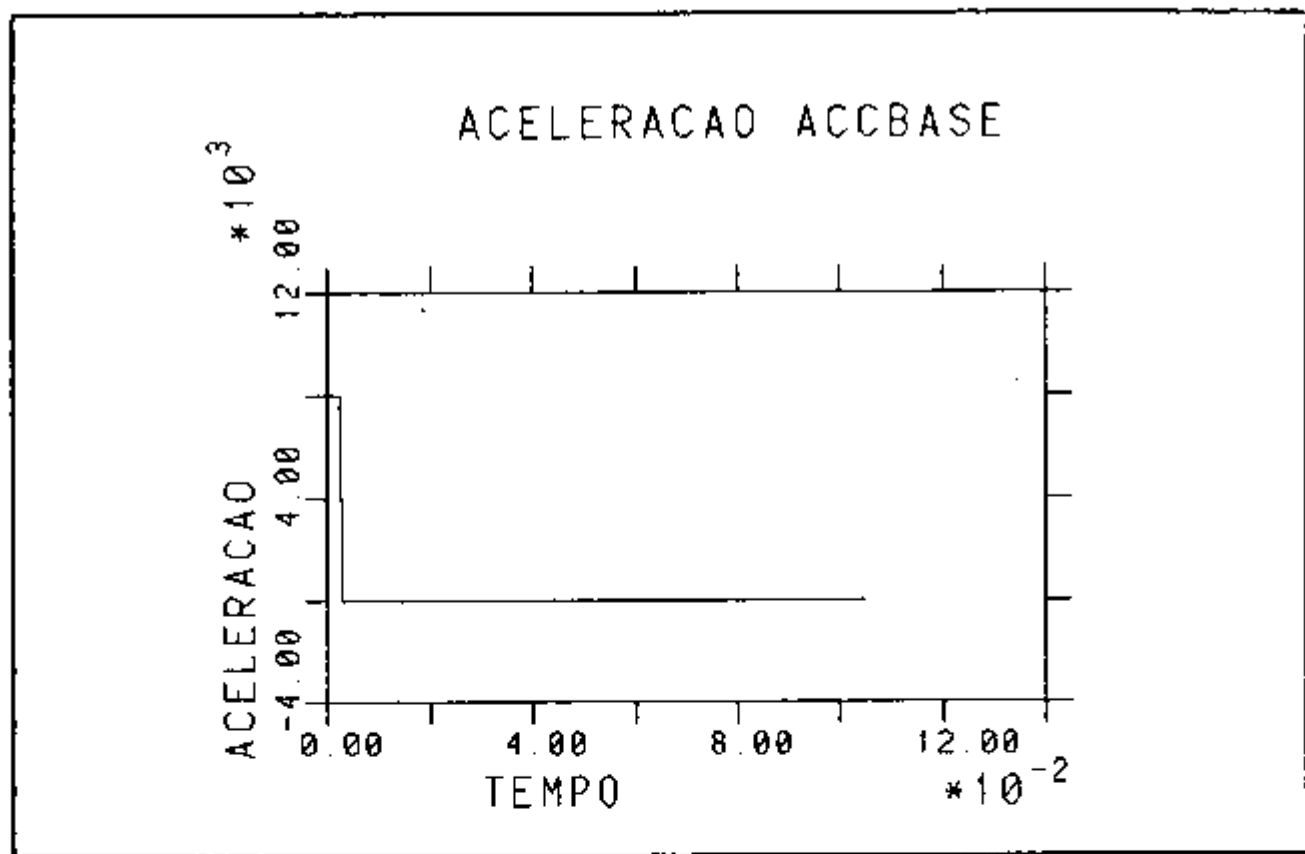


FIGURA 7.7 - Aceleração de Base ( $\text{in/s}^2$ ). Caso 2.

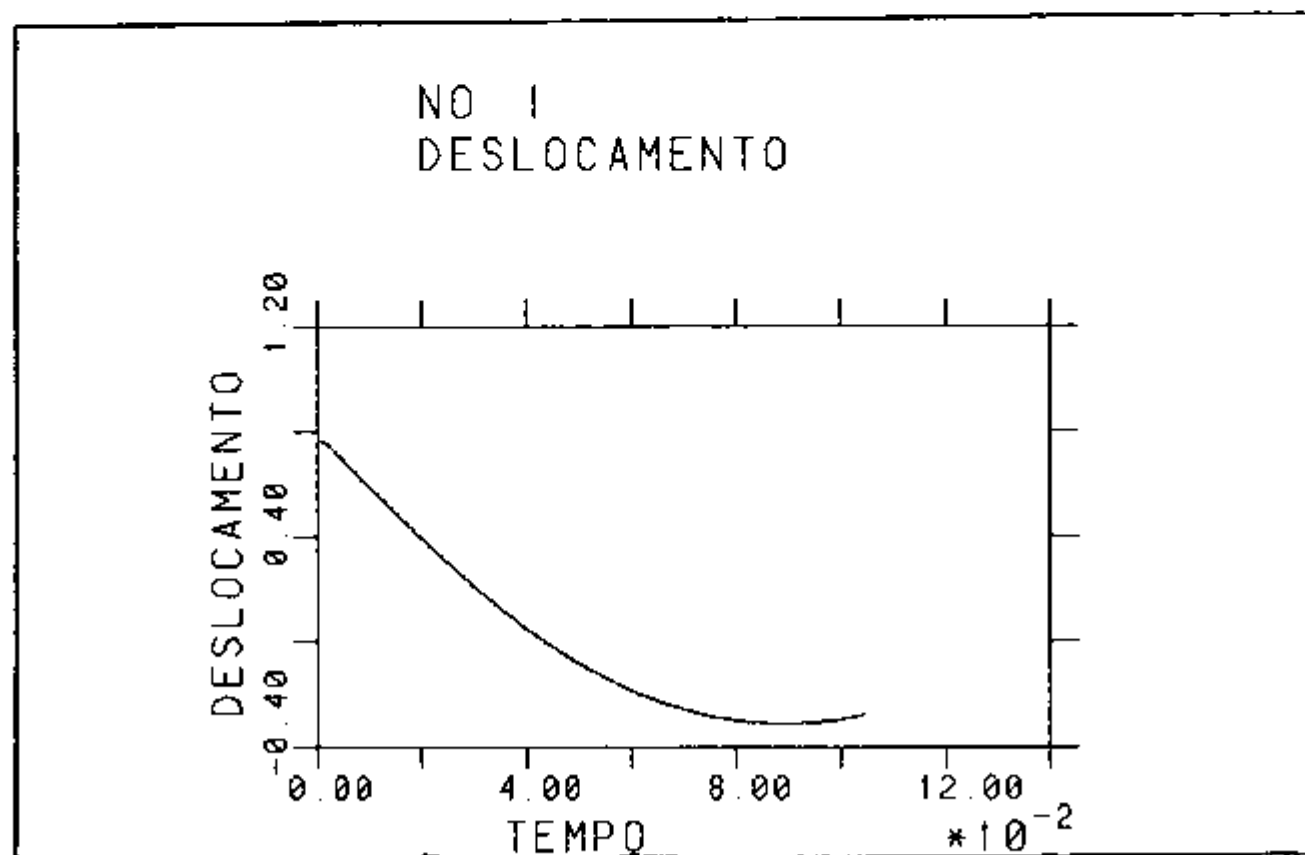


FIGURA 7.8 - Deslocamento (in). Caso 2.

### 7.3 - Caso 3:

Neste caso foram analisadas 5 vigas (fazendo o papel de 5 elementos combustíveis), colocadas lado a lado, com folgas de 1 mm entre elas e de 0,5 mm entre as vigas das extremidades e encostos rígidos (fazendo o papel dos defletores), conforme mostrado esquematicamente na figura 7.9.

As propriedades das vigas analisadas são as seguintes:

$$I = 3,080 \cdot 10^{-7} \text{ m}^4$$

$$A = 1,478 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$\bar{m} = 146,62 \text{ Kg/m}$$

$$E = 2,0 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$$

$$L = 1,5 \text{ m}$$

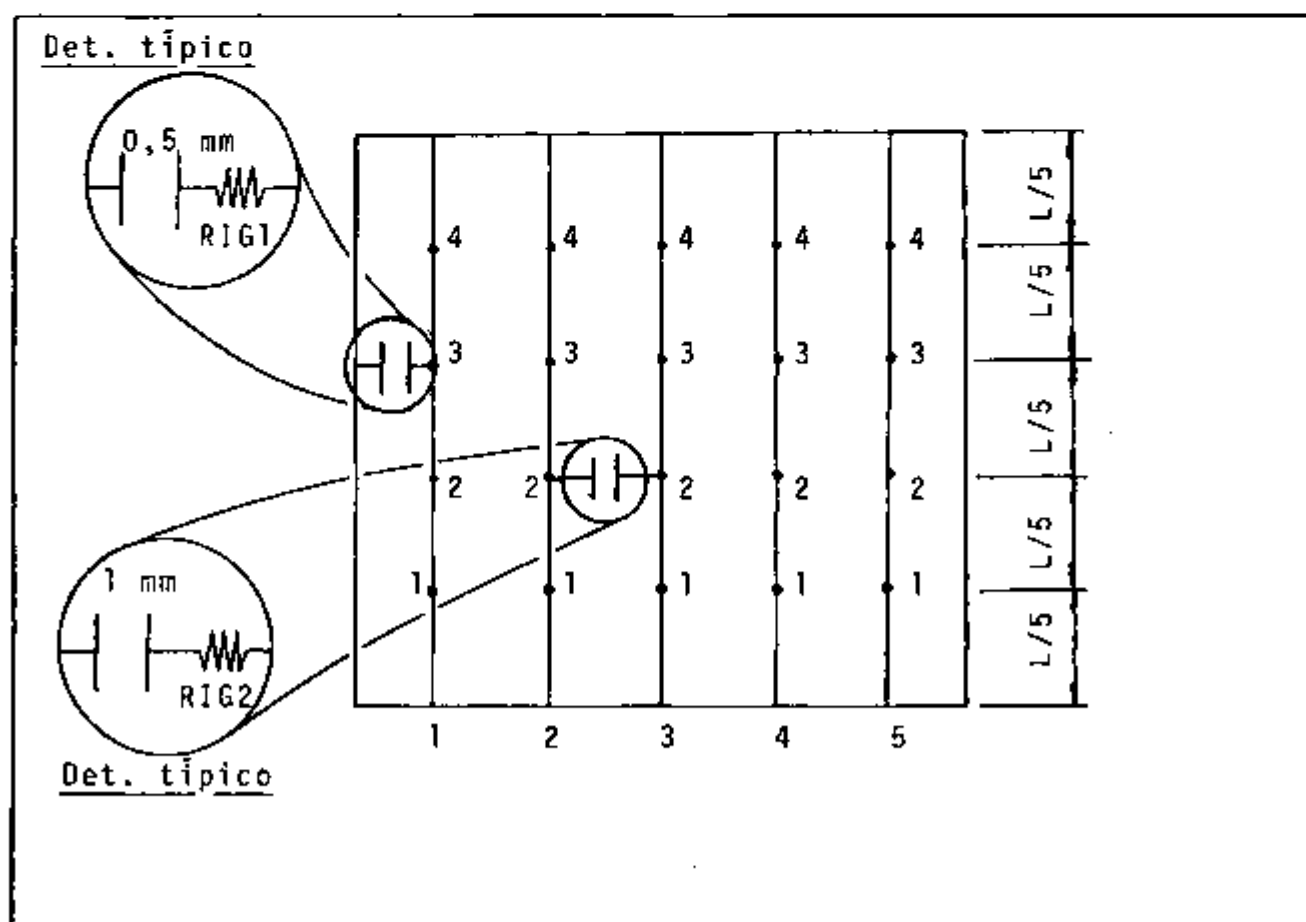


FIGURA 7.9 - Modelagem para o programa STYCA. Caso 3.

A viga foi inicialmente modelada em elementos finitos utilizando-se o programa ANSYS (25), obtendo-se suas frequências naturais e matriz modal (tabelas 7.4 e 7.5 respectivamente). Considerou-se as vigas bi-engastadas, tendo-se então a seguinte solução analítica para as suas frequências naturais (27):

$$\omega_n = k_n^2 \sqrt{\frac{EI}{mL^4}} \quad (7.3)$$

onde  $k_n$  é dado na tabela 7.4.

Tabela 7.4: Frequências naturais das vigas do caso 3 (rad/s).

Freq.	$k_n$	sol. analítica	ANSYS
1	4,730	203,78	203,801
2	7,853	561,71	564,158
3	10,996	1101,32	1130,458
4	14,137	1820,36	1869,775

Tabela 7.5: Modos das vigas do caso 3.

MODO			
1	2	3	4
0,0418	-0,0823	0,1078	-0,0918
0,0982	-0,0705	-0,0453	0,1039
0,0982	0,0705	-0,0453	-0,1039
0,0418	0,0823	0,1078	0,0918

Não se teve a preocupação de uma maior discretização das vigas visando obter maior aproximação das frequências naturais calculadas pelo ANSYS com os resultados teóricos, porque o interesse era apenas comparar-se a resposta dinâmica do conjunto calculada pelos dois programas, ANSYS e STYCA. Para isto utilizou-se como dado de entrada para STYCA os modos e frequências naturais calculados pelo ANSYS. Com isto, garantiu-se que ambos os programas estão resolvendo exatamente o mesmo modelo.

A diagonal principal da matriz de massa das vigas, utilizada em STYCA é mostrada na tabela 7.6.

Tabela 7.6: Diagonal principal da matriz de massa aglutinada das vigas do caso 3 (Kg).

Nó	1	2	3	4
Massa	40,053	45,429	45,429	40,053

Não foi considerado amortecimento estrutural.

Não foi considerada dissipação de energia no fenômeno do impacto.

O intervalo de tempo de integração utilizado no ANSYS foi de  $5.10^{-6}$  s e em STYCA foi de  $3.10^{-6}$  s.

Os coeficientes de rigidez para o elemento elástico do elemento de impacto utilizados foram:

- $1,0.10^8$  N/m entre ECs,
- $2,0.10^8$  N/m entre EC e defletor.

O carregamento impulsivo submetido à estrutura está mostrado na figura 7.10.

Nas figuras 7.11 e 7.12 estão mostrados os deslocamentos dos nós obtidos com o programa STYCA. Nas figuras 7.13 a 7.17 estão mostradas as forças de impacto em cada nó, também fornecidas por STYCA.

Observe-se que as vigas são simétricas para os nós 1 - 4 e 2 - 3, portanto são mostrados resultados apenas para os nós 1 e 2.

Na tabela 7.7, compilada a partir dos resultados dos dois programas pós-processados na forma de gráficos, estão comparados os valores de pico da força de impacto em cada colisão obtidos por STYCA e pelo ANSYS. Na tabela, sob a coluna ocorrência indica-se entre quais vigas ocorreu o impacto, onde "d" indica os encostos, "1" indica a 1ª viga, "2" indica a 2ª viga, e assim por diante.

Ambos os programas, de uma forma geral, descreveram o mesmo comportamento para a estrutura analisada.

Observou-se concordância entre os resultados de deslocamento entre ambos os programas até o instante  $t = 0,06s$  aproximadamente. A partir daí os resultados começam a diferir.

Segundo STYCA ocorreram 21 colisões. Segundo o ANSYS ocorreram 20 colisões. Uma colisão detectada por STYCA não o foi pelo ANSYS, qual seja, a 16ª em ordem cronológica, entre os nós 2 do 4º e 5º elementos.

À exceção das 20ª e 21ª colisões em ordem cronológica (conforme a tabela 7.7), em todas as outras os instantes de ocorrência coincidiram.

Ambos os programas detectaram apenas uma colisão dos nós 1 dos elementos. Ela ocorreu entre o nó 1 do 5º elemento e o defletor, no instante  $t = 0,03$  s. O erro relativo entre o valor de pico desta força de impacto computada pelos dois programas é grande, no entanto o seu valor de pico é pequeno em relação aos demais impactos acontecidos e o período deste impacto é muito curto também em relação aos demais.

Tabela 7.7: Forças de impacto - caso 3.

	ocorrência	tempo (s)	STYCA (N)	ANSYS (N)	
1	d/1	0,008	19.000	19.000	
2	1/2	0,011	10.000	10.000	
3	5/d	0,023	27.500	27.000	
4	4/5	0,025	16.000	16.000	
5	5/d	0,029	2.300	1.100	(nó 1)
6	3/4	0,030	9.000	9.000	
7	5/d	0,031	18.000	17.500	
8	1/2	0,036	12.500	12.500	
9	2/3	0,040	12.000	11.500	
10	d/1	0,044	8.000	11.000	
11	5/d	0,048	32.500	32.000	
			18.000	18.000	
12	3/4/5	0,051	32.000	34.000	
			17.000	15.500	

Tabela 7.7: (Continuação).

13	5/d	0,057	26.000	23.000
14	2/3	0,057	15.000	15.000
15	1/2	0,063	5.000	6.500
16	4/5	0,065	3.500	-----
17	d/1	0,066	31.000	31.000
18	1/2	0,070	4.000	3.500
19	3/4	0,072	11.000	5.000
20	5/d	0,075	13.000	-----
		0,078	-----	20.000
21	2/3	0,078	18.000	-----
		0,080	-----	9.000

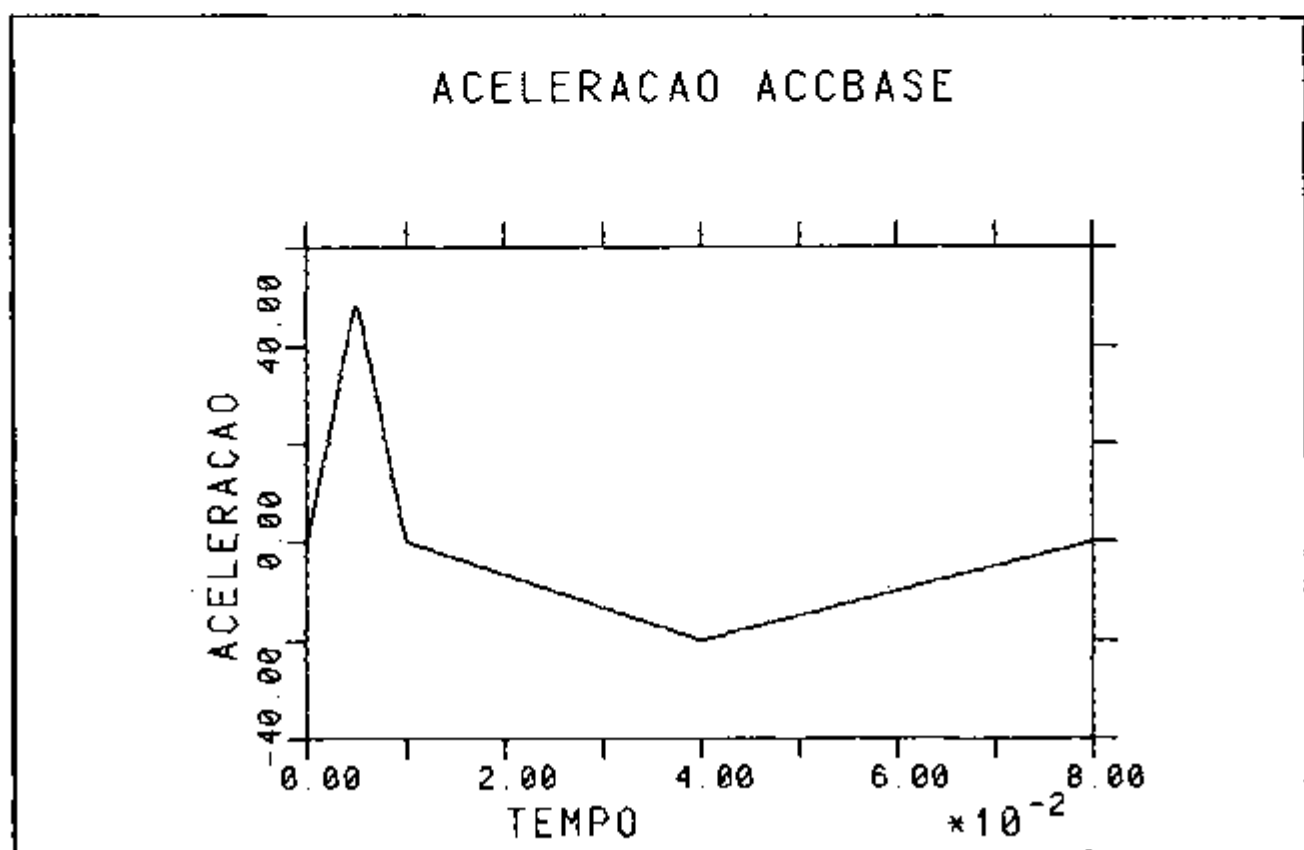


FIGURA 7.10 - Aceleração de Base ( $m/s^2$ ). Caso 3.

