



Regina Augusta Campos Sampaio

**Espectro de Resposta de Projeto Uniformemente Provável
para Sistemas Secundários Inelásticos**

Tese de Doutorado

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Área de concentração: Estruturas.

Orientador: João Luis Pascal Roehl

Rio de Janeiro, outubro de 2003



Regina Augusta Campos Sampaio

**Espectro de Resposta de Projeto Uniformemente Provável
para Sistemas Secundários Inelásticos**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Área de concentração: Estruturas. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

João Luis Pascal Roehl
Orientador
PUC-Rio

Paulo Gonçalves Batista
PUC-Rio

Raul Rosas e Silva
PUC-Rio

José Eduardo Maneschy
ELETRONUCLEAR

Tereza Denyse Pereira de Araújo
UFC

Ney Augusto Dumont
Coordenador(a) Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 27 de outubro de 2003

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e do orientador.

Regina Augusta Campos Sampaio

Graduou-se em Engenharia Civil, pela Universidade Federal do Pará, em março de 1996. Ingressou no curso de mestrado em Engenharia Civil da PUC-Rio no ano de 1997, na área de concentração em Estruturas. Titulou-se Mestre em Ciências de Engenharia Civil: Estruturas pela PUC-Rio em março de 1999. Participou do projeto de colaboração entre a Eletronuclear e a PUC-Rio nos anos de 1998 a 2000.

Ficha Catalográfica

Sampaio, Regina Augusta Campos

Espectro de resposta de projeto uniformemente provável para sistemas secundários inelásticos / Regina Augusta Campos Sampaio ; orientador: João Luis Pascal Roehl. - Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Engenharia Civil, 2003.

112 f. : il. ; 30 cm

Tese (doutorado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil.

Incluí referências bibliográficas.

1. Engenharia civil - Teses. 2. Espectro de resposta. 3. Inelasticidade. 4. Fator de utilidade. 5. Sistemas secundários. I. Roehl, João Luis Pascal. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD: 624

À Sophia

Agradecimentos

À Deus;

Ao Prof. João Luis Pascal Roehl, amigo e mestre, pela compreensão das dificuldades da vida e pela dedicação em ensinar e transmitir sua sabedoria;

Ao CNPQ, à CAPES e à PUC-Rio pelo apoio financeiro;

Aos colegas da ELETRONUCLEAR sempre disponíveis a discutir e contribuir com a pesquisa;

Aos professores da pós graduação e funcionários do departamento de engenharia civil;

À Andreia e Denyse, obrigado pelas proveitosas discussões técnicas e mais ainda pela dedicada amizade;

À Ângela, Maria Fernanda e Paôla pelo carinho dedicado a mim e à minha filha nestes últimos anos;

A todos os amigos do mestrado e doutorado que dividiram comigo as alegrias e dificuldades destes anos de pós-graduação;

Aos meus pais, Carlos e Graça e aos meus irmãos, Antonio e João, por estarem sempre ao meu lado;

Às meninas Sophia e Fernanda, que renovam as esperanças nos nossos corações e;

Ao Giorgio, por dividir comigo a alegria de sermos uma família.

Resumo

Sampaio, Regina Augusta Campos; Roehl, João Luis Pascal **Espectro de resposta de projeto uniformemente provável para sistemas secundários inelásticos**. Rio de Janeiro, 2003. 112p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Estuda-se a consideração de comportamento inelástico do material na geração de espectros de resposta de projeto. Para tanto, trabalha-se sobre um sistema secundário simplificado acoplado a um pórtico de cinco andares com características dinâmicas ajustadas para modelar um sistema principal real, de uma usina nuclear. Faz-se um estudo paramétrico sobre estes sistemas acoplados onde são variados os parâmetros: fator de escoamento, a intensidade da excitação e o nível de amortecimento. É proposto um fator de utilidade global formulado em termos de trabalho externo realizado sobre o sistema secundário. São obtidos espectros de utilidade e de resposta. A análise de tais espectros fornece informações sobre o desempenho do sistema secundário e seus suportes e conclui por fatores de transposição entre os espectros elástico e inelástico. Propõe-se metodologia para obtenção de espectros de resposta elásticos e inelásticos que levam em conta o acoplamento entre os sistemas principal e secundário, o movimento relativo dos suportes e o compromisso probabilístico entre as ordenadas do espectro e a sismicidade da região expressa em termos de uma função densidade de espectro de potência objetivo para a aceleração do terreno. Um exemplo de obtenção de espectros de resposta acoplada de projeto uniformemente provável inelástico é apresentado.

Palavras-chave

sistemas secundários; comportamento inelástico; espectros de resposta; inelasticidade; fator de utilidade

Abstract

Sampaio, Regina Augusta Campos; Roehl, João Luis Pascal **Uniformly probable project response spectra for inelastic secondary system.** Rio de Janeiro, 2003. 112p. Dsc Thesis - Department of Civil Engineering, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The author's concern includes two main points in the subject of design response spectra generation for secondary systems in nuclear power plant structures: the consideration of inelastic behavior in the secondary systems materials and the production of uniformly probable design response spectra.

One works with a previously developed secondary system model attached to primary structure model tuned to the frequency range of a nuclear power plant building.

A global ductility factor is formulated relating the plastic to the overall work done by the seismic external forces on the secondary system. This factor together with a particular definition of the yielding factor allows one to determine elastic to inelastic spectrum transpose factors.

A methodology is proposed to generate uniformly probable coupled response spectra for multiply supported inelastic secondary systems.

The seismic excitation is prescribed by a target power spectrum density function of the ground acceleration and an internal pressure condition is added to the seismic action. Examples illustrate the application of this proposed methodology.

Keywords

secondary systems; inelastic behavior; response spectrum; inelasticity; ductility factor

Sumário

1 Introdução	18
2 Situação no assunto	21
2.1. Aspectos Gerais	21
2.2. Métodos de análise	21
2.2.1. Definição da excitação sísmica	22
2.2.2. Domínios e métodos de análise	27
2.3. Análise modal espectral de sistemas secundários, suas razões e conseqüências.	30
2.3.1. Movimento relativo dos suportes.	32
2.3.2. Acoplamento dos sistemas	32
2.3.3. Espectros de resposta acoplada uniformemente provável.	37
2.3.4. Consideração das não linearidades	38
3 Metodologia	45
3.1. Estratégia	45
3.2. Sistema secundário simplificado	46
3.3. Sistema principal	50
3.4. Modelagem e análise no programa Ansys	52
3.4.1. Elementos PIPE20 e PIPE60	52
3.4.2. Comportamento não linear e inelástico na tubulação – elementos PIPE20 e PIPE60	53
3.4.3. Elemento COMBIN40 e comportamento não linear dos suportes.	55
3.5. Carregamento no sistema secundário simplificado	56
3.6. Amortecimento	58
3.7. Fator de escoamento	60
3.8. Fator de utilidade	60
3.9. Espectro de Resposta Acoplada de Projeto Uniformemente Provável Linear	63

4 Ensaaios e Resultados para o SSS acoplado ao SP	67
4.1. Programação dos ensaios	67
4.2. Espectros de ductilidade	68
4.2.1. Apresentação	68
4.2.2. Análise geral para carga sísmica	68
4.2.3. Pressão interna	70
4.2.4. Amortecimento	71
4.2.5. Dutilidade dos apoios	79
4.3. Espectros de resposta linear elástica	81
4.4. Espectros de resposta do sistema secundário simplificado	82
4.4.1. Apresentação	82
4.4.2. Análise Geral para a carga sísmica	83
4.4.3. Pressão interna	85
4.4.4. Amortecimento	85
4.5. Avaliação do catraqueamento	92
4.6. Síntese das variações espectrais devidas à ductilidade	96
4.7. Exemplo de aplicação	97
4.7.1. Apresentação	97
4.7.2. Modelo do reator, excitação e sistema secundário.	97
4.7.3. Espectro de resposta acoplada uniformemente provável	101
5 Conclusões	105
6 Referências bibliográficas	108

Lista de figuras

Figura 2.1 – Espectro de resposta. Acelerações espectrais são as amplitudes de aceleração máxima do S1GL em resposta à mesma excitação. (Kramer, 1996)	23
Figura 2.2 - - Representação de um Espectro de quatro escalas logarítmicas.	24
Figura 2.3– Sistema com dois graus de liberdade (S2GL)	34
Figura 2.4– Primeiro e segundo modo do S2GL em função da frequência do sistema secundário, normalizado pela frequência do SP	35
Figura 2.5–Procedimento esquemático para obtenção de espectros de resposta acoplada em vários pontos (Valverde, 1998).	37
Figura 2.6 – Definição da faixa de deformação inelástica e da deformação por catraqueamento.	41
Figura 2.7 – a) Diagrama tensão deformação – baixa tensão média. b) Diagrama tensão deformação – caso limite ($\varepsilon^{pc} = 0$).	42
Figura 2.8 – Catraqueamento transiente e assintótico- esquema	43
Figura 2.9 – Limites de comportamento do material para o caso de placa de comprimento unitário submetida a carga permanente de tração e carga cíclica de flexão.	43
Figura 3.1 – Representação esquemática do sistema secundário simplificado	49
Figura 3.2– Representação esquemática do sistema principal.	50
Figura 3.3 – Representação esquemática modelo de barras e placas do SP.	51
Figura 3.4 – Geometria do elemento PIPE20	52
Figura 3.5 – Geometria do elemento PIPE60	53
Figura 3.6 – Translação da superfície de escoamento com a progressão do escoamento. Encruamento cinemático.	55
Figura 3.7 – Elemento COMBIN40	55
Figura 3.8 – Sismo gerado artificialmente normalizado para uma aceleração máxima de 0,1 g e compatibilizado pelo espectro de resposta	

adotado para o trabalho.	56
Figura 3.9 – Espectro de Fourier do sismo utilizado. $\ddot{v}_{g\max} = 0,1g$.	57
Figura 3.10 – Espectro de resposta de projeto em pseudo velocidade adotado para o trabalho, $\ddot{v}_{g\max} = 0,1g$.	57
Figura 3.11 – Densidade espectral de potência do sismo, $\ddot{v}_{g\max} = 0,1g$.	58
Figura 3.12 – a) Força x tempo e deslocamento resultante. b) Relação bilinear histerética entre força e deslocamento.	62
Figura 3.13 – Procedimento esquemático de obtenção do Espectro de Resposta Uniformemente Provável. As ordenadas do espectro são obtidas a partir da fixação da reta horizontal que representa um nível de probabilidade F de não ser ultrapassada.	65
Figura 4.1 - Espectro de utilidade para o SSS acoplado ao SP, parametrizado pelo fator de escoamento, C. Sismo1g e Sismo0,1g	72
Figura 4.2 - Espectro de utilidade para o SSS acoplado ao SP, parametrizado pelo fator de escoamento, C. Sismo0,1g +Pi	73
Figura 4.3 - Espectro de utilidade para o SSS acoplado ao SP, parametrizado pelo fator de escoamento, C. Sismo1g+Pi.	73
Figura 4.4 - Espectro de utilidade para o SSS acoplado ao SP, parametrizado pelo fator de escoamento, C.Sismo1g+Pi-7%.	74
Figura 4.5 - Espectro de utilidade, C=0,2. Comparação dos casos.	74
Figura 4.6 - Função de transferência de acelerações do ponto de controle do sismo para os nós 206 e 210 do SSS acoplado ao SP.	75
Figura 4.7 – a) Representação esquemática do SSS com tubulação muito flexível. b) Representação esquemática do SSS com tubulação rígida.	75
Figura 4.8 - Períodos de regime linear elástico e plástico do SSS, $f_{0s} = 0,25$ Hz, C=0,2	76
Figura 4.9 - Períodos de regime linear elástico e plástico do SSS, $f_{0s} = 5$ Hz, C=0,2	76
Figura 4.10 - Períodos de regime linear elástico e plástico do SSS, $f_{0s} = 9$ Hz, C=0,2.	77
Figura 4.11 - Períodos de regime linear elástico e plástico do SSS, $f_{0s} = 33$ Hz, C=0,2.	77

Figura 4.12 - Tensões equivalentes máximas para o elemento 399, $C=1$, $f_{0s} = 5$ Hz e tensões de escoamento para $C=0,2$.	78
Figura 4.13 - Tensões equivalentes máximas para o elemento 399, $C=1$, $f_0 = 9$ Hz e tensões de escoamento para $C=0,2$.	78
Figura 4.14 – Espectro de Fourier da resposta em deslocamento, u , do nó 85 do SP, com SSS acoplado, $f_0 = 5$ Hz e $C=1$. Sismo1g.	79
Figura 4.15 – Espectro de resposta acoplada linear elástica – metodologia de Valverde (1998). Nó 46 do SP.	81
Figura 4.16 - Espectro de resposta acoplada linear elástica – metodologia de Valverde (1998). Nó 85 do SP.	82
Figura 4.17 – Espectro de resposta em pseudovelocidade do nó 206 do SSS. Sismo1g.	86
Figura 4.18 – Espectro de resposta em pseudovelocidade do nó 210 do SSS. Sismo1g.	86
Figura 4.19 - Espectro de resposta em pseudovelocidade para o nó 206 do SSS. Sismo1g+Pi.	87
Figura 4.20 - Espectro de resposta em pseudovelocidade para o nó 210 do SSS. Sismo1g+Pi.	87
Figura 4.21 - Espectro de resposta em pseudovelocidade do nó 206 do SSS. Sismo1g+Pi-7%.	88
Figura 4.22 - Espectro de resposta em pseudovelocidade do nó 210 do SSS. Sismo1g+Pi-7%.	88
Figura 4.23 – Espectro de resposta em pseudo velocidade normalizado pela resposta linear elástica ($C=1$) e parametrizado pelo fator de escoamento, C . Nó 206 do SSS. Sismo1g.	89
Figura 4.24 - Espectro de resposta em pseudo velocidade normalizado pela resposta linear elástica ($C=1$) e parametrizado pelo fator de escoamento, C . Nó 210 do SSS. Sismo1g.	89
Figura 4.25 – Espectro de resposta em pseudo velocidade normalizado pela resposta linear elástica ($C=1$) e parametrizado pelo fator de escoamento, C . Nó 206 do SSS. Sismo1g+Pi.	90
Figura 4.26 – Espectro de resposta em pseudo velocidade normalizado pela resposta linear elástica ($C=1$) e parametrizado pelo fator de	

escoamento, C. Nó 210 do SSS. Sismo1g+Pi.	90
Figura 4.27 – Espectros de resposta do nó 206 do SSS. C=0,2. $\xi = 0$.	91
Figura 4.28 - Espectro de resposta em pseudo velocidade normalizado pela resposta linear elástica (C=1) e parametrizado pelo fator de escoamento, C. Nó 206 do SSS. Sismo1g+Pi-7%.	91
Figura 4.29 - Espectro de resposta em pseudo velocidade normalizado pela resposta linear elástica (C=1) e parametrizado pelo fator de escoamento, C. Nó 210 do SSS. Sismo1 g+Pi-7%.	92
Figura 4.30 – Relações entre tensão devido ao sismo e à pressão interna normalizadas pela tensão de escoamento. Elemento 399, seção i, ponto de integração r.	94
Figura 4.31 – Gráfico tensão-deformação. Elemento 399, seção i, ponto de integração r.	95
Figura 4.32 – Gráficos de tensão deformação para Sismo0,1g+Pi e Sismo0,1g. Elemento 399, seção i, ponto de integração r.	95
Figura 4.33 – $V/V_0 \times f_{os}/f_{osp}$ em função de C, $\xi = 0$ e $\xi = 7\%$	97
Figura 4.34 – Modelo da superestrutura do prédio do reator	100
Figura 4.35 – Modelo da base do prédio do reator	100
Figura 4.36 – Densidade espectral de potência objetivo para o sítio de Angra 3 (Weston Geophysical Research Inc,1972).	100
Figura 4.37 - Espectro de resposta acoplada de projeto uniformemente provável, elástico. Sistema secundário com $\xi = 7\%$. Sistema principal: modelo do prédio do reator da usina Angra 3. Acoplamento em um, dois e quatro pontos.	102
Figura 4.38 - Espectro de resposta acoplada uniformemente provável, elástico e inelástico. Sistema secundário com $\xi = 7\%$. SP -modelo do prédio do reator da usina Angra 3. Acoplamento em um ponto.	103

Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Relação entre domínio de análise e regime do modelo (Wolf, 1993).....	28
Tabela 3.1– Módulos de elasticidade e frequências fundamentais do SSS	47
Tabela 3.2– Valores das relações, f_{0i}/f_{01} , das 15 primeiras frequências do SSS para a sua frequência fundamental.....	48
Tabela 3.3 – Valores das rigidezes inicial e final dos elementos de mola, kN ou kN.m.....	48
Tabela 3.4– Quinze primeiras frequências naturais do sistema principal, f_{0pi} , e suas massas modais, m_i	51
Tabela 3.5 – Comparação entre fatores de utilidade.....	62
Tabela 4.1 – Valores de V/V_0 para os casos não amortecidos.	84
Tabela 4.2 – Fator de relação entre os espectros elástico e inelástico	96

