



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO DO COMPORTAMENTO VIBRATÓRIO
DE UM PAINEL ESTRUTURAL LEVE

JOCICLEY JAMAGUIVA Nº USP 2369176
MARIA REGINA GOMES ZOBY Nº USP 2370219

São Paulo
Outubro de 2001

Jocicley Jamaguiva
Maria Regina Gomes Zoby

ESTUDO VIBRATÓRIO DE UMA PAINEL ESTRUTURAL LEVE

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia

São Paulo
2001

SUMÁRIO

<u>1</u>	<u>INTRODUÇÃO</u>	2
<u>2</u>	<u>RESUMO</u>	3
<u>3</u>	<u>OBJETIVOS</u>	4
<u>4</u>	<u>METODOLOGIA</u>	5
<u>5</u>	<u>EQUIPAMENTOS</u>	6
<u>6</u>	<u>MODELOS NUMÉRICOS</u>	7
6.1	<i>Período de formação</i>	7
6.2	<i>Construção de modelos</i>	8
6.3	<i>Problemas de memória</i>	10
<u>7</u>	<u>ENSAIO EXPERIMENTAL</u>	11
7.1	<i>Resultados obtidos e Análise</i>	12
<u>8</u>	<u>CONCLUSÃO</u>	18
<u>9</u>	<u>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</u>	19

ANEXO A

ANEXO B

ANEXO C

1 INTRODUÇÃO

A partir de 1998 a CAPES – Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior passou a organizar o Programa Graduação Sanduíche, possibilitando que alunos de graduação em engenharia estudem em média um ano em escolas de engenharia na França, na Alemanha ou Estados Unidos.

Dentro do quadro deste programa, os autores deste trabalho foram alunos da École Supérieure de Mécanique de Marseille - ESM2 (França) durante o ano de 2000 e realizaram este trabalho como projeto de fim de estudos sob orientação do Prof. Stéphane Bourgeois e sob coordenação do Prof. Alberto Hernandez Neto.

2 RESUMO

Este trabalho teve como objetivo o estudo do comportamento vibratório de um painel estrutural leve (PEL) através da comparação entre um modelo em elementos finitos e os resultados experimentais de um painel real.

Após um período de aprendizado de utilização do software ABAQUS, de pesquisa bibliográfica e de estudo da teoria envolvida, um modelo em elementos finitos, utilizando-se o software ABAQUS foi construído. Devido a problemas de memória e de falta de tempo hábil, os cálculos relativos ao comportamento vibratório deste modelo não puderam ser finalizados com sucesso, comprometendo assim o pós tratamento do mesmo e consequentemente, impossibilitando uma comparação mais detalhada entre o modelo numérico e os resultados experimentais.

O modelo numérico do PEL foi modelado como um painel livre-livre, pois nenhum esforço ou condição de contorno eram aplicados ao modelo real. O PEL era sustentado por fios de aço em quatro pontos, não sendo portanto considerada nenhuma restrição nas bordas, razão pela qual o modelo é considerado como livre-livre.

Para tomada dos dados experimentais, primeiramente foram colocados dois acelerômetros na estrutura. Estes acelerômetros eram conectados a uma placa de aquisição e ao software de coleta e tratamento de dados CADA-X. Foram aplicados então impulsos sobre o PEL através da utilização de um “martelo eletrônico”, também monitorado pelo software.

3 OBJETIVOS

Este trabalho teve como objetivo o estudo do comportamento vibratório de um painel estrutural leve (PEL) através da comparação entre um modelo em elementos finitos e os resultados experimentais de uma painel real.

4 METODOLOGIA

As etapas seguidas durante a elaboração do projeto são apresentadas a seguir.

1ª etapa	Estudo da teoria de placas delgadas e de seu comportamento vibratório
2ª etapa	Aquisição de conhecimentos para utilização do programa ABAQUS
3ª etapa	Geração dos primeiros modelos ABAQUS
4ª etapa	Aquisição de conhecimentos e instrumentação do painel para o ensaio experimental e familiarização com o programa CADA-X
5ª etapa	Ensaio experimental
6ª etapa	Geração do modelo do PEL
7ª etapa	Comparação dos resultados

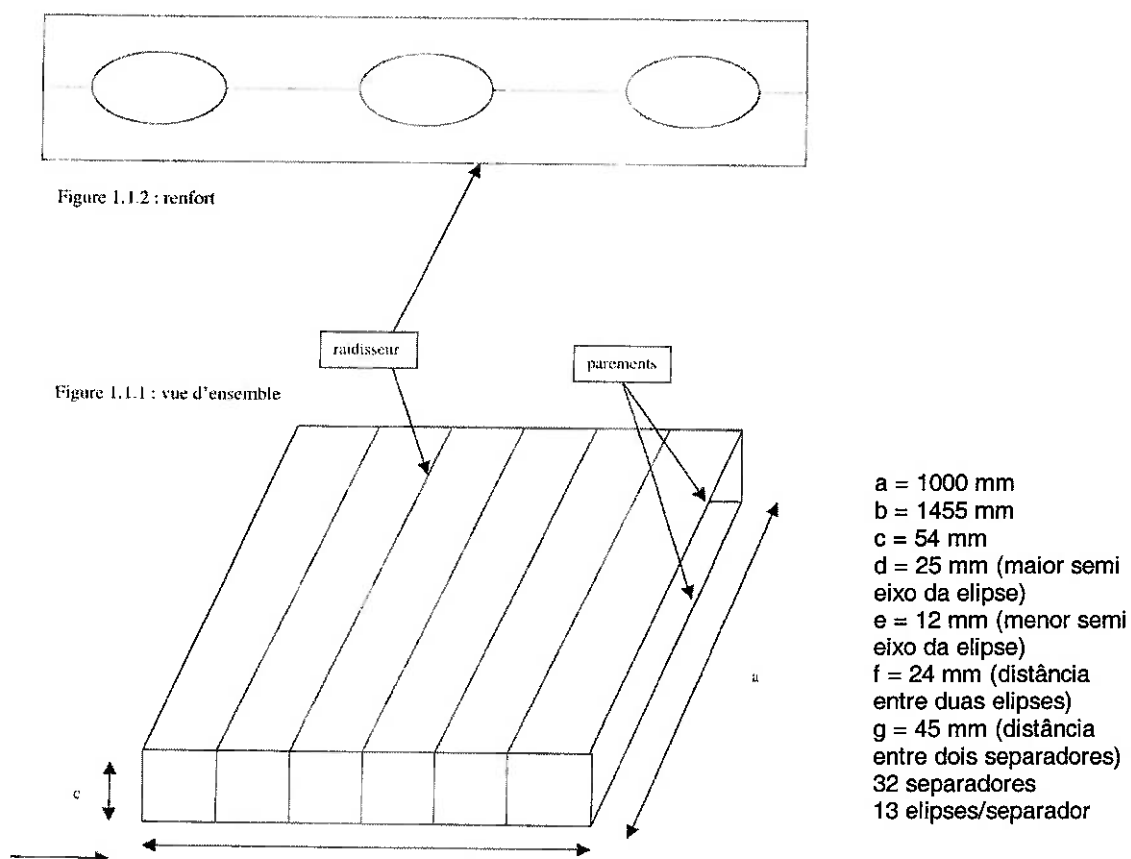
Tabela 1. Etapas da elaboração do projeto

5 EQUIPAMENTOS

Foram utilizados os seguintes equipamentos:

- estações de trabalho IBM
- 2 acelerômetros
- martelo eletrônico
- painel estrutural leve – PEL, conforme a figura 1

Figura 1. Painel Estrutural Leve



6 MODELOS NUMÉRICOS

6.1 *Período de formação*

A formação com o programa ABAQUS CAE apresentou algumas dificuldades devido à falta de memória nas estações de trabalho disponíveis. A familiarização com o software foi realizada através de treinamento com cada um dos módulos que compunham o programa. Cada parte da concepção do modelo foi realizada por um módulo.

Módulo Part

Este módulo é responsável pela construção geométrica do modelo.

Módulo Property

Neste módulo, as características dos materiais são fornecidas e também as espessuras das seções.

Módulo Assembly

Define os conjuntos que integram o modelo, mesmo que haja apenas uma parte que o componha. Todos os carregamentos, as malhas e os cálculos são feitos para um conjunto e não para uma parte.

Módulo Step

Define o tipo de análise que será efetuada sobre a estrutura. Para este projeto, se deseja conhecer o comportamento vibratório e portanto, é escolhida a opção *step linear* que possibilita a imposição de uma perturbação vibratória sobre o modelo.

Módulo Interaction

Define o contato entre duas partes do modelo, mas neste projeto não foi utilizado.

Módulo Load/Bc/IC

Este módulo define os carregamentos, as condições de contorno e as condições internas. O projeto refere-se a um painel livre- livre, ou seja, que não há condições limites nem carregamento.

Módulo Mesh

Módulo utilizado para gerar a malha do modelo. Aqui é necessário definir todos os parâmetros da malha.

Módulo Job

Este módulo é responsável pelo cálculo do comportamento vibratório. Devido aos problemas de memória, não se pôde terminar os cálculos dos modelos do PEL livre-livre. Construiu-se então um modelo de uma placa simplesmente apoiada, ou seja, foram restringidos os graus de liberdade de rotação das bordas. Esta geometria foi escolhida por ser mais simples, necessitar menos nós e consequentemente menos memória para cálculo, e além disso, por apresentar solução analítica.

Módulo Visualization

Este módulo permite a visualização dos resultados e foi utilizado para a placa simplesmente apoiada.

6.2 Construção de modelos

O primeiro modelo não representa o PEL mas uma placa plana de mesmas dimensões (1000 mm de largura e 1455 mm de comprimento) simplesmente apoiada sobre os seus bordos. Este modelo foi feito para comparar o resultado com a solução analítica conhecida, com o objectivo de familiarização com o software.

A placa é modelada como uma placa fina (Shell) e a malha possui elementos quadrados (dimensões médias de 60 mm). O tipo de elementos escolhido é o S4R (4 nós, integração reduzida, deformação de membrana finita).

A solução analítica para o cálculo das frequências naturais, usando as propriedades do PEL, é dada por [3]:

$$f_{m,n} = 4932883.96 \cdot \left(\left(\frac{n}{1455} \right)^2 + \left(\frac{m}{1000} \right)^2 \right)$$

onde m e n são números inteiros.