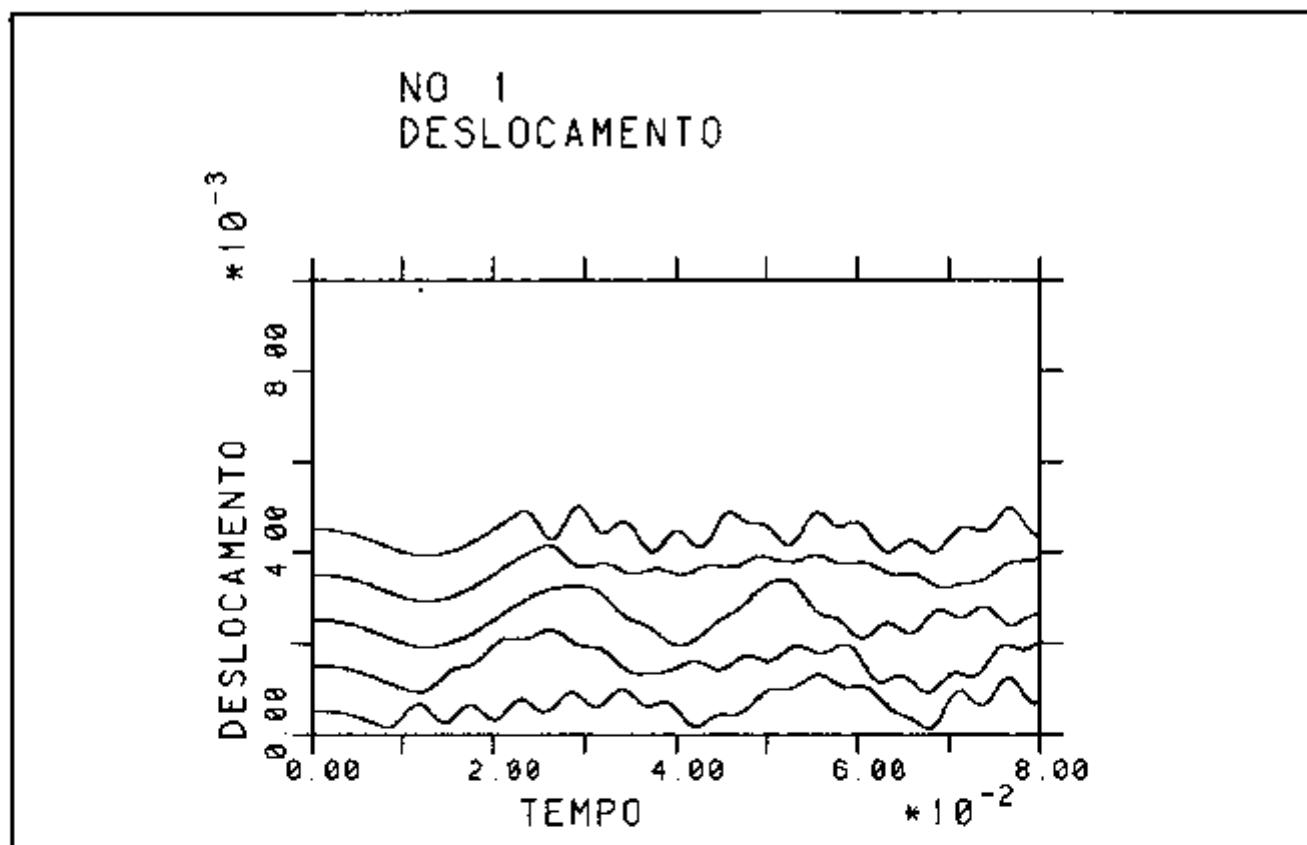


FIGURA 7.11 - Deslocamentos do nós 1 (m) - STYCA.

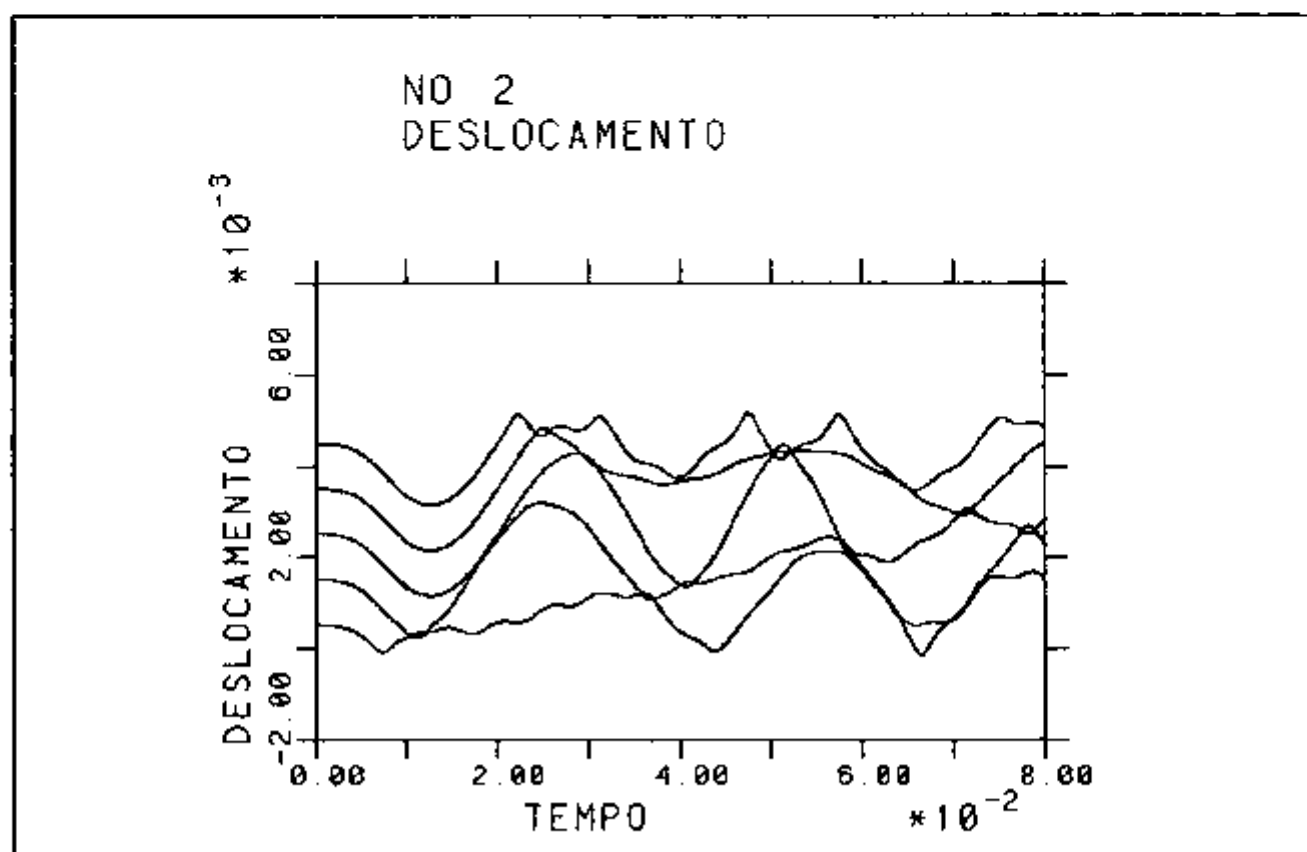


FIGURA 7.12 - Deslocamentos dos nós 2 (m) - STYCA.

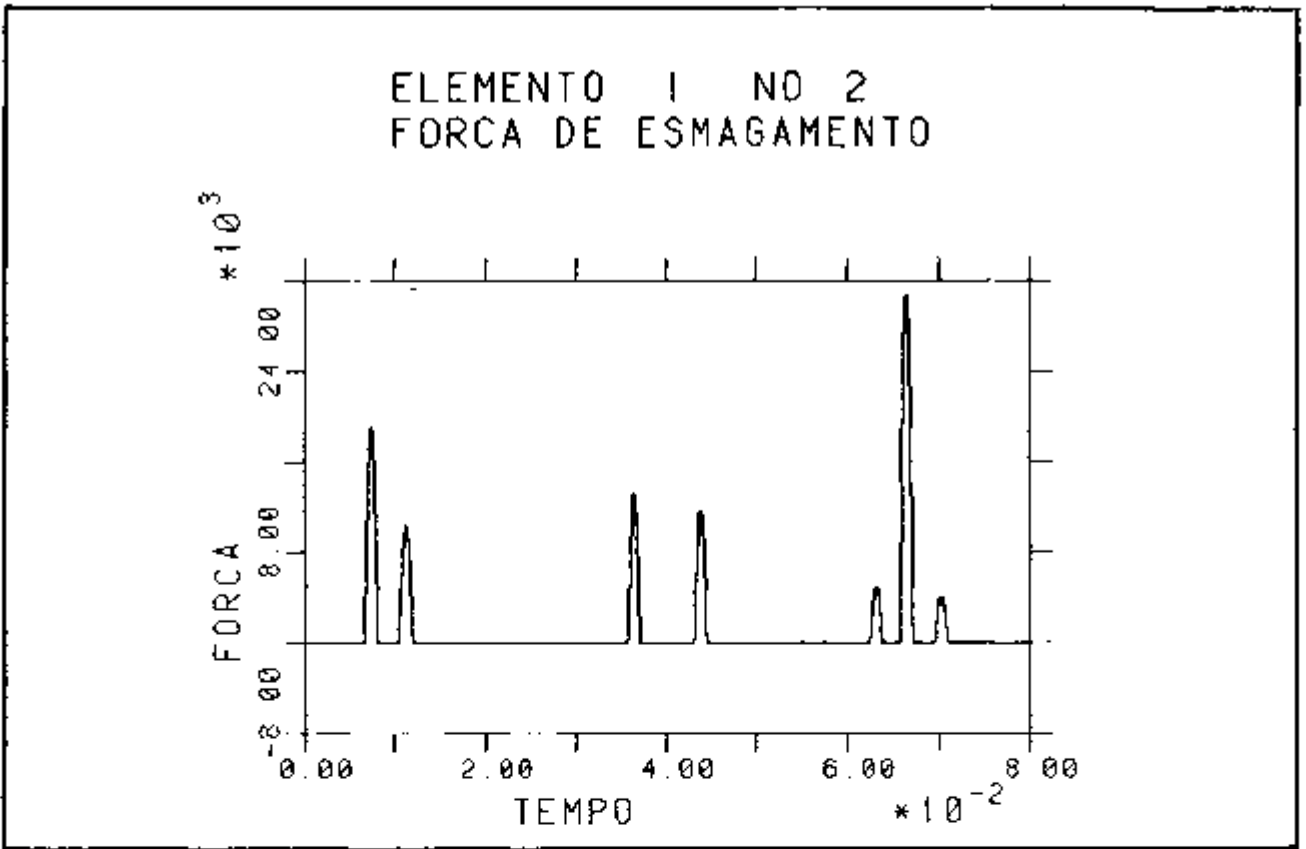


FIGURA 7.13 - Força no Elemento de Impacto - Elemento 1 nó 2 - STYCA - (N).

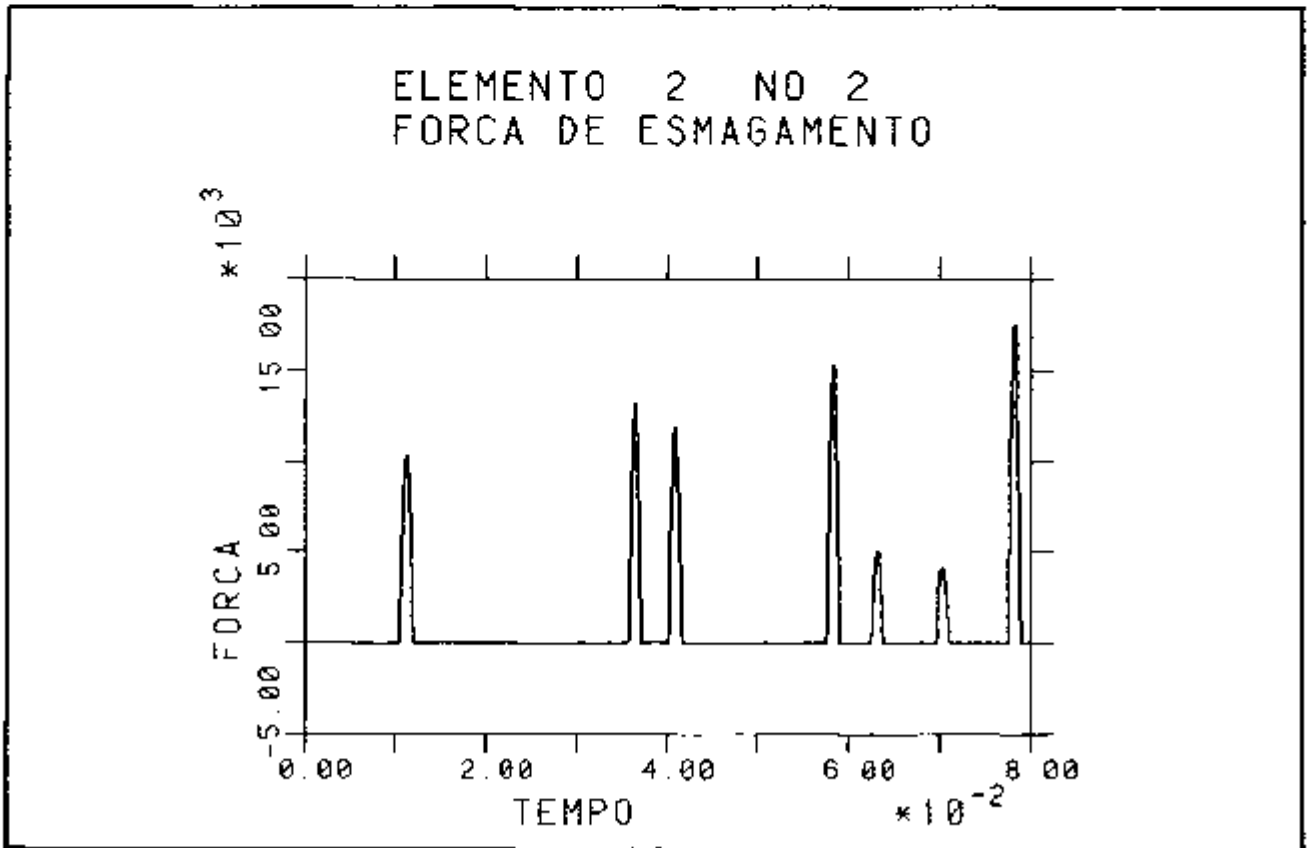


FIGURA 7.14 - Força no Elemento de Impacto - Elemento 2 nó 2 - STYCA - (N).

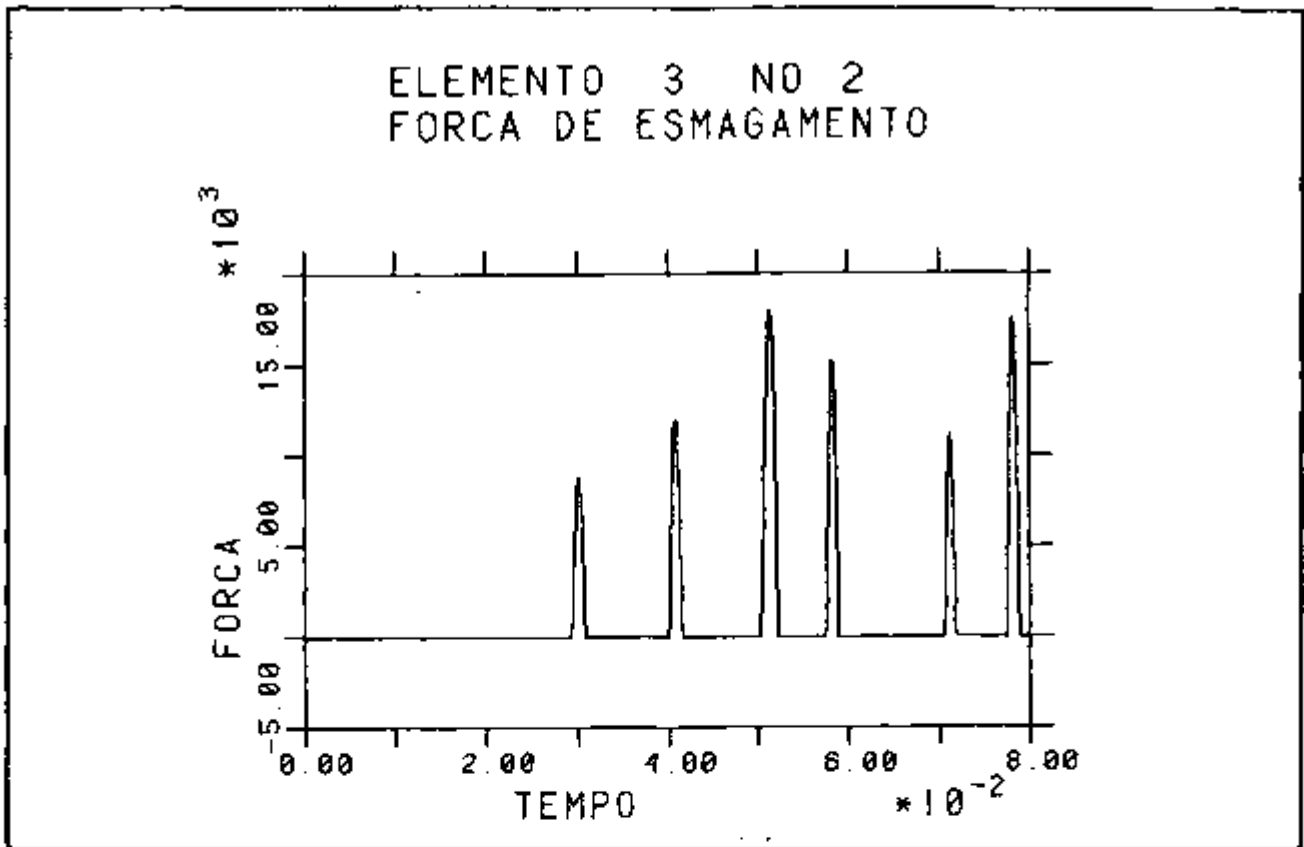


FIGURA 7.15 - Força no Elemento de Impacto - Elemento 3 nó 2 - STYCA - (N).

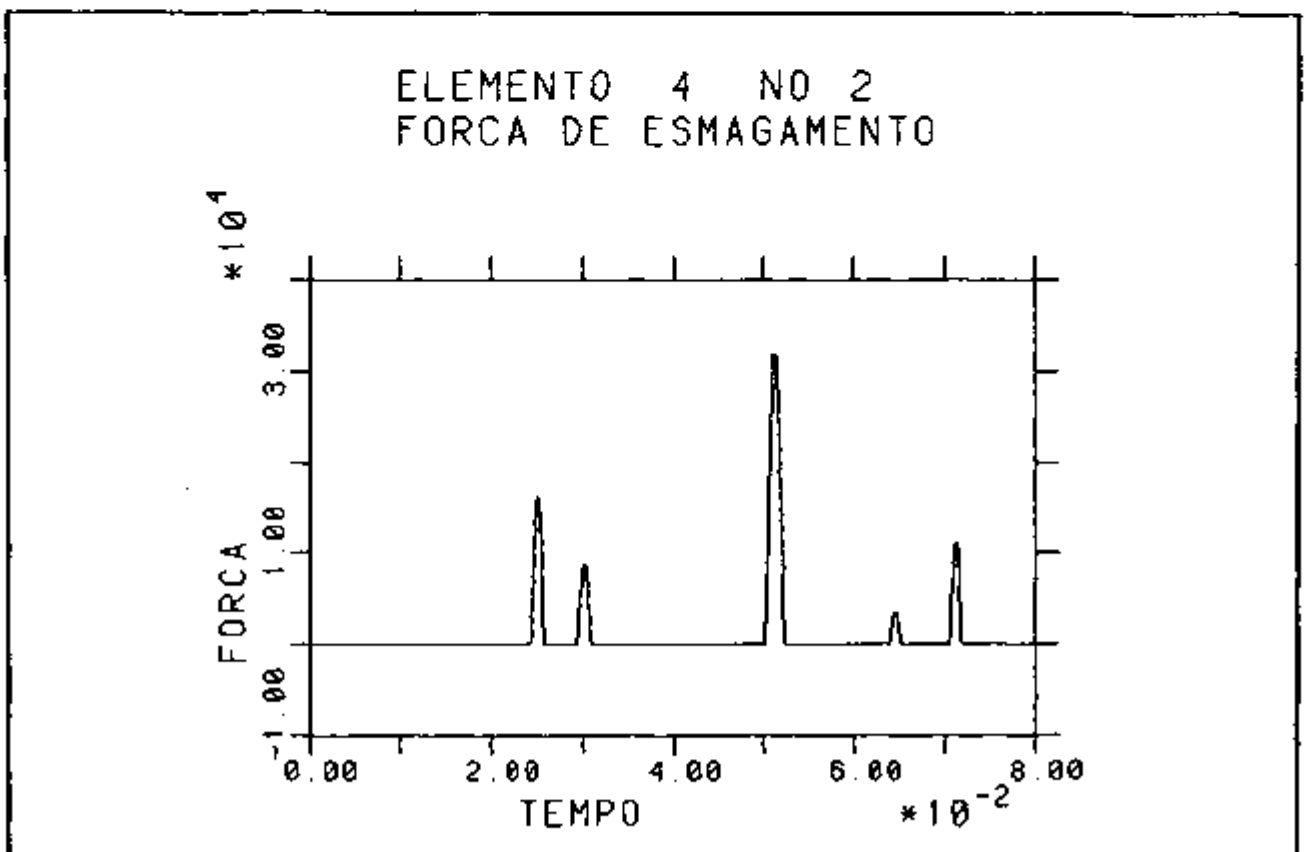


FIGURA 7.16 - Força no Elemento de Impacto - Elemento 4 nó 2 - STYCA - (N).

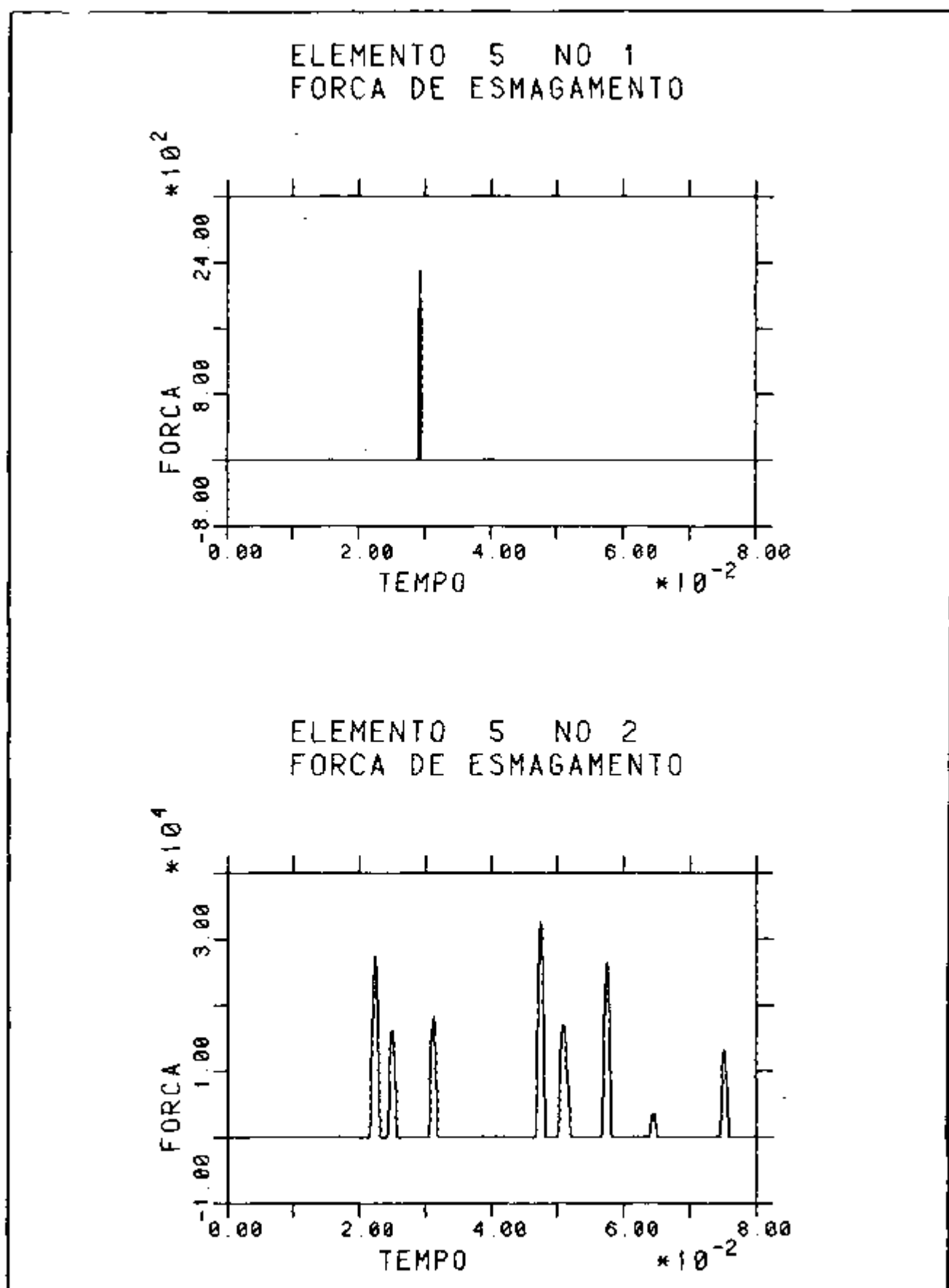


FIGURA 7.17 - Força no Elemento de Impacto - Elemento 5 nós 1 e 2 - STYCA - (N).