Lista de símbolos e abreviaturas

Romanos

A	Pseudo aceleração espectral
$ A_n $	Amplitude de Fourier
[C]	Matriz de amortecimento
C	Fator de escoamento
C_{ijkl}	Matriz constitutiva
c_i	Fator de participação no modo i
E	Módulo de elasticidade
ERAUPE	Espectro de resposta acoplada uniformemente provável elástico
ERAUPIN	Espectro de resposta acoplada uniformemente provável inelástico
ERUP	Espectro de resposta uniformemente provável
FAI_i	Fator de amplificação instantâneo no modo i
$F_j(a)$	Função distribuição de probabilidade da aceleração a e frequência j
F_y	Força correspondente ao escoamento
F_0	Força máxima aplicada
f_i	Frequência i
f_{0j}	Frequência natural j do sistema secundário
g	Aceleração da gravidade
$H(\omega)$	Função de transferência (função resposta a um harmônico unitário)
J	Momento de inércia
[K]	Matriz de rigidez
k	Coefficiente de rigidez, elemento da matriz de rigidez
k_r	Coefficiente de rigidez rotacional
k_t	Coefficiente de rigidez translacional
[M]	Matriz de massa
m	Massa, elemento da matriz de massa
P_0	Pressão externa no tubo
P_i	Pressão interna no tubo

q_i	Relação entre as tensões provocadas pela pressão interna e a provocada pelo sismo
S_{ij}	Tensor de tensões desviadoras
S1GL	Sistema de um grau de liberdade
S2GL	Sistema de dois graus de liberdade
SP	Sistema principal
SS	Sistema secundário
SSS	Sistema secundário simplificado
T	Período
T_e	Trabalho elástico realizado pelas forças externas sobre o SSS
T_m	Trabalho total realizado pelas forças externas sobre o SSS
T_p	Trabalho plástico realizado pelas forças externas sobre o SSS
t	Instante de tempo
t_d	Duração da excitação
t_1	Duração do primeiro período de carregamento
U	Deslocamento espectral
u , v	Deslocamento
\dot{u} , \dot{v}	Velocidade
\ddot{u} , \ddot{v}	Aceleração
u_y , v_y	Deslocamento correspondente ao início do escoamento
v_g	Deslocamento do sismo
v_b	Deslocamento do nó de apoio do sistema secundário
$\ddot{v}_{g \max}$	Aceleração máxima do sismo
V	Pseudo velocidade espectral
V_0	Pseudo velocidade espectral – sistema secundário elástico
v_m	Deslocamento máximo
$x_r(t)$	Função amostra de um processo aleatório
X_{nr}	Amplitude da série de Fourier

Gregos

α_{ij}	Variável de encruamento que determina o centro da superfície de escoamento
β	Relação entre as frequências do sistema secundário e a do principal
$\Delta\omega$	Intervalo de frequência circular
$\Delta\varepsilon^p$	Faixa de deformação plástica
$\delta\varepsilon^p$	Deformação plástica progressiva
ε^p	Deformação plástica
ε^{pc}	Deformação plástica à compressão
ε^{pt}	Deformação plástica à tração
ϕ_i	Modo de vibração com frequência ω_{0i}
Φ_{rr}	Densidade espectral de potência da resposta r
$\Phi_{\ddot{v}_g \ddot{v}_g}^0$	Densidade espectral de potência objetivo da aceleração do sismo
γ	Relação entre as massas do sistema secundário e a do principal
η	Relação entre as frequências do sistema acoplado e a do principal
λ_i	Momento espectral de iésima ordem
μ, μ', μ^*	Fator de ductilidade
ρ	Relação entre os coeficientes de rigidez final e inicial do gráfico força deslocamento bilinear
σ	Tensão
σ_0	Tensão equivalente elástica máxima
σ_b	Tensão devido a flexão
σ_{eq}	Tensão equivalente que depende do critério de escoamento
σ_p	Tensão devido a carregamento primário
σ_y	Tensão de escoamento
ω	Frequência circular
ω_{0i}	Frequência circular natural i do SS
ω_{0pi}	Frequência circular natural i do sistema principal
ξ	Fator de amortecimento

1 Introdução

A importância dos projetos de usinas nucleares e a necessidade de que estas sejam projetadas para seguramente resistir às condições mais adversas, em particular aos sismos, tem motivado um grande esforço de pesquisa que contribui não somente para a indústria nuclear, mas para a engenharia de terremotos como um todo.

Uma das áreas que tem sido objeto de estudo é a relacionada ao projeto de sistemas secundários, ou seja, sistemas apêndices à estrutura principal e que recebem, através desta, a excitação, tais como tubulações e equipamentos. Estes são sistemas vitais para um desligamento seguro de usinas nucleares no caso da ocorrência de um terremoto. Além disso, apresentam-se com grande número de graus de liberdade e em diversidade, características que dificultam sua modelagem e que acabam por determinar o método de análise a ser utilizado.

A metodologia corrente na análise de sistemas secundários de instalações de usinas nucleares é a análise modal espectral. É um método de simples aplicação e entendimento, mas que incorpora uma série de pontos de conservadorismos na sua forma usual. Dentre estes pontos tem-se o acoplamento entre os sistemas principal e o secundário, o movimento relativo dos suportes, a consideração dos modos rígidos e a consideração de comportamento não linear. Devido a estes conservadorismos, os sistemas de tubulação, no presente, são projetados para cargas elevadas que determinam um grande número de suportes, o que onera ainda mais o projeto, a inspeção e a manutenção destes sistemas.

Trabalhos como os de Valverde (1998), Gastanaga (1998) e Sampaio (1999) atentam para estas considerações no âmbito das usinas nucleares brasileiras, incorporando os efeitos de acoplamento e do movimento relativo dos suportes à

rotina de obtenção de espectros de resposta. Seguindo uma outra linha, a de análise de risco sísmico, Diniz de Almeida (2002) avalia o compromisso probabilístico entre as ordenadas dos espectros de resposta de projeto e uma densidade de espectro de potência representativa da sismicidade da região. Em conjunto, estes trabalhos produzem um espectro de resposta acoplada de projeto uniformemente provável para sistemas secundários elásticos.

No entanto, ainda há a necessidade da consideração de comportamento inelástico dos sistemas secundários.

Tal assunto vem sendo discutido e estudos publicados (Adam e Fotiu, 2000; Aoki e Watanabe, 2000; Roehl, 1971 e Veletsos, 1965) apontam para uma redução nos picos das respostas, no caso de sistemas sintonizados, devido à absorção da energia de vibração pelo comportamento inelástico. E, em alguns casos de sistemas com vários graus de liberdade, o pico de aceleração na região de baixos períodos é amplificado, ao invés de ser reduzido, devido aos efeitos dos modos altos. Além de modificar a amplitude da resposta, o escoamento da estrutura também provoca alterações nas configurações modais e nas frequências naturais do sistema.

Segundo Slagis (1991) a consideração de ductilidade e da absorção de energia inelástica é necessária para projetar corretamente sistemas de tubulação sob efeitos sísmicos.

Além disso, os sistemas de tubulação são regularmente revisados para cargas novas ou modificadas que algumas vezes são maiores do que as que os sistemas foram originalmente dimensionados a resistir. Qualquer redução na resposta devido à ductilidade irá ter um impacto positivo nos processos de projeto e qualificação (Okeil e Tung, 1995).

Tem-se como objetivo, neste trabalho, estudar o problema de obtenção de espectros de resposta de projeto para sistemas secundários submetidos a cargas

sísmicas e desenvolver metodologia para sua obtenção. Incluir nos procedimentos recursos para a consideração de:

- Deslocamentos relativos entre pontos de apoio do SS no SP;
- Efeitos de interação dinâmica entre os sistemas secundário e principal;
- Interação solo estrutura
- Um compromisso probabilístico único entre as ordenadas do espectro de resposta de projeto e a função de densidade de espectro de potência representativo da sismicidade da região do sítio da obra.
- Não linearidades e inelasticidades no sistema secundário;

Desenvolve-se o trabalho em cinco capítulos:

- No Capítulo 2 a análise de sistemas secundários e, em particular, o método de análise modal espectral, são brevemente explorados, ressaltando-se seus aspectos mais relevantes;
- A metodologia para avaliação dos efeitos da consideração de sistemas secundários inelásticos é desenvolvida sobre um sistema secundário simplificado no Capítulo 3;
- No Capítulo 4 os resultados são apresentados e comentados e, exemplifica-se a metodologia de obtenção de espectro de resposta acoplada de projeto uniformemente provável para sistemas inelásticos;
- O Capítulo 5 é reservado às conclusões, contribuições e sugestões para prosseguimento da pesquisa.

2 **Situação no assunto**

2.1. **Aspectos Gerais**

Os sistemas ditos secundários, tais como tubulações e equipamentos, são vitais para o funcionamento de instalações industriais sensíveis como as usinas termonucleares e, se um sinistro ocorrer, precisam operar de forma a garantir a segurança das pessoas envolvidas e das comunidades vizinhas possibilitando o desligamento seguro da usina.

Os sistemas secundários apresentam, normalmente, numerosos graus de liberdade e natureza e geometria variadas. A numerosidade, a complexidade e o grau de importância de tais sistemas determinam a utilização seletiva de diversos métodos de análise, entre eles alguns simplificados, sendo estes os que cobrem o maior número de análises. Tais simplificações produzem conservadorismos que oneram o custo da obra e elevam o número de suportes, congestionando o sistema e dificultando a execução, inspeção e manutenção destes. O projeto de sistemas secundários representa uma elevada parcela do já alto orçamento do projeto de usinas termonucleares.

2.2. **Métodos de análise**

De maneira geral, no processo de definição do projeto sísmico para sistemas de estruturas de usinas termonucleares, podem-se ressaltar os dois pontos seguintes como seletivos do método de análise apropriado ao problema:

- Definição da excitação (sismo);
- Seleção do domínio e do método de análise.

2.2.1.

Definição da excitação sísmica

Um sismo é constituído por um conjunto de ondas de tensão que se originam em um ponto de liberação de energia ao longo da linha de encontro de placas tectônicas e ficam sujeitas, na sua trajetória, através das diferentes e complexas estratificações do solo, a inúmeras refrações e reflexões de caráter muito diverso. Esta variedade, aliada à escassez de registros, dificulta a determinação da excitação nos projetos sísmicos de estruturas civis. O carregamento sísmico pode ser determinado a partir de registros de terremotos ocorridos, ou de um tratamento estatístico destes, ou ainda gerado artificialmente por um processo estocástico compatibilizado com características de sismos reais.

Para efeito de projeto pode-se definir o sismo como um registro temporal da aceleração do terreno, da resposta potencial máxima de sistemas de um grau de liberdade ou do conteúdo da sua potência na frequência, isto é, um acelerograma, um espectro de resposta ou uma densidade espectral de potência.

A escolha da forma de definição do sismo está relacionada com o domínio, do tempo ou da frequência, onde se irá trabalhar e, também, com o método utilizado para análise. As análises, no tempo, por integração direta ou análise modal, são feitas tendo como entrada um ou mais acelerogramas; já as análises modais espectrais utilizam um espectro de resposta de projeto. As análises no domínio da frequência partem de uma transformada de Fourier do acelerograma para depois retornarem a resposta para o domínio do tempo; no caso de análise não determinística é usada, normalmente, uma densidade espectral de potência do sismo.

A seguir, os conceitos de espectros de resposta e de densidade espectral são apresentados de forma resumida e, para um maior aprofundamento recomenda-se

reportar a Clough (1993), Veletsos et al (1965), Newland (1978), Standard Review Plan (1989).

2.2.1.1. Espectros de Resposta

Descrevem a resposta máxima de um oscilador simples (S1GL), submetido a um sismo, como uma funo da freqncia natural e do amortecimento do S1GL (Figura 2.1); a resposta pode ser expressa em acelerao, velocidade ou deslocamento. Note-se que o S1GL de freqncia natural infinita   rígido e sua acelerao espectral igual   máxima acelerao do solo.

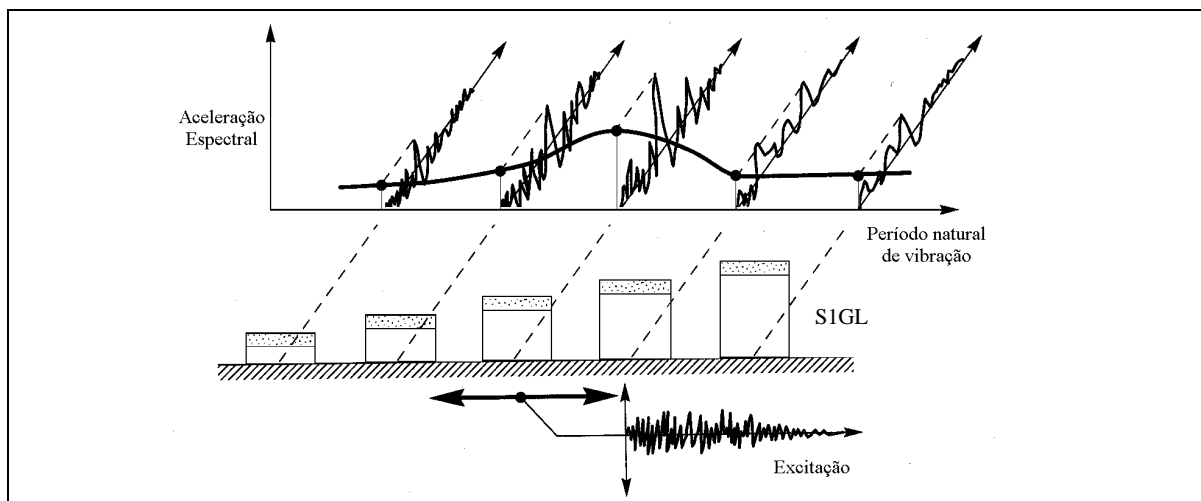


Figura 2.1 – Espectro de resposta. Aceleraes espectrais são as amplitudes de acelerao máxima do S1GL em resposta   mesma excitao. (Kramer, 1996)

Uma forma conveniente de representar o espectro de resposta   através do chamado espectro de quatro escalas logarmicas.

O deslocamento máximo do S1GL relativo   sua base   designado por U . O produto de U pela freqncia circular natural   a chamada pseudo velocidade (V) do sistema. De maneira análoga, o produto $\omega \cdot V$ refere-se   pseudo acelerao (A), assim:

$$V = \omega \cdot U \quad (2.1)$$

$$A = \omega \cdot V = \omega^2 \cdot U \quad (2.2)$$

Em alguns casos, o deslocamento máximo pode ser mais convenientemente expresso indiretamente em termos de V ou A , do que diretamente, em termos de U . Ainda, as características do espectro de resposta podem ser mais bem aproximadas com o auxílio das três quantidades do que em termos de apenas uma delas (Veletsos, Newmark e Chelapati, 1965).

Aplicando-se o logaritmo nos dois lados da equa o (2.1) tem-se: $\log(V) = \log(\omega) + \log(U)$, se U   constante e $\omega = 2\pi f$ então: $\log(V) = a + \log(f)$, onde a   uma constante, representa uma linha reta com inclina o de 45° . De maneira análoga trabalhando-se com a equa o (2.2) chega-se a $\log(V) = a - \log(f)$ que representa uma reta com inclina o de -45°

Assim, no gráfico em escala logarítmica onde a ordenada representa a pseudovelocidade e a abscissa a freq ncia natural do sistema, as diagonais inclinadas a $+45$ graus representam valores constantes de U e as diagonais inclinadas a -45° , valores constantes de A , conforme esquematicamente representado na Figura 2.2.

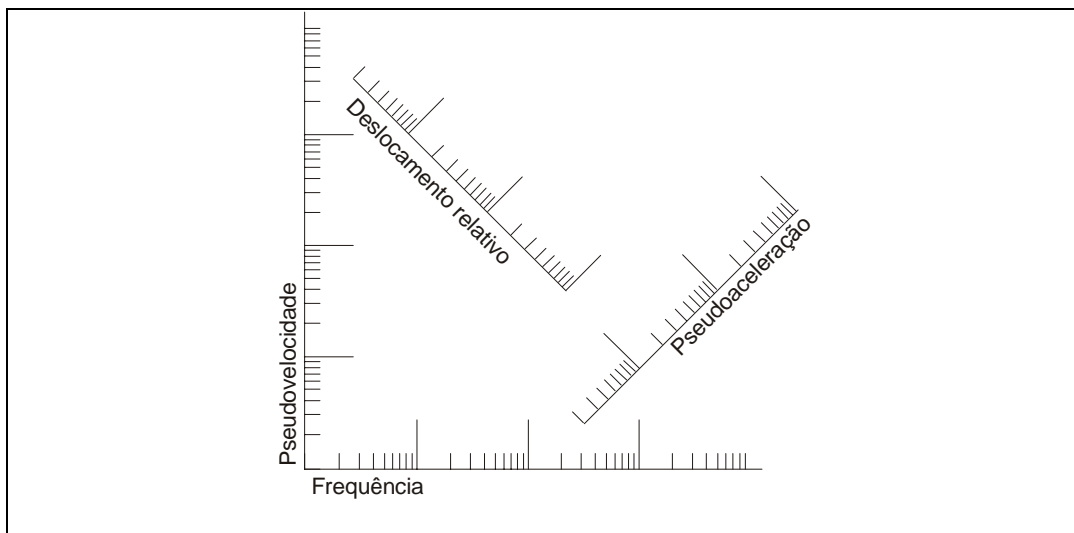


Figura 2.2 - - Representa o de um Espectro de quatro escalas logarítmicas.