Foram utilizados os seguintes parâmetros na construção do modelo da placa delgada simplesmente apoiada:

Modelos	shell
Largura	1455 mm
Comprimento	1000 mm
E (Young)	209 MPa
Densidade	7800 kg/m³
Espessura da placa fina	2 mm
Tipo de Step	linear perturbation
Número de modos próprios solicitados	14¹*
Elemento	S4R²

Foram obtidos os seguintes resultados:

Frequência Natural (Hz) Modelo ABAQUS	Frequência Natural (Hz) Solução Analítica	Diferença (%)
7,28	7,26	0,5
14,33	14,25	0,9
22,42	22,06	2,9
26,27	25,90	2,5
29,40	29,05	2,1
41,24	40,70	2,3
43,43	42,21	5,0
48,66	46,73	7,0
55,52	53,72	5,8

¹ os seis primeiros modos correspondem aos modos de corpo rígido, e não devem ser considerados

² 4 nós, integração reduzida, deformação de membrana finita

58,24	57,01	3,8
-------	-------	-----

Tabela 3.Frequências naturais de uma placa simplesmente apoiada nas bordas

6.3 Problemas de memória

Quando malhas “grosseiras” eram aplicadas, o programa não conseguia efetuar os cálculos corretamente, fornecendo frequências negativas. Quando da malha refinada, não havia memória suficiente para os cálculos.

Os problemas de memória foram resolvidos apenas duas semanas antes do término do projeto. Passou-se a utilizar outro servidor com mais memória disponível. Foi necessário ainda aprender a utilizar o programa ABAQUS POST para visualização dos resultados.

7 ENSAIO EXPERIMENTAL

Nesta parte do projeto foram obtidas as frequências e os modos próprios do modelo real. Para ter-se a condição de placa livre-livre, o painel é suspenso por uma corda em quatro pontos apenas. Os acelerômetros foram posicionados sobre os nós 5 e 6 da malha (figura 2). Sobre cada nó são aplicadas duas batidas de martelo. Através de um trigger, o programa coleta os dados experimentais para cada batida.

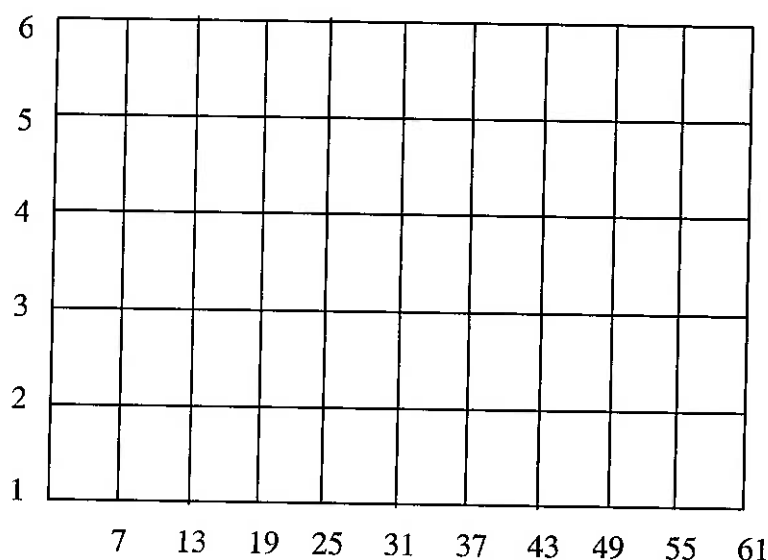


Figura 2. Malha do PSL para o programa Cada-x

Após esse passo, foram determinados os limites de frequência que desejava-se analisar (a frequência máxima deste ensaio é de 500Hz). O programa fornece os gráficos de aceleração/força por frequência para os limites escolhidos (Anexo A). Os picos determinam as frequências naturais. Escolheu-se os pontos indicados pela letra s e foram visualizados os modos próprios nesses pontos (Anexo B).

7.1 Resultados obtidos e Análise

As frequências naturais calculadas para valores entre 14 e 500Hz são apresentados na Tabela 2.

Frequências Próprias de Vibração (Hz)		
26,6	156,6	362,2
28,7	178,6	388,3
39,9	186,4	396,6
59,4	199,9	401,2
77,6	224,4	410,1
100,9	259,7	413,3
124,7	300,7	444,6
126,5	334,2	

Tabela 2. Frequências Próprias de Vibração

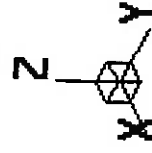
Foram encontrados 23 modos próprios e frequências naturais amortecidas (Anexo B). Para alguns valores (26,6-28,7Hz e 410,1-413,3Hz), pôde-se observar frequências muito próximas mas que representavam modos próprios diferentes (de flexão e de torção). Esse efeito ocorre devido à geometria do PEL e a suas características de rigidez. Os picos coincidem sobre o gráfico (Anexo A) devido a falta de precisão de leitura.

Não foi possível comparar esses resultados com um modelo em elementos finitos equivalente pois este não foi obtido.

lms Window Align Model Component Vector Animation Node

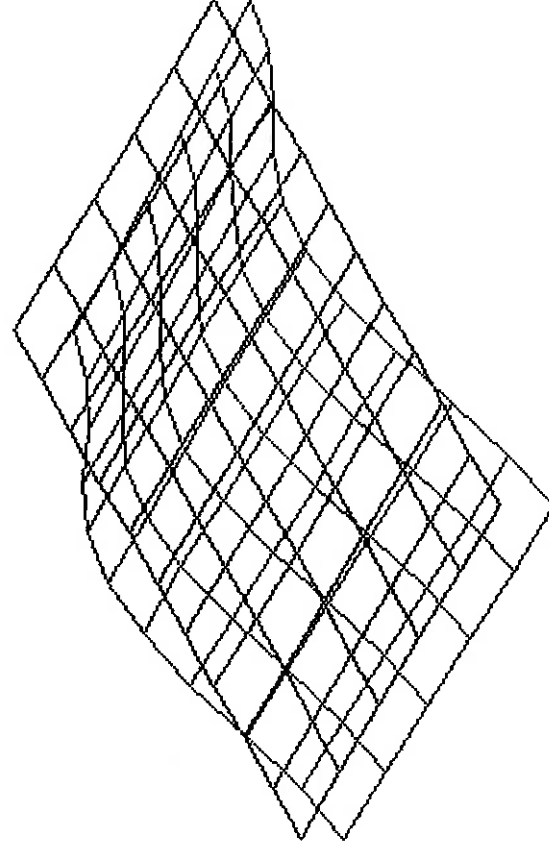
Help

Memory mode 1



Freq : 26.59 Hz

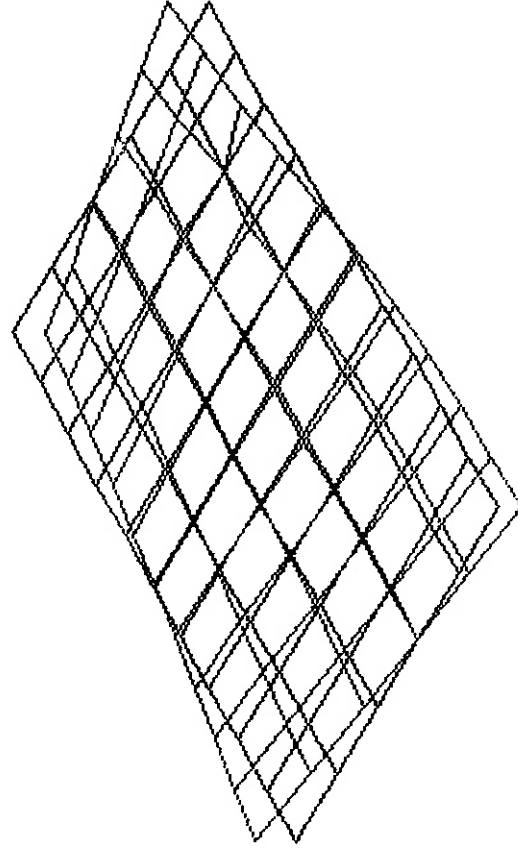
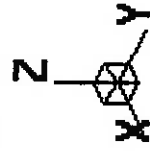
Damp : 0.36 %



0 (m/N)/s 0.01000

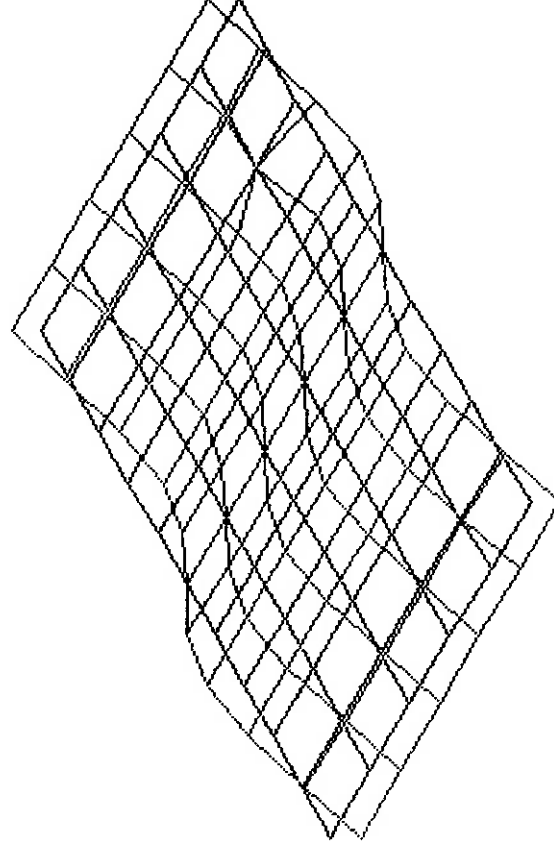
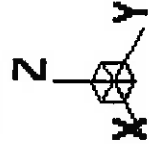
Memory mode 2