#### 7.4 - Caso 4:

Neste item é apresentado um caso exemplo rodado com o programa STYCA, onde analisa-se um conjunto de 5 elementos combustíveis dispostos lado a lado em uma fileira.

Não pretendeu-se mostrar uma análise completa de um núcleo, sendo a própria excitação utilizada e as variações feitas sobre este mesmo caso bastante simplificadas.

Aqui analisam-se elementos cujas características dinâmicas representam as características de um elemento combustível real.

Estes elementos combustíveis são semelhantes aos elementos ANGRA I - Westinghouse, com as seguintes características:

- comprimento dos tubos guias: 3897,1 mm;
- arranjo: 16 x 16, com 20 tubos guias e 1 tubo de instrumentação;
- 2 bocais de extremidade e 8 grades espaçadoras;
- passo entre tubos: 12,32 mm;
- tubo guia: diâmetro externo: 11,962 mm;  
diâmetro interno: 11,048 mm;
- vareta combustível: diâmetro externo: 9,500 mm;  
diâmetro interno: 8,356 mm;
- material dos tubos guias e varetas: zircalloy 4;
- material dos bocais: aço inoxidável austenítico 304;
- material das grades espaçadoras: inconel 718;
- material combustível: pastilhas de dióxido de urânio;  
diâmetro: 8,19 mm;  
altura ativa: 3657,6 mm.

As características dinâmicas dos elementos (matrizes espectral e modal) necessárias para a análise foram obtidas do programa computacional ELCOM (28, 29).

O programa ELCOM realiza a análise estrutural estática de elementos combustíveis típicos PWR, utilizando um método matricial.

ELCOM admite movimento de corpo rígido para as grades espaçadoras, cada nó da estrutura elemento combustível (acoplamento vareta combustível-grade espaçadora; tubo guia-grade espaçadora; tubo guia-bocal de extremidade) têm seus deslocamentos e rotações relacionados aos deslocamentos e rotações do centro de gravidade da grade ou bocal. A matriz de rigidez global do sistema é obtida através do somatório das transformações de rigidez de cada nó para o centro de gravidade das grades espaçadoras e bocais. Utilizando uma matriz de massa aglutinada nestes pontos, ELCOM resolve o auto-problema fornecendo a matriz modal e a matriz espectral.

Nas tabelas 7.8, 7.9, 7.10 e 7.11 estão mostradas respectivamente as frequências naturais do elemento combustível analisado, sua correspondente matriz modal, a diagonal principal da matriz de massa utilizada e os valores dos fatores de amortecimento modal também utilizados.

O modelo esquemático da estrutura analisada está mostrado na figura 7.18.

Na tabela 7.12 estão mostradas as características do elemento de impacto utilizadas, quais sejam, coeficiente de rigidez e

coeficiente de amortecimento do dissipador de energia.

Os valores dos coeficientes de amortecimento utilizados correspondem a um coeficiente de restituição aproximadamente igual a 0,7.

Tabela 7.8: Frequências naturais dos elementos (rad/s).

Frequência	Valor
1	14,70
2	32,04
3	52,53
4	75,52
5	99,59
6	118,94

Tabela 7.9: Matriz modal dos elementos.

	MODO					
	1	2	3	4	5	6
	0,0002	0,0008	0,0003	0,0013	0,0004	0,0009
	0,0306	0,0511	0,0590	0,0553	0,0420	0,0225
	0,0494	0,0551	0,0169	-0,0330	-0,0592	-0,0446
	0,0583	0,0184	-0,0512	-0,0414	0,0308	0,0576
	0,0561	-0,0319	-0,0415	0,0502	0,0217	-0,0589
	0,0435	-0,0588	0,0313	0,0207	-0,0571	0,0481
	0,0230	-0,0433	0,0570	-0,0595	0,0489	-0,0275
	0,0006	-0,0009	0,0012	-0,0019	0,0016	-0,0013

Tabela 7.10: Diagonal principal da matriz de massa aglutinada (Kg).

Nô	1	2	3	4	5	6	7	8
Massa	41	81	81	81	81	81	81	41

Tabela 7.11: Fatores de amortecimento modal.

Modo	1	2	3	4	5	6
Fator de amortecimento	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

Tabela 7.12: Características do elemento de impacto. (RIG = coeficiente de rigidez (N/m); C = coeficiente de amortecimento (Ns/m) ).

elemento/ defletor	RIG1 = $2,0 \times 10^8$ C1 = $1,5 \times 10^4$
entre elementos	RIG2 = $1,0 \times 10^8$ C2 = $2,0 \times 10^4$

A aceleração de base, arbitrária, imposta à estrutura é dada na expressão 7.4 e mostrada graficamente na figura 7.19.

$$\ddot{y} = 1. \text{sen}(20 \pi t) \quad (\text{m/s}^2) \quad (7.4)$$

Foram executadas três rodadas deste caso com o programa

STYCA, procurando-se com isso mostrar algumas de suas possibilidades como ferramenta de projeto e análise dos elementos combustíveis.

A primeira rodada, tomada como base de comparação para as demais, considera amortecimento estrutural e também dissipação de energia no fenômeno do impacto.

A segunda rodada não considera a atuação do dissipador de energia do elemento de impacto, sendo neste caso  $C1 = C2 = 0,0$ .

Na terceira rodada, diminuiu-se a folga entre os elementos da periferia e o defletor, passando de 1,0 mm para 0,5 mm, mantendo-se os demais valores idênticos aos da primeira rodada.

Nas figuras 7.20 a 7.25 estão mostrados os deslocamentos laterais de todos os nós de todos os elementos combustíveis para a primeira rodada. Em cada figura, apresentam-se os resultados para os nós de mesma elevação para todos os elementos. A curva de cada nó é deslocada de um valor correspondente à folga entre elementos. Isto permite uma visualização direta das eventuais interferências entre nós de elementos adjacentes.

Os nós extremos 1 e 8 apresentam deslocamento desprezível devido estarem juntos aos nós da base (observar coeficientes correspondentes a estes nós na matriz modal), e portanto seus resultados não são mostrados.

Na tabela 7.13 estão mostrados os valores de pico e os instantes de ocorrência dos impactos obtidos na 1ª rodada. Na tabela 7.13, e 7.14 e 7.15 que se seguem, sob a coluna ocorrência

indica-se entre quais elementos ocorreu o impacto, onde "d" indica o defletor, "1" indica o 1º elemento, "2" indica o 2º, e assim por diante.

Pode-se observar que os impactos ocorrem sequencialmente entre o primeiro elemento e o defletor, entre o primeiro e o segundo elementos, entre o segundo e o terceiro e entre o quinto elemento e o defletor.

O quarto elemento não colide em momento algum, assim como os nós 7 de todos os elementos. Os nós 1 e 8, como já foi dito, apresentam deslocamentos desprezíveis e obviamente não sofrem impacto.

Nas figuras 7.26 a 7.28 estão mostrados gráficos das forças de impacto em alguns dos nós e elementos, conforme fornecidos por STYCA, e a partir dos quais foi montada a tabela 7.13

Nas figuras 7.29 a 7.34 estão mostrados os deslocamentos laterais dos nós para a segunda rodada. Da mesma forma que na rodada anterior os nós extremos 1 e 8 apresentam deslocamento desprezível e portanto os seus resultados não são mostrados.

Na tabela 7.14 estão mostrados os valores de pico e os instantes de ocorrência dos impactos obtidos na segunda rodada.

Pode-se notar, comparando-se os resultados da 2ª rodada com os da 1ª (tabelas 7.14 e 7.13 respectivamente) um aumento nos valores de pico das forças de impacto e um afastamento mais acentuado dos nós após as colisões, coerentemente com o que era esperado, tendo em vista que na 2ª rodada não há dissipação de

energia no fenômeno do impacto.

Nas figuras 7.35 a 7.37 estão mostrados gráficos das forças de impacto em alguns dos nós e elementos, para a 2ª rodada, conforme fornecidos por STYCA, e a partir dos quais foi montada a tabela 7.14.

Nas figuras 7.38 a 7.43 estão mostrados os deslocamentos laterais dos nós para a terceira rodada. Da mesma forma que nas rodadas anteriores os nós extremos 1 e 8 apresentam deslocamento desprezível e portanto os seus resultados não são mostrados.

Na tabela 7.15 estão mostrados os valores de pico e os instantes de ocorrência dos impactos obtidos na terceira rodada.

Pode-se notar comparando-se os resultados da 3ª rodada com os da 1ª (tabelas 7.15 e 7.13 respectivamente) um aumento no número de colisões, especialmente entre os elementos da periferia e os defletores, de forma coerente com o que era esperado, tendo em vista a diminuição da folga entre estes na 3ª rodada.

No entanto os valores de pico das forças de impacto não aumentaram de forma significativa. A máxima força de impacto na 1ª rodada, que ocorria entre os nós 4 do defletor e do 1º elemento, logo no início do transiente, e era de 4000 N, baixou para 3500 N, devido a uma distribuição dos esforços para os outros nós do elemento, estes sim impactando mais violentamente em relação à 1ª rodada.

Nas figuras 7.44 a 7.46 estão mostrados gráficos das forças de impacto em alguns dos nós e elementos, para a 3ª rodada,

conforme fornecidos por SIYCA, e a partir dos quais foi montada a tabela 7.15.

O intervalo de tempo de integração utilizado foi de 0,00004 s.

Tabela 7.13: Forças de impacto - 1ª rodada.

	Ocorrência	Nº	Tempo (s)	Força (N)
1	d/1	3	0,058	2900
2	d/1	4	0,058	4000
3	d/1	5	0,058	3400
4	d/1	6	0,058	2400
5	1/2	4	0,077	2700
6	1/2	5	0,077	2400
7	1/2	2	0,110	600
8	2/3	4	0,142	180
9	2/3	5	0,148	90
10	2/3	3	0,150	600
11	2/3	5	0,185	110
12	5/d	3	0,310	1900
13	5/d	6	0,310	2200

Tabela 7.14: Forças de impacto - 2ª rodada.

	Ocorrência	Nº	Tempo (s)	Força (N)
1	d/1	3	0,058	3000
2	d/1	4	0,058	3800
3	d/1	5	0,058	3800
4	d/1	6	0,058	2600
5	1/2	4	0,075	3500
6	1/2	5	0,075	3300
7	1/2	3	0,088	200
8	2/3	4	0,102	1500
9	2/3	5	0,102	1600
10	1/2	2	0,108	700
11	5/d	3	0,308	2000
12	5/d	6	0,308	2400

Tabela 7.15: Forças de impacto - 3ª rodada.

	Ocorrência	Nº	Tempo (s)	Força (N)
1	d/1	3	0,041	3400
2	d/1	4	0,041	3500
3	d/1	5	0,041	3500
4	d/1	6	0,041	3400
5	d/1	2	0,046	2000
6	d/1	7	0,048	1100
7	1/2	4	0,060	3000
8	1/2	5	0,060	2900
9	1/2	3	0,063	2100
10	1/2	6	0,065	1500
11	1/2	2	0,075	800
12	2/3	4	0,085	1800
13	2/3	5	0,089	1500
14	2/3	3	0,104	380
15	5/d	2	0,217	960
16	5/d	6	0,220	1300
17	5/d	3	0,225	450
18	5/d	4	0,235	1700
19	d/1	2	0,260	2100
20	d/1	7	0,260	930
21	d/1	6	0,262	2000
22	5/d	7	0,315	280

Tabela 7.15: (Continuação).

23	5/d	6	0,316	640
24	1/2	5	0,360	250
25	1/2	4	0,366	340

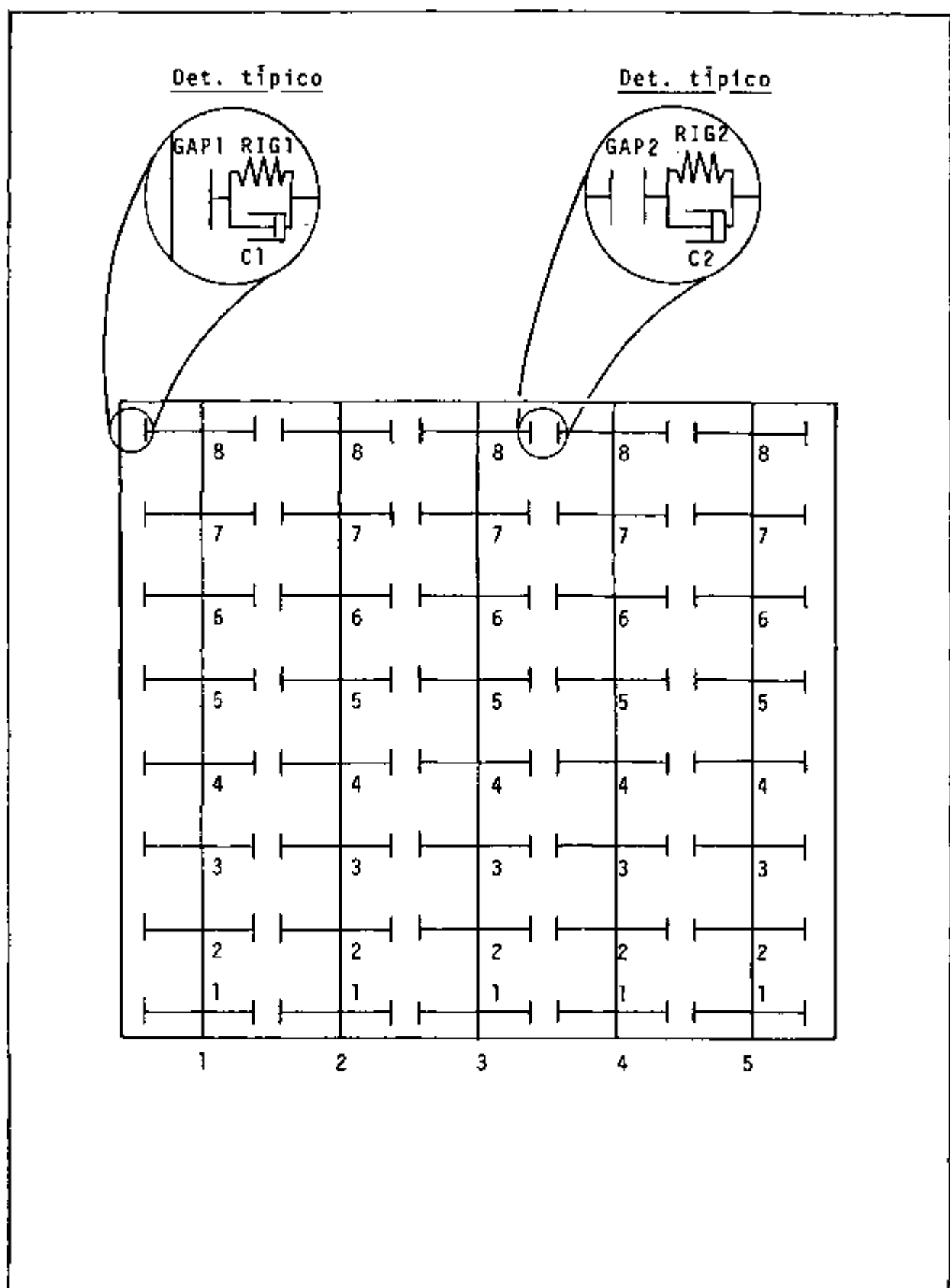


FIGURA 7.18 - Caso Exemplo - Modelo do Núcleo.

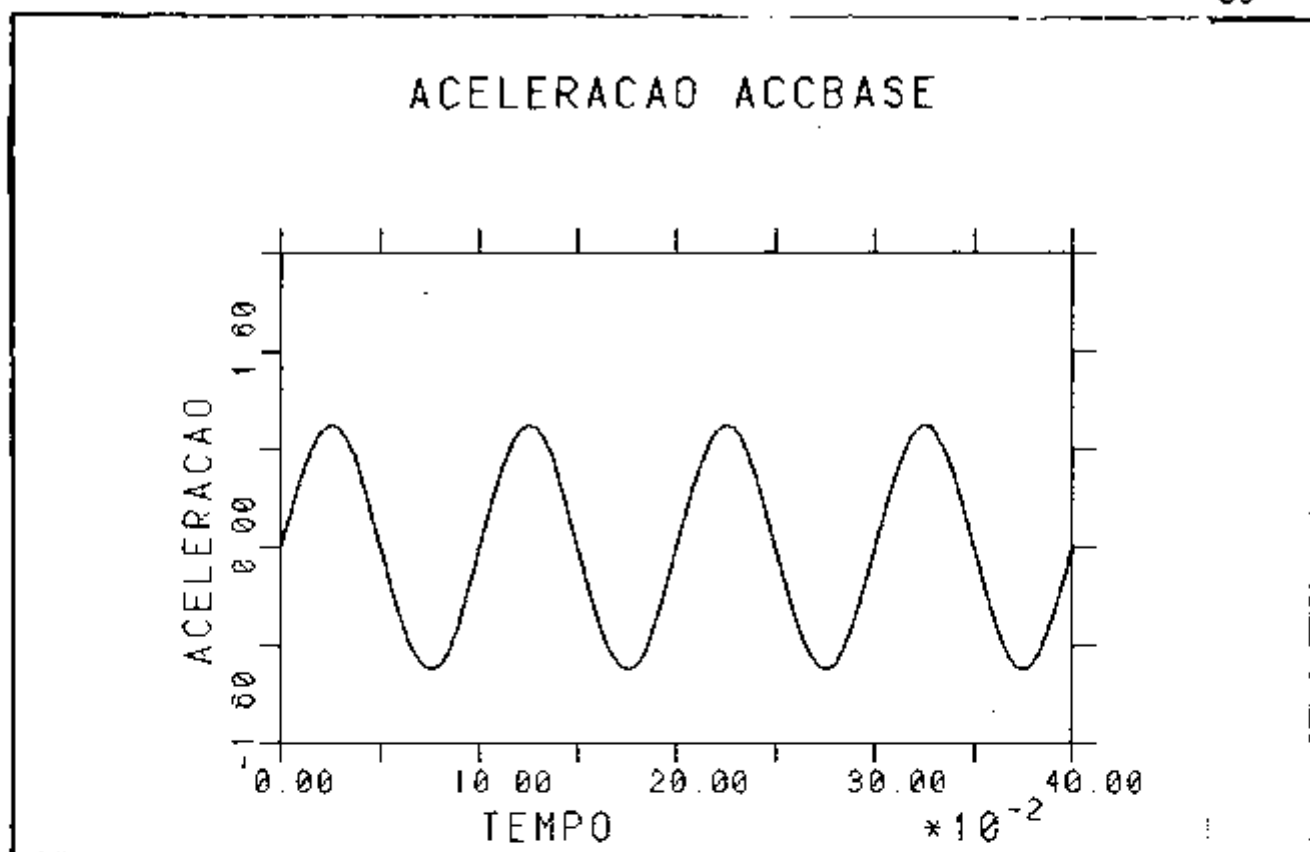


FIGURA 7.19 - Aceleração de Base ( $m/s^2$ ).