2.2.1.2. Densidade Espectral de Potência

Qualquer função amostra $x_r(t)$ tomada de um processo randômico estacionário tendo média zero, pode ser separada nas suas componentes de freqncia usando a análise de Fourier. Se esta função  representada apenas sobre um intervalo finito de tempo, mas suficientemente longo, $-T/2 < t < +T/2$, a representação em séries de Fourier pode ser usada (Clough, 1993), assim:

$$x_r(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} X_{nr} \exp(i\omega_n t) \quad (2.3)$$

onde:

$$X_{nr} = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x_r(t) \exp(-i\omega_n t) dt \quad (2.4)$$

e onde $\omega_n = 2n\pi/T$. Se $x_r(t)$  periódica, as Equações (2.3) e (2.4) são a exata representação da função total desde que o intervalo de integração T seja tomado como um período completo. Toda função periódica consiste de harmônicos discretos tendo freqncia circulares $\omega, 2\omega, 3\omega, \dots$, e correspondentes amplitudes finitas $A_{1r} = 2|X_{1r}|$, $A_{2r} = 2|X_{2r}|$, $A_{3r} = 2|X_{3r}|$, ..., desde que,  claro, as componentes de freqncia positiva e negativa sejam combinadas.

Usualmente, a quantidade de maior interesse, quando um processo randômico estacionário  analisado,  o valor da média dos quadrados de $x_r(t)$ sobre o intervalo $-T/2 < t < +T/2$, que  obtido substituindo-se a Equação (2.3) na relação:

$$[x_r^2(t)] = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x_r^2(t) dt \quad (2.5)$$

assim:

$$[x_r^2(t)] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} |X_{nr}|^2 \quad (2.6)$$

Substituindo a Equação (2.4) em (2.6), tem-se:

$$[x_r^2(t)] = \sum_{n \rightarrow -\infty}^{\infty} \frac{\left| \int_{-T/2}^{T/2} x_r(t) \exp(-i\omega_n t) dt \right|^2}{2\pi T} \Delta\omega \quad (2.7)$$

onde, $\Delta\omega = 2\pi/T$ é o intervalo de frequências dos harmônicos discretos. Se, $T \rightarrow \infty$, $\Delta\omega \rightarrow d\omega$ e $\omega_n \rightarrow \omega$, a equação é convertida na forma:

$$[x_r^2(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_{x_r}(\omega) d\omega \quad (2.8)$$

onde a raiz quadrada desta expressão é o desvio padrão do processo aleatório e a função $\Phi_{x_r}(\omega)$,

$$\Phi_{x_r}(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\left| \int_{-T/2}^{T/2} x_r(t) \exp(-i\omega_n t) dt \right|^2}{2\pi T} \quad (2.9)$$

é definida como **Função Densidade Espectral de Potência** para a função $x_r(t)$ desde que o limite realmente exista. De acordo com a definição, a função densidade espectral de potência é uma função par quando $x_r(t)$ é uma função real, positiva e finita sobre a faixa de frequência $-\infty < \omega < \infty$

A densidade espectral do processo aleatório estacionário é obtida pela média simples da função densidade espectral das funções amostras pertencentes ao processo, como segue:

$$\Phi_x(\omega) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{r=1}^N \Phi_{x_r}(\omega) \quad (2.10)$$

2.2.1.3. Sismos artificiais

A escassez de registros de terremotos disponíveis, aliada ao caráter incerto que é intrínseco a um fenômeno natural, conduz a uma idealização dos sismos como amostras de processos estocásticos. Sendo assim, admite-se, em geral, que os acelerogramas são amostras integrantes de processos fracamente estacionários, ergódicos e de comportamento semelhante aos sismos reais.

Tanto a densidade espectral quanto o espectro de resposta de projeto são recursos que podem representar a sismicidade de uma região em termos de sua potencialidade de produzir efeitos mecânicos sensíveis nos sistemas estruturais, ou seja, estas representam um comportamento possível para um conjunto de sismos. Em vista disto, a geração de sismos artificiais é condicionada ao atendimento de um espectro de resposta de projeto e a uma densidade espectral mínima, recomendada para assegurar à excitação sísmica uma representativa dimensão da sua potência e de uma adequada distribuição ao longo da faixa de frequência de interesse do espectro de resposta de projeto (USNRC, 1989). Esta densidade espectral é chamada de Função Densidade Espectral de Potência Objetivo, $\Phi_{\ddot{v}_b \ddot{v}_b}^o$.

Todavia, tendo em vista a característica da densidade espectral de representar um espaço amostral composto por um número infinito de funções temporais (sismos), a ela pode ser atribuída a responsabilidade da representação da própria sismicidade da região à qual ela é vinculada.

2.2.2. Domínios e métodos de análise

2.2.2.1. Domínio do tempo X domínio da frequência

O comportamento do solo dependente da frequência e a conveniência com que devem ser expressos o amortecimento, a rigidez e a condição de contorno de radiação em termos de funções dependentes da frequência fazem da análise no domínio da frequência uma escolha natural para o estudo de problemas que envolvem propagação de ondas no solo. Sua maior restrição fica por conta da consideração das não linearidades. No entanto, a necessidade de inclusão do comportamento não linear e inelástico do solo já deixou de ser questionada pelos pesquisadores e passou a ser uma exigência básica dos modelos de interação solo-estrutura em vigor. Há também consenso em torno da conveniência de representar-se a não linearidade do solo através de curvas do módulo de

deformação e coeficiente de amortecimento dependentes do nível de deformação. Tal procedimento, conhecido como linearidade equivalente tem como principal vantagem sua simplicidade de utilização associada a bons resultados. O programa desenvolvido por Lysmer et al (1999), SASSI 2000, utiliza este procedimento. No entanto, permanece a questão do desempenho inelástico.

Além disso, a análise no domínio do tempo apresenta-se muito atraente por sua simplicidade, clareza dos aspectos físicos envolvidos e capacidade de trabalhar com não linearidades, embora haja dificuldades com relação aos possíveis erros numéricos provenientes da integração direta sobre um “registro de tempo” de um terremoto.

A necessidade de consideração de não linearidades na estrutura ou no solo tem um peso decisivo na escolha do domínio a ser utilizado na análise como mostrado na Tabela 1.1, principalmente se for considerada a relação de interação dinâmica entre cada um dos sistemas componentes (solo, sistema principal e sistema secundário) do conjunto de estruturas de uma instalação industrial, seja ela uma usina termonuclear ou não, sujeita a um carregamento sísmico.

Tabela 1.1 – Relação entre domínio de análise e regime do modelo (Wolf, 1993).

Estrutura	Solo	Domínio de análise
Linear	Linear	Frequência ou tempo
Linear	Não-linear	Tempo
	Linear-equivalente	Frequência
Não-linear	Linear	Tempo
Não-linear	Não-linear	Tempo

2.2.2.2. Análise modal espectral

A definição da excitação segundo um espectro de resposta de projeto é uma forma sintética de representação que acenou, desde os primeiros tempos, para uma

análise envolvendo a discriminao modo a modo, para sistemas com muitos graus de liberdade, dos valores extremos das grandezas cinemáticas e dos esforços e tensões nos elementos.

A estrutura  decomposta em vários sistemas com um grau de liberdade (modos de vibrao), e a cada um deles  atribuída a amplificao máxima prescrita no espectro de resposta (de projeto) para o oscilador simples com a freqncia e o amortecimento correspondentes ao modo em considerao:

$$v_i = c_i \phi_i |FAI_i|_{\max} \quad (2.11)$$

v_i - contribuio máxima do modo i no deslocamento total, $v|_{\max}$

c_i - fator de participao do modo i

ϕ_i - modo de vibrao com freqncia ω_{0i}

$|FAI_i|_{\max}$ - fator de amplificao instantâneo i , máximo; ordenada do espectro de resposta (de projeto) para o oscilador simples, com freqncia ω_{0i} e fator de amortecimento, ξ_i .

Em resumo, trata-se de uma análise modal na qual empregam-se $|FAI_i|_{\max}$ ao invés dos fatores de amplificao instantâneos.

Por isso, tal procedimento  designado por “Análise modal espectral” ou simplesmente “Análise espectral”. Os fatores de amplificao máximos concentram modo a modo, todo o efeito dinâmico do sismo sobre a estrutura, e podem ser obtidos quer no domínio do tempo ou da freqncia.

Naturalmente, ao fazer-se a sobreposio das componentes modais, v_i ,  perdido o faseamento real entre elas, podendo surgir efeitos de majorao ou reduo da resposta máxima, em níveis indesejáveis.

O número destas componentes modais a serem incluídas e a maneira de combin-las, incluindo as chamadas componentes de modos rígidos, têm sido

objeto de diversos estudos e conseqüentes atitudes de trabalho, reunidos em várias publicaes (Gupta, AK, 1986; Joshi e Gupta, ID, 1998), mas não se incluem na tnica desta tese.

Um desenvolvimento, iniciado na década de 1960-69 (Veletsos et al, 1965), foi a introduo no $|FAI_i|_{\max}$ de efeitos decorrentes de aspectos não lineares e inelásticos da estrutura utilizando-se para tal um fator de reduo de resistência do sistema, C , e um ndice de dutilidade do sistema, μ .

$$v_y = C \cdot v_e|_{\max} \quad (2.12)$$

onde: v_y  o deslocamento no escoamento

$v_e|_{\max}$  o deslocamento elástico máximo do sistema

C  um fator de reduo aplicado sobre o deslocamento máximo

O ndice de dutilidade do sistema  dado por:

$$\mu = \frac{v_m}{v_y} \quad \text{ou} \quad \mu' = \frac{v_m - v_y}{v_y} = \mu - 1 \quad (2.13)$$

onde: μ e μ' são medidas de dutilidade do sistema

v_m  o deslocamento total do sistema

2.3.

Análise modal espectral de sistemas secundários, suas razões e conseqncias.

A multiplicidade e a variabilidade dos sistemas secundários, comentadas em 2.1, sugerem uma abordagem seletiva destes sistemas grupando-os em três conjuntos:

- um grupo de sistemas de extrema sensibilidade que requerem um tratamento dinâmico individualizado e com toda a sofisticao disponível;

- um outro conjunto de sistemas relativamente simples cujo projeto dinâmico pode ser baseado em procedimentos pseudo-estáticos.
- um terceiro grupo de sistemas, nem tão sensíveis nem tão simples, mas numeroso e, em consequência, oneroso, que recomenda recursos de análise apropriada, isto é, que propiciem um projeto compatível em termos de segurança e de custo.

Uma análise modal e espectral, por suas características de simplicidade e generalidade, atende aos reclamos deste terceiro grupo sobre o qual focaliza-se a atenção do presente desenvolvimento, no que se segue.

Assim, a análise espectral encontra, neste novo contexto, outras circunstâncias além das identificadas anteriormente:

- trata-se de um sistema secundário, SS , acoplado a outra estrutura, o sistema principal, SP , com o qual mantém uma reduzida relação de massa, normalmente não superior a 0,02; em consequência, a interação entre as propriedades dinâmicas é limitada, mas, por outro lado, o SP funciona como um filtro para a excitação, valorizando e projetando sobre o SS as componentes da excitação de frequências próximas às do SP ;
- a interação entre os dois sistemas, presidida pela relação entre a frequência do sistema secundário, ω_{ss} , e a frequência, ω_{sp} , do SP , pode provocar sensíveis variações entre os espectros de resposta do sistema secundário, calculados de forma acoplada ou não ao SP (Asfura e Der Kiureghian, 1986 ; Gupta, A e Gupta, AK, 1995).
- os sistemas secundários apóiam-se, via de regra, em vários pontos (nós) do SP havendo, durante o movimento, deslocamentos relativos entre os pontos de apoio cuja influência deve ser considerada na produção do espectro [Gupta, AK,1986; Gupta, A e Gupta, AK, 1995];

- os sistemas secundários são estruturas relativamente flexíveis e formadas por elementos de material dútil habilitando-os à dissipação de energia ao longo de fases não lineares e inelásticas do seu desempenho; tal verifica-se quer ao longo dos tubos, quer nas conexões e quer ainda nos pontos de apoio no SP, os chamados suportes (Slagis,1995; Endo e Murota, 1995).

2.3.1.

Movimento relativo dos suportes

O espectro de projeto é um só e é obtido da envoltória dos espectros para cada apoio do SS. É evidente que este procedimento deixa de lado qualquer consideração de deslocamento relativo entre suportes, pois cada espectro é gerado simplesmente a partir do movimento registrado no ponto de apoio do SS, e qualquer espectro produto deles tem as mesmas características. As regras de aproximação utilizadas para combinar os modos não são capazes de considerar as correlações cruzadas entre as várias excitações dos pontos de apoio.

Gupta, AK (1986), baseado em estudos anteriores, apresenta um método para avaliar a resposta de sistemas secundários levando em consideração os efeitos de interação e a correlação entre as respostas dos vários movimentos dos suportes. No entanto, na prática, uma fonte de dificuldade está no fato de que o modelo estrutural não é suficientemente detalhado para levar em consideração apropriadamente os movimentos dos suportes.

2.3.2.

Acoplamento dos sistemas

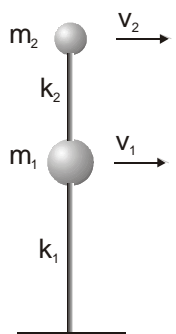
Um dos pontos que tem sido discutido e recebido contribuições a respeito das conseqüências do acoplamento dos sistemas que compõem a estrutura é a interação das propriedades dinâmicas dos sistemas principal (SP) e secundário (SS). Tal atitude, chamada de análise acoplada, se feita diretamente, apresenta dois inconvenientes: o aumento substancial do número de graus de liberdade – muitas vezes, o sistema secundário tem um número expressivamente maior de graus de liberdade que o principal – e o acoplamento de dois sistemas com

propriedades bem diferentes. Buscam-se, então, procedimentos que levem em conta os efeitos sem realizar um acoplamento formal.

Imagine-se que se está produzindo um espectro de resposta acoplada para um sistema secundário e se recorde que o sistema principal pode ser admitido constituído por uma série de sistemas com um grau de liberdade (configuraes), cada um com freqncia natural circular, $\omega_{sp} = \omega_{oi}$; assim sendo, para valores das freqncias do sistema secundário, ω_{ss} , próximos das freqncias naturais do sistema principal, o conjunto SP-SS funciona como um sistema com dois graus de liberdade, uma vez que a sua resposta  dominada pela parcela ressonante proveniente da interao entre as duas freqncias próximas; lembre-se, complementarmente, que predominam na cinemática dos nós de apoio do SS no SP os harmônicos do sismo abrangidos pelo canho¹ da funo de transferência da excitao sísmica desde o seu ponto de controle, para os nós em foco.

Eis porque, a seguir,  feita uma avaliao da influência dos parâmetros individuais de rigidez e massa de dois sistemas de um grau de liberdade não amortecidos e acoplados. Esta avaliao  proposta por proporcionar a entrada na natureza do problema em questão.

Considerando a equao de equilíbrio para vibrao livre do sistema com dois graus de liberdade não amortecido (Figura 2.3), tem-se:



$$[M]\ddot{v} + [K]v = 0 \quad (2.14)$$

onde: $[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix}$, $[K] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix}$ e $\{v\} = \begin{Bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{Bmatrix}$

Figura 2.3– Sistema com dois graus de liberdade (S2GL)

¹ Região da funo de transferência de intensa amplificao.