Freq : 28.73 Hz
Damp : 2.45 %



0 (m/N)/s 0.0250

Memory mode 3



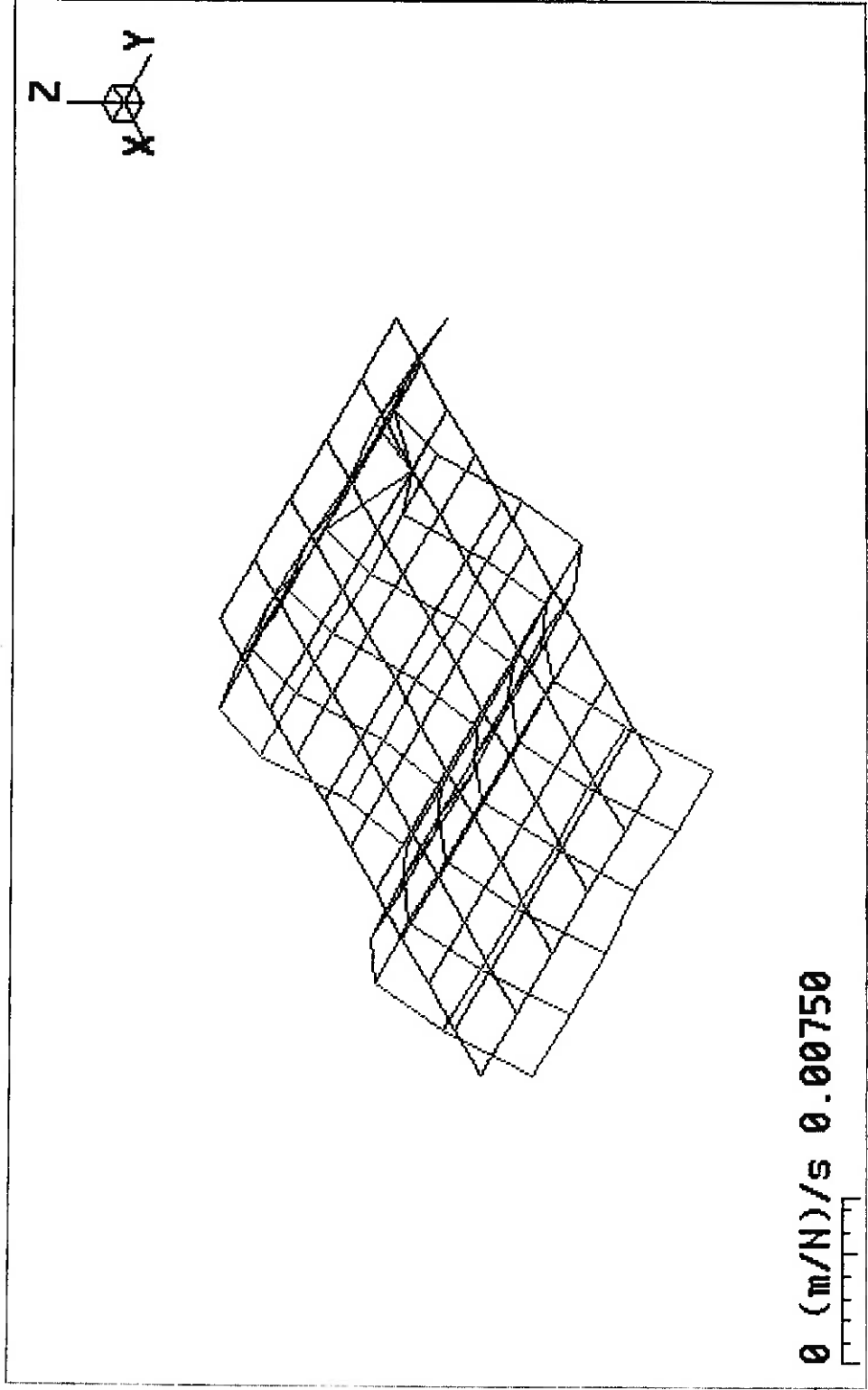
0 (m/N)/s 0.00750

Freq : 39.94 Hz

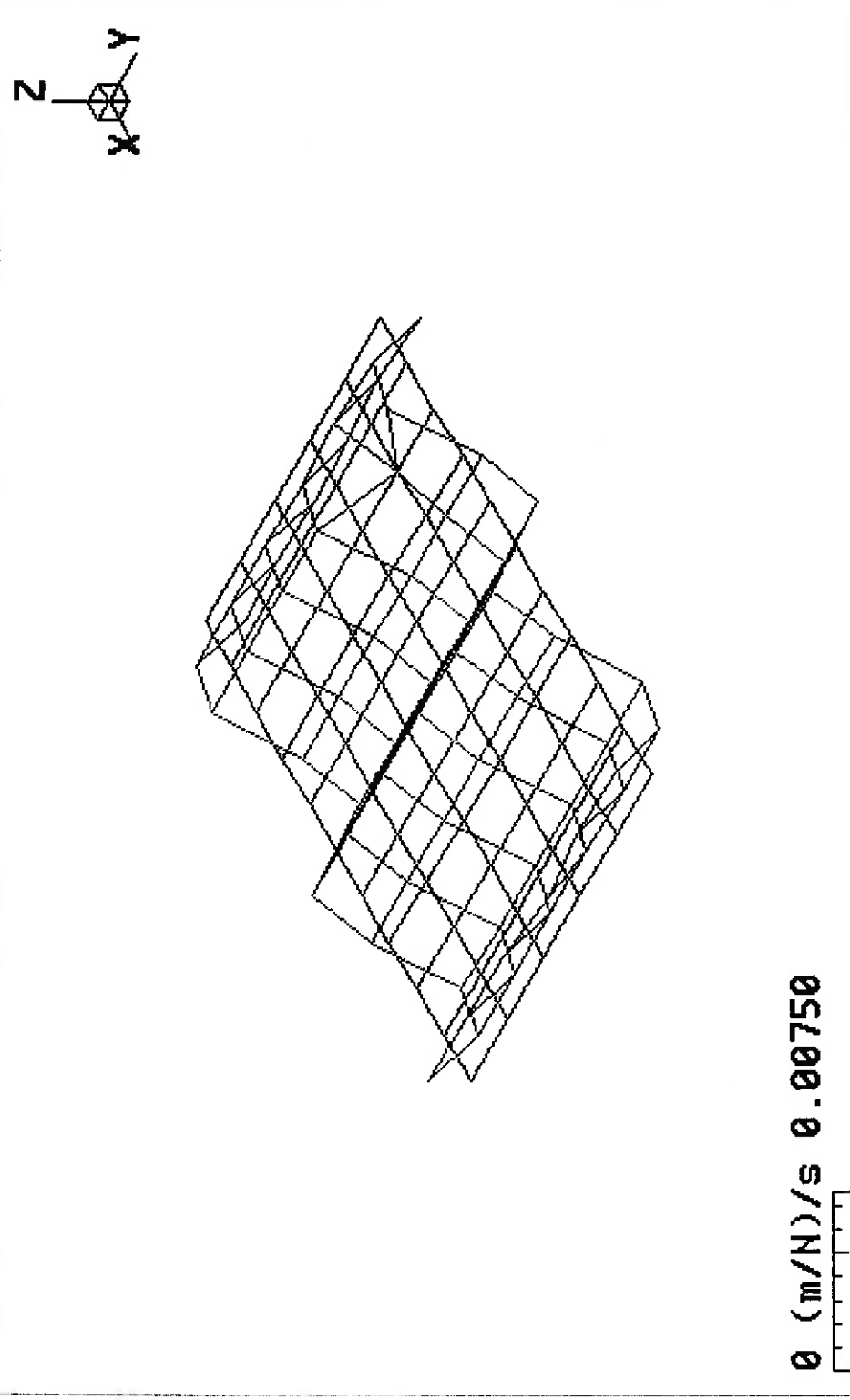
Damp : 0.46 %

Memory mode 4

Freq : 59.43 Hz
Damp : 0.53 %



Memory mode 5



Freq : 77.63 Hz

Damp : 0.50 %

8 CONCLUSÃO

O ensaio experimental permitiu encontrar as frequências e os modos próprios até uma frequência máxima de 500Hz. Para resultados mais precisos, ensaios experimentais utilizando mais de dois acelerômetros devem ser feitos.

O modelo numérico equivalente ao PEL não forneceu resultados conclusivos. O modelo com malha grosseira gerou resultados que não condizem com a realidade (frequências naturais negativas) e o modelo com malha mais refinada não apresentou nenhum resultado por motivos já citados.

Mesmo que o objetivo deste trabalho não tenha sido completamente atingido foi possível entrar em contato com a teoria de elementos finitos, adquirir bons conhecimentos do software ABAQUS, conhecimentos sobre vibrações foram aprimorados e teve-se o primeiro contato com medições mecânicas³. Além disso, este trabalho serve como base para trabalhos futuros.

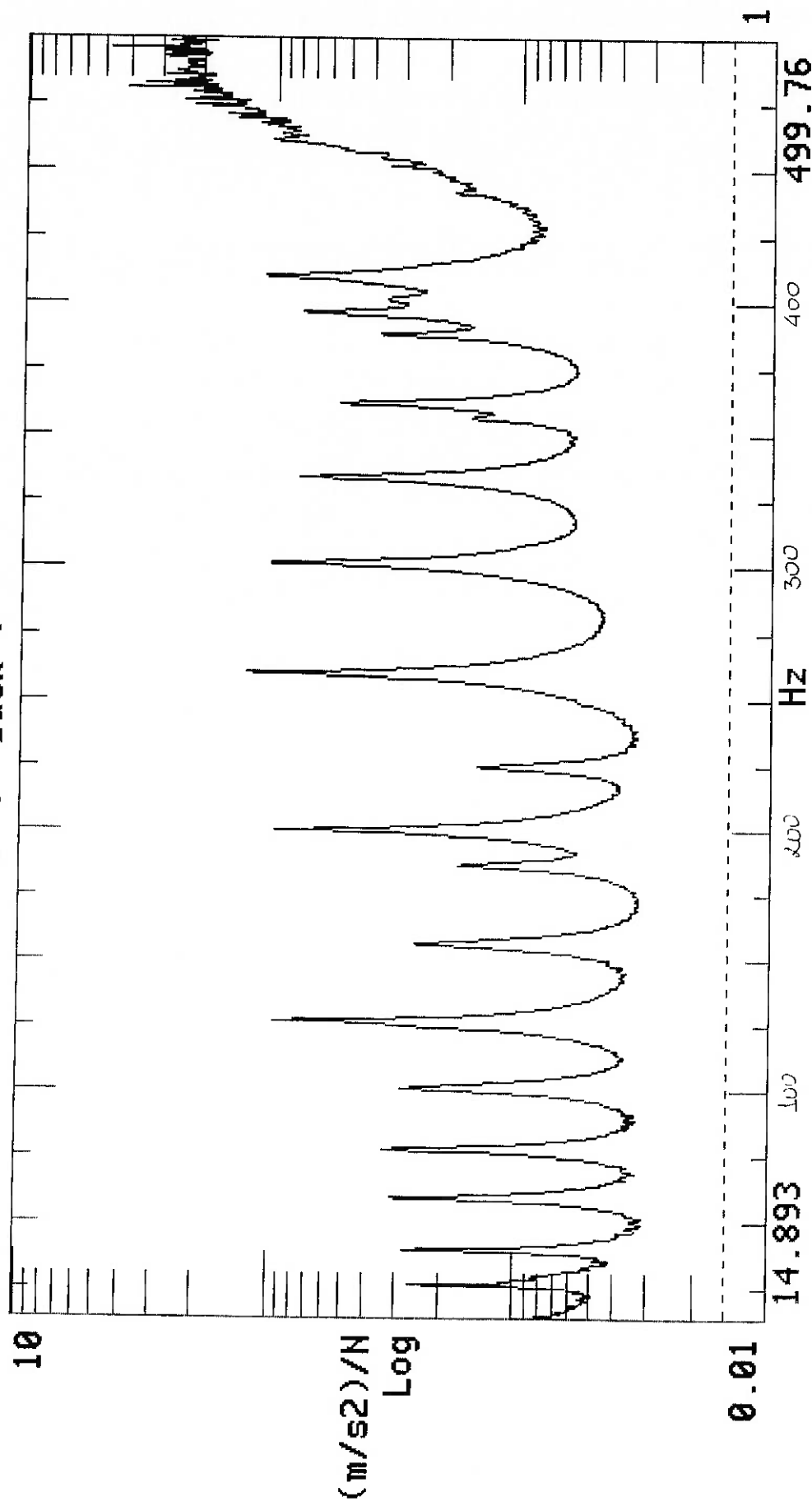
9 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- [1] **Abaqus/Standard** , User's Manual, 1994
- [2] **FERRIERE R., NOEL C.** .*“Homogénéisation d'un PSL- Panneau Structural Léger”*. Projet de fin d'études, 2000
- [3] **GERADIN M., RXEN D.** .*“Théorie des Vibrations – Application à la dynamique des structures”*. MASSON 1993
- [4] **LABORDE S., SEBILLE S.** .*“Homogénéisation des panneaux structuraux légers”*. Projet de fin d'études. 1999