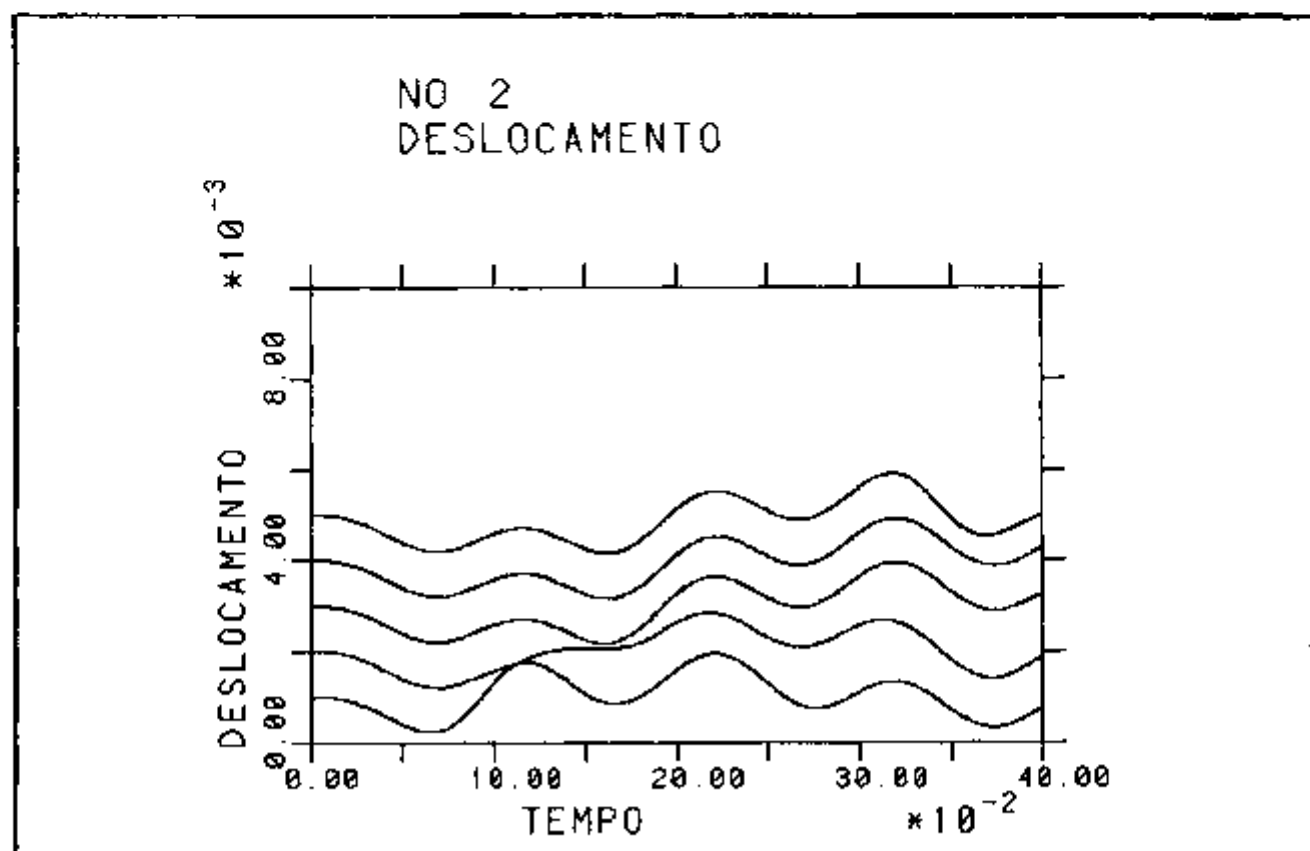


FIGURA 7.20 - Deslocamento dos nós 2 - 1ª rodada (m).

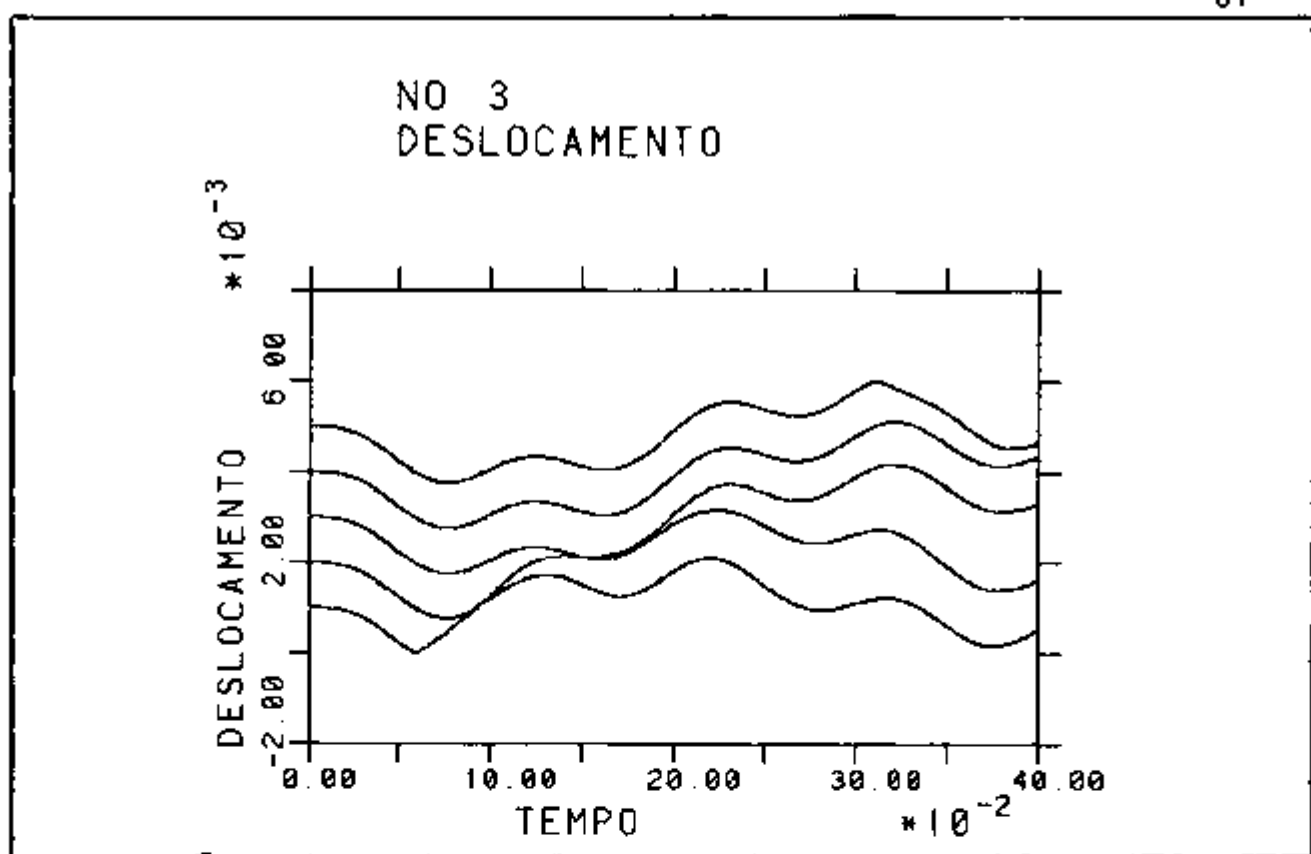


FIGURA 7.21 - Deslocamento dos n<sup>o</sup>s 3 - 1<sup>a</sup> rodada (m).

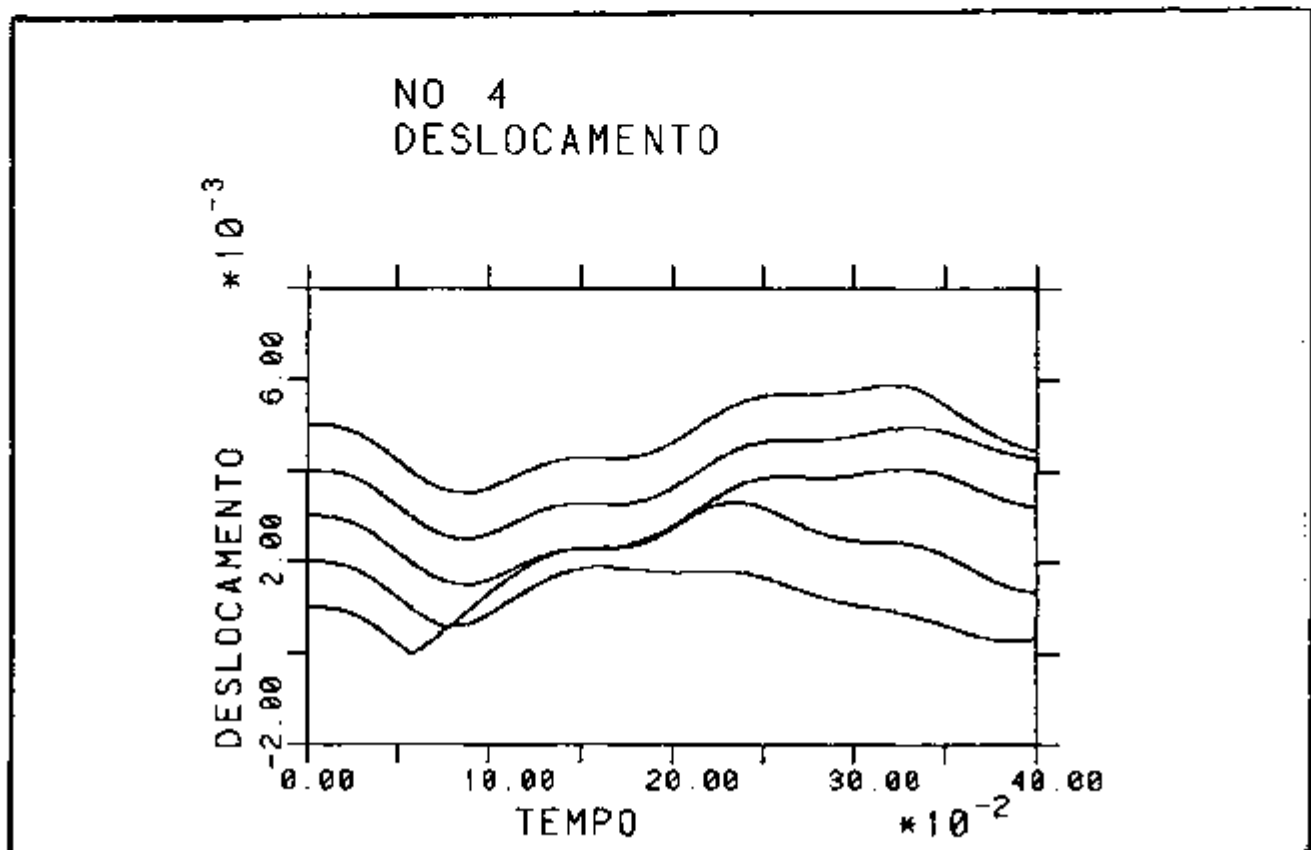


FIGURA 7.22 - Deslocamento dos n<sup>o</sup>s 4 - 1<sup>a</sup> rodada (m).

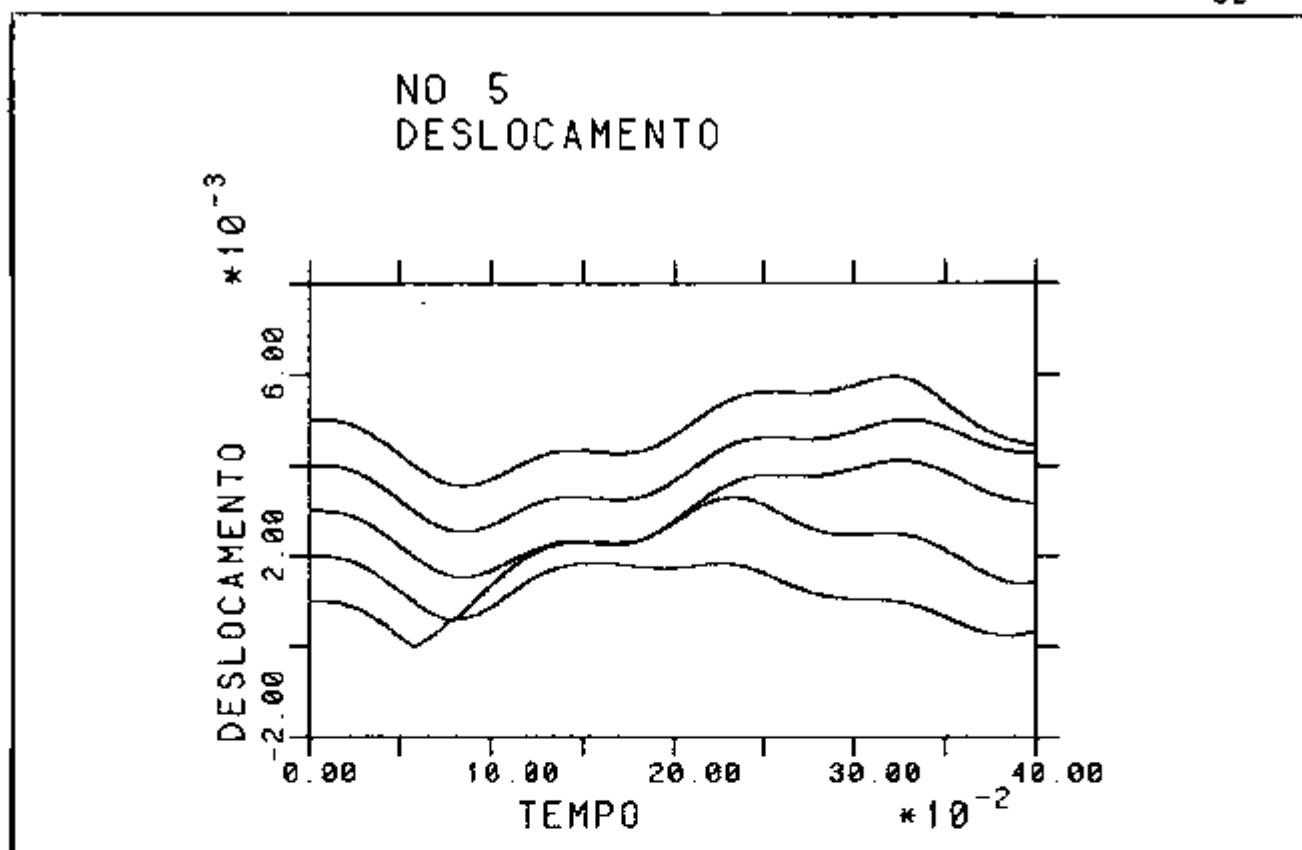


FIGURA 7.23 - Deslocamento dos nós 5 - 1ª rodada (m).

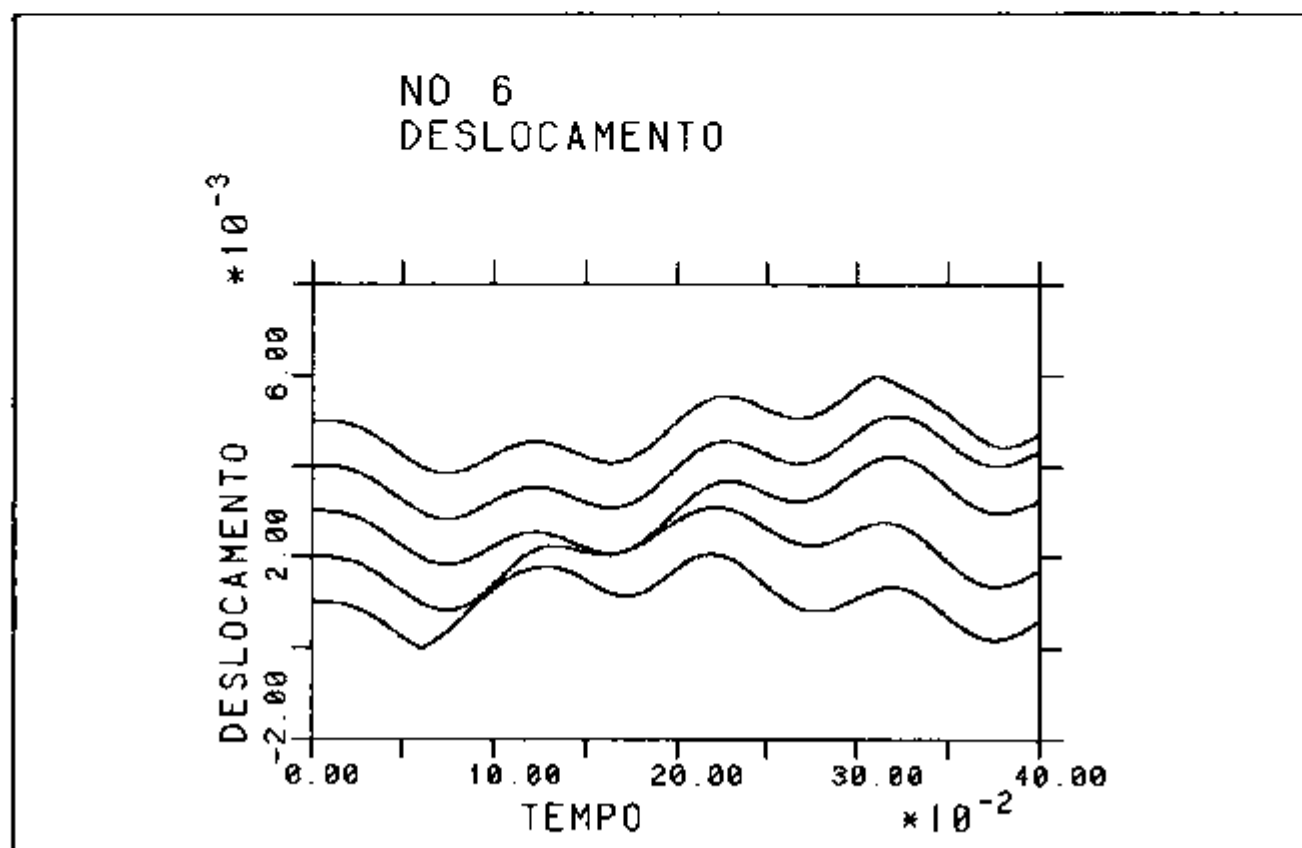


FIGURA 7.24 - Deslocamento dos nós 6 - 1ª rodada (m).

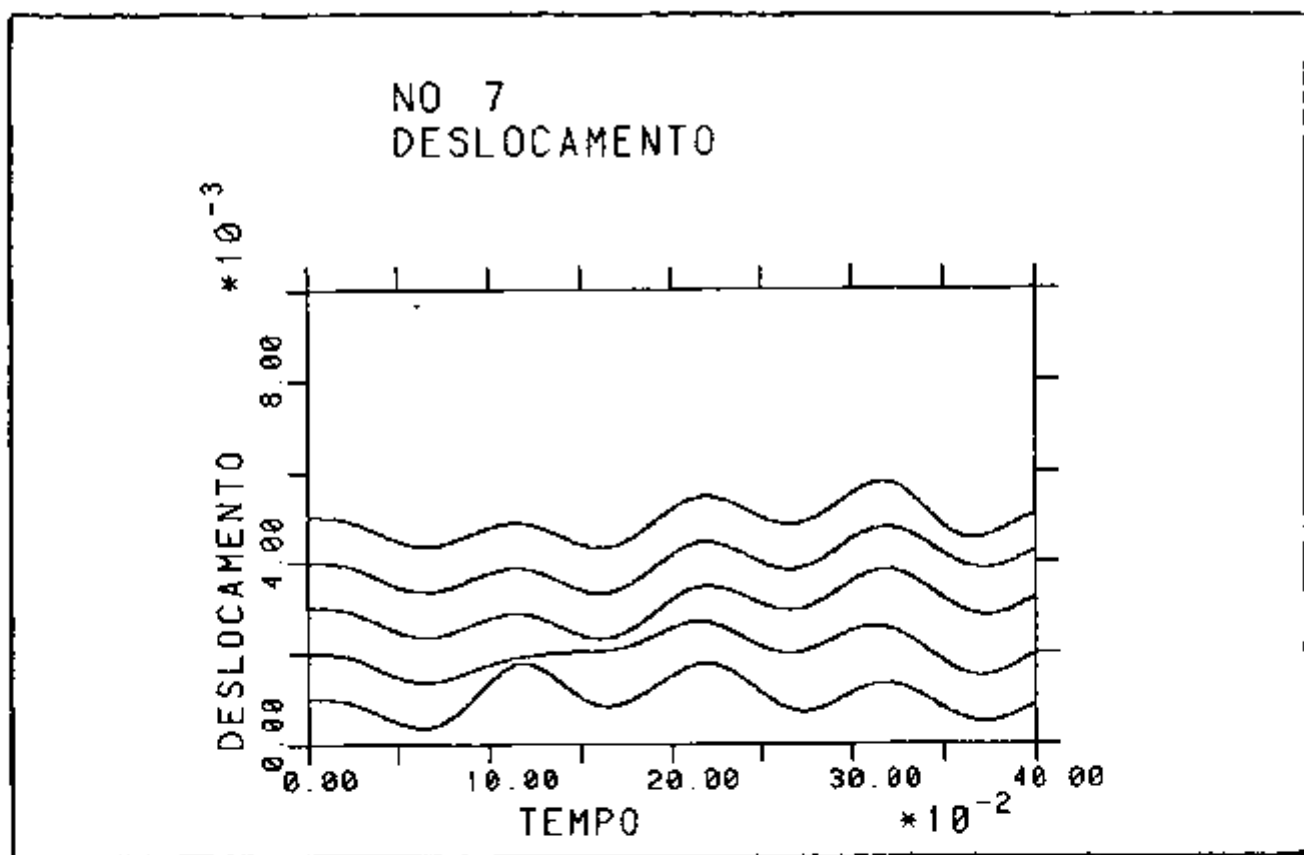


FIGURA 7.25 - Deslocamento dos nós 7 - 1ª rodada (m).

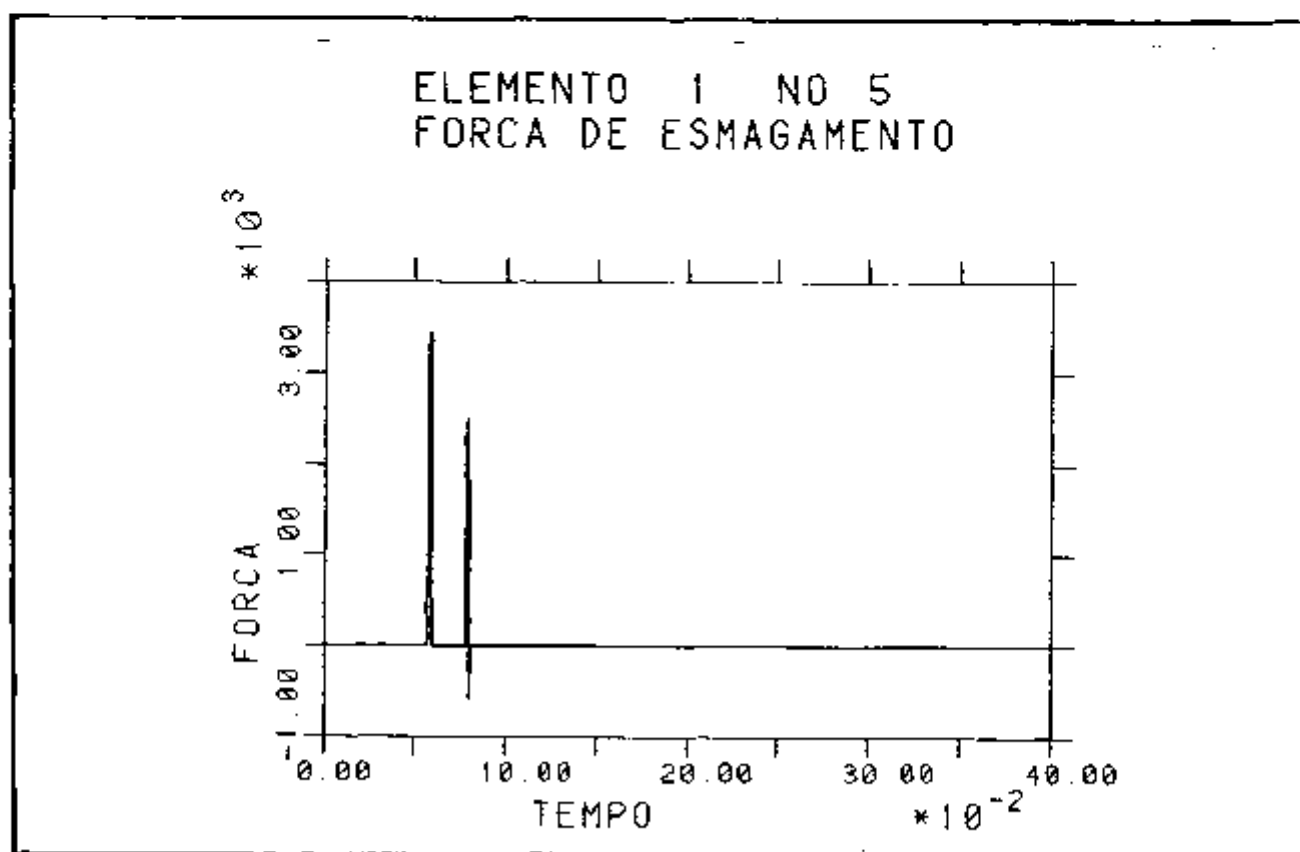


FIGURA 7.26 - Força no Elemento de Impacto - Elemento 1 nó 5 - 1ª rodada (N).