A soluço harmônica da equaco de movimento pode ser escrita como:

$$v_1 = V_1 \cos(\omega_0 t - \alpha) \quad (2.15)$$

$$v_2 = V_2 \cos(\omega_0 t - \alpha) \quad (2.16)$$

onde: V_1 e V_2 são amplitudes de deslocamento e ω_0  a freqncia circular do S2GL. Substituindo-se as expressões de v_1 e v_2 na equaco de movimento, e sabendo-se que, para o sistema ter soluço, o determinante da matriz dos coeficientes deve ser igual a zero, tem-se:

$$\omega_0^4 - \omega_0^2 \frac{k_2}{m_2} - \omega_0^2 \frac{k_1}{m_1} + \frac{k_1}{m_1} \frac{k_2}{m_2} - \omega_0^2 \frac{k_2}{m_2} \frac{m_2}{m_1} = 0 \quad (2.17)$$

Sendo ω_{sp} a freqncia circular do sistema chamado principal (m_1, k_1), ω_{ss} a freqncia circular do sistema chamado secundário (m_2, k_2), γ a relao entre as massas m_2 e m_1 e fazendo, ainda, $\eta = \frac{\omega_0}{\omega_{sp}}$ e $\beta = \frac{\omega_{ss}}{\omega_{sp}}$, então:

$$\omega_{sp}^2 = \frac{k_1}{m_1} \quad \omega_{ss}^2 = \frac{k_2}{m_2} \quad (2.18)$$

$$\eta^4 - (1 + (1 + \gamma)\beta^2)\eta^2 + \beta^2 = 0 \quad (2.19)$$

As duas raízes positivas desta equaco estão graficamente representadas na Figura 2.4. Para valores de γ próximos de zero têm-se duas raízes positivas: $\eta = 1$ e $\eta = \beta$, ou seja, as duas freqncias do S2GL assumem valores iguais  freqncia do SP ou  do SS, sendo a freqncia fundamental aquela que for menor.

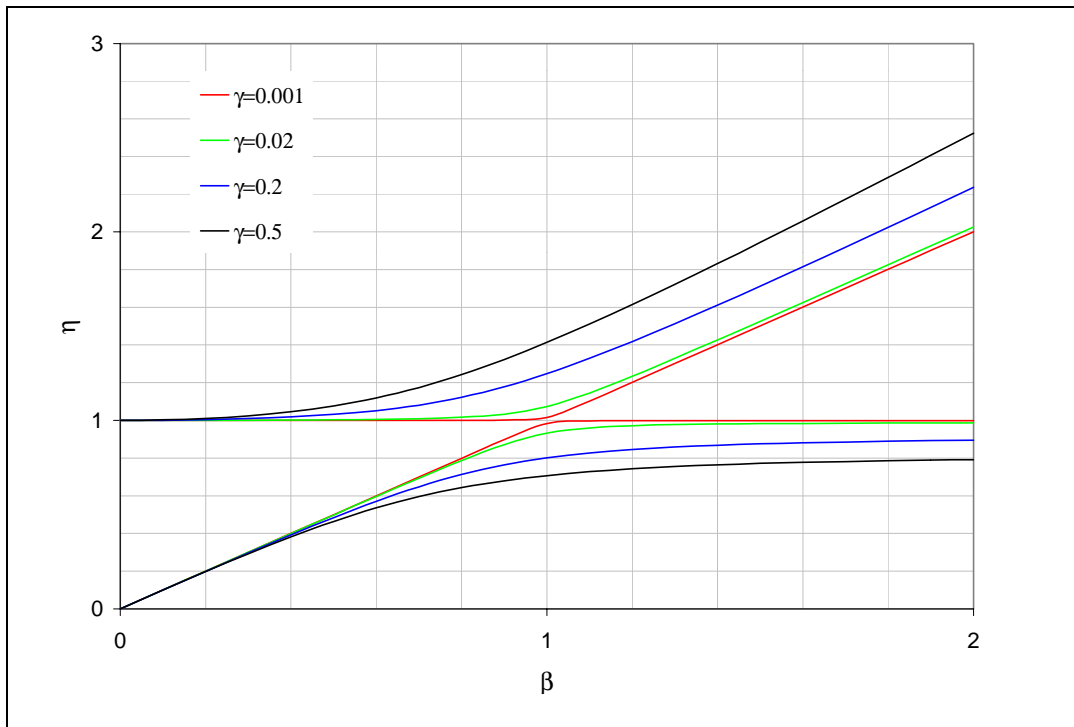


Figura 2.4– Primeiro e segundo modo do S2GL em função da frequência do sistema secundário, normalizado pela frequência do sistema principal.

Quando $\gamma \neq 0$ identificam-se três regiões:

1ª região ($\beta \leq 0,2$) – neste caso, as massas m_1 e m_2 vibram como se fossem independentes, sendo as frequências do S2GL iguais ao caso de valores de γ próximos de zero.

2ª região ($0,2 < \beta \leq 1,2$) – interação de rigidezes e massas.

3ª região ($\beta > 1,2$) – preponderância da interação entre as massas m_1 e m_2 .

Desta maneira, a influência da interação entre as frequências do sistema principal com as do sistema secundário pode ser analisada por sucessivas aplicações dos gráficos da Figura 2.4 ao longo da faixa de interesse do sismo (0,2 Hz – 20 Hz).

Tal estudo pode concluir por diferenças sensíveis entre os espectros acoplados e desacoplados, como já mostrado, quer a favor da segurança quer no sentido inverso (Gupta, AK; 1986). O ponto não é o de se encontrar um recurso para

reduzir a demanda do sismo sobre a estrutura. O que se deve ter em mente é que um espectro de resposta acoplada é mais consistente com a análise em curso, seja no tempo ou na frequência, e como a sua implementação é relativamente simples, ainda que trabalhosa, o seu emprego deve ser recomendado.

O acoplamento entre os sistemas principal e secundário tem sido objeto de estudo de diversos trabalhos como o de Valverde (1998), Gastanaga (1998) e Sampaio (1999) realizados dentro de uma parceria entre a PUC-Rio e a ELETRONUCLEAR, que tem como objetivo a atualização do conhecimento da análise de estruturas de usinas nucleares brasileiras.

Valverde (1998) propõe espectros de resposta acoplados para o cálculo de SS onde um SIGL é acoplado ao sistema principal em vários pontos de apoio de forma a considerar o deslocamento relativo dos suportes e o acoplamento dos dois sistemas. A Figura 2.5 mostra esquematicamente este procedimento. Aplicando tal metodologia em um modelo de prédio de reator com o auxílio do programa Ansys e no domínio do tempo, ele verifica uma acentuada modificação nos picos de resposta em relação à análise desacoplada corrente. Segundo Valverde a metodologia é trabalhosa e exige esforço computacional extra para modelagem e análise, mas é uma rotina adequada para a extração de espectros de resposta para sistemas com comportamento não linear dos suportes cujos movimentos entre os mesmos estão fortemente correlacionados.

Sampaio (1999) aplica esta metodologia com o auxílio do programa SASSI, no domínio da frequência, aferindo os resultados obtidos no domínio do tempo, mas com esforço computacional reduzido à metade.

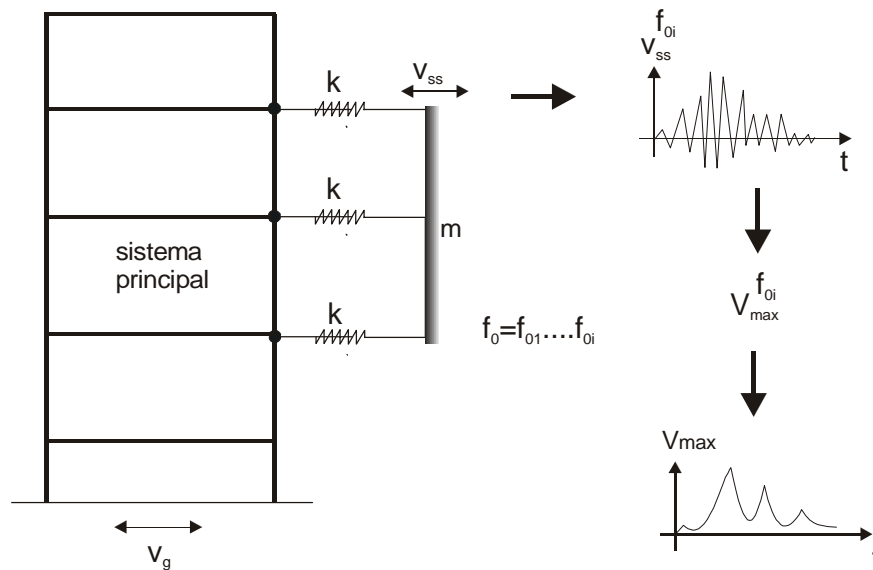


Figura 2.5—Procedimento esquemático para obtenção de espectros de resposta acoplada em vários pontos (Valverde, 1998).

2.3.3. Espectros de resposta acoplada uniformemente provável

Em recente desenvolvimento na PUC-Rio, Diniz de Almeida (2002) propõe a adoção de espectros de resposta de projeto uniformemente prováveis. Tais espectros têm suas ordenadas representando uma barreira com igual probabilidade de não serem excedidas pela resposta de um S1GL excitado, em sua base, por um movimento do solo pertencente a um processo randômico estacionário representado por uma função densidade de espectro de potência.

Na metodologia utilizada, a formulação do problema de primeira ultrapassagem, proposto inicialmente por Vanmarcke (1975), é aplicada para calcular a função de probabilidade da resposta de um S1GL não exceder, por exemplo, um nível de espectro de resposta de projeto especificado. Esta formulação é baseada inteiramente nos momentos da função densidade de espectro de potência.

Estes mesmos procedimentos são aplicados na determinação de espectros de resposta uniformemente prováveis em sistemas principal e secundário acoplados. Isto é feito, aplicando o método de obtenção de espectros acoplados sugerido no

trabalho de Valverde (1998) modificado de tal forma a considerar o espectro uniformemente provável.

2.3.4. Consideração das não linearidades

Segundo Roeset (1998), em oposição aos edifícios regulares que são projetados com a suposição de que irão experimentar grandes deformações inelásticas sob terremotos severos, as estruturas de usinas nucleares são projetadas para permanecerem linearmente elásticas mesmo sob um terremoto SSE². Uma quantidade de comportamento inelástico é implicitamente admitida com a permissão de considerar valores de amortecimento maiores para o SSE do que para o DBE³, mas se supõe ser muito pequena. Ainda segundo Roeset, a avaliação dos efeitos das não linearidades é a área na qual menor progresso tem sido feito e na qual é necessária uma considerável quantidade de pesquisa.

As não linearidades podem ser geométricas ou físicas e têm origem diversa. Detendo-se no caso das tubulações, identificam-se comportamentos não lineares tanto nos apoios quanto ao longo dos elementos, especialmente nos trechos curvos por serem mais flexíveis que os trechos retos, e nas conexões.

As não linearidades físicas compreendem efeitos de duas naturezas, o escoamento, com a redução de rigidez resultante, implica em queda na frequência do sistema e a resposta resultante segue, naturalmente, o padrão de uma estrutura mais flexível. Dependendo da composição de frequências da excitação, ou do espectro de resposta, este deslocamento da frequência da estrutura pode representar uma redução ou uma amplificação da resposta máxima. A inelasticidade que se segue ao escoamento na fase de descarregamento e em sucessivos ciclos de histerese, produz dissipação de energia que se acumula, para o mesmo valor da resposta máxima. Se a estrutura possui ductilidade suficiente

² Sismo de desligamento seguro para o qual a usina é projetada de forma que, ocorrendo um terremoto a usina possa ser desligada com segurança.

³ Sismo de projeto que serve de base para o dimensionamento dos edifícios “Classe I” das usinas nucleares.

para tal comportamento, o resultado é uma redução no custo da estrutura mais flexível, isto é, mais leve. Daí o interesse em metodizar-se a consideração da ductilidade na metodologia de análise dos sistemas secundários.

Verifica-se que há um conjunto relativamente numeroso de sistemas secundários cuja análise mais conveniente é a modal espectral. Isto leva a uma expectativa de um espectro de resposta acoplada dútil de projeto para sismos.

Grande parte dos trabalhos publicados até hoje, a respeito da consideração de inelasticidade na análise de SS, segue duas tendências principais. Os que buscam a determinação de um fator redutor da resistência baseado na ductilidade do sistema e os que buscam avaliar diretamente os espectros de resposta inelásticos. A última opção é a que produz resultados mais exatos, no entanto, a aproximação que tem atraído maior atenção é a primeira.

Na primeira linha estão, por exemplo, os trabalhos de Vidic et al (1994), Fajfar e Novak (1995), Okeil et al (1995) e Okeil e Tung (1996).

Okeil e Tung (1996), utilizando o programa ANSYS, fazem um estudo paramétrico sobre um sistema idealizado com quatro trechos retos de tubulação de igual comprimento apoiados em molas de igual rigidez. Eles examinam parâmetros como a frequência natural do sistema, o nível da excitação e o nível de escoamento dos suportes. Além deste, um trecho de tubulação real é avaliado. Nos dois casos, os suportes são idealizados como elastoplásticos. Os autores concluem que se é permitido um certo nível de ductilidade no sistema, especialmente nos suportes, estes podem ser projetados para cargas muito menores se o sistema é flexível e propõem um fator redutor da carga do suporte que depende da frequência natural do sistema e da ductilidade.

Vidic et al (1994) e Fajfar e Vidic (1994), em dois artigos conjuntos, trabalham na determinação de espectros de resposta inelástica consistente. Entende-se por consistentes, espectros que estejam correlacionados e baseados nas mesmas hipóteses. São considerados apenas sistemas de um grau de liberdade e são variados: o movimento da base, a frequência natural, a ductilidade, o

comportamento histerético e o amortecimento dos sistemas. Ao final, os autores propõem uma expressão bilinear para um fator de redução da resistência, R , tal que:

$$F_y = \frac{mA_e}{R} \quad (2.22)$$

onde A_e é o valor nos espectros de pseudo aceleração elástica.

Este fator depende do nível de utilidade, do comportamento histerético e do amortecimento. Tal expressão é uma aproximação feita com procedimentos de tentativa e erro e baseada nos resultados do estudo paramétrico. Fajfar e Novak (1995) estendem este estudo para sistemas desacoplados principal e secundário, de um grau de liberdade, considerando apenas o sistema principal inelástico.

Seguindo a proposta de determinação direta da resposta inelástica do SS, Aoki e Watanabe (2000) trabalham com uma barra de um vão engastado e livre com comportamento histerético bilinear do apoio sujeito a uma excitação harmônica; uma solução aproximada da resposta da viga é obtida. Singh et al (1996) estudam a amplificação do espectro de resposta de projeto devido ao escoamento do sistema principal. Lin e Mahin (1995) estudam o efeito do escoamento do sistema principal na cinemática da base do sistema secundário.

Adam e Fotiu (2000) aplicam uma técnica para avaliar o comportamento de um oscilador simples acoplado a um pórtico de quatro andares. Ambos com comportamento elastoplástico. Nesta técnica é considerado o acoplamento modal apenas nas frequências de sintonia, ou seja, quando o pórtico e o oscilador têm frequências naturais próximas.

Em geral, os trabalhos apontam para uma redução nos picos de resposta, no caso de sistemas sintonizados, devido à absorção da energia de vibração pelo comportamento inelástico. E, em alguns casos de SVGL, o pico de aceleração na região de baixos períodos é amplificado, ao invés de ser reduzido, devido aos efeitos dos modos altos. Além de modificar a amplitude da resposta, o escoamento

da estrutura também provoca altera es nas configura es modais e nas frequências naturais do sistema.

Considerando as não linearidades físicas, uma singular característica, observada no comportamento de trechos de tubula o quando submetidos a ensaios dinâmicos,   o acúmulo progressivo de deforma o, ciclo a ciclo, induzido pela sobreposi o de um carregamento primário, considerado constante, e um carregamento secundário cíclico. Este fen meno conhecido como “ratchetting”, passa a ser designado de catraqueamento, termo usado em manobras mecânicas com catracas.

O catraqueamento pode ser classificado como mecânico, no caso de carregamento cíclico mecânico, ou térmico, quando o carregamento cíclico   devido a uma distribui o de temperatura. Causa deforma o cíclica do material que pode resultar em “crescimento incremental cíclico da estrutura” (Burgreen, 1975), ou seja, a deforma o se acumula na dire o da tensão média com o acréscimo de números de ciclos.