ANEXO A

GRÁFICOS ACELERAÇÃO/FORÇA X FREQUÊNCIA
(DADOS DO PROGRAMA CADA-X)

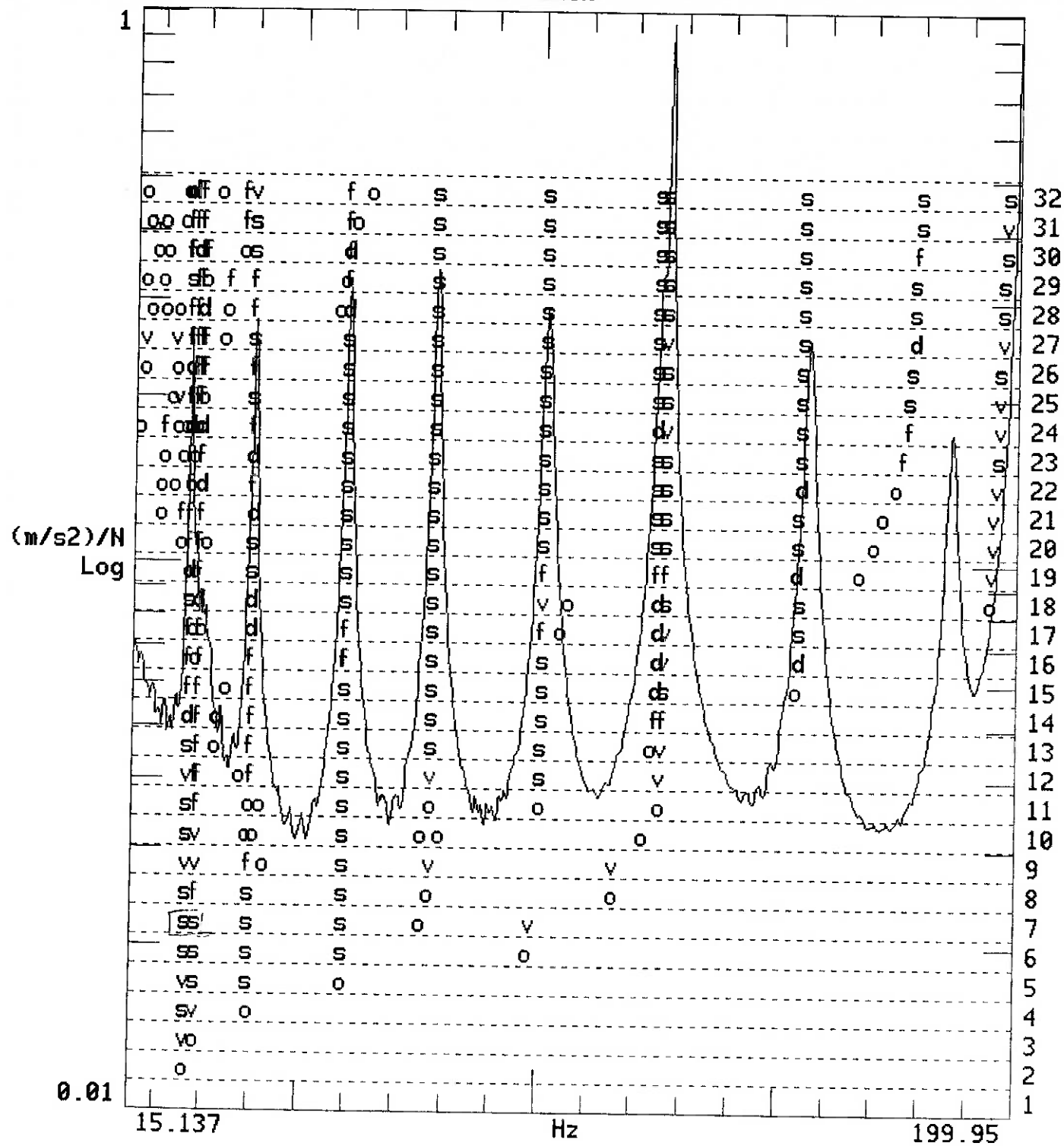
Front : 10 B C D E F Back :



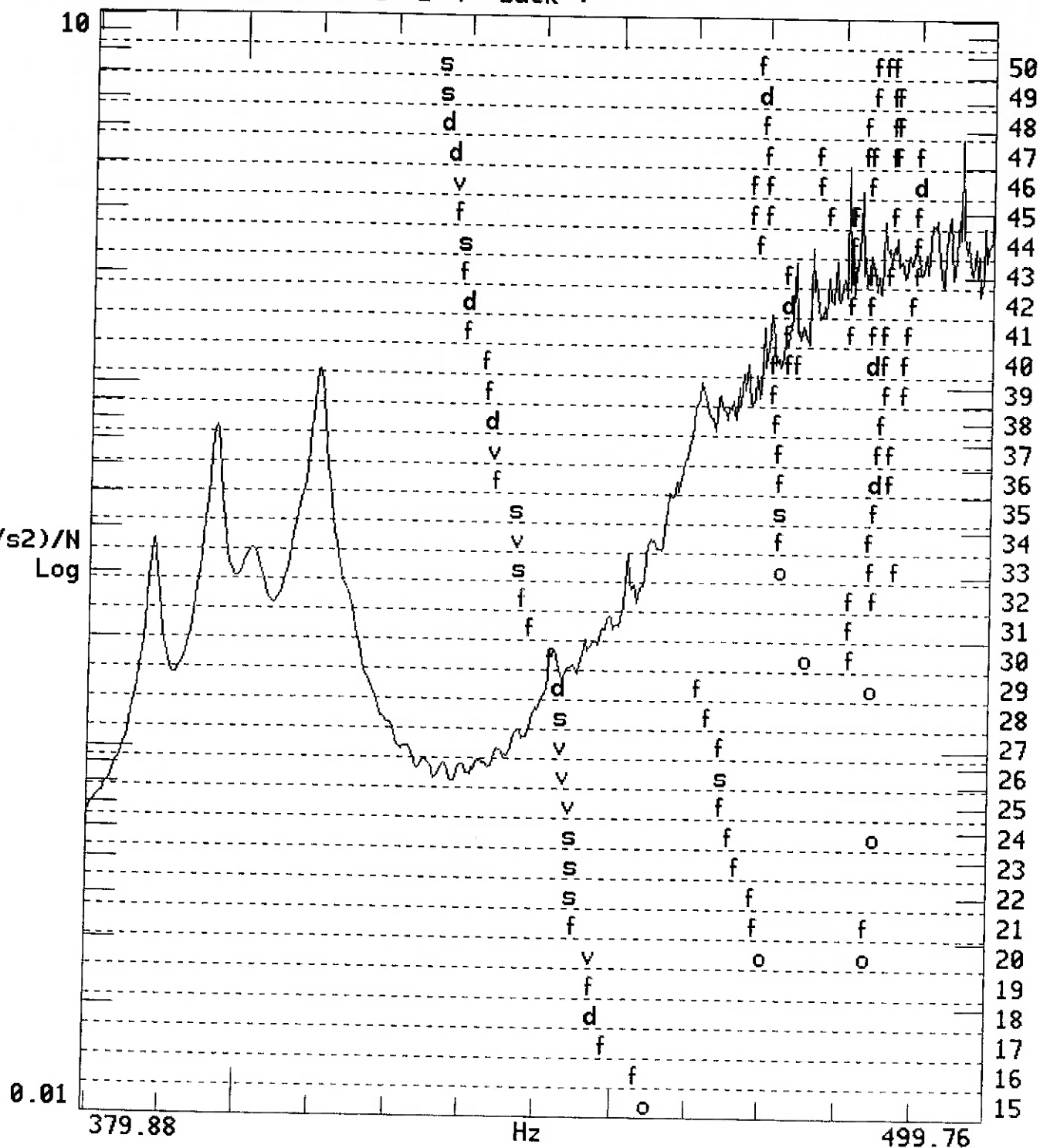
Window Align Format Limits Data Cursor Indicator Stabilization

Help

Front : 10 B C D E F Back :



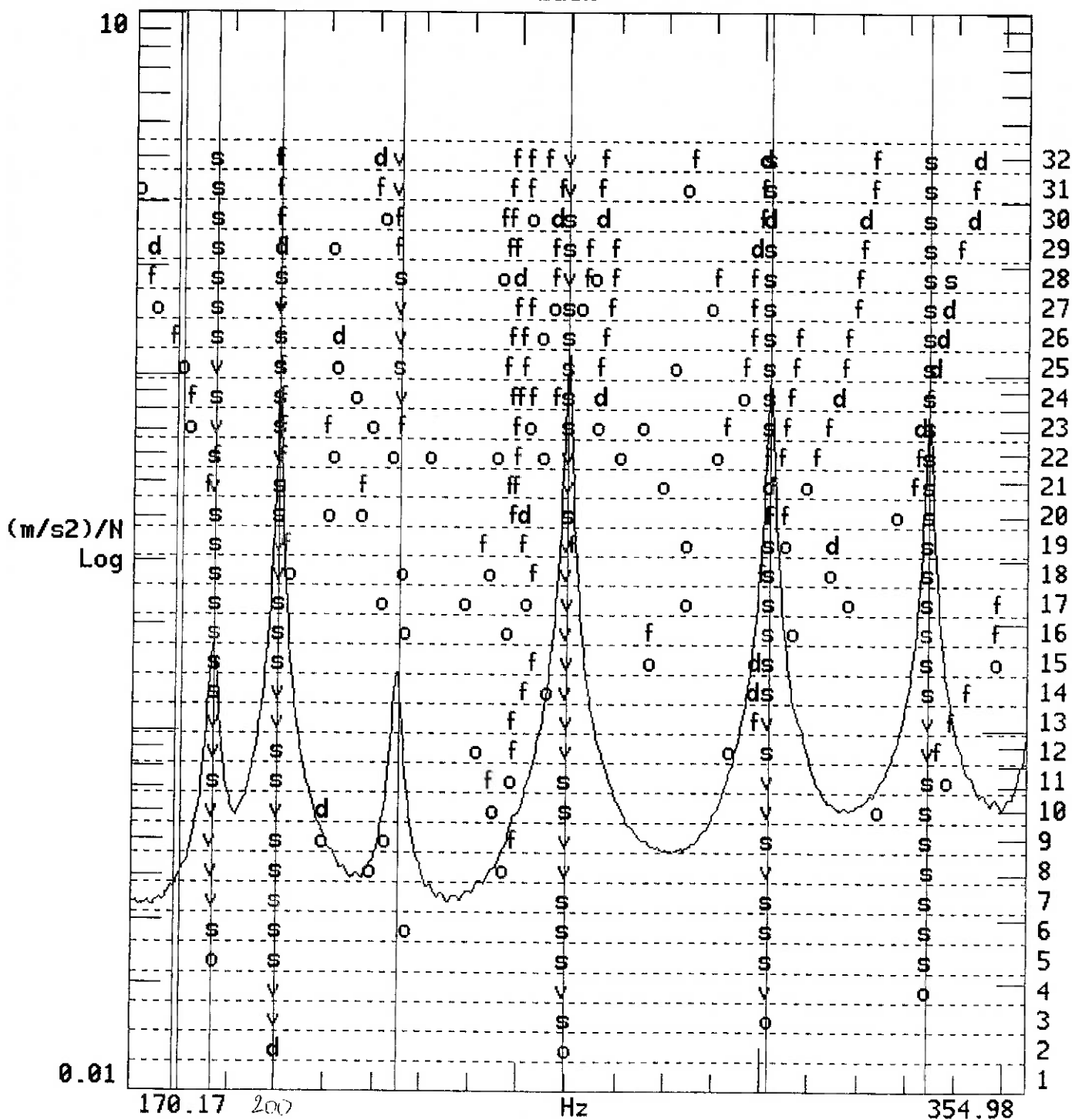
Front : 10 B C D E F Back :