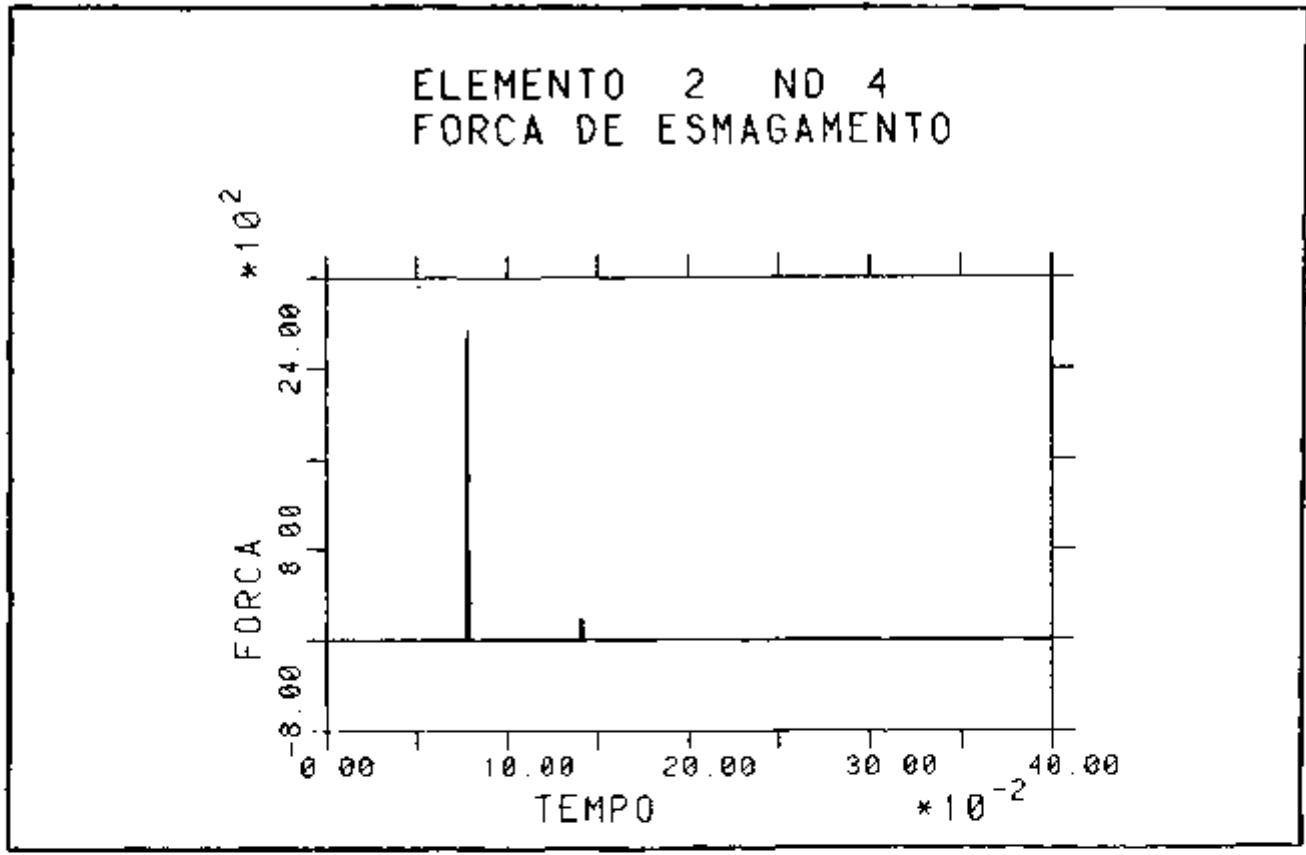


FIGURA 7.27 - Força no Elemento de Impacto - Elemento 2 n<sup>o</sup> 4 - 1<sup>a</sup> rodada (N).

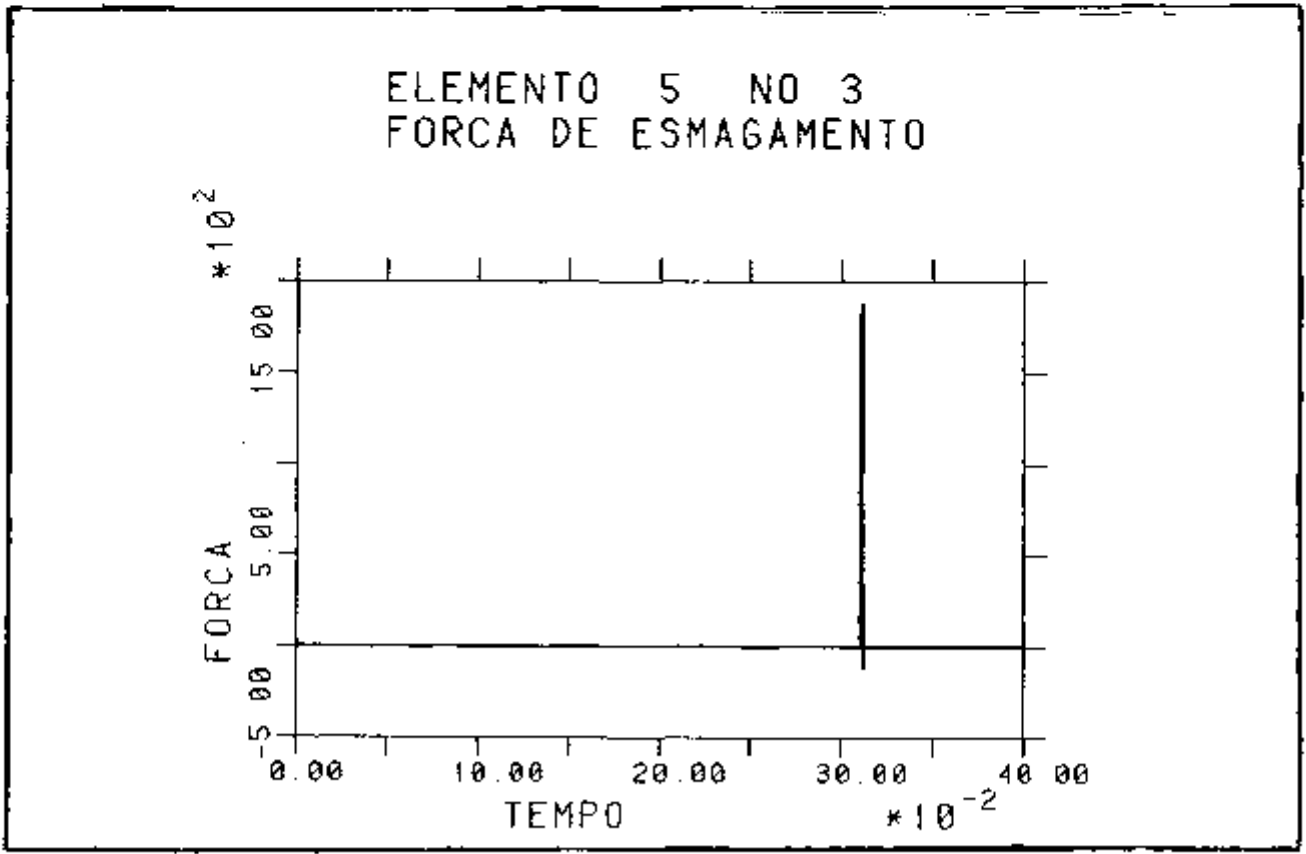


FIGURA 7.28 - Força no Elemento de Impacto - Elemento 5 n<sup>o</sup> 3 - 1<sup>a</sup> rodada (N).

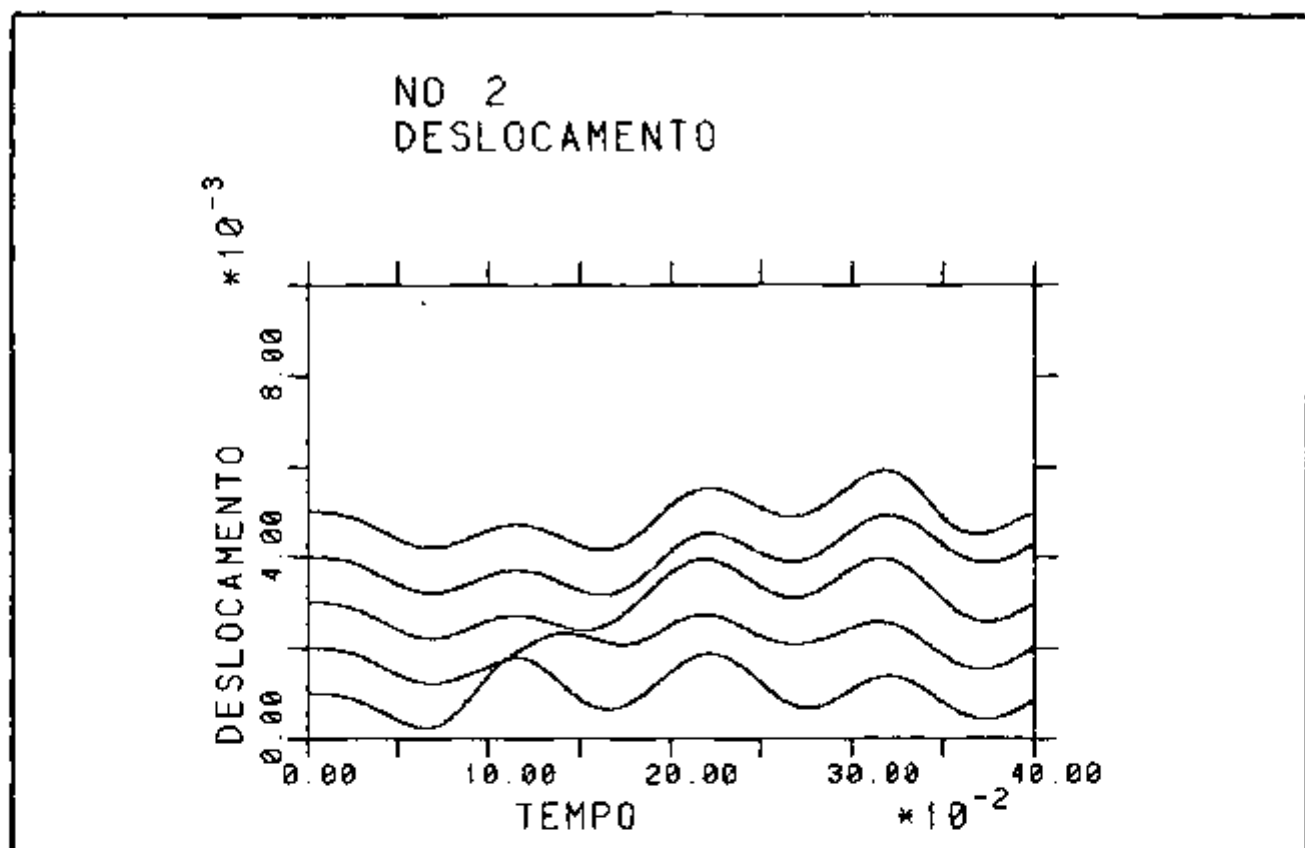


FIGURA 7.29 - Deslocamento dos nós 2 - 2ª rodada (m).

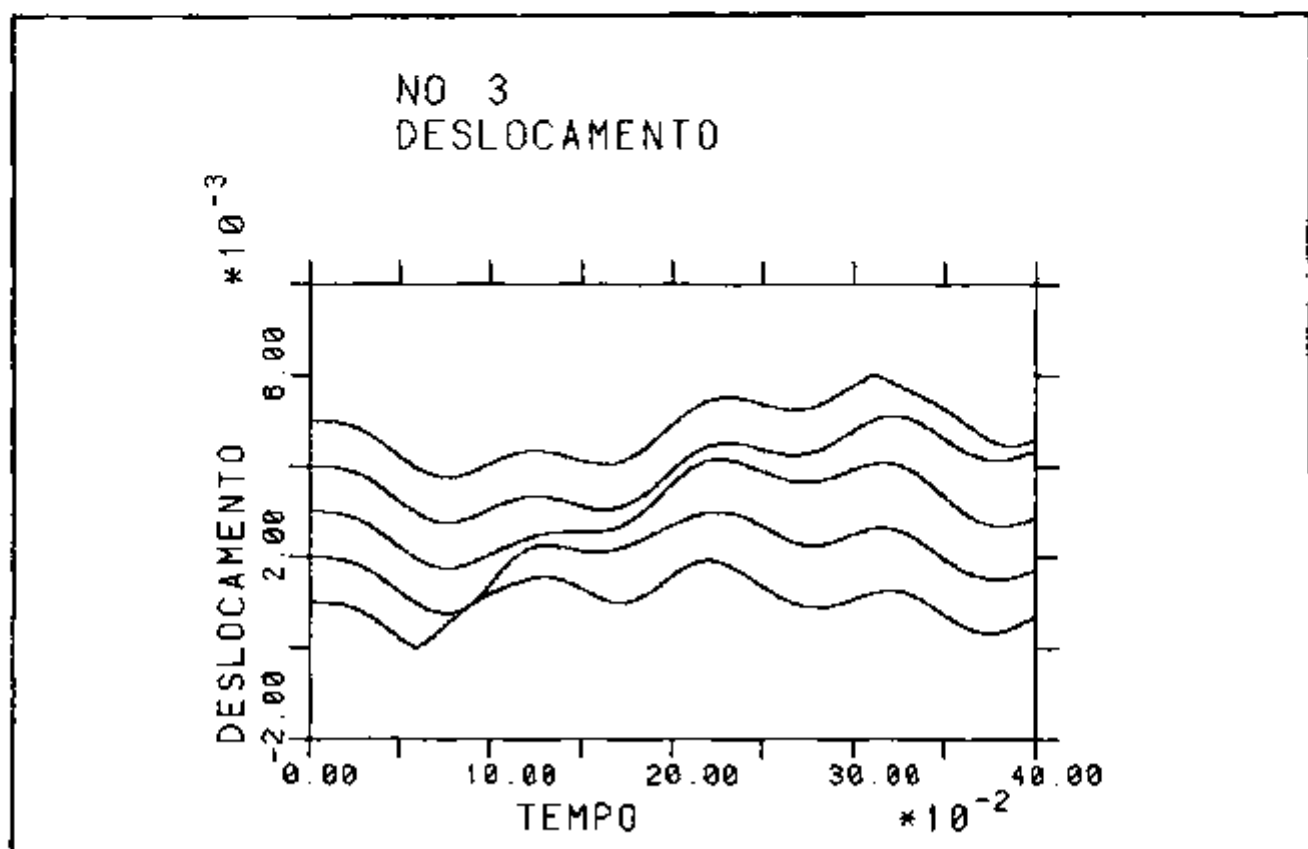


FIGURA 7.30 - Deslocamento dos nós 3 - 2ª rodada (m).

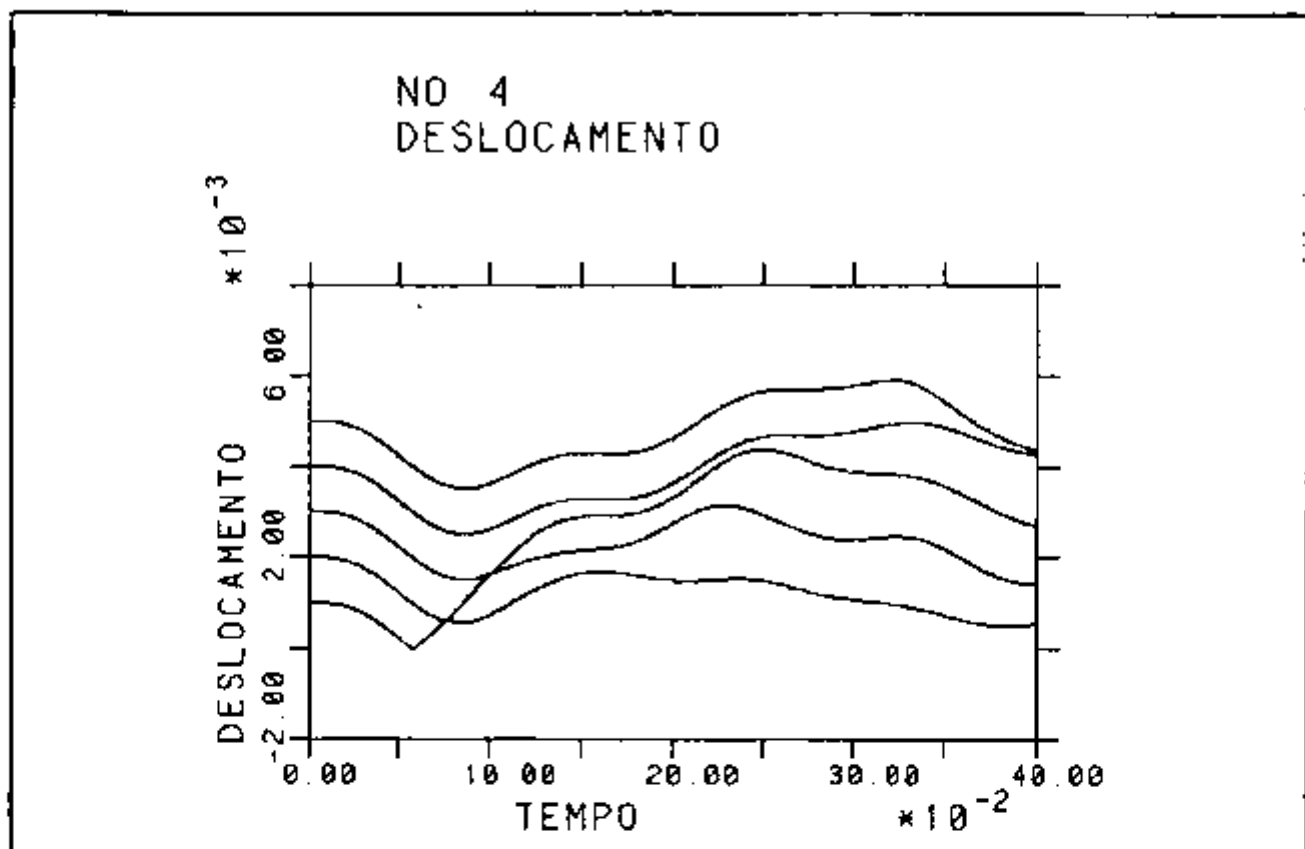


FIGURA 7.31 - Deslocamento dos nós 4 - 2ª rodada (m).

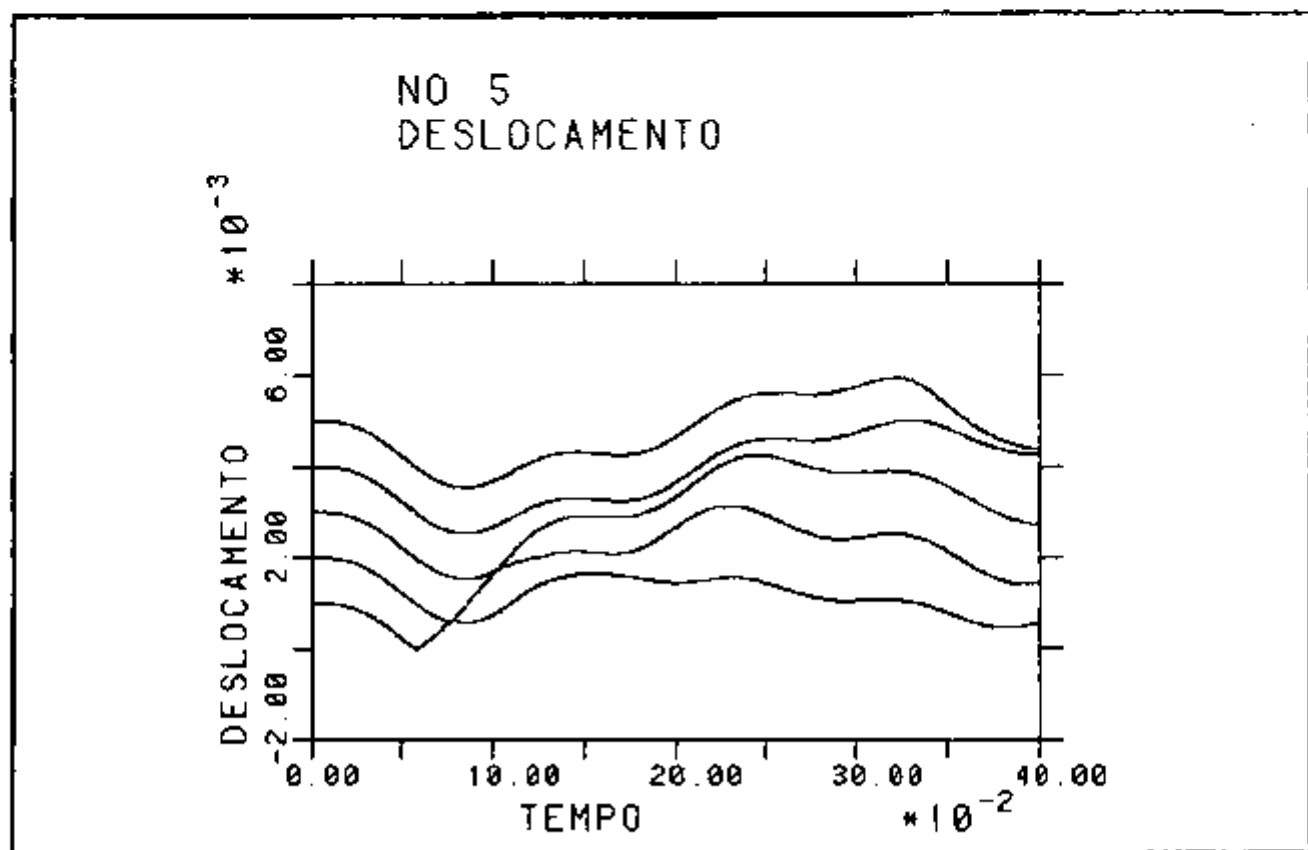


FIGURA 7.32 - Deslocamento dos nós 5 - 2ª rodada (m).