De forma a ilustrar melhor o fen meno, Chaboche e Nouailhas (1989) consideram um caso de teste uniaxial de tensão, traço e compressão. Para cada ciclo pode-se definir a deforma o plástica   traço (ϵ^{pt}), a deforma o plástica   compressão (ϵ^{pc}), a faixa de deforma o plástica ($\Delta\epsilon^p$) e a deforma o plástica progressiva ($\delta\epsilon^p$) como na Figura 2.6 , assim:

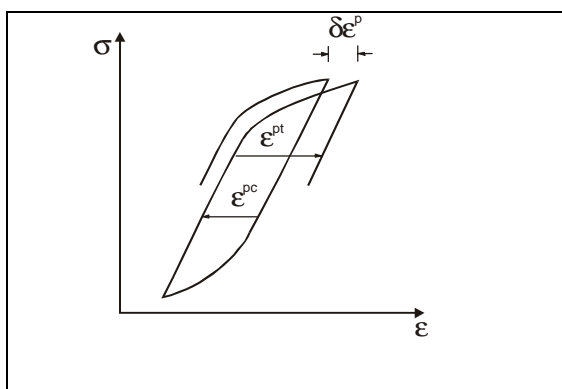


Figura 2.6 – Defini o da faixa de deforma o inelástica e da deforma o por catraqueamento.

$$\Delta\epsilon^p = \frac{1}{2}(\epsilon^{pt} + \epsilon^{pc}) \quad (2.22)$$

$$\delta\epsilon^p = \epsilon^{pt} - \epsilon^{pc} \quad (2.23)$$

Sob condies uniaxiais, pode-se considerar a tensão média como o carregamento primário e tensão cíclica como secundário. Quando a tensão média tem um valor pequeno em relao ao nível de trabalho das tensões (Figura 2.7a), ou seja, baixo carregamento primário e alto secundário, a deformaco plástica  traço e  compressão são da mesma ordem de grandeza e a deformaco por catraqueamento é muito pequena ($\delta\epsilon^p \ll \Delta\epsilon^p$). Se, ao contrário, a tensão média  alta em relao ao nível de tensões e é positiva, então $\epsilon^{pt} \gg \epsilon^{pc}$ e, então, $\delta\epsilon^p > \Delta\epsilon^p$. No caso limite, (Figura 2.7b), quando a deformaco plástica em compressão é nula, o catraqueamento é puramente um fluxo inelástico monotnico.

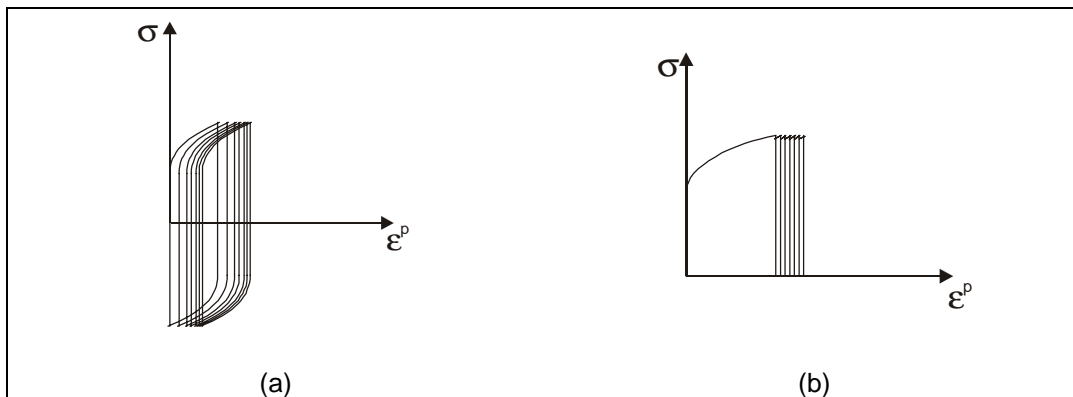


Figura 2.7 – a) Diagrama tensão deformaco – baixa tensão média. b) Diagrama tensão deformaco – caso limite ($\epsilon^{pc} = 0$).

É ainda chamada atenco para a necessidade de se distinguir, no catraqueamento, um período transiente e um assintótico. Na Figura 2.8 observa-se a evoluo da deformaco plástica com o número de ciclos de carregamento. Em uma fase inicial, ha acréscimo de deformaco plástica com o número de ciclos, período transiente, que pode se estabilizar resultando em um “shakedown” ou evoluir de forma assintótica. Este último é o que caracteriza o fenmeno de catraqueamento.

Assim sendo, o catraqueamento depende da relao entre a carga axial permanente considerada e o carregamento cíclico. Burgreen (1975), analisa um elemento de placa submetida  carga permanente de traço distribuída por unidade

de comprimento, P , e flexão cíclica com controle de deforma o que produz tensões normais σ_b e determina, para este caso, os limites da rela o entre as tensões relativas σ_p/σ_y e σ_b/σ_y , para os quais se verifica a ocorrência de catraqueamento, ou seja, determina estas rela es a partir da hipótese de que o acréscimo da deforma o plástica após um ciclo completo de carregamento seja maior que zero. Com base em gráfico apresentado no mesmo trabalho,   proposto o diagrama da Figura 2.9 para entendimento geral dos limites de ocorrência do catraqueamento. Gráficos como este prestam-se a organizar planilhas de projeto com delimita o parametrizada de regiões a serem observadas para controle do catraqueamento.

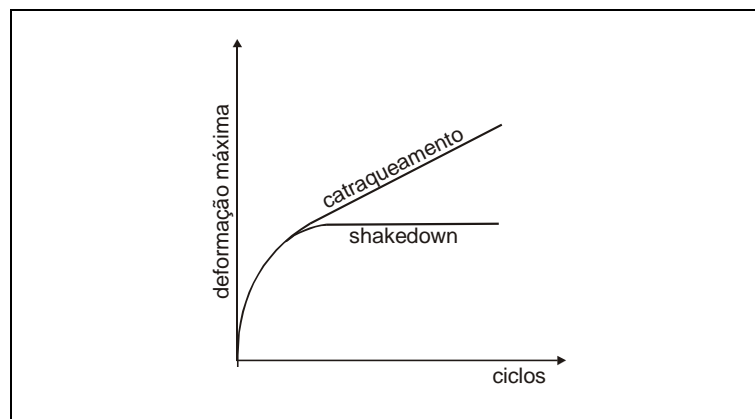


Figura 2.8 – Catraqueamento transiente e assintótico- esquema

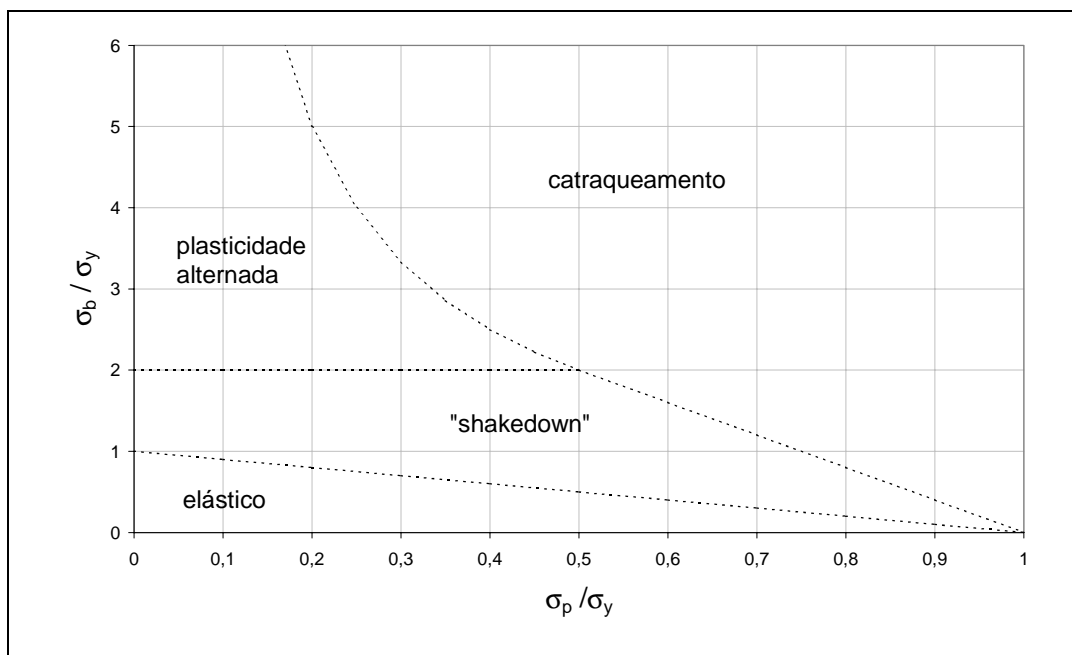


Figura 2.9 – Limites de comportamento do material para o caso de placa de comprimento unitário submetida a carga permanente de traço e carga cíclica de flexão.

O catraqueamento pode resultar em colapso por ruptura direta ou por fadiga de componentes. No entanto, não se sabe ainda o quanto o catraqueamento afeta a vida à fadiga do material. Há dificuldades em sua simulação de forma a concordar com os registros de experimentos em tubulações. Isto se deve, principalmente, à falta de um modelo constitutivo adequado. Diversos trabalhos apontam nesse sentido (Hassan e Matzen, 1998; Ohno, 1997 e 1998; Jiang e Sehitoglu, 1996).

Diante desta breve apresentação a respeito da consideração de não linearidades no sistema secundário cabe repetir o questionamento. Como é possível considerar a inelasticidade do SS, levando em conta a análise espectral, o acoplamento dos sistemas principal e secundário, o movimento relativo dos suportes e ainda, o compromisso probabilístico entre as ordenadas do espectro?

Ou de uma outra forma: Como é possível conjugar as potencialidades dos itens 1.2.1 a 1.2.4 em um espectro de resposta não-linear acoplada uniformemente provável?

3 Metodologia

3.1. Estratégia

Para perseguir os objetivos anteriormente discutidos adota-se a seguinte metodologia de trabalho:

- Desenvolve-se o estudo sobre um modelo de estrutura em 3-D composto por um sistema principal genérico ao qual é acoplado um sistema secundário simplificado de tubulação. O sistema principal é submetido em sua base a um acelerograma representativo de um sismo de projeto e se analisa a sua resposta segundo o plano vertical, xoy, em que está contida a excitação;
- Escolhe-se trabalhar, inicialmente, com um sistema secundário simplificado (SSS), obtido de um trecho de tubulação real e adaptado, em termos de massa e frequência, às relações requeridas com o sistema principal.
- Modela-se o SSS e o SP no programa Ansys (1995). Nesta fase são atribuídas ao SSS propriedades inelásticas de forma que estas representem os possíveis comportamentos não lineares de tubulações submetidas a pressão interna e carregamento dinâmico (sismo).
- Propõe-se a determinação da ductilidade global do SSS avaliando a quantidade de trabalho externo positivo, total e elástico, produzido no sistema. Geram-se curvas de ductilidade que variam com a frequência e o nível de escoamento imposto, isto é, espectros de ductilidade parametrizados pelo fator de escoamento, C .

- Tais curvas são analisadas conjuntamente com os espectros de resposta correspondentes obtidos em determinados pontos do SSS; desta análise sugerem-se relações entre o espectro de resposta linear elástico e o não linear inelástico em função dos fatores de escoamento, C , e de ductilidade, μ .
- As relações acima são utilizadas para a transposição do espectro de resposta acoplada uniformemente provável elástico (ERAUPE), descritos anteriormente, em espectro de resposta acoplada uniformemente provável inelástico (ERAUPIN).

3.2. Sistema secundário simplificado

O sistema secundário simplificado (SSS), esquematicamente representado na Figura 3.1, foi primeiramente proposto por Gastañaga (1998). Gastañaga obtém o modelo a partir de um trecho real de um sistema de tubulação do prédio do reator da usina Angra3, ajusta as suas propriedades geométricas e mecânicas de tal forma que este represente as características dinâmicas de um sistema de tubulação real, mantendo a relação de massas com o sistema principal e as frequências naturais. O modelo é composto de trechos retos e curvos de tubulação apoiados sobre molas translacionais e rotacionais que representam os aparelhos de apoio. A seção transversal do tubo mostra ainda uma camada de isolamento que atua apenas como um carregamento estático adicional.

Neste trabalho são feitas algumas modificações nos comprimentos dos trechos retos para se adequarem geometricamente ao sistema principal utilizado. A relação de massa entre os sistemas principal e secundário continua mantida constante e igual a 0,02. Desta forma, tanto há interação entre as massas nas frequências de sintonia entre os dois sistemas como se trabalha com uma relação próxima da realidade. No entanto, para a obtenção de espectros de resposta acoplada é necessário modificar as frequências naturais do sistema secundário.

Seguindo a rotina proposta por Valverde (1998) para obtenção de espectros de resposta acoplada, o sistema secundário é um S1GL, o que simplifica a manipulação da sua frequência natural. No caso do sistema secundário simplificado (SSS), apresentam-se dois questionamentos: temos um conjunto de frequências para cada posição do espectro e não apenas uma; e, há vários pontos no SSS onde podem ser lidas as respostas.

Escolhe-se a frequência fundamental do SSS como determinante desses conjuntos. Seguindo as recomendações do Regulatory Guide 1.60 - USAEC são adotados os seguintes valores de frequência fundamental: 0,25Hz, 2,5Hz, 5Hz, 9Hz e 33Hz. Para que a relação de massa seja mantida, a densidade e a geometria ficam constantes e varia-se o módulo de elasticidade inicial do material do tubo. Os valores de módulo de elasticidade dos trechos retos e curvos de tubulação são sucessivamente alterados dependendo do conjunto de frequências que se queira trabalhar. Ressalta-se que o coeficiente de rigidez inicial do material dos suportes (apoios) é mantido inalterado.

Na Tabela 3.1, têm-se os valores das relações dos módulos de elasticidade e das frequências fundamentais do SSS. Na Tabela 3.2, os valores das relações das demais frequências do SSS para a sua frequência fundamental. As rigidezes das molas dos apoios são apresentadas na Tabela 3.3. Os valores de densidade para o tubo, o isolamento e o fluido estão na Figura 3.1.

Tabela 3.1– Módulos de elasticidade e frequências fundamentais do SSS

f_{01} (Hz)	E (kN/m ²)
0,25	$1,50 \cdot 10^6$
2,5	$0,47 \cdot 10^9$
5,0	$3,90 \cdot 10^9$
9,0	$14,70 \cdot 10^9$
33,0	$243,60 \cdot 10^9$

Escolhem-se os nós 206 e 210 como paradigmas de uma representação do comportamento global do SSS por serem nós de trechos retos de tubulação e por apresentarem as maiores respostas em termos de deslocamento na direção de

aplicação do sismo. A não linearidade do SSS pode ocorrer ao longo da tubulação, das suas conexões e nos suportes ou apoios. Nos trechos retos dos tubos e nas conexões, ela é definida mediante uma relação bilinear histerética para uma tensão equivalente e a deformação específica, com a segunda tangente igual a 0,3 da tangente do primeiro trecho; para os apoios, a relação entre a força e o deslocamento é também bilinear, sendo a tangente do segundo trecho igual a 0,6 da tangente do primeiro, conforme a Tabela 3.3. Os elementos Combin40 e PIPE20 do programa Ansys são utilizados na simulação deste comportamento não linear, ver item 3.4.