Σ Window Align Format Limits Data Cursor Indicator Stabilization

Help

Front : 10 B C D E F Back :

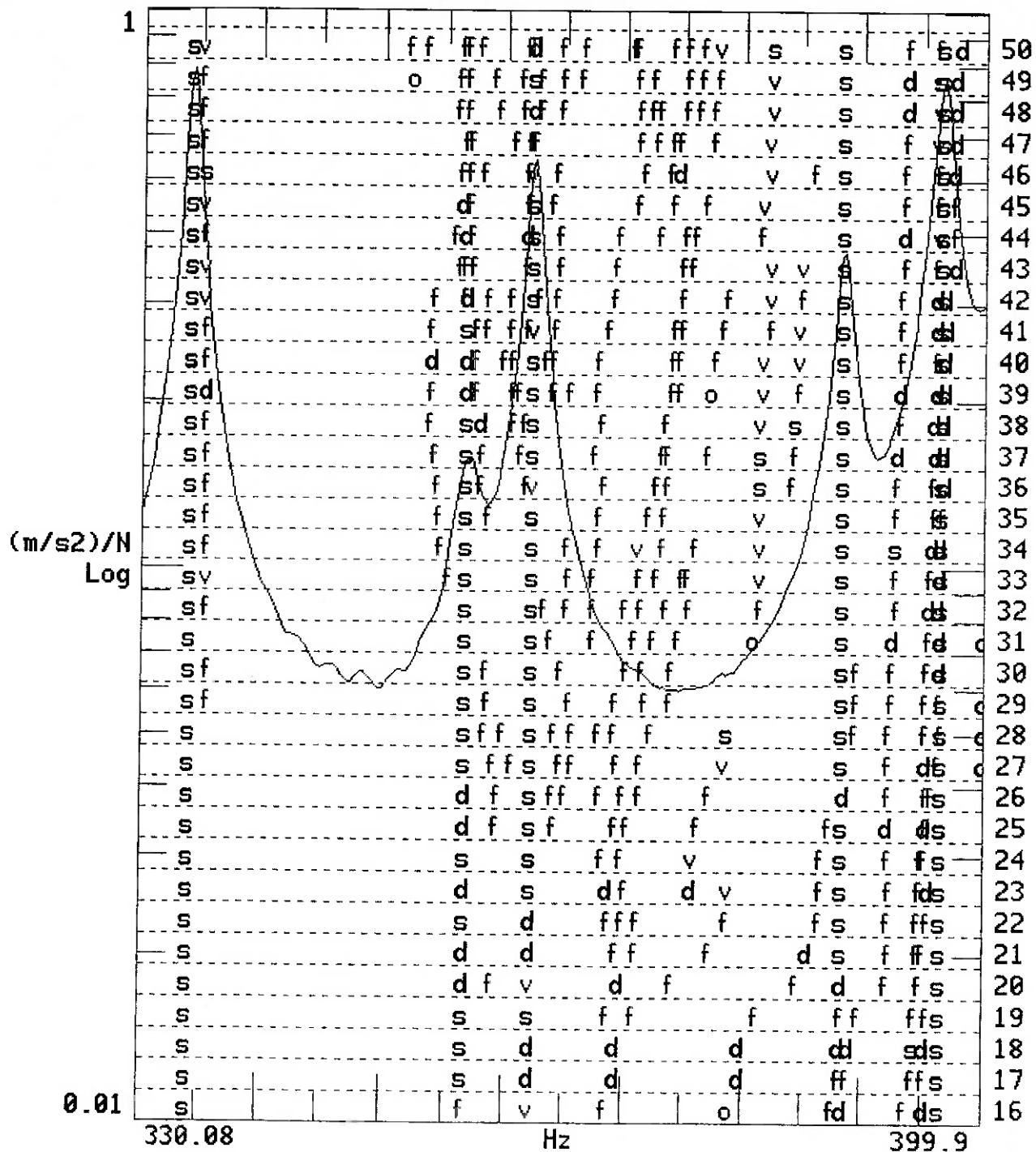


lms Window Align Format Limits Data Cursor Indicator

Stabilization

Help

Front : 10 B C D E F Back :

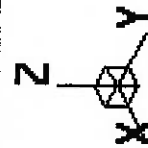


POINT TO FRONT PAGE OR PRESS DE VIERRE PAGE

ANEXO B

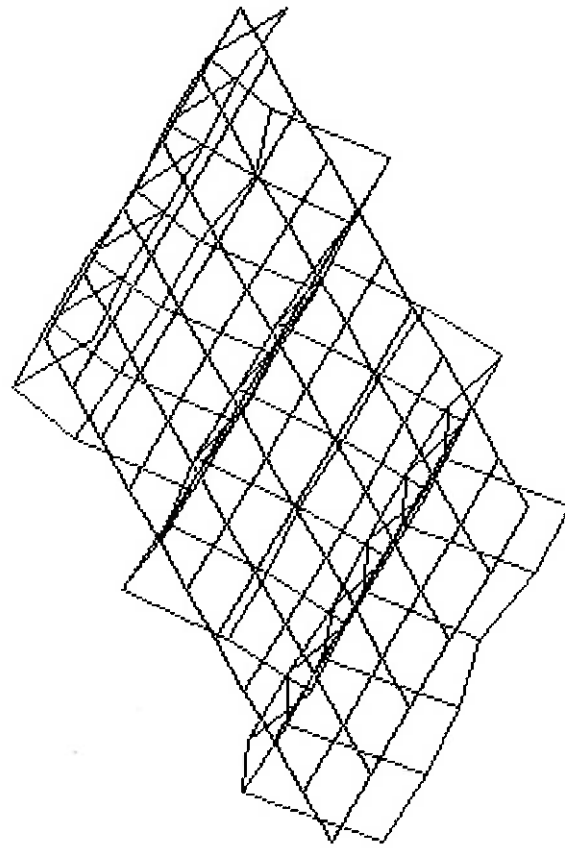
MODOS PRÓPRIOS DE VIBRAÇÃO DO PSL
(DADOS DO PROGRAMA CADA-X)

Memory mode 6

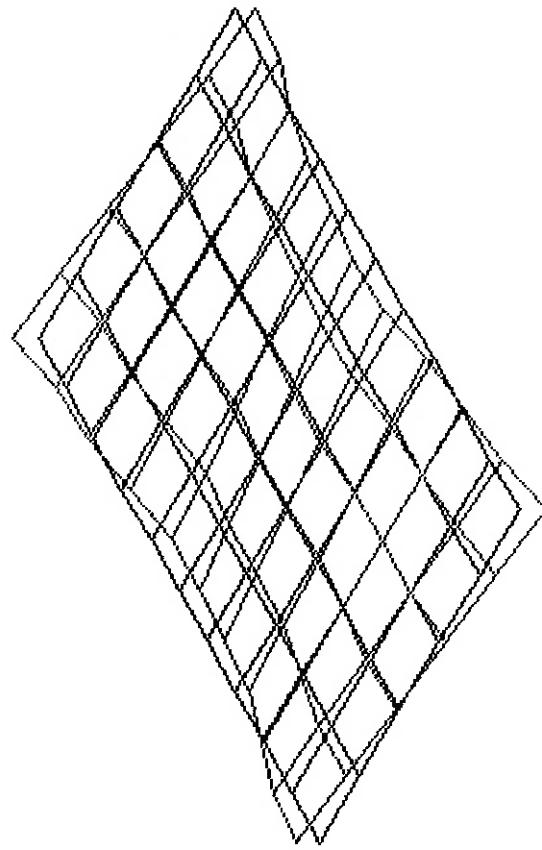
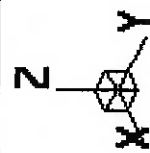


Freq : 100.90 Hz

Damp : 0.54 %

 θ (m/N)/s 0.00750

Memory mode 7



θ (m/N)/s 0.00500

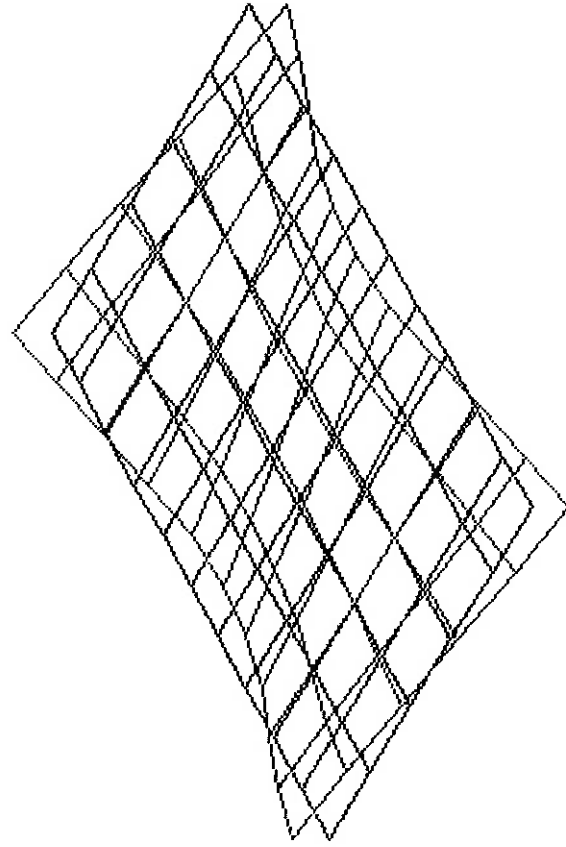
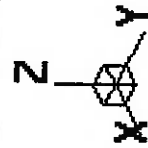
Freq : 124.74 Hz