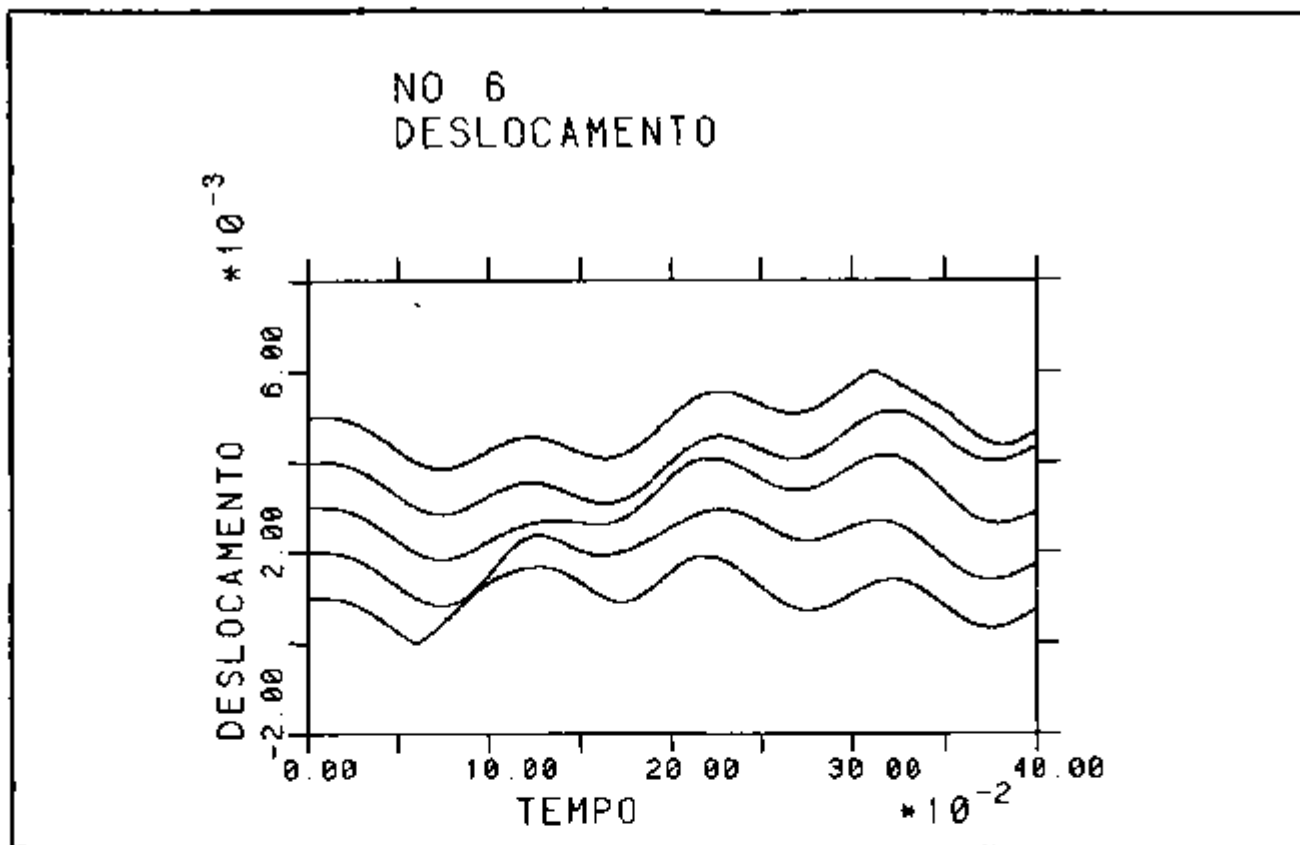


FIGURA 7.33 - Deslocamento dos nós 6 - 2ª rodada (m).

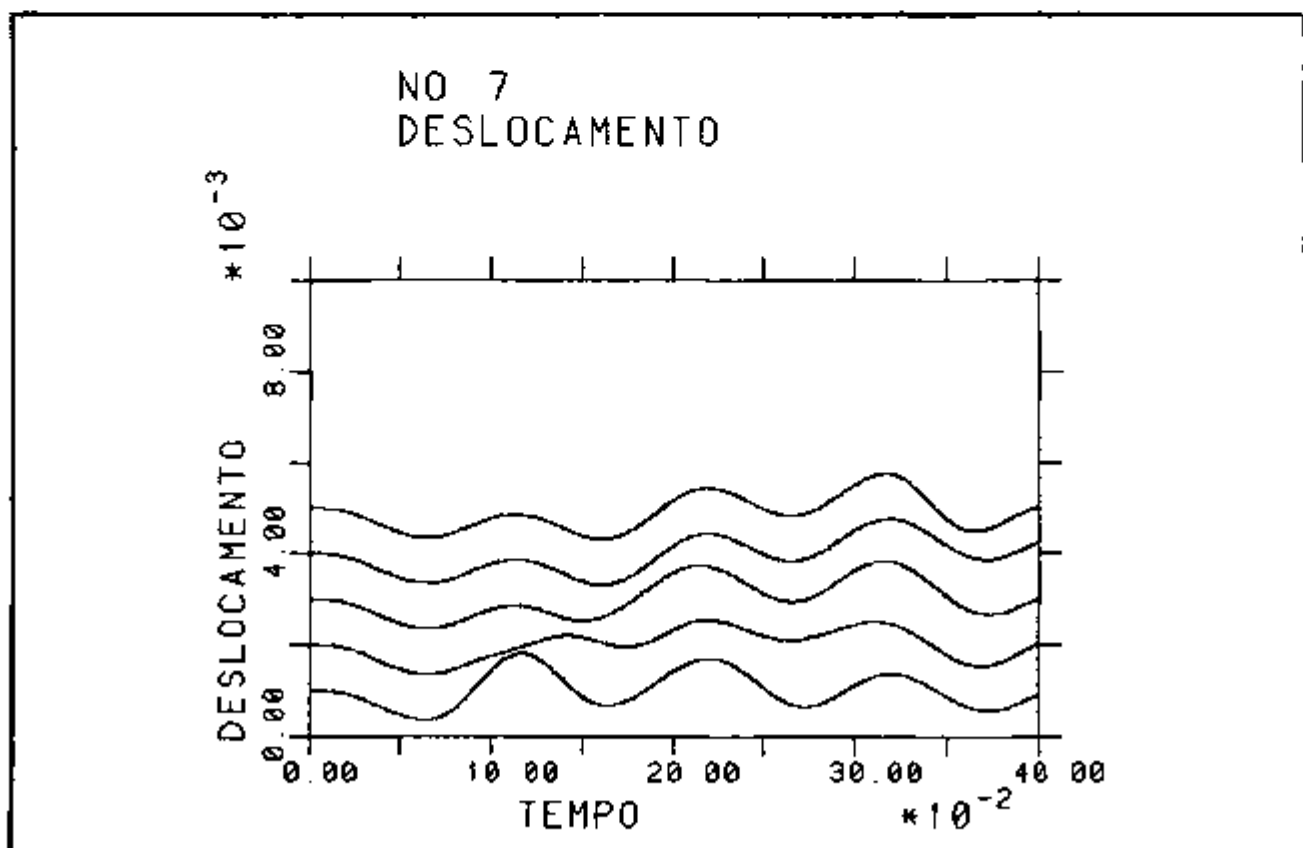


FIGURA 7.34 - Deslocamento dos nós 7 - 2ª rodada (m).

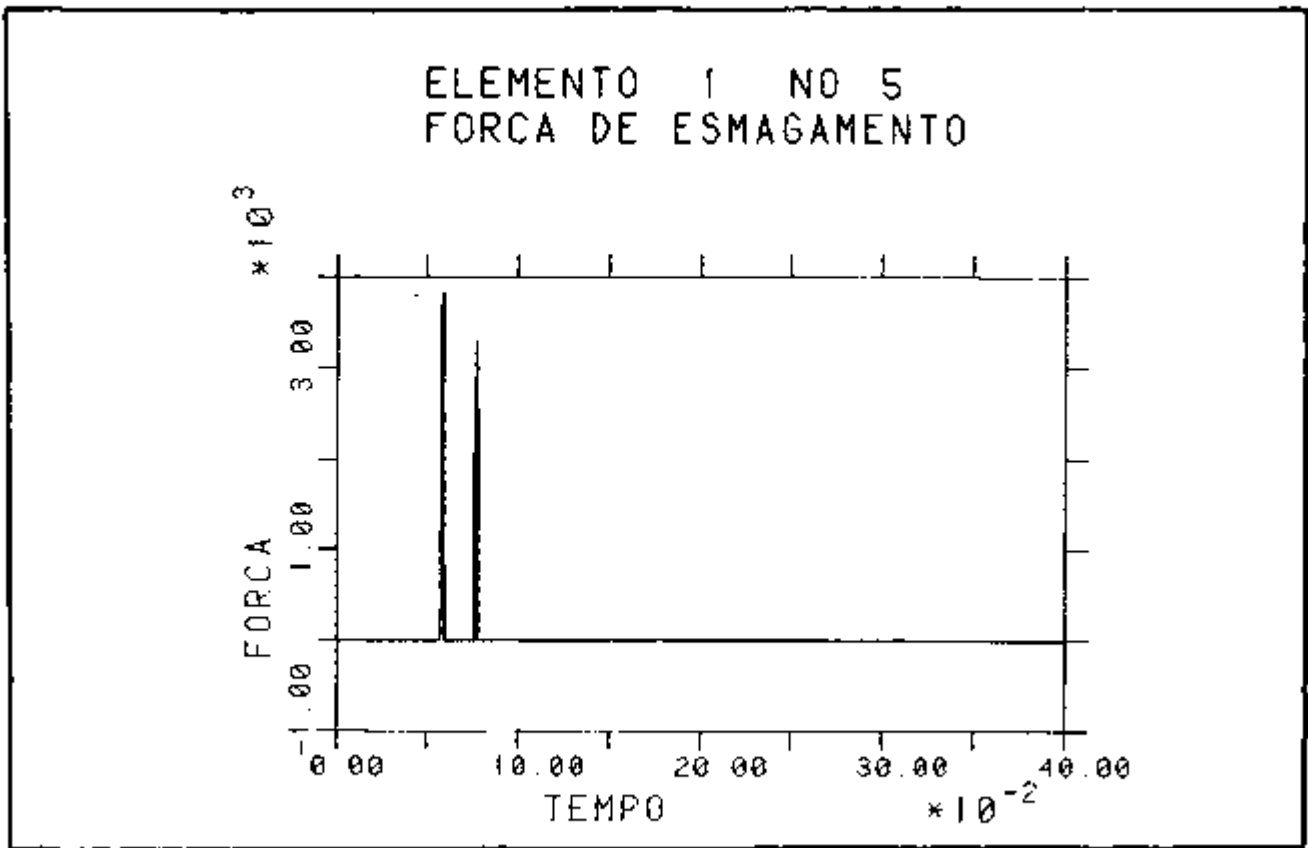


FIGURA 7.35 - Força no Elemento de Impacto - Elemento 1 nó 5 - 2ª rodada (N).

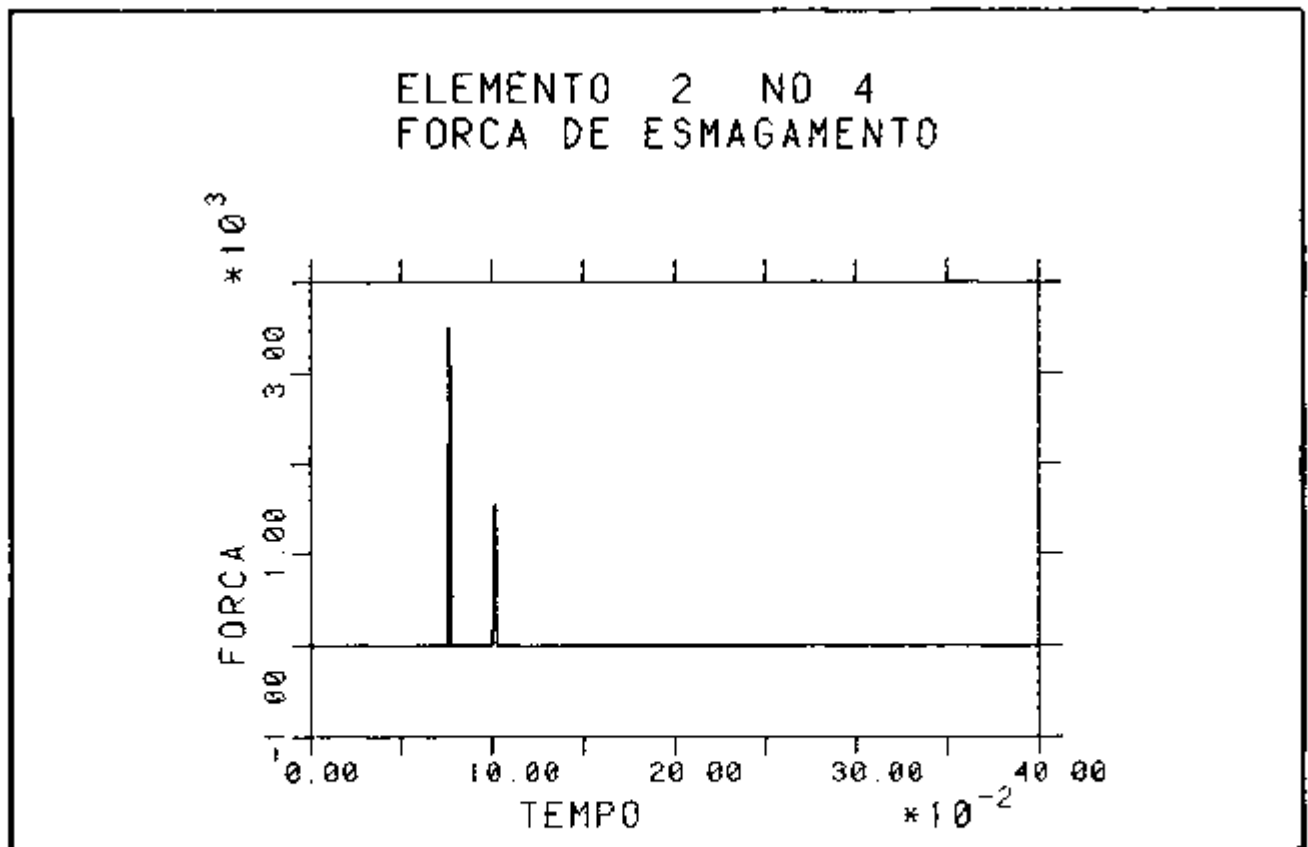


FIGURA 7.36 - Força no Elemento de Impacto - Elemento 2 nó 4 - 2ª rodada (N).

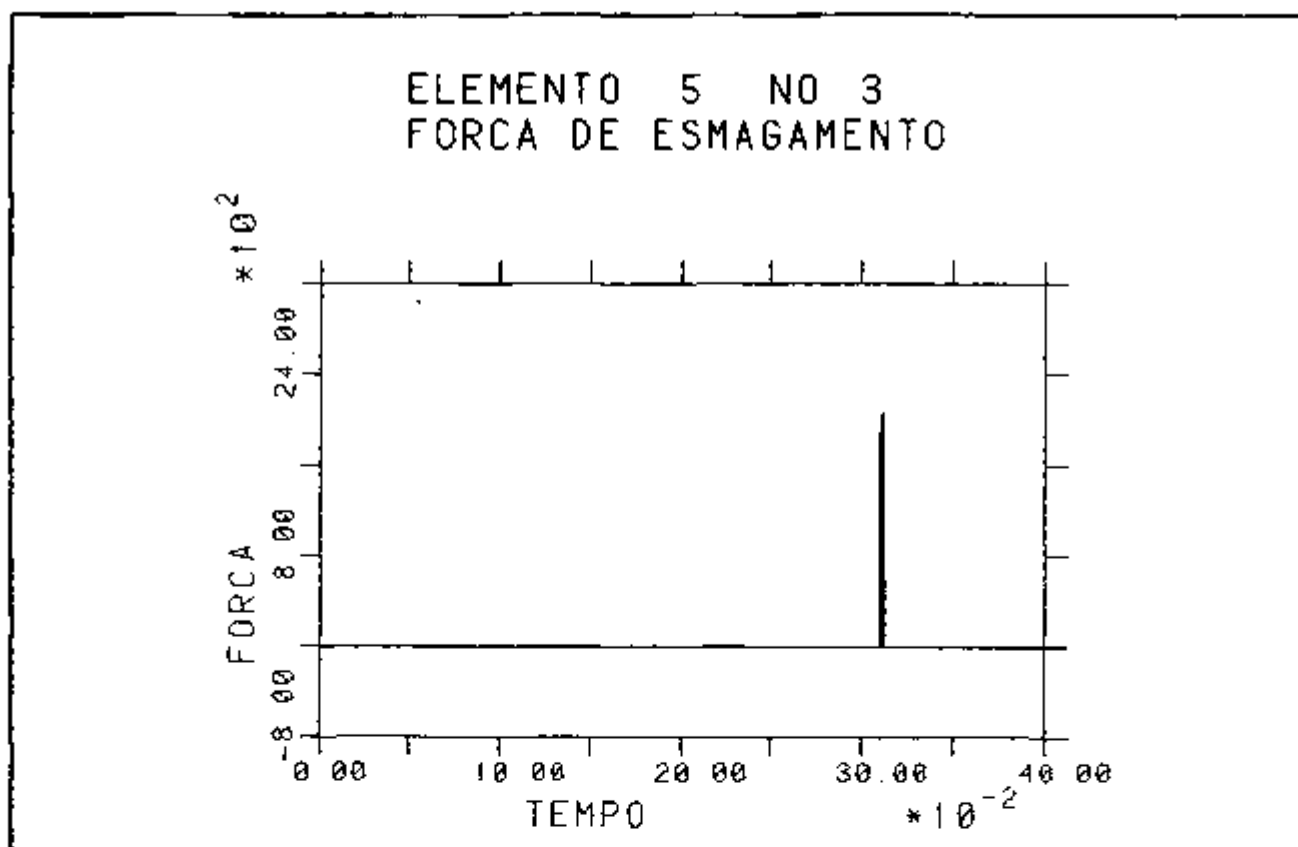


FIGURA 7.37 - Força no Elemento de Impacto - Elemento 5 nó 3 -  
2ª rodada (N).

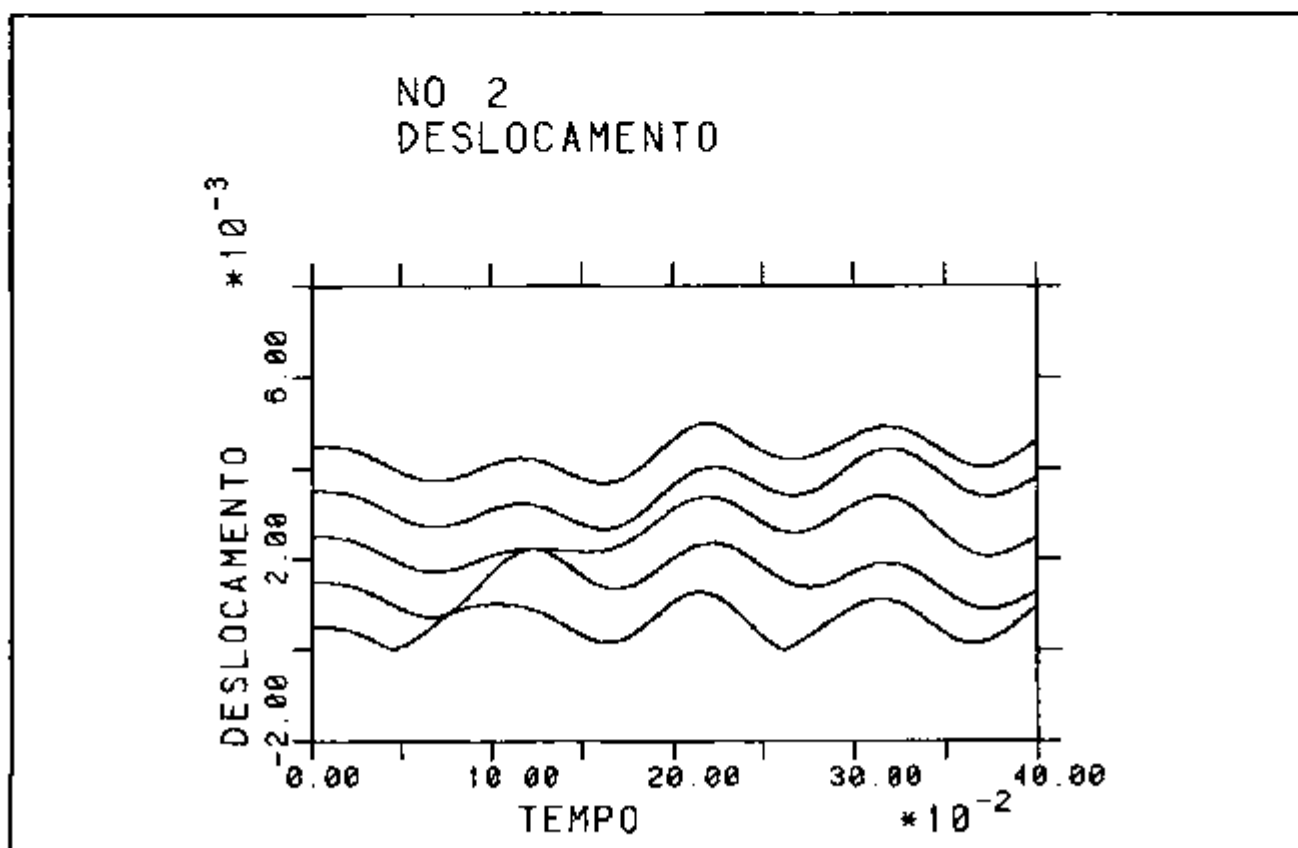


FIGURA 7.38 - Deslocamento dos nós 2 - 3ª rodada (m).