Tabela 3.2– Valores das relações, f_0/f_{01} , das 15 primeiras frequências do SSS para a sua frequência fundamental

$f_{01} = 0,25$ Hz	$f_{01} = 2,5$ Hz	$f_{01} = 5$ Hz	$f_{01} = 9$ Hz	$f_{01} = 33$ Hz
f_0/f_{01}	f_0/f_{01}	f_0/f_{01}	f_0/f_{01}	f_0/f_{01}
1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
1,3	1,7	1,8	1,9	1,5
1,5	1,9	2,3	2,4	1,7
1,9	2,8	3,8	4,0	2,5
2,7	3,1	4,3	4,5	2,6
5,5	4,1	5,4	5,6	3,2
16,8	4,2	5,8	6,1	3,5
17,7	18,0	13,0	7,8	4,3
19,2	20,5	18,5	10,8	4,4
20,5	24,2	24,6	13,9	6,8
23,5	27,1	24,6	13,9	7,0
26,4	35,4	29,3	21,7	10,6
32,9	42,7	29,4	22,1	11,4
35,3	49,0	37,1	31,6	34,9
39,2	49,1	37,3	32,0	35,4

Tabela 3.3 – Valores das rigidezes inicial e final dos elementos de mola, kN ou kN.m

Elemento de mola*	k	k'
mt1	$3,09 \cdot 10^6$	$1,85 \cdot 10^6$
mt2	$8,24 \cdot 10^3$	$4,94 \cdot 10^3$
mr1	$3,09 \cdot 10^{13}$	$1,85 \cdot 10^{13}$

*mt1 – molas transl. nos extremos do SSS; mt2 – molas transl. intermediárias; e mr1 – molas rotac. nos extremos do SSS. (ver Fig 3.1)

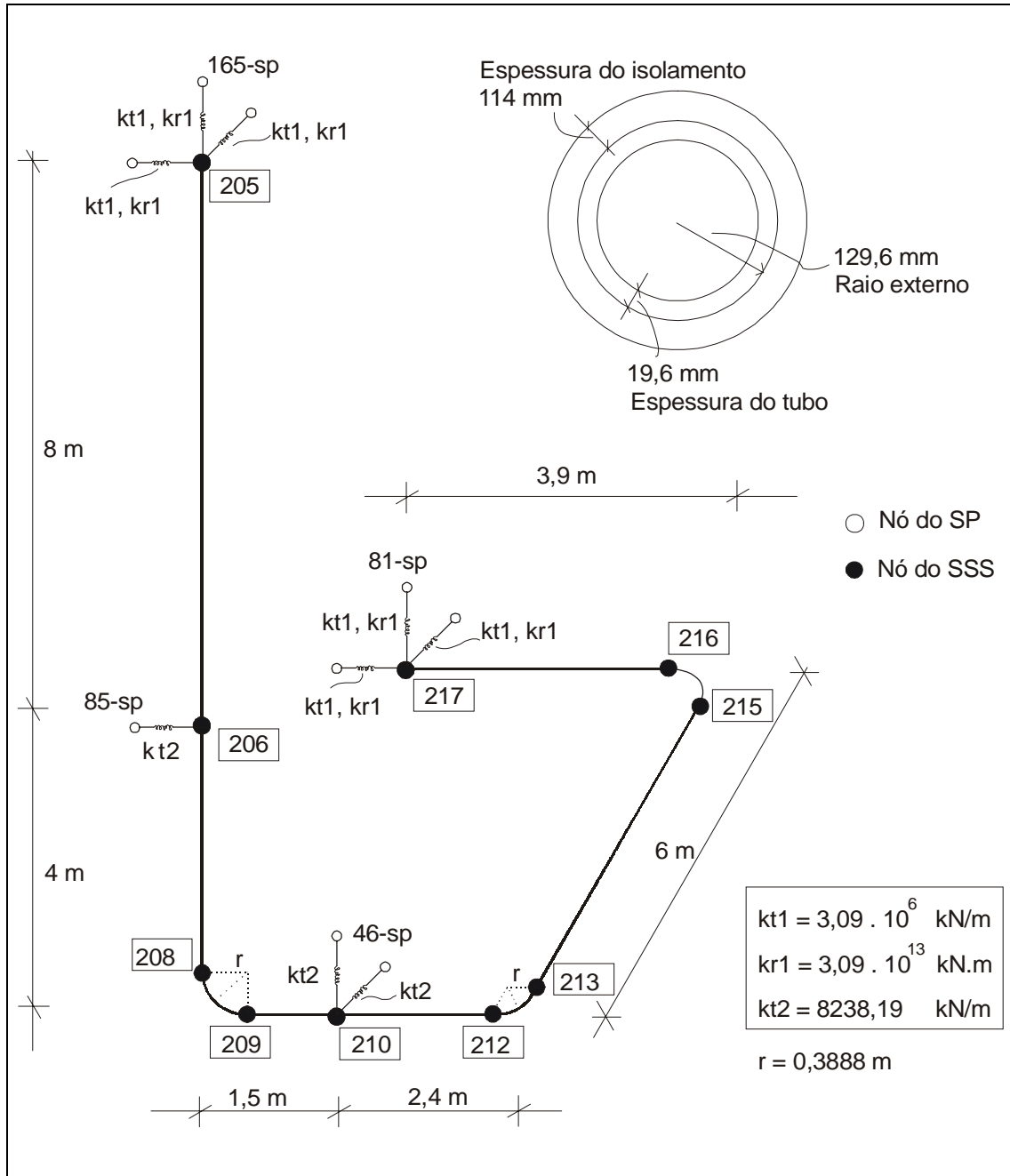


Figura 3.1 – Representação esquemática do sistema secundário simplificado

3.3. Sistema principal

O sistema principal (Figura 3.2) é uma estrutura tridimensional genérica em concreto armado, em forma de pórtico retangular fechado (Diniz de Almeida, 2000) composta por elementos de barra e placa, e massas dos andares concentradas em dois nós separados por uma das diagonais, compondo um sistema com 30 graus de liberdade. O conjunto de frequências deste sistema cobre as típicas de um prédio de reator (Tabela 3.4). A massa total do prédio é igual a 1350 t.

Na Figura 3.3 tem-se um esquema do modelo utilizado, as propriedades das barras (E_v , J_v) e placas (E_p , J_p) e os nós 46, 81, 85 e 165, em destaque, são os que servem de apoio para o sistema secundário.

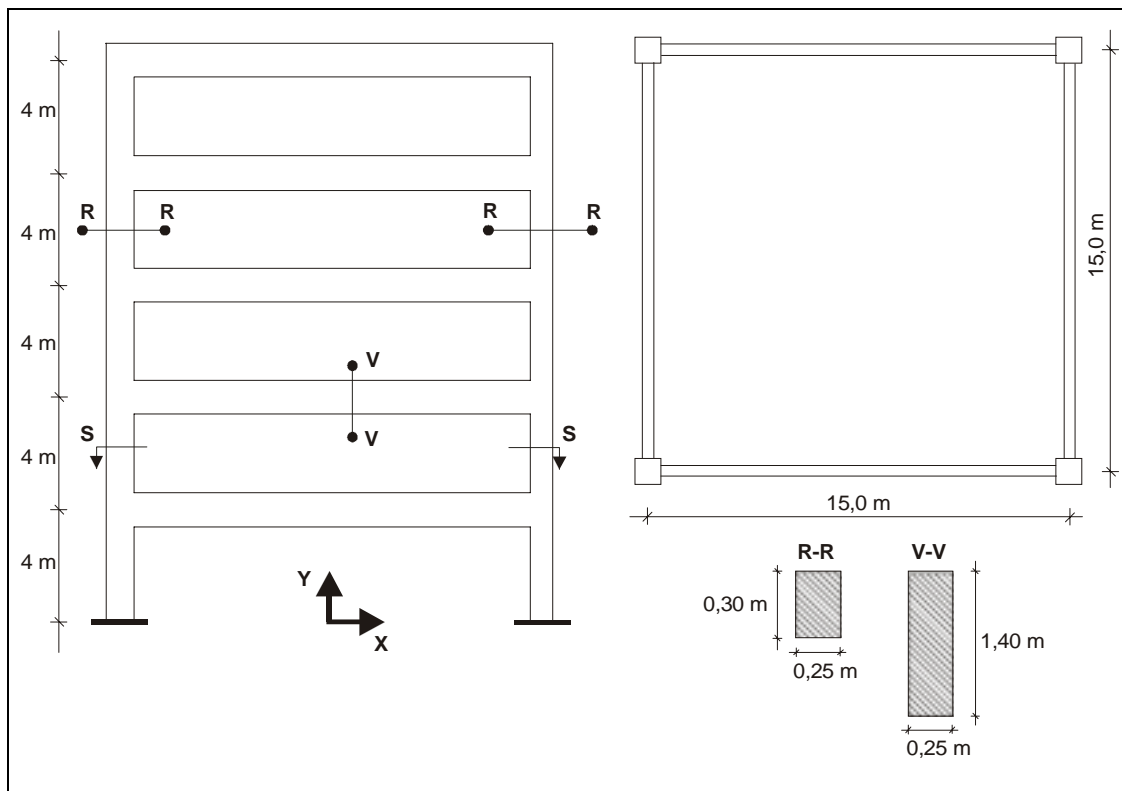


Figura 3.2– Representação esquemática do sistema principal.

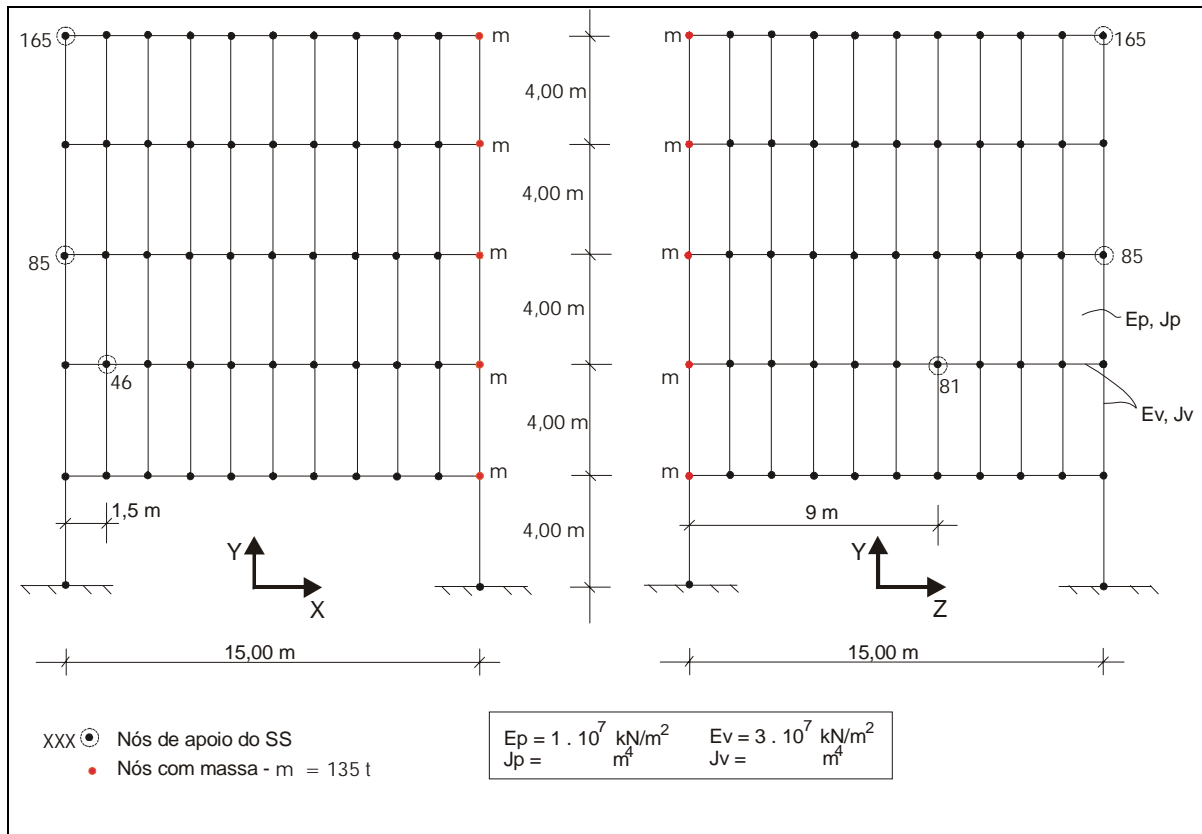


Figura 3.3 – Representação esquemática modelo de barras e placas do SP.

Tabela 3.4– Quinze primeiras freqüências naturais do sistema principal, f_{0pi} , e suas massas modais, m_i .

Modo	f_{0pi} (Hz)	m_i (t)
1	4,59	592,51
2	4,60	596,69
3	4,82	6,05E-24
4	4,94	1,98E-23
5	12,32	5,70E-29
6	12,37	50,32
7	12,91	47,79
8	13,34	8,83E-26
9	17,32	1,28E-28
10	17,53	1,59168
11	20,45	16,21
12	20,49	9,12E-27
13	20,52	16,1864
14	20,57	2,02E-28
15	29,89	9,91E-23

3.4. Modelagem e análise no programa Ansys

A modelagem dos sistemas principal e secundário é feita no programa Ansys (1995), como dito anteriormente. A seguir apresentam-se os elementos estruturais utilizados no SS, uma vez que o SP atua como um filtro da excitação e não está no foco das análises deste trabalho. O sistema secundário, formado por tubos, conexões e aparelhos de apoio é modelado com elementos PIPE20, PIPE60 e COMBIN40.

3.4.1. Elementos PIPE20 e PIPE60

São elementos de tubo uniaxiais com seis graus de liberdade em cada nó: translação nas direções x , y e z locais e rotação em torno dos eixos locais x , y e z . Permitem considerar comportamento não linear do material. A avaliação das tensões é feita em oito pontos de integração em torno da circunferência e em cada extremidade do elemento. Considera-se o elemento como um tubo de parede fina com extremidades fechadas.

O PIPE20 é usado para discretizar os trechos retos de tubulação enquanto o PIPE60 é um elemento de tubo curvo, utilizado para modelar as conexões em curva. As Figuras 3.4 e 3.5 mostram a geometria dos elementos PIPE20 e PIPE60, respectivamente.

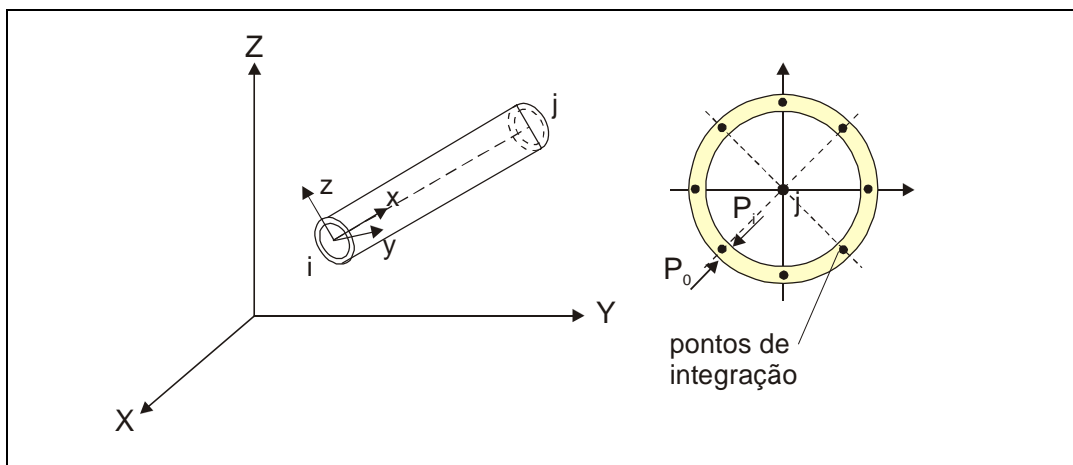


Figura 3.4 – Geometria do elemento PIPE20

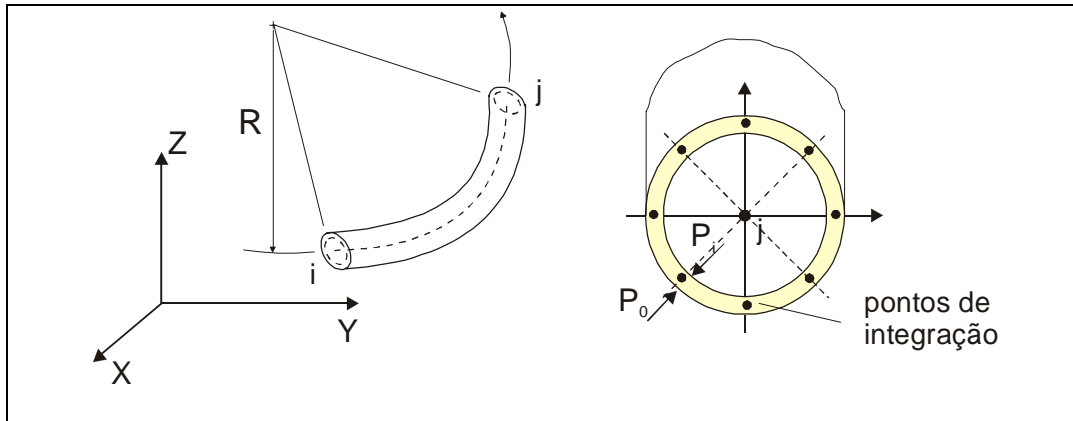


Figura 3.5 – Geometria do elemento PIPE60

3.4.2. Comportamento não linear e inelástico na tubulação – elementos PIPE20 e PIPE60

Os principais conceitos da teoria da plasticidade, que são utilizados quando se assume comportamento inelástico do material nos elementos de tubo do SSS, são brevemente apresentados.

O comportamento plástico de uma estrutura é caracterizado pelas deformações irreversíveis que ocorrem no material quando um determinado nível de tensão é alcançado. Tais deformações dependem tanto do carregamento quanto da história deste.

A função de tensões que delimita o domínio elástico determinando o nível de tensão para o qual o escoamento se inicia é chamado de função de escoamento que pode ser interpretada como uma Tensão Equivalente. A tensão equivalente é uma tensão de comparação com a tensão de escoamento. Assim, no espaço de funções o escoamento é definido por:

$$\sigma_{eq} - \sigma_y = f(\sigma, q) < 0 \quad (3.1)$$

onde σ é o campo de tensões e q são as variáveis de encruamento. Entende-se por encruamento a expansão do domínio elástico com a progressão das deformações plásticas.

Após escoar, a deformação no material pode ser decomposta em uma parcela elástica e outra plástica. Assim, o incremento de deformações fica:

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p \quad (3.2)$$

onde os índices e e p referem-se a elástico e plástico, respectivamente. O incremento de tensões deve-se à parcela elástica do incremento de deformações totais, os quais estão relacionados pela matriz constitutiva elástica, C_{ijkl} , segundo:

$$d\sigma_{ij} = C_{ijkl} d\varepsilon_{ij}^e \quad (3.3)$$

As deformações plásticas podem ser obtidas derivando-se a função de potencial plástico em relação às tensões, σ_{ij} , assim

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} \quad d\lambda \geq 0 \quad (3.4)$$

onde $d\lambda$ é um escalar chamado fator de proporcionalidade que é diferente de zero apenas quando ocorrem deformações plásticas. Este satisfaz às condições de carregamento e de descarregamento e à condição de consistência, que garante que o estado de tensões permaneça na superfície de escoamento. Assim sendo:

$$d\lambda \geq 0 \quad f \leq 0 \quad fd\lambda = 0 \quad d\lambda df = 0 \quad (3.5)$$

No caso de encruamento cinemático, a superfície de escoamento translada como um corpo rígido no espaço de tensões, mantendo a forma, o tamanho e a orientação da superfície de escoamento inicial, Figura 3.6.