Damp : 0.49 %

Memory mode 8

Freq : 126.50 Hz

Damp : 0.12 %

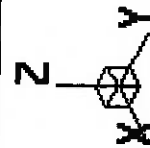
0 (m/N)/s 0.00750

ims

Window Align Model Component Vector Animation Node

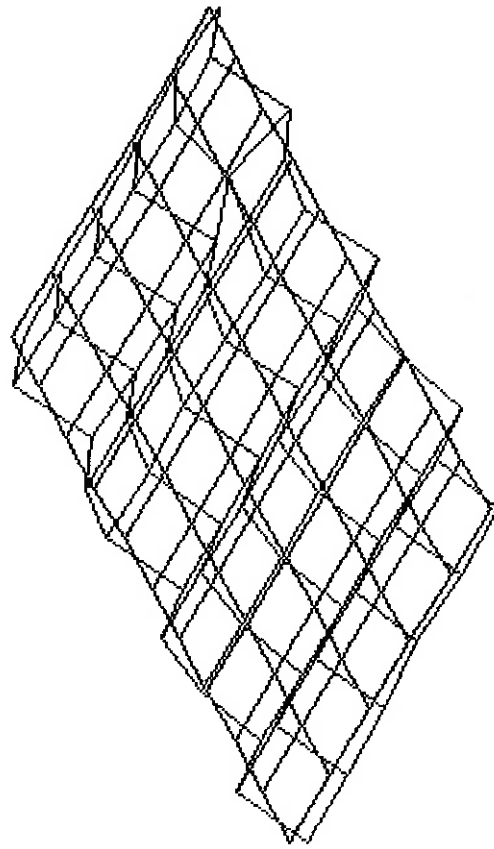
Help

Memory mode 1



Freq : 156.61 Hz

Damp : 0.22 %



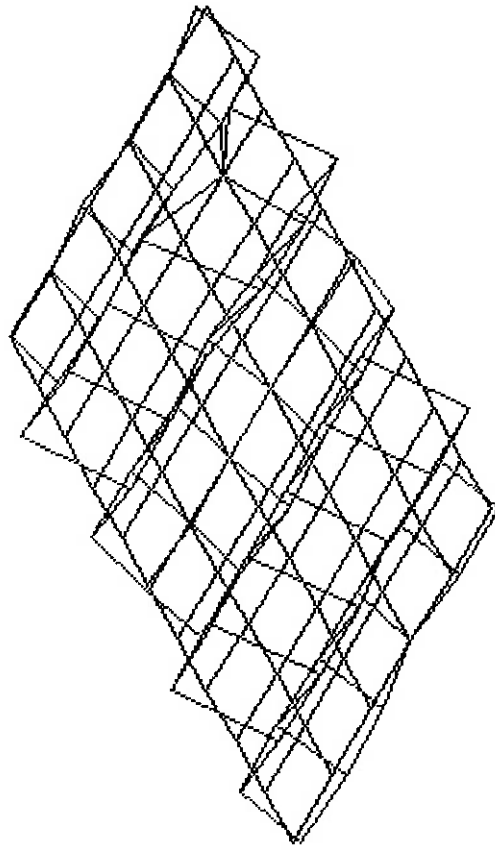
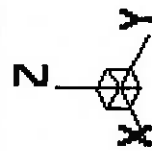
0 (m/N)/s 0.00750