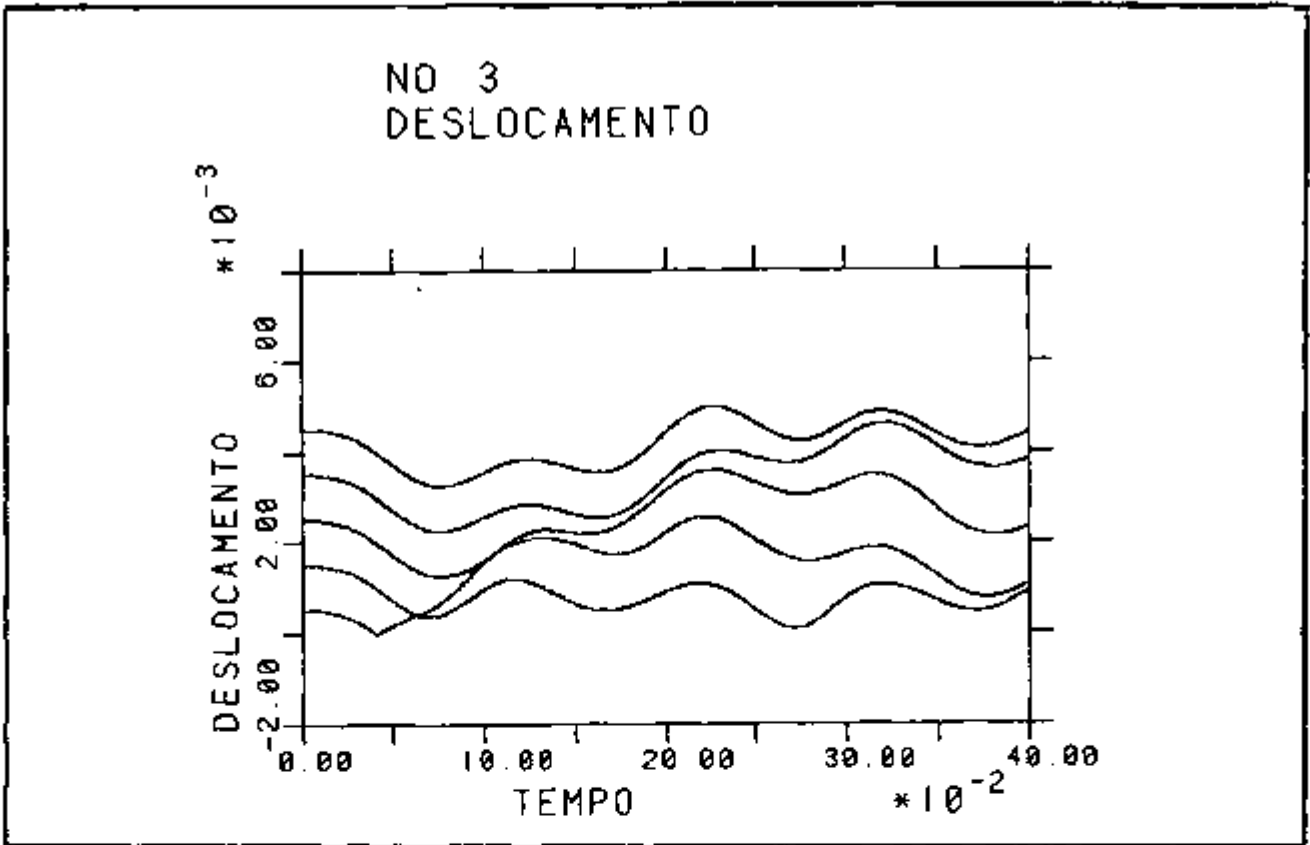


FIGURA 7.39 - Deslocamento dos nós 3 - 3ª rodada (m).

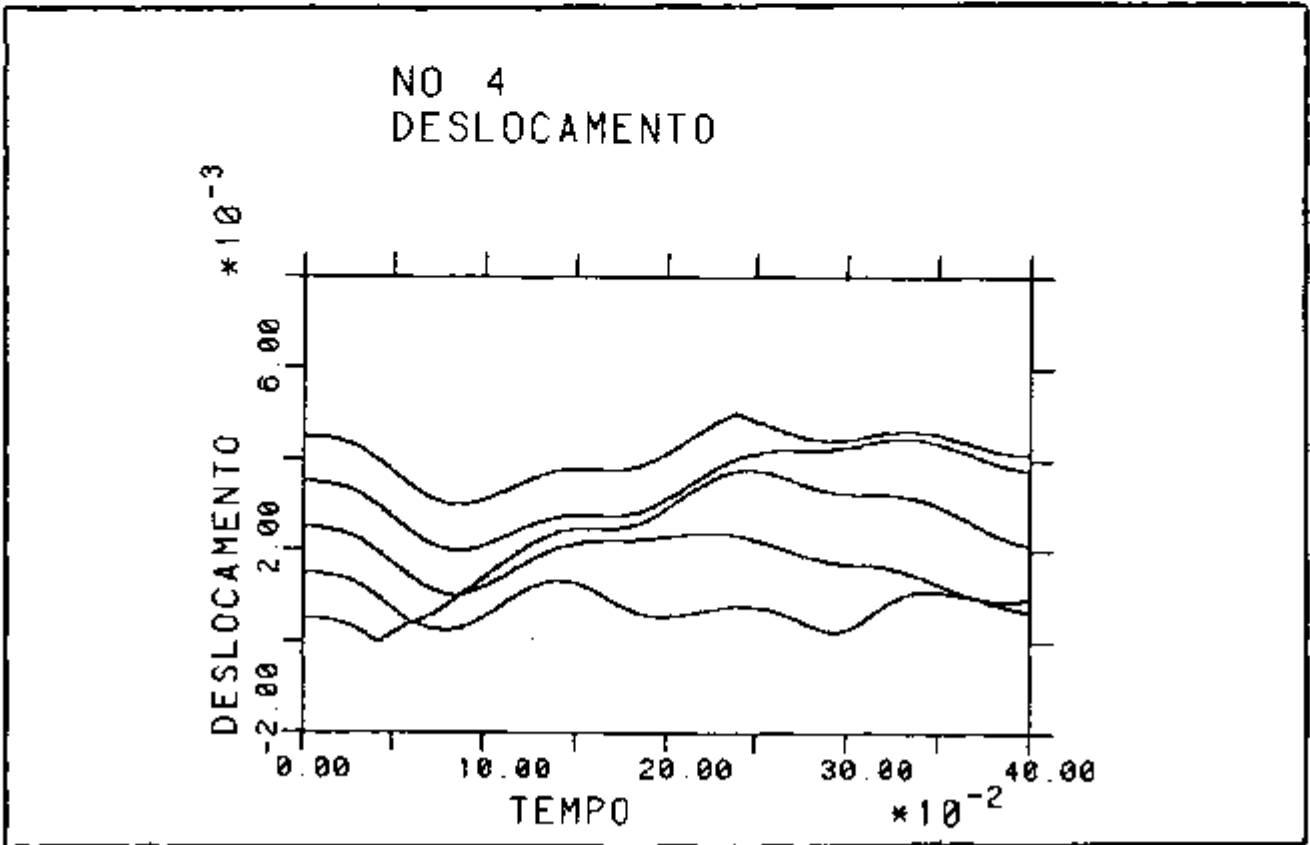


FIGURA 7.40 - Deslocamento dos nós 4 - 3ª rodada (m).

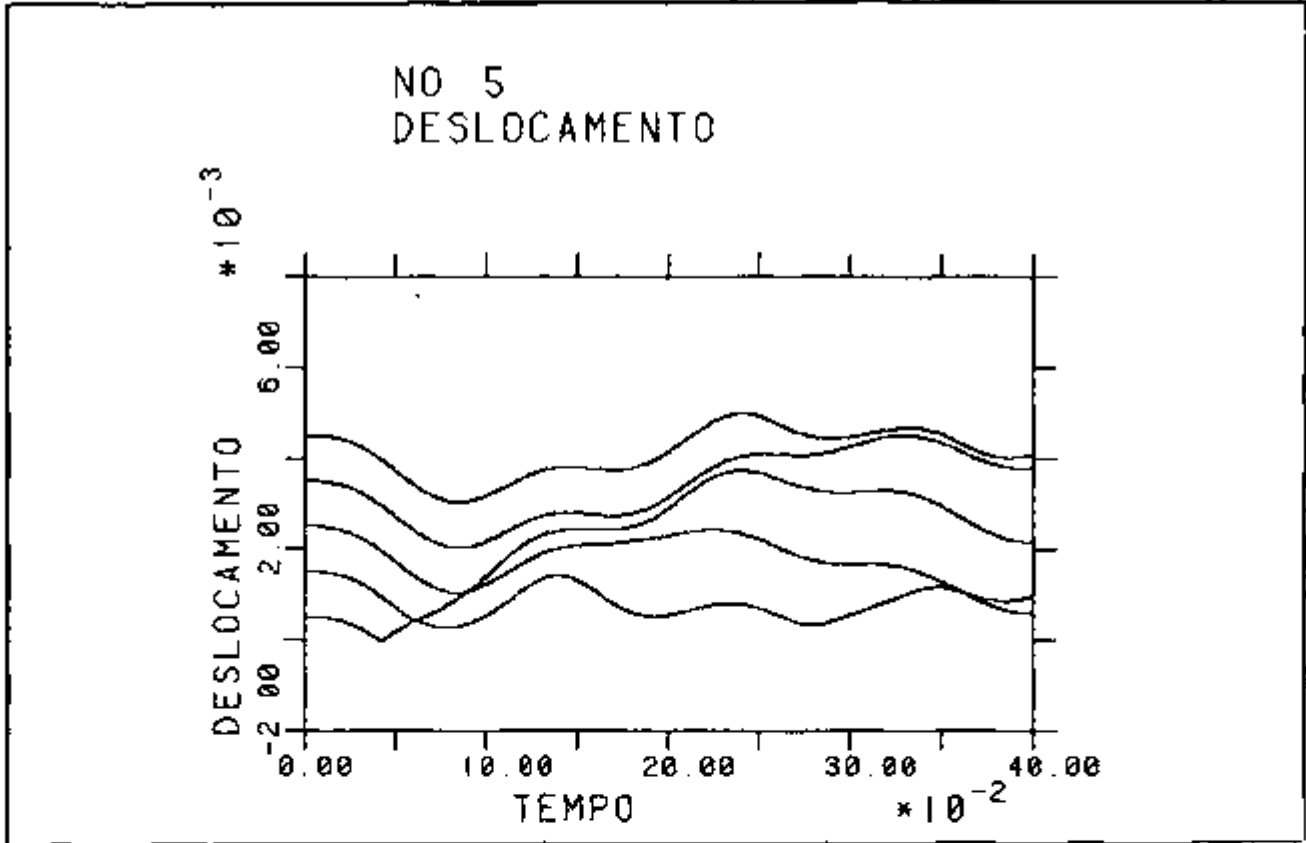


FIGURA 7.41 - Deslocamento dos nós 5 - 3ª rodada (m).

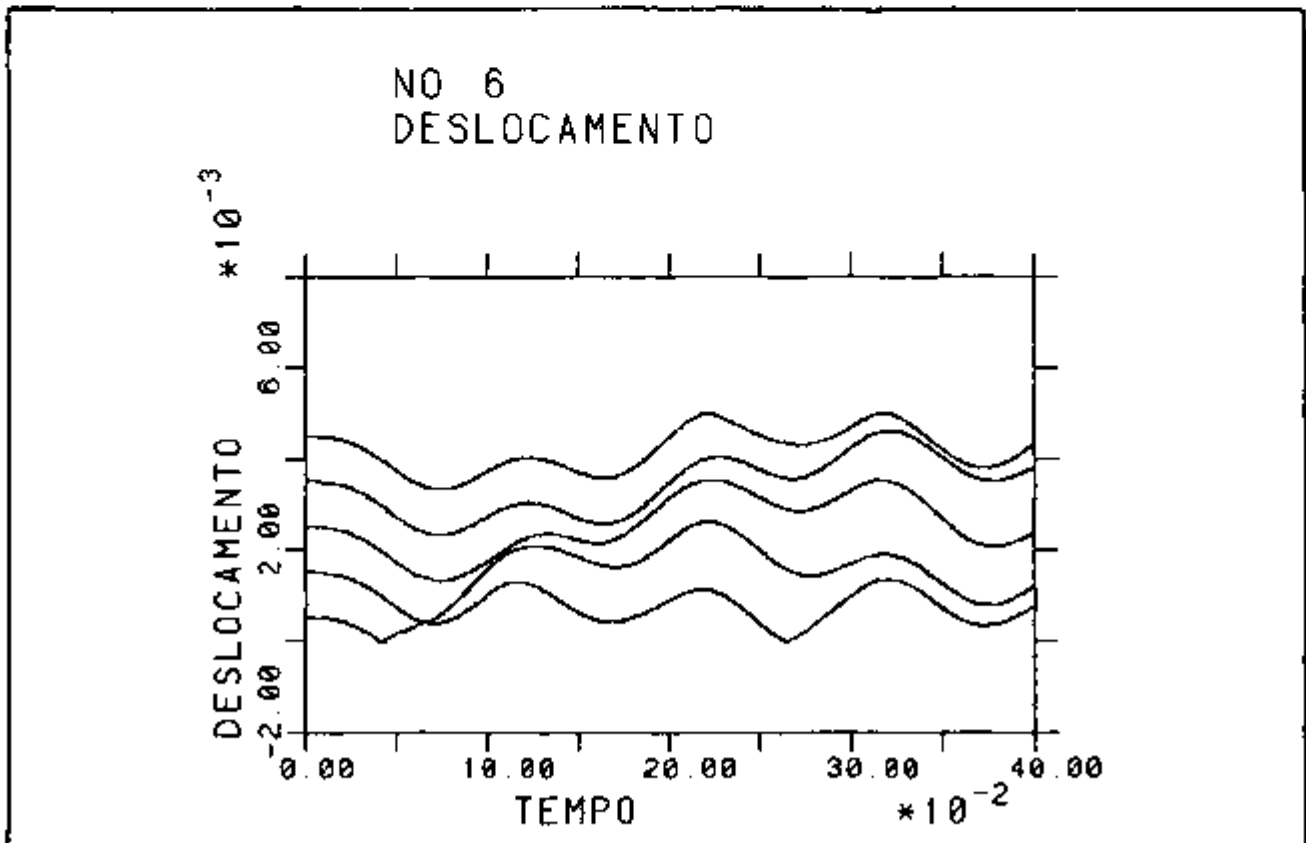


FIGURA 7.42 - Deslocamento dos nós 6 - 3ª rodada (m).

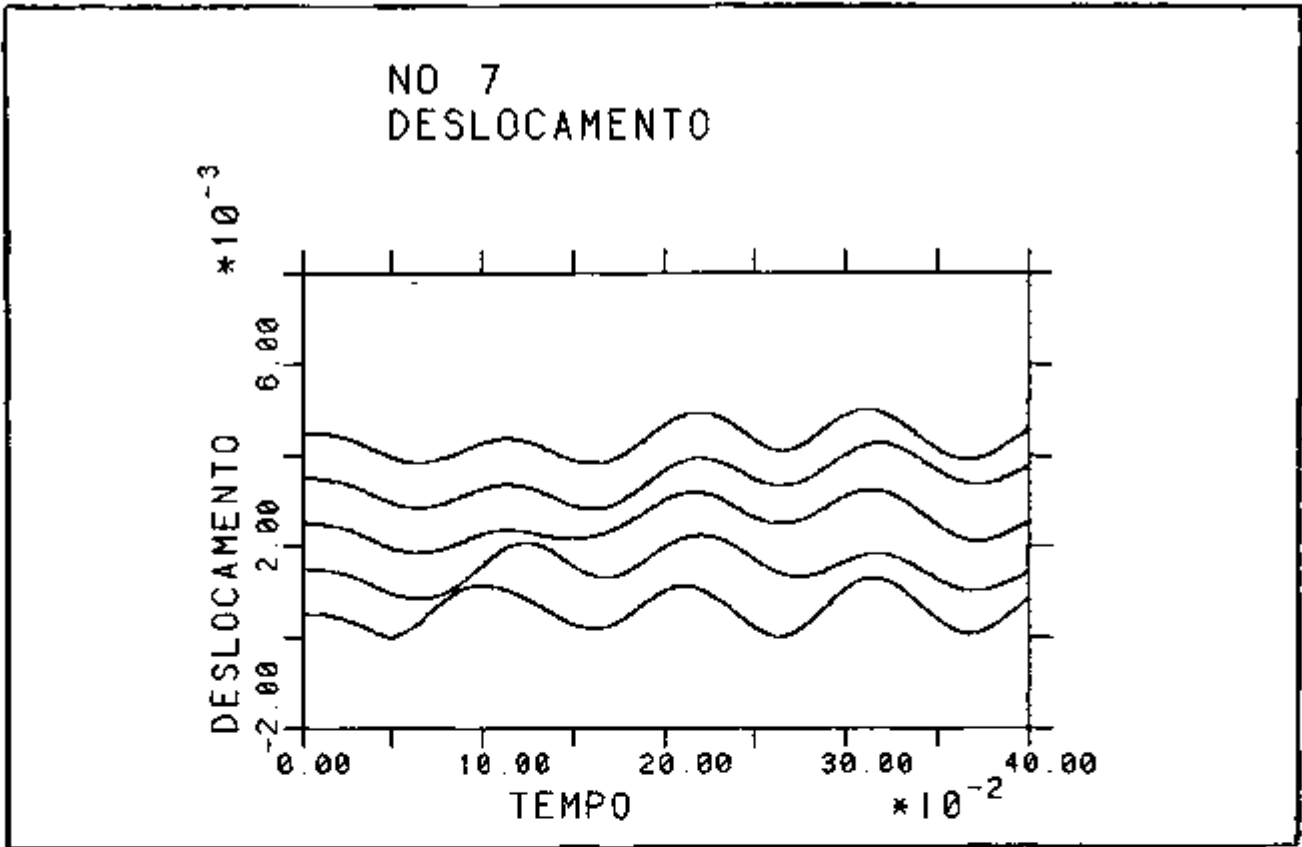


FIGURA 7.43 - Deslocamento dos nós 7 - 3ª rodada (m).

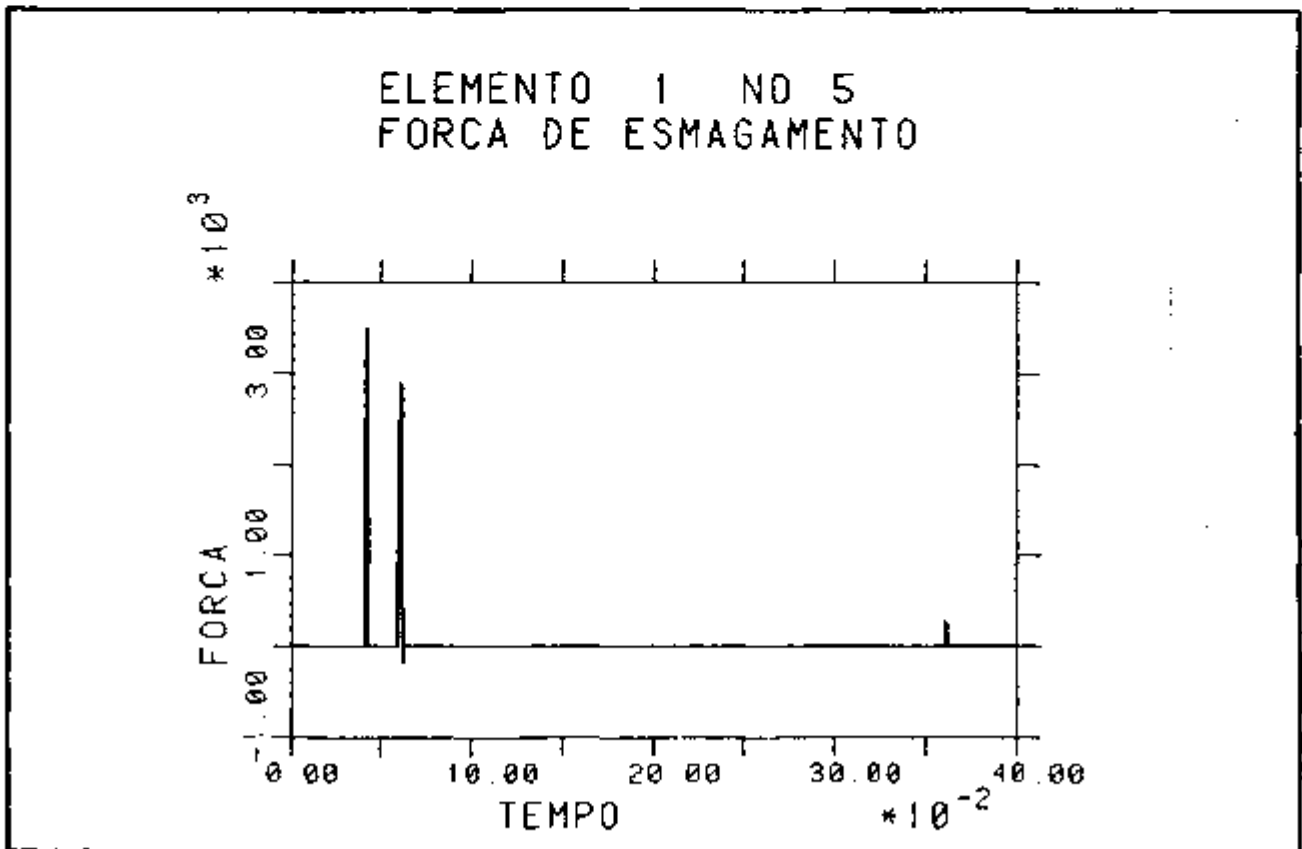


FIGURA 7.44 - Força no Elemento de Impacto - Elemento 1 nó 5 -  
3ª rodada (N).