Adota-se, neste trabalho, para o comportamento inelástico da tubulação (elementos PIPE20 e PIPE60), o critério de escoamento de Von Mises com regra de fluxo associada e encruamento cinemático.

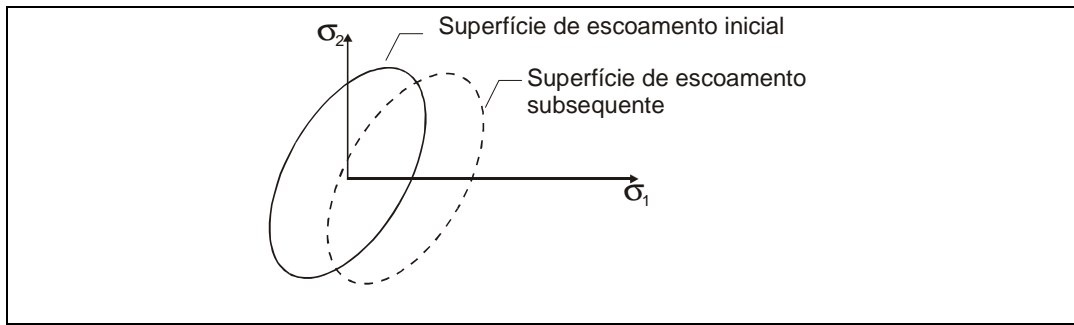


Figura 3.6 – Translação da superfície de escoamento com a progressão do escoamento. Encruamento cinemático.

O critério de escoamento de Von Mises com encruamento cinemático é definido por:

$$\sigma_{eq} = \frac{3}{2} (S_{ij} - \alpha_{ij}) \tag{3.6}$$

onde: S_{ij} é o tensor de tensões desviadoras dado por $S_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} \sigma_{kk} \delta_{ij}$

δ_{ij} o delta de Kronecker e α_{ij} é a variável de encruamento que determina o centro da superfície de escoamento.

3.4.3. Elemento COMBIN40 e comportamento não linear dos suportes

É um elemento discreto que combina propriedades de rigidez e amortecimento em paralelo. Tem apenas um grau de liberdade por nó, que pode ser de translação ou de rotação. É usado para modelar os suportes do SSS. As duas molas atuam em paralelo até que a força no elemento alcance o valor da força F_y , a partir de então, a rigidez do elemento é igual à rigidez da mola 2. O comportamento resultante é bilinear como na Figura 3.7.

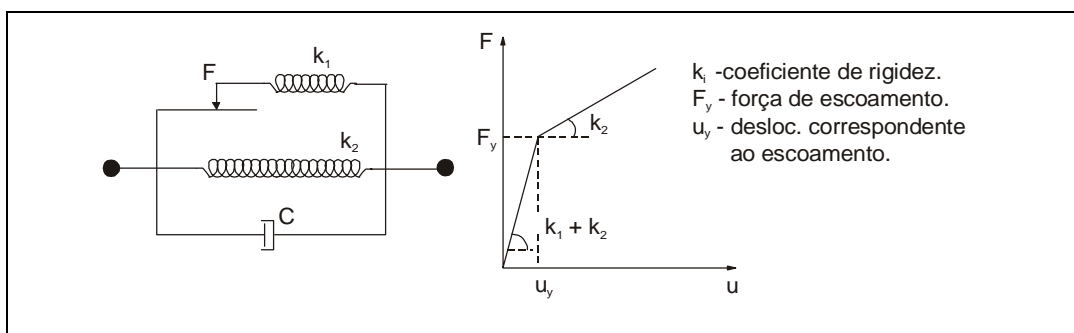


Figura 3.7 – Elemento COMBIN40

3.5. Carregamento no sistema secundário simplificado

O SSS é submetido a carregamento sísmico através do SP na direção do eixo global x-x que pode ou não ser combinado com uma pressão interna na tubulação.

Escolhe-se um sismo de projeto proposto para utilização no projeto da usina Angra 3 e adotado para este trabalho (Figura 3.8). Os acelerogramas artificiais estatisticamente independentes têm ângulos de fase randômicos para o espectro de Fourier (Figura 3.9), são normalizados para aceleração máxima de 0,1g ou 1g, compatibilizados pelo espectro de projeto da Figura 3.10, com duração total de 15 segundos e com 10 segundos na sua fase mais intensa de oscilação. A Figura 3.11 mostra a densidade espectral de potência do sismo fornecendo a distribuição de potência deste ao longo da frequência. Estes quatro gráficos compõem uma caracterização da excitação sísmica.

A pressão interna tem nível constante e relativamente corrente de 250 atm (≈ 250 bars), capaz de produzir uma tensão equivalente máxima na tubulação correspondente a, aproximadamente, 30% da obtida quando o SSS linear elástico está submetido somente ao sismo com aceleração máxima igual a 1g.

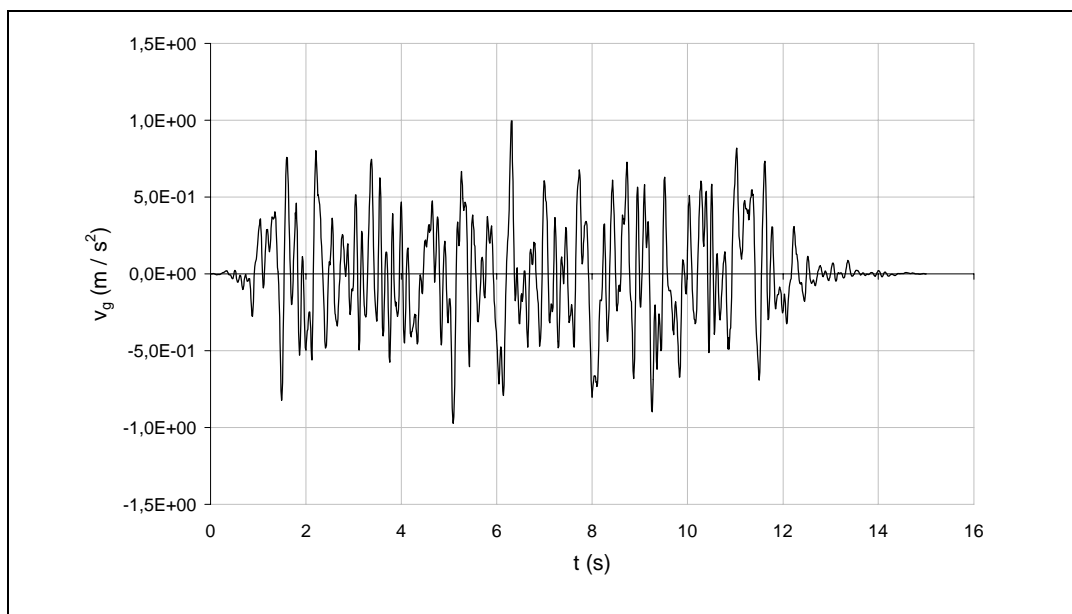


Figura 3.8 – Sismo gerado artificialmente normalizado para uma aceleração máxima de 0,1 g e compatibilizado pelo espectro de resposta adotado para o trabalho.

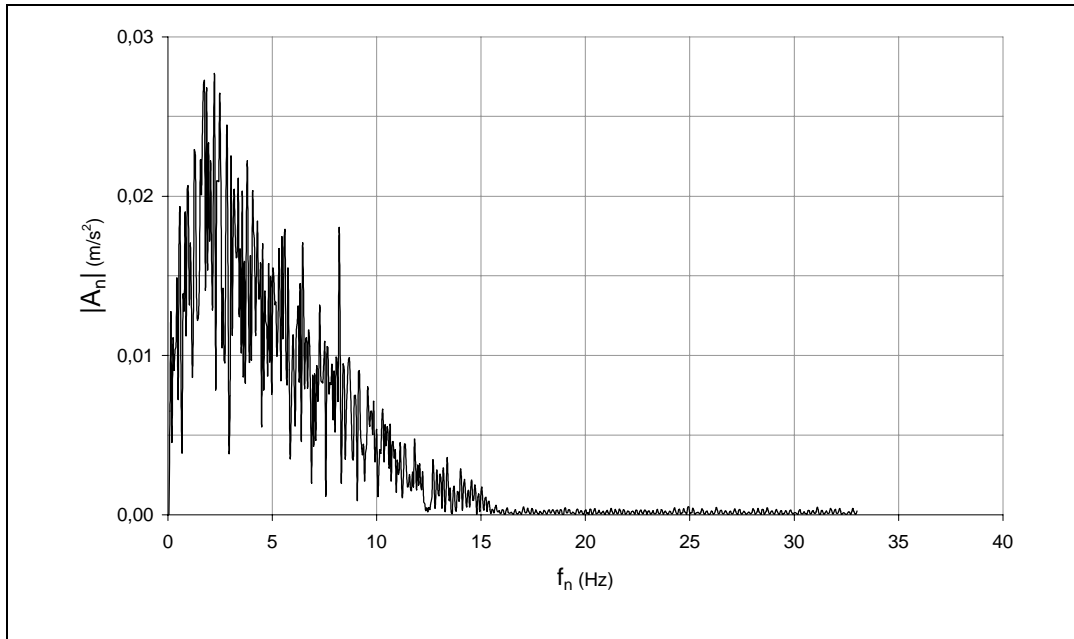


Figura 3.9 – Espectro de Fourier do sismo utilizado. $\ddot{v}_{g \max} = 0,1g$.

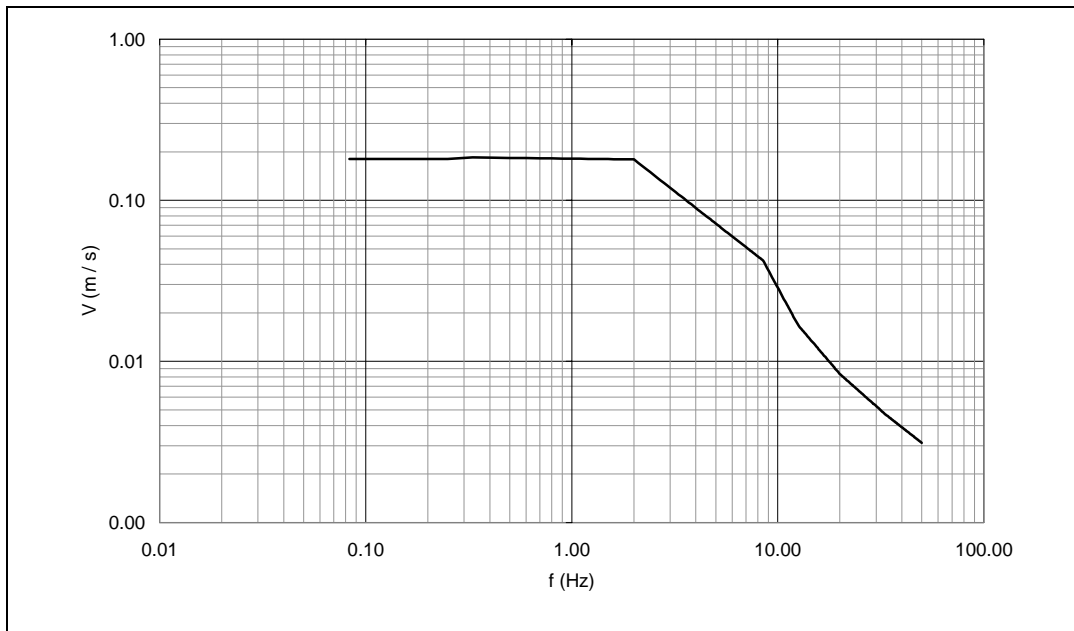


Figura 3.10 – Espectro de resposta de projeto em pseudo velocidade adotado para o trabalho, $\ddot{v}_{g \max} = 0,1g$.

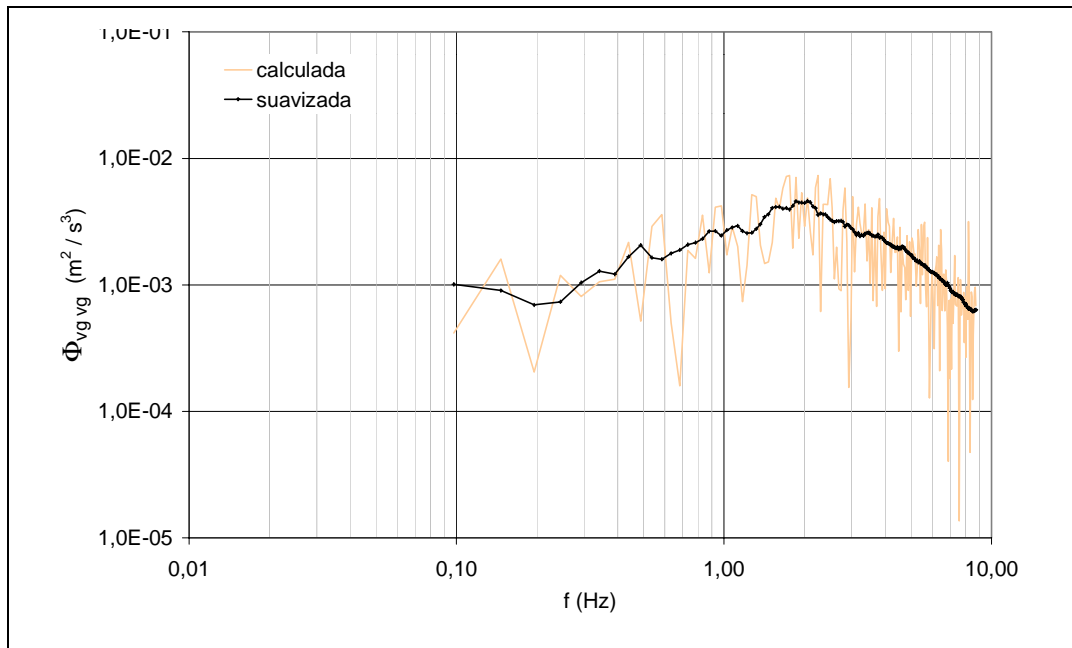


Figura 3.11 – Densidade espectral de potência do sismo, $\ddot{v}_{g \max} = 0,1g$.

3.6. Amortecimento

Geralmente, no caso linear, não é necessário expressar o amortecimento de um SVGL tipicamente amortecido por meio de uma matriz de amortecimento, porque este é mais convenientemente representado em termos de fatores de amortecimento modais, ξ_i . No entanto, no caso de comportamento não linear, para o qual as configurações modais não são fixas, mas variam com as mudanças de rigidez, a resposta dinâmica não é obtida por superposição das respostas modais e então, o amortecimento não pode ser expresso em termos de ξ_i , ao contrário, é necessária uma matriz de amortecimento.

Segundo Clough (1990), é apropriado definir a matriz de amortecimento proporcional para o estado inicial elástico e admitir que as propriedades de amortecimento permaneçam constantes durante a resposta mesmo que a rigidez possa alterar e provocar a perda de energia por histerese somando-se às perdas pelo amortecimento viscoso. Especialmente, no caso de SVGL cuja resposta é dominada por um único modo esta prática é bem apropriada.

No programa Ansys a definição da matriz de amortecimento é feita da seguinte forma:

$$[C] = a_0 [M] + a_1 [K] + \sum_j^{NMAT} a_{1j} [K_j] + \sum_k^{NEL} [C_k] \quad (3.7)$$

onde: $[C]$ - matriz de amortecimento da estrutura;

a_0 - constante de proporcionalidade em relação à matriz de massa;

$[M]$ - matriz de massa;

a_1 - constante de proporcionalidade em relação à matriz de rigidez;

$[K]$ - matriz de rigidez;

NMAT - número de materiais com amortecimento

a_{1j} - constante de proporcionalidade em relação à matriz de rigidez para o material j ;

$[K_j]$ - parte da matriz de rigidez relativa ao material j ;

NEL - número de elementos com amortecimento especificado;

$[C_k]$ - matriz de amortecimento do elemento.

Em análises não lineares, conforme comentado acima, não é recomendado utilizar os amortecimentos fornecidos pelas constantes de proporcionalidade relativas à matriz de rigidez, a_1 e a_{1j} . Assim sendo, e dentro das possibilidades do programa, em uma análise dinâmica não linear é possível definir de duas formas o amortecimento na estrutura, através da constante de proporcionalidade relativa à massa ou através de um elemento de matriz que representa a matriz de amortecimento do elemento, $[C_k]$.