ims

Window Align Model Component Vector Animation Node

Help

Memory mode 10



0 (m/N)/s 0.00750

Freq : 178.60 Hz

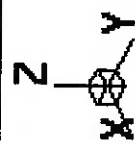
Damp : 0.42 %

ims

Window Align Model Component Vector Animation Node

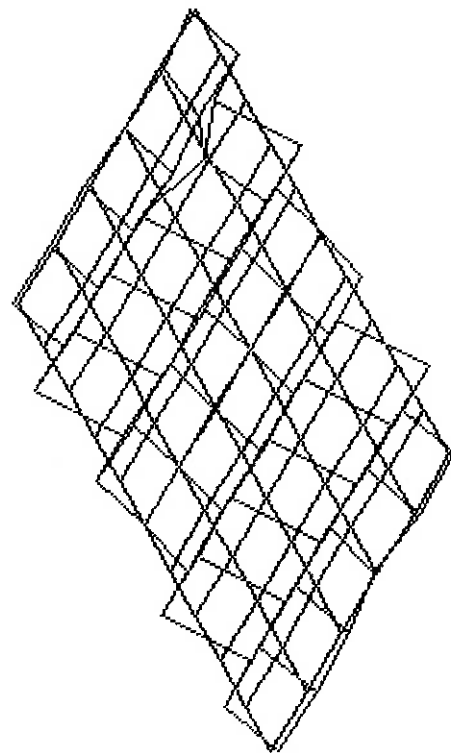
Help

ASM gateway Rank 42, Mode 7



Freq : 186.40 Hz

Damp : 0.42 %



0 / 0.500

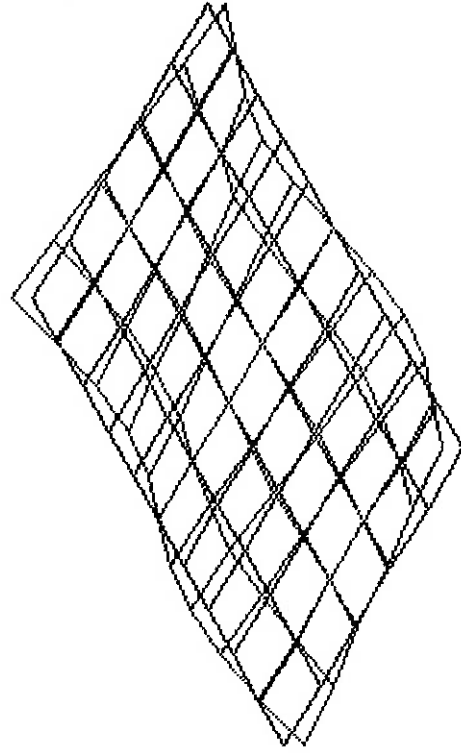
ims

Window Align Model Component Vector Animation Mode

Help

ASM gateway Rank 36, Mode 15

Z
X Y



0 / 0.500

Freq : 199.89 Hz

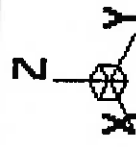
Damp : 0.12 %

ims

Window Align Model Component Vector Animation Node

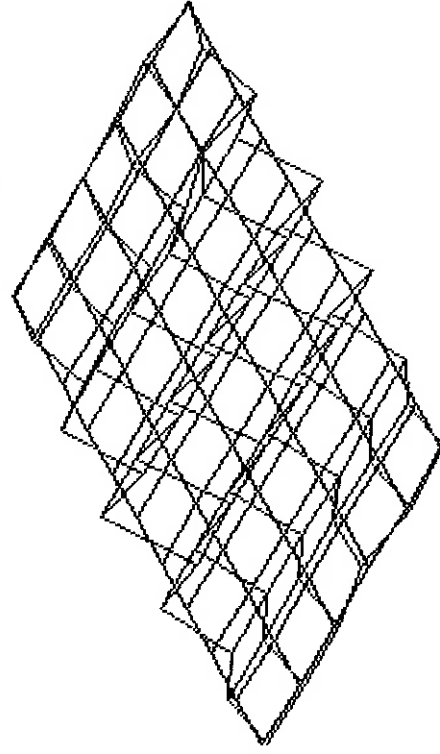
Help

ASM gateway Rank 28, Mode 11



Freq : 224.43 Hz

Damp : 0.36 %



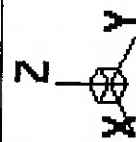
0 / 0.500

ims

Window Align Model Component Vector Animation Node

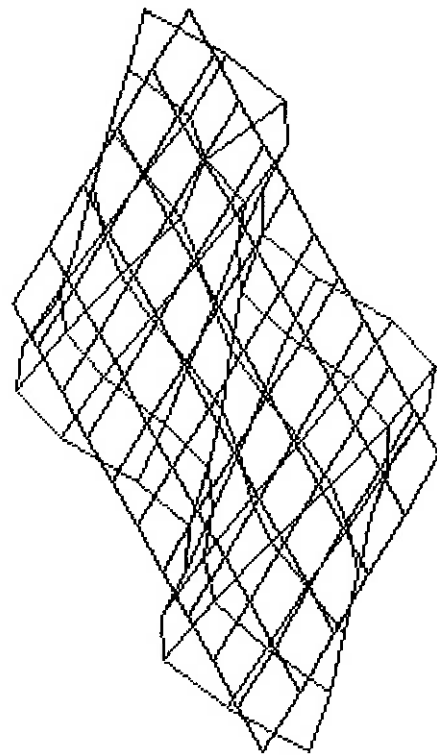
Help

ASM gateway Rank 36, Mode 12



Freq : 259.72 Hz

Damp : 0.10 %

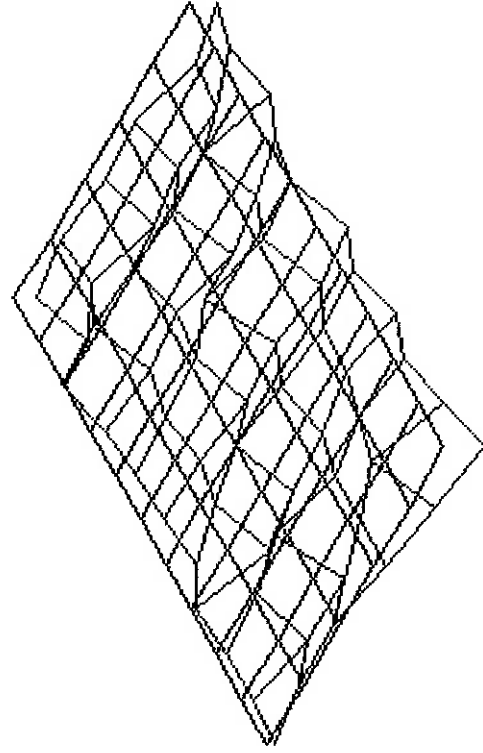


0 / 0.500

ASM gateway Rank 36, Mode 17

Freq : 300.78 Hz

Damp : 0.42 %



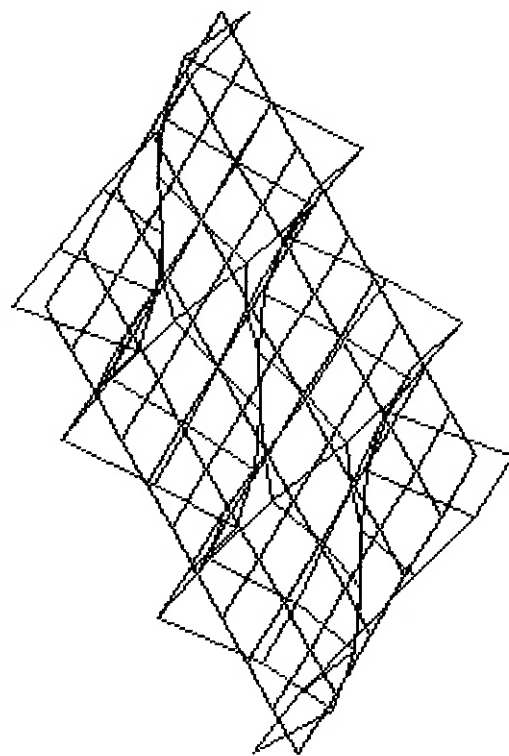
0 / 0.500



ASM gateway Rank 36, Mode 21

Z
x y

Freq : 334.15 Hz
Damp : 0.14 %



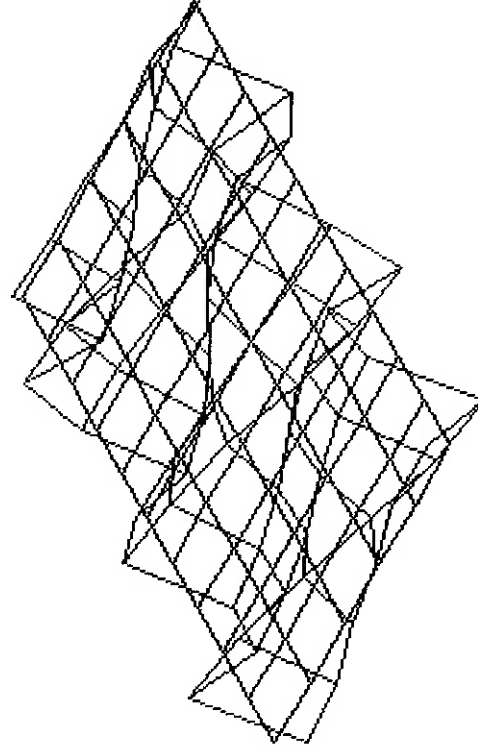
0 / 0.500

ASM gateway Rank 42, Mode 21

Z
X Y

Freq : 362.22 Hz

Damp : 0.14 %



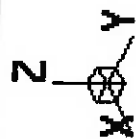
0 / 0.500

lms

Window Align Model Component Vector Animation Node

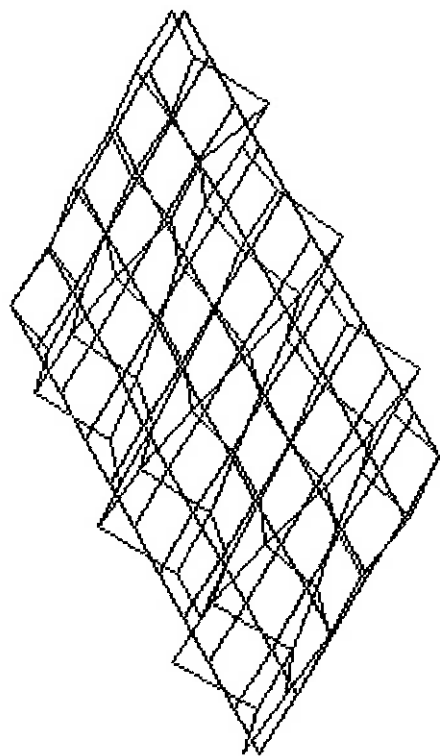
Help

ASM gateway Rank 48, Mode 29

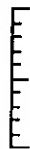


Freq : 388.27 Hz

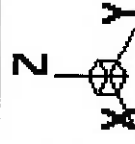
Damp : 0.16 %



0 / 0.500

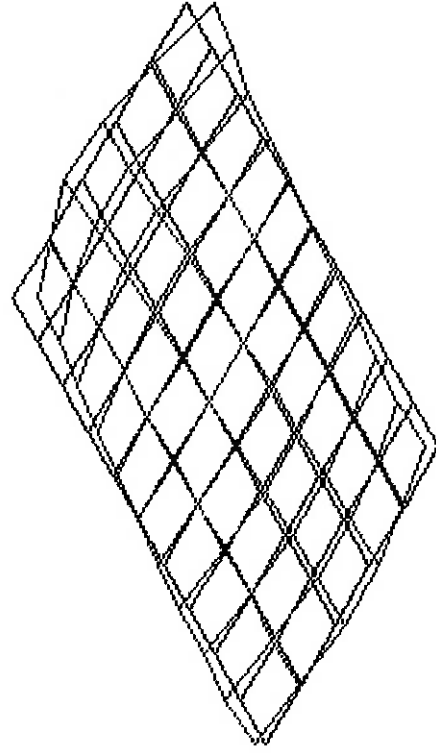


ASM gateway Rank 47, Mode 31



Freq : 396.55 Hz

Damp : 0.13 %



0 / 0.750



ims

Window Align Model Component Vector Animation Node

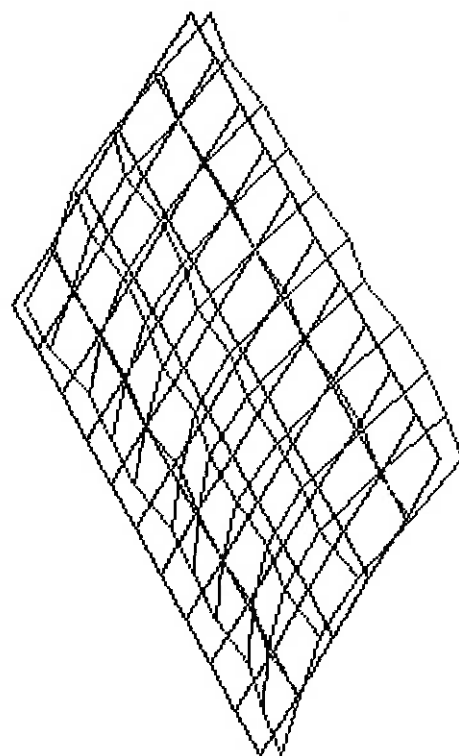
Help

ASM gateway Rank 47, Mode 32

Z
X Y

Freq : 401.17 Hz

Damp : 0.30 %



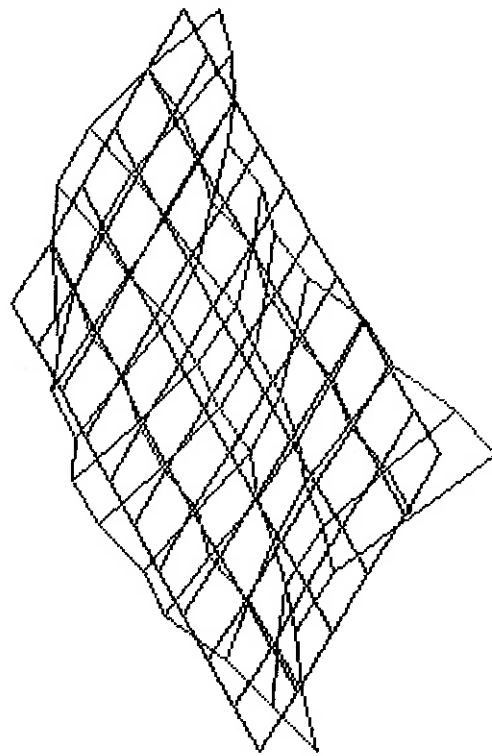
0 / 0.500

ASM gateway Rank 27, Mode 18

Z
X Y

Freq : 410.05 Hz

Damp : 0.18 %



0 / 0.500

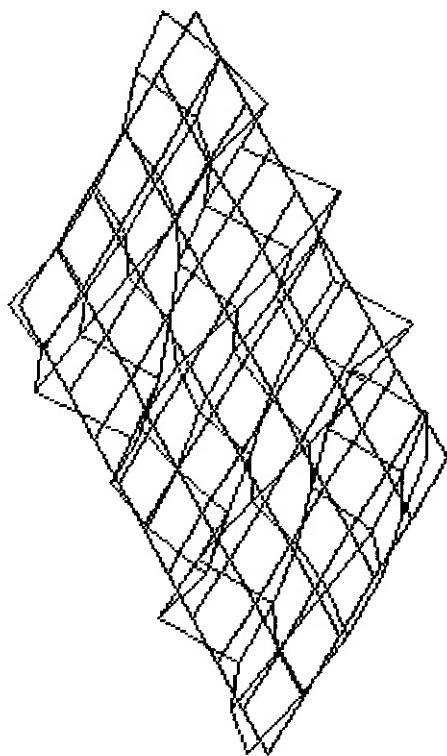
ims

Window Align Model Component Vector Animation Node

Help

ASM gateway Rank 46, Mode 33

Z
X Y



0 / 0.500

Freq : 413.34 Hz

Damp : 0.15 %

ims

Window Align Model Component Vector Animation Node

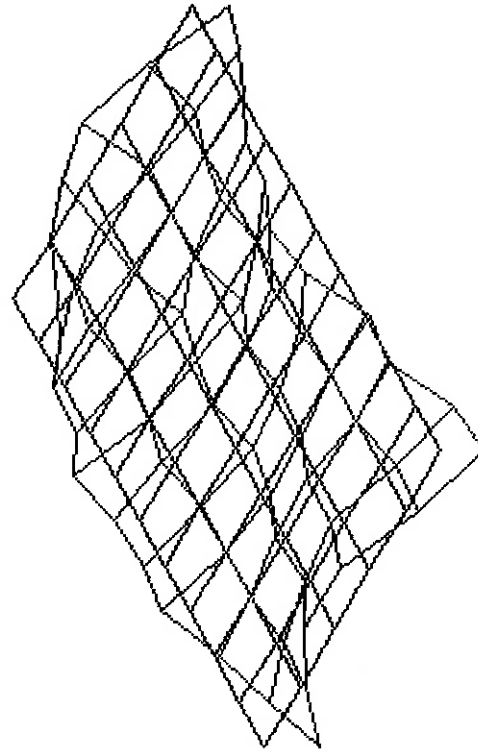
Help

ASM gateway Rank 23, Mode 1

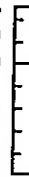


Freq : 444.56 Hz

Damp : 0.14 %

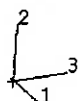
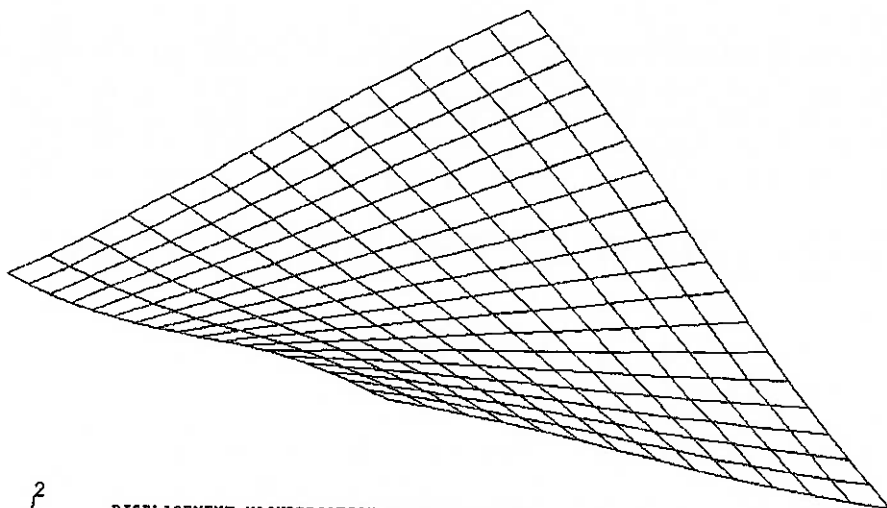