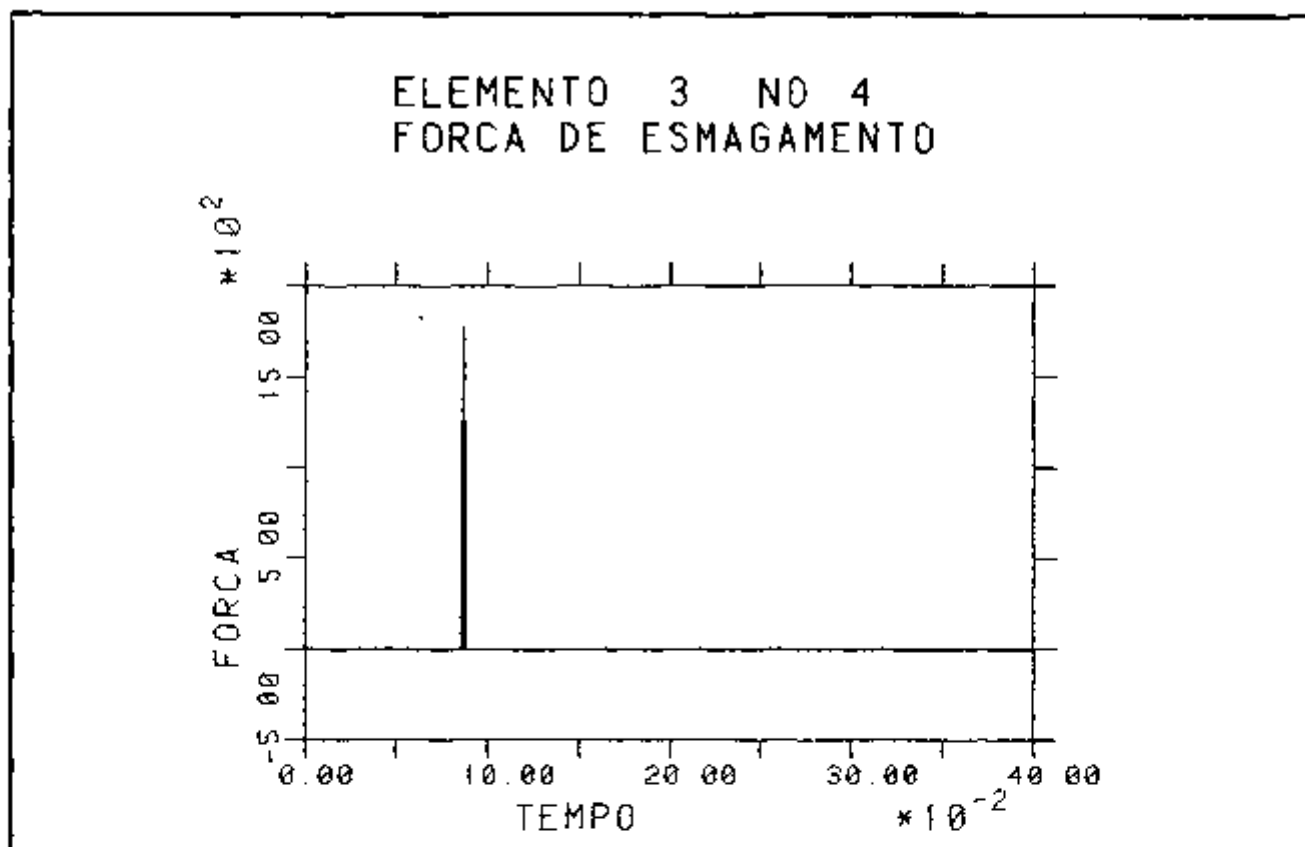


FIGURA 7.45 - Força no Elemento de Impacto - Elemento 3 nó 4 -  
3ª rodada (N).

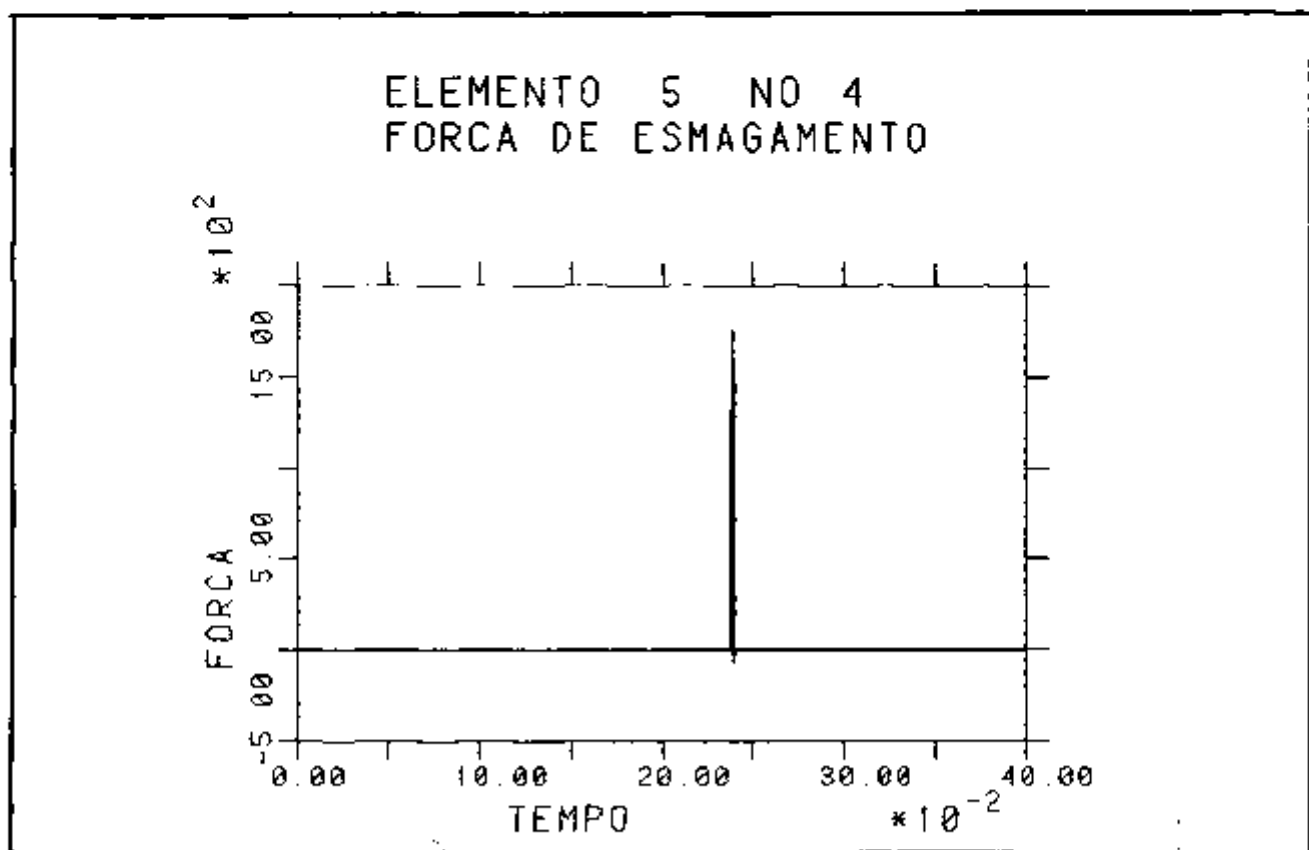


FIGURA 7.46 - Força no Elemento de Impacto - Elemento 5 nó 4 -  
3ª rodada (N).

## 8 - CONCLUSÃO

Neste trabalho apresentou-se um procedimento para a análise estrutural dinâmica do conjunto de elementos combustíveis no núcleo de reatores nucleares PWR.

Foi estabelecida a forma de abordagem do problema, em acordo com a bibliografia estudada. Estabeleceu-se ainda a formulação analítica e a resolução numérica das equações que definem o problema.

Desenvolveu-se um algoritmo de solução e um programa computacional (STYCA) baseados nos procedimentos estabelecidos. Foram feitos alguns testes verificando-se a precisão de seus resultados, estando apto a ser utilizado como ferramenta de trabalho nas fases de projeto e análise estrutural do núcleo de reatores PWR.

As características dinâmicas dos elementos combustíveis são dados de entrada para o programa desenvolvido. Isto apresenta a vantagem de permitir a utilização direta de modos e frequências naturais obtidos experimentalmente. Parametrizações da variação da resposta obtida em função das incertezas nas reais características dinâmicas dos elementos, caso estas tenham sido obtidas através de um modelo analítico, por exemplo, também são bastante facilitadas.

Como já foi dito, STYCA deverá ser de grande utilidade nas fases de projeto e análise do núcleo de reatores PWR. Na fase de projeto será ferramenta auxiliar na definição, por exemplo, do número e distribuição dos componentes estruturais (tubos guias e

grades espaçadoras) dos elementos combustíveis, tamanho das folgas no interior do núcleo, projeto das grades espaçadoras, etc... De forma indireta será ainda ferramenta auxiliar no projeto dos elementos de controle, das placas defletoras, dos demais internos e da própria sustentação do vaso do reator. Todas estas interfaces no projeto do reator partem da verificação da integridade estrutural dos elementos combustíveis, permitida pelos resultados fornecidos pelo tipo de análise realizada por STYCA, quando submetidos a excitações dinâmicas provenientes de certas condições de operação postuladas, atendendo assim requisitos presentes nas normas dos órgãos licenciadores de centrais nucleares.

Aperfeiçoamento dos modelos propostos, ampliação da capacidade do programa STYCA e estudos experimentais necessários para o completo domínio do problema abordado são sugeridos para trabalhos futuros.

O trabalho apresentado abrange uma área da Engenharia do Núcleo de reatores nucleares pouco desenvolvida no país, e deve contribuir para um entendimento maior de problemas com ela relacionados. Desta forma, conclui-se pela satisfação dos objetivos a que nos propusemos inicialmente.

## SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

. Realização de testes experimentais que possibilitem a verificação dos resultados fornecidos por STYCA.

. Verificação efetiva da compatibilidade entre um modelo integrado simplificado do vaso do reator e seus internos, e o modelo do núcleo, com a realização de casos exemplos.

. Consideração de comportamento elastoplástico das grades espaçadoras, aperfeiçoando-se o elemento de impacto, reavaliando após cada colisão as folgas entre elementos adjacentes, seguindo a linha percorrida por Grubb (12) e por Kim et alli. (17).

. Estudo da interação fluido-estrutura.

. Abordagem do problema tridimensional, ampliando a capacidade de STYCA, possibilitando assim a análise conjunta de todos os elementos combustíveis no núcleo, e não apenas a análise de uma fileira isolada, seguindo a linha percorrida por Hotta (21).

. Estudo dos movimentos relativos entre as varetas combustíveis e as grades espaçadoras, devidos aos deslocamentos das varetas no interior das células das grades, verificando a necessidade de incorporar-se a modelagem deste fenômeno em STYCA, seguindo a linha percorrida por Nuno et alli. (8).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) BOHM, G.J. - Natural Vibration of Reactor Internals.  
In: Nuclear Science and Engineering, 22: 143-152, 1965.
- (2) NAHAVANDI, A.N.; BOHM, G.J. - A Solution of Nonlinear Vibration Problems in Reactor Components.  
In: Nuclear Science and Engineering, 26: 80-89, 1966.
- (3) NAHAVANDI, A.N.; BOHM, G.J. - Impact Between Continuous Structures. Pressure Vessels and Piping: Design and Analysis, Volume II: Structural Components/Structural Dynamics, ASME: 1211-1234, 1972.
- (4) BOHM, G.J.; NAHAVANDI, A.N. - Dynamic Analysis of Reactor Internal Structures with Impact Between Components.  
In: Nuclear Science and Engineering, 47: 391-408, 1972.
- (5) TAKADA, Y.; EGUSA, T. - Vibration of the Fuel Assembly of a Marine Reactor.  
In: Nuclear Engineering and Design, 7: 578-584, 1968.
- (6) GESINSKI, L.; CHIANG, D. - Safety Analysis of 17 x 17 Fuel Assembly for Combined Seismic and Loss-of-Coolant Accident. Westinghouse Electric Corporation, Dec. 1973. (WCAP - 8288).

- (7) NUNO, H.; MIZUTA, M.; KITADE, K.; SARUYAMA, I. - A Method of Colliding Vibration Analysis of PWR Fuel Assemblies Under Seismic Condition. Proc. SMIRT - 2, Berlin, DDR, Set. 1973, paper K6/10.
- (8) NUNO, H.; MIZUTA, M.; TSUMURA, N. - Development of Advanced method for Fuel Seismic Analysis. Proc. SMIRT - 4, San Francisco, Cal., USA, Aug. 1977, paper D4/6.
- (9) RAMANI, D.T. - Stress and Deflection Analysis of a Typical PWR Fuel Assembly Due to Seismic and Maximum Hypothetical LOCA Loading Conditions. Proc. SMIRT - 4, San Francisco, Cal., USA, Aug. 1977, paper D4/1.
- (10) STOKES, F.E.; KING, R.A. - PWR Fuel Assembly Dynamic Characteristics. Proc. of International Conference in BNES Vibration in Nuclear Plant, Keswick, U.K., May 1978, Vol. 1: 27-45.
- (11) PREUMONT, A. - A Two-Time Step Algorithm for Seismic Analysis of a PWR Core.  
In: Nuclear Engineering and Design, 65: 49-62, 1981.
- (12) GRUBB, R.L. - Pressurized Water Reactor Lateral Core Response Routine, FAMREC (Fuel Assembly Mechanical Response Code). EG&G Idaho Inc., Set. 1979. (NUREG/CR - 1019).

- (13) PREUMONT, A.; vonSTEENBERGHE, T. - Dynamic Characteristics of PWR Fuel Assemblies. Proc. SMIRT - 6, Paris, France, Aug. 1981, paper D3/8.
- (14) PREUMONT, A.; THOMSON, P.; PARENT, J. - Seismic Analysis of PWR-RCC Fuel Assemblies. In: Nuclear Engineering and Design, 71: 103-119, 1982.
- (15) WEHLING, H.J.; KIM, J.D.; NINK, A.; STERN, G.; STOLBEN, H. - Experimental Investigations of PWR Fuel Assembly Dynamic Parameters. Proc SMIRT - 6, Paris, France, Aug. 1981, paper D3/7.
- (16) KIM, J.D.; BORSODORF, U.; STERN, G. - Comparison of Theoretical and Experimental Examinations on PWR Fuel Assemblies Under External Loads. Proc. SMIRT - 6, Paris, France, Aug. 1981, paper D3/6.
- (17) KIM, J.D.; BORSODORF, U.; FUCHS, H.P.; STABEL, J. - Influence of Energy Dissipation on PWR Fuel Assembly Behavior During Severe Seismic Excitation. Proc. SMIRT - 10, Los Angeles, Cal., USA, Aug. 1989, Vol. C: 1-6.
- (18) LEROUX, J.C. - CASAC: A Code Computing the LOCA and Seismic Loading on PWR Fuel Assemblies. Proc. SMIRT - 7, Chicago, Illinois, USA, Aug. 1983, paper C6/1.
- (19) LEROUX, J.C.; MONCHANIN, M.; MORGAT, R. - Structural Analysis of PWR Fuel Assemblies in LOCA and Seismic Conditions. Proc. SMIRT - 7, Chicago, Illinois, USA, Aug. 1983, paper C6/2.

- (20) RIGADEAU, J.; LEROUX, J.C.; SCHLOSSER, J. - PWR Fuel Assembly Grid External Stiffness determination from Dynamic Grid Crush Tests. Proc. SMIRT - 10, Los Angeles, Cal., USA, Aug. 1989, Vol. C: 7-13.
- (21) HOTTA, A. - Development of a Computer Code for Horizontal Two-Dimensional Seismic Analysis of PWR Core. Proc. SMIRT - 7, Chicago, Illinois, USA, Aug. 1983, paper F7/7.
- (22) QUEVAL, J.C.; BROCHARD, D. - Analysis of Impact Phenomena Between PWR Fuel Assemblies in Earthquake Situations. CEA - CONF - 9699, 1988.
- (23) QUEVAL, J.C.; MONCHANIN, M. - Analysis of Impact Phenomena Between PWR Fuel Assemblies in Earthquake Situations. Proc. SMIRT - 9, Lausanne, Switzerland, Aug. 1987.
- (24) CLOUGH, R.W.; PENZIEN, J. - Dynamics of Structures. McGraw-Hill Book Co., Singapore, 1986.
- (25) DeSALVO, G.J. - ANSYS - Engineering Analysis System - Verification Manual. Swanson Analysis Systems, Inc., Houston, 1985.
- (26) THOMSON, W.T. - Vibration Theory and Applications. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 2nd Printing, 1965.

- (27) HARRIS, C.M. - Shock and Vibration Handbook. McGraw-Hill Book Co. New York, NY, 3rd edition, 1988.
- (28) PIMENTA, P.M.; PERROTTA, J.A. - Análise Matricial de Estruturas Compostas de Tubos Interligados por Espaçadores Rígidos. 5º Congresso Latino-Americano de Métodos Computacionais para Engenharia, Salvador, Nov., 1984.
- (29) HAYASHI, I.M.V.; PERROTTA, J.A. - Um Programa Computacional para Análise Estrutural de Elementos Combustíveis. Anais do 2º Congresso Geral de Energia Nuclear, Rio de Janeiro, Abril, 1988.

APÊNDICE - O PROGRAMA STYCA

A.1 - Descrição de Styca.

O programa computacional STYCA foi desenvolvido para realizar a análise estrutural dinâmica de um conjunto de elementos combustíveis no núcleo de um reator nuclear refrigerado a água leve pressurizada.

O programa utiliza o método de superposição modal para a obtenção do histórico no tempo da resposta lateral de cada elemento combustível. Para a integração das equações diferenciais desacopladas do movimento utiliza-se a integral de Duhamel, calculada numericamente através da regra de Simpson.

O programa está codificado em FORTRAN 77 na versão FORTRAN 5 da Control Data Corporation.

Na sua versão atual STYCA se constitui do programa principal e mais cinco sub-rotinas:

STYCA	DUHAMEL	
	PENETRA	
	IMPACTO	
	DADOS	FORMULA

Na implementação do programa teve-se preocupação com o seu desempenho computacional, obtendo-se na sua versão final, implantada num computador CDC 180/830, uma boa eficiência.

Modificações no programa podem ser feitas facilmente. Por

exemplo, maior sofisticação do elemento de impacto pode ser obtida com mudanças apenas na subrotina IMPACTO.

A aceleração de base, dado de entrada para o programa, que corresponde ao movimento das placas intermediária e inferior do núcleo, gerada artificialmente, pode ser fornecida de duas maneiras (correspondendo à variável IBAND fornecida como dado de entrada):

i) pode ser colocada na subrotina FORMULA uma expressão analítica para a aceleração de base (IBAND = 1);

ii) a aceleração de base pode ser lida em um arquivo externo, de acordo com um formato a ser especificado na sub-rotina DADOS (IBAND  $\neq$  1).

Para cada caso rodado com o programa STYCA é gerado um arquivo de saída contendo os dados de entrada fornecidos, os resultados obtidos e um resumo dos recursos computacionais utilizados. Este arquivo é controlado pela variável PAPEL fornecida como dado de entrada. Se PAPEL for diferente de 'SIMCOMPLETA', os resultados obtidos são omitidos. Neste caso os resultados podem ser visualizados a partir de outro arquivo gerado por STYCA. Este arquivo contém os resultados obtidos na análise prontos para serem acessados por rotinas de pós-processamento. Neste pós-processamento obtêm-se gráficos em função do tempo da aceleração de base fornecida, dos deslocamentos dos nós de cada elemento e das forças de impacto em cada nó.

Não é necessário armazenar-se os resultados em todos os instantes em que estes são calculados. Para evitar-se problemas

numéricos, a discretização do problema no tempo é muito maior do que aquela necessária para a plotagem dos resultados. Portanto a saída de resultados é controlada pela variável INC fornecida como dado de entrada. São armazenados os resultados do terceiro instante e dos instantes imediatamente seguintes aos múltiplos inteiros de INC. Querendo-se a saída completa INC deve ser igual a 2. Querendo-se saída resumida INC deve ser par maior do que 2.

A.2 - Registros de entrada para STYCA.

CARTÃO	FORMATO	COLUNA	VARIÁVEL	ENTRADA
1	A80	1 - 80	TITULO	
2	5(I2,1X)	1 - 2 4 - 5 7 - 8 10 - 11	NEC NNO NFR MAXITER	Núm. de elems. combust. Núm. de nós em cada EC. Núm. de modos considerados. Núm. máx. de iterações/EC/DT.
3	F10.4,5X,F10.4	1 - 10 16 - 25	TEF DT	Instante de tempo final. Intervalo de tempo de integração
4	F10.4,5X,F10.4	1 - 10 16 - 25	PMININO ERR	Força mínima de comparação para verificação da convergência. Erro relativo máximo para convergência.
5	F10.4,5X,F10.4	1 - 10 16 - 25	GAP1 GAP2	Folga entre EC e defletor. Folga entre ECs adjacentes.
6	F10.4,5X,F10.4	1 - 10 16 - 25	RIG1 RIG2	Coef. de rigidez no impacto EC/defletor. Coef. de rigidez no impacto entre ECs adjacentes.
7	F10.4,5X,F10.4	1 - 10 16 - 25	C1 C2	Coef. de amortecimento no impacto EC/defletor. Coef. de amortecimento no impacto entre ECs adjacentes.
8	6(F10.4,4X)		AMAS(K) (K=1,NNO)	Diagonal principal da matriz de massa.
9	6(F10.4,4X)		FREQ(L) (L=1,NFR)	Diagonal principal da matriz espectral.
10	6(F10.4,4X)		AMOR(L) (L=1,NFR)	Diagonal principal da matriz de amortecimento.
11	6(F10.4,4X)		MODO(K,L) (K=1,NNO) (L=1,NFR)	Matriz modal.

12	I1	1	IBAND	<p>IBAND = 1: Deve-se colocar expressão analítica para cálculo da aceleração de base na subrotina FORMULA.</p> <p>IBAND ≠ 1: Aceleração de base deve ser lida em arquivo externo de acordo com formato a ser especificado na subrotina DADOS.</p>
13	A10	1 - 10	EXEC	<p>Modo de execução:</p> <p>EXEC = SIMEXECUTA: Lê, imprime dados e executa.</p> <p>EXEC ≠ SIMEXECUTA: Apenas lê e imprime dados de entrada.</p>
14	I2	1 - 2	INC	<p>Apenas são armazenados resultados dos instantes múltiplos inteiros de INC. ( INC deve ser par ).</p>
15	A11	1 - 11	PAPEL	<p>PAPEL = SIMCOMPLETA Impressão de resultados.</p> <p>PAPEL ≠ SIMCOMPLETA Impressão apenas dos dados de entrada.</p>