Considera-se, no SSS, um amortecimento proporcional à matriz de massa com fator de amortecimento crítico, ξ , igual a 0,07. A matriz de amortecimento é obtida utilizando-se o fator a_0 , tal que este seja ajustado de forma que ξ esteja definido para o primeiro modo de vibração do SSS isolado. Assim:

$$a_0 = 2\xi\omega_{01} \quad (3.8)$$

onde ω_{01} é a frequência circular fundamental do SSS isolado.

A inclusão do amortecimento no modelo é feita apenas no caso de carregamento de sismo com aceleração máxima igual a 1g combinado com pressão interna de 250 atm, e, por praticidade, chamado de sismo 1g+Pi-7%.

3.7. Fator de escoamento

O fator de escoamento, C , é uma grandeza que relaciona a tensão elástica máxima do sistema com a sua tensão de escoamento como na Equação 3.9. A determinação de C é que define o nível de escoamento a ser utilizado na análise. Para cada caso, é calculada a tensão equivalente elástica máxima e, a partir desta, e do valor de C que se queira trabalhar, é obtido o nível da tensão de escoamento.

$$C = \frac{\sigma_0}{\sigma_y}, \quad C < 1 \quad (3.9)$$

onde σ_0 é a tensão equivalente elástica máxima e σ_y é a tensão de escoamento.

Escolhem-se cinco valores de C de forma que estes cubram de forma uniforme uma faixa representativa de tensões de escoamento. Assim, tem-se C igual a 0,2; 0,4; 0,6 e 0,8.

3.8. Fator de utilidade

Estando o interesse central do estudo focalizado na ocorrência de efeitos não-lineares e inelásticos no sistema secundário, busca-se uma forma de exprimir o conjunto desses efeitos por um índice único, de maneira a propiciar a transposição das observações sobre o comportamento do SSS a um sistema de um grau de liberdade tipo massa-mola-amortecedor. Ainda, para facilitar essa transposição, a resposta não-linear inelástica é relacionada à correspondente resposta linear elástica do mesmo sistema.

Assim sendo, imagina-se exprimir a utilidade do SSS através de uma relação entre parcelas do trabalho total, elástico e inelástico, executado pelo SSS e do trabalho realizado pelo mesmo durante a sua fase elástica. Para a avaliação dessas

parcelas de trabalho lança-se mão das forças externas ao sistema e representadas, em cada nó, pelo produto da massa nodal pela aceleração do terreno a cada instante. Para cada caso de carga, avalia-se o trabalho total positivo produzido por essas forças, T_m , e o somatório das parcelas do mesmo trabalho realizado durante as fases lineares elásticas da resposta de todo o sistema, T_e , isto é, o sistema é considerado em trabalho linear elástico quando todos os seus elementos, tubulações e suportes, assim estão. Define-se como fator de utilidade do sistema, μ , a relação entre estas duas quantidades de trabalho na ordem de sua identificação:

$$\mu = \frac{T_m}{T_e} \quad (3.9)$$

A parcela de μ que excede a unidade passa a representar uma medida da utilidade global do sistema em termos da sua capacidade elástica.

Ilustra-se, a seguir, sobre um exemplo simples, a concepção da forma proposta para avaliação do fator de utilidade.

Considere-se um sistema submetido ao carregamento triangular cíclico da Figura 3.12a. A força e o seu deslocamento resultante estão relacionados na forma bilinear histerética com na Figura 3.12b. Definem-se as grandezas T_e e T_p como o trabalho realizado pela força no regime elástico e plástico, respectivamente. Assim, tem-se:

$$T_e = \int_0^{c t_1} F du = \int_0^{c t_1} \left(\frac{C F_0}{C t_1} t \cdot \frac{C F_0}{C t_1 k} \right) dt = \frac{C \cdot F_0^2}{2k} \quad (3.10)$$

$$T_p = \int_{c t_1}^{t_1} F du = \int_{c t_1}^{t_1} \left(\frac{F_0}{t_1} t \cdot \frac{(u_m - u_y)}{(1-C)t_1} \right) dt = \frac{F_0^2 (1-C^2)}{2\rho k} \quad (3.11)$$

onde: F_0 - força máxima aplicada;

F_y - força de escoamento

C - fator de escoamento

t_1 - duração do primeiro período de carregamento

k - rigidez inicial

ρ - relação entre a primeira e a segunda tangente do gráfico força x deslocamento.

u_y - deslocamento correspondente à força de escoamento

u_m - deslocamento correspondente à força máxima

O fator de ductilidade, na forma proposta, é dado por:

$$\mu = 1 + \frac{T_p}{T_e} = 1 + \frac{1 - C^2}{\rho C^2} \quad (3.12)$$

Além disso, o fator de ductilidade é usualmente calculado como a razão entre o deslocamento máximo e o deslocamento no escoamento. Sendo assim, monta-se uma tabela comparativa entre estas duas formas de cálculo do fator de ductilidade.

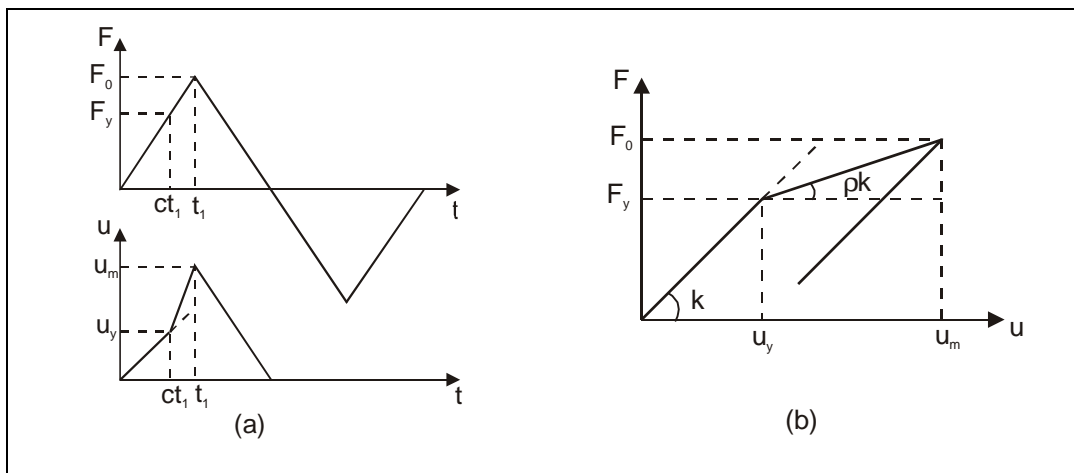


Figura 3.12 – a) Força x tempo e deslocamento resultante. b) Relação bilinear histerética entre força e deslocamento.

Tabela 3.5 – Comparação entre fatores de ductilidade

C	ρ	$\mu = 1 + \frac{T_p}{T_e}$	$\mu' = \frac{u_m}{u_y}$
0,2	0,3	81,00	14,33
0,4	0,3	18,50	6,00
0,6	0,3	6,93	3,22
0,8	0,3	2,88	1,83
0,2	0,6	41,00	7,67
0,4	0,6	9,75	3,50
0,6	0,6	3,96	2,11
0,8	0,6	1,94	1,42

3.9. Espectro de Resposta Acoplada de Projeto Uniformemente Provável Linear

Para servir de base a uma transposição da resposta elástica para a inelástica, seguindo o último item da estratégia adotada, geram-se espectros de resposta acoplada de projeto uniformemente prováveis.

Considerando a sismicidade do sítio definida por uma função densidade de espectro de potência objetivo da aceleração do movimento do terreno, $\Phi_{\ddot{v}_g \ddot{v}_g}^0$, compatibilizada para o mesmo nível de aceleração máxima admitido para o espectro de resposta de projeto, pode-se escrever:

$$\Phi_{\ddot{v}\ddot{v}} = |H(\omega)|^2 \Phi_{\ddot{v}_g \ddot{v}_g}^0 \quad (3.20)$$

$\Phi_{\ddot{v}\ddot{v}}$ - função densidade de espectro de potência da aceleração da massa do S1GL.

$H(\omega)$ - função de transferência de aceleração do ponto onde está definido o movimento de controle para a aceleração da massa do S1GL.

Aproveitando do fato de que a função densidade de espectro de potência do movimento da massa do S1GL traz informações de cunho probabilístico a respeito de tal movimento, Diniz de Almeida (2002) propõe, inicialmente, a determinação de um Espectro de Resposta Uniformemente Provável, ERUP, que, então é estendida para levar em consideração os efeitos do acoplamento entre o sistema principal e secundário, que se faz tão importante na análise.

Tais espectros têm ordenadas que representam os valores máximos da resposta de um S1GL aos sismos pertencentes ao espaço amostral da função densidade espectral de potência objetivo, com igual probabilidade de não serem ultrapassados ao longo de toda a faixa de frequência de interesse.

A metodologia desenvolvida por Diniz de Almeida (2002) é baseada na resolução sistemática de um problema de primeira ultrapassagem na direção inversa, ou seja, a partir da função densidade espectral da resposta de um S1GL, calculada a partir do produto entre a densidade espectral de potência do

movimento da base pelo quadrado do módulo da função de transferência do sistema, obtém-se a probabilidade desta resposta não ultrapassar um determinado nível. Sendo assim, para cada frequência do S1GL está associada uma resposta com a mesma probabilidade de não ser ultrapassada que compõem o ERUP, Figura 3.13.

É válido ressaltar que, na sistemática em questão, aplica-se a formulação sugerida por Vanmarcke apud Diniz de Almeida (2002), no cálculo da função de probabilidade de um S1GL não exceder um nível específico de espectro de resposta. Esta formulação é baseada inteiramente nos momentos espectrais, e é escrita como:

$$F(r) = \left(1 - e^{-\frac{r^2}{2}} \right) \exp \left(\frac{-\frac{1}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{\lambda_2}{\lambda_0}} \cdot \exp\left(\frac{-r^2}{2}\right) \cdot t_d \cdot \left(1 - \exp\left(\sqrt{\frac{\pi}{2}} r \left(\sqrt{1 - \frac{\lambda_1^2}{\lambda_2 \lambda_0}} \right)^{1,2} \right) \right)}{\left(1 - e^{-\frac{r^2}{2}} \right)} \right)$$

(3.21)

onde: r – nível reduzido de resposta

t_d – duração do movimento da base

λ_i - momento espectral de i -ésima ordem

a – nível da resposta em aceleração

ω - frequência circular

$$r = \frac{a}{\sqrt{\lambda_0}} \quad \lambda_i = \int \omega^i \Phi_{rr}(\omega) d\omega$$

Percebe-se pela forma simples e ampla de definição da sismicidade do sítio que o ERUP assim definido é muito apropriado à análise dos sistemas secundários com as características de que são eles portadores e já discutidas anteriormente.

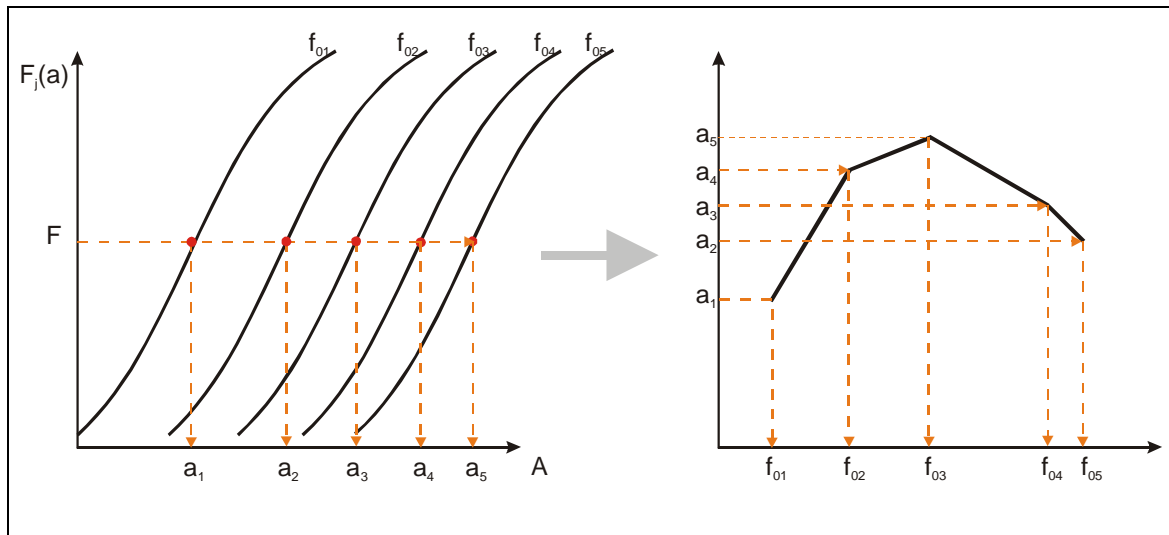


Figura 3.13 – Procedimento esquemático de obtenção do Espectro de Resposta Uniformemente Provável. As ordenadas do espectro são obtidas a partir da fixação da reta horizontal que representa um nível de probabilidade F de não ser ultrapassada.

Assim sendo, e lembrando a metodologia desenvolvida por Valverde (1998) para consideração da interação entre os sistemas, principal e secundário, parte-se para a determinação de Espectros de Resposta Acoplada de Projeto Uniformemente Prováveis.

A análise acoplada é realizada conectando-se ao SP um sistema massa-mola-amortecedor representativo do SS, no ponto onde se deseja obter o espectro de resposta acoplada. Excita-se a base do sistema principal com a densidade espectral de potência objetivo do sismo e varia-se a frequência f_{0j} do SIGL através de sua massa e rigidez. Para cada valor de frequência, f_{0j} , obtém-se uma função de transferência da aceleração do sismo para a aceleração no nó de apoio do SS. Com esta função de transferência e a densidade de espectro de potência objetivo do sismo, $\Phi_{\ddot{v}_g \ddot{v}_g}^0$, determina-se a densidade de espectro de potência do nó de apoio, $\Phi_{\ddot{v}_b \ddot{v}_b}$, do SS que irá excitá-lo. A resposta na massa do SS é então obtida fazendo-se:

$$\Phi_{\ddot{v}_v \ddot{v}_v} = |H(\omega)|^2 \Phi_{\ddot{v}_b \ddot{v}_b}^0 \tag{3.22}$$

onde $H(\omega)$ é Função de Transferência de um S1GL em termos de deslocamento relativo devido a uma aceleração na sua base e dada por:

$$H(\omega) = \frac{1}{k \left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 + 2i\xi \frac{\omega}{\omega_0} \right)} \quad (3.23)$$

A partir da densidade de espectro de potência da resposta do SS, determina-se a distribuição de probabilidade $F_j(a)$. Com as distribuições de probabilidade, prossegue-se a análise e se obtém os valores máximos de resposta para o SS que apresentam a mesma probabilidade de não serem ultrapassados. Esses valores representam as ordenadas do espectro de resposta de projeto acoplada uniformemente provável linear.

4

Ensaio e Resultados para o SSS acoplado ao SP

4.1.

Programação dos ensaios

A seqüência de ensaios realizada segue a metodologia proposta. Trabalha-se inicialmente, com o SSS e varia-se o fator de escoamento, C ; a taxa de amortecimento viscoso no SSS, ξ ; a aceleração máxima do sismo de excitação e a pressão interna na tubulação do SSS. A combinação de parâmetros realizada está organizada no Quadro 4.1.

Quadro 4.1- Combinação de parâmetros do carregamento e do SSS usados nos ensaios.

SSS	carregamento
$f_{01} = 0,25 \text{ Hz}$ $C = 1,0$	$\xi = 0$ Sismo - $\ddot{v}_{g \max} = 1g$ $P_i = 250 \text{ atm}$ Sismo - $\ddot{v}_{g \max} = 0,1g$ $P_i = 0$
$f_{01} = 2,5 \text{ Hz}$ $C = 0,8$	
$f_{01} = 5 \text{ Hz}$ $C = 0,6$	
$f_{01} = 9 \text{ Hz}$ $C = 0,4$	
$f_{01} = 33 \text{ Hz}$ $C = 0,2$	
	$\xi = 7\%$

Na discussão que segue a apresentação dos resultados resolve-se, para um melhor fluxo do texto, nomear os casos pelo carregamento e pelo amortecimento; assim, quando o carregamento é sismo com aceleração máxima igual a $1g$ associada à pressão interna e amortecimento do SSS igual a 7% , passa-se a chamar “Sismo $1g+P_i-7\%$ ” e, seguindo este raciocínio, têm-se também os outros três casos: Sismo $0,1g$, Sismo $0,1g+P_i$ e Sismo $1g+P_i$. A duração da carga sísmica é limitada aos 10 s de sua fase mais intensa.

4.2. Espectros de utilidade

4.2.1. Apresentação

Os espectros de utilidade são gráficos que representam o fator de utilidade em função da frequência fundamental do SSS, f_{01} . São