0 / 0.750

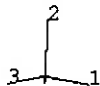
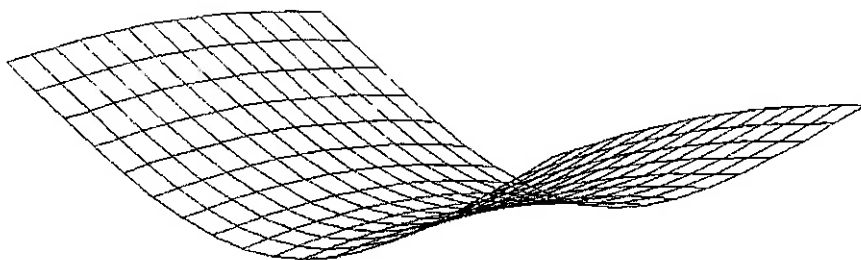


ANEXO C

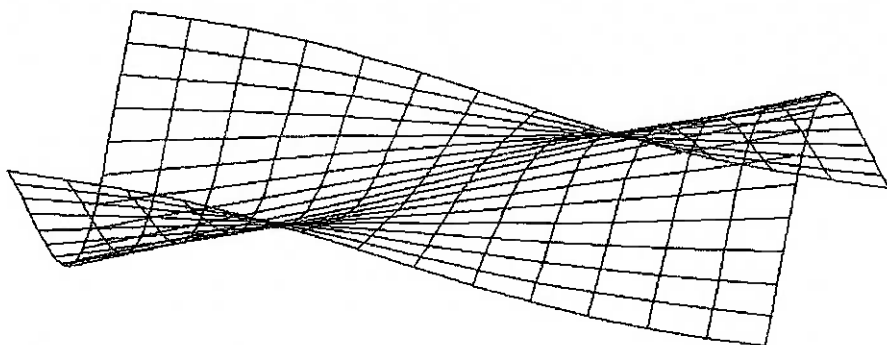
MODOS PRÓPRIOS DE VIBRAÇÃO DO MODELO ABAQUS



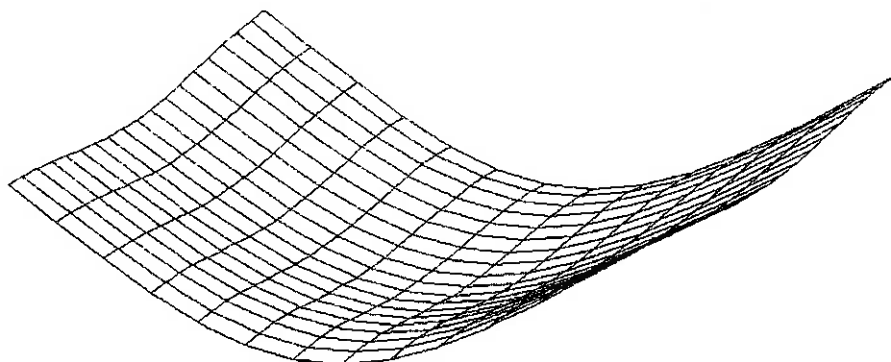
DISPLACEMENT MAGNIFICATION FACTOR = 172.
 RESTART FILE = pa STEP 1 INCREMENT 1
 EIGENMODE 7 FREQUENCY = 4.645E-03 (CYCLES/TIME)
 ABAQUS VERSION: 5.8-18 DATE: 22-JAN-2001 TIME: 10:41:00



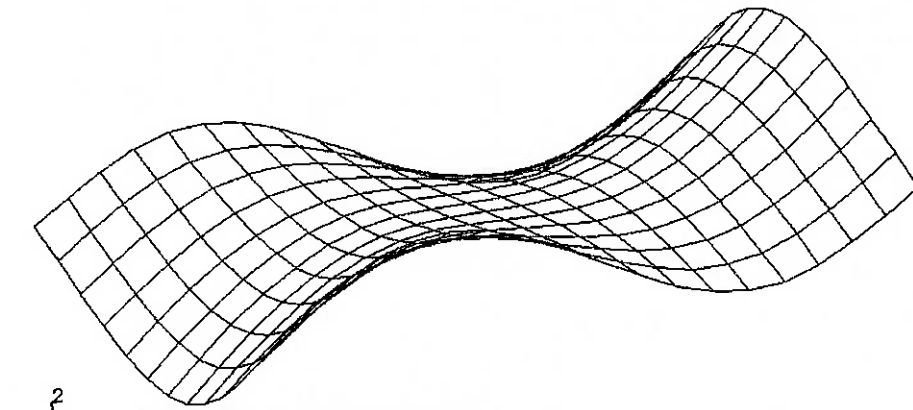
DISPLACEMENT MAGNIFICATION FACTOR = 194.
 RESTART FILE = pa STEP 1 INCREMENT 1
 EIGENMODE 8 FREQUENCY = 5.144E-03 (CYCLES/TIME)
 ABAQUS VERSION: 5.8-18 DATE: 22-JAN-2001 TIME: 10:41:00



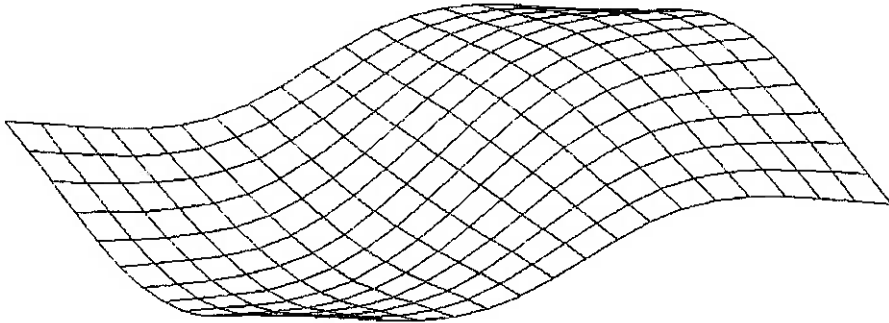
DISPLACEMENT MAGNIFICATION FACTOR = 128.
 RESTART FILE = pm STEP 1 INCREMENT 1
 EIGENMODE 9 FREQUENCY = 1.083E-02 (CYCLES/TIME)
 ABAQUS VERSION: 5.8-18 DATE: 22-JAN-2001 TIME: 10:41:00



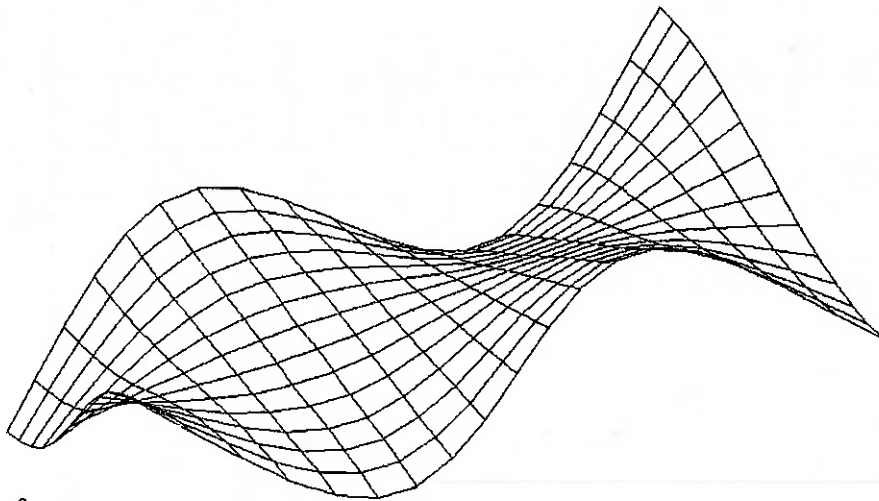
DISPLACEMENT MAGNIFICATION FACTOR = 150.
 RESTART FILE = pm STEP 1 INCREMENT 1
 EIGENMODE 10 FREQUENCY = 1.120E-02 (CYCLES/TIME)
 ABAQUS VERSION: 5.8-18 DATE: 22-JAN-2001 TIME: 10:41:00



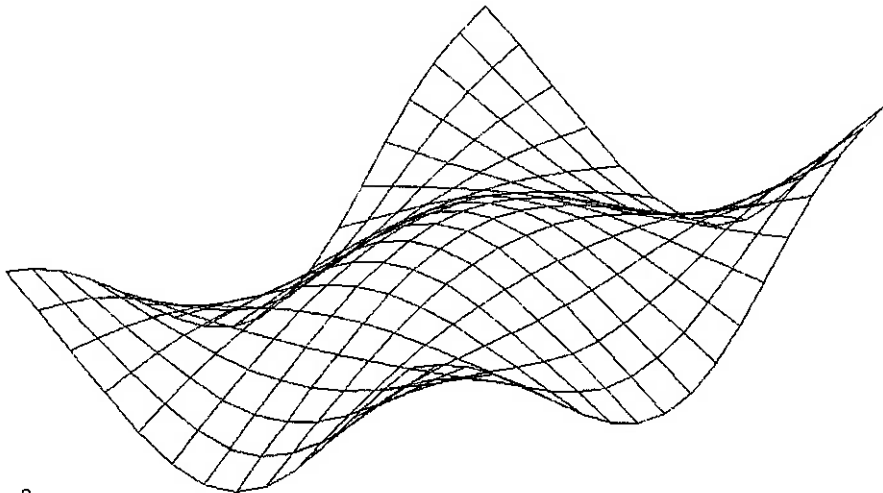
DISPLACEMENT MAGNIFICATION FACTOR = 193.
 RESTART FILE = pm STEP 1 INCREMENT 1
 EIGENMODE 11 FREQUENCY = 1.364E-02 (CYCLES/TIME)
 ABAQUS VERSION: 5.8-18 DATE: 22-JAN-2001 TIME: 10:41:00



DISPLACEMENT MAGNIFICATION FACTOR = 194.
 RESTART FILE = pm STEP 1 INCREMENT 1
 EIGENMODE 12 FREQUENCY = 1.571E-02 (CYCLES/TIME)
 ABAQUS VERSION: 5.8-18 DATE: 22-JAN-2001 TIME: 10:41:00



DISPLACEMENT MAGNIFICATION FACTOR = 185.
 RESTART FILE = pm STEP 1 INCREMENT 1
 EIGENMODE 13 FREQUENCY = 2.042E-02 (CYCLES/TIME)
 ABAQUS VERSION: 5.8-18 DATE: 22-JAN-2001 TIME: 10:41:00



DISPLACEMENT MAGNIFICATION FACTOR = 187.
 RESTART FILE = pm STEP 1 INCREMENT 1
 EIGENMODE 14 FREQUENCY = 2.285E-02 (CYCLES/TIME)
 ABAQUS VERSION: 5.8-18 DATE: 22-JAN-2001 TIME: 10:41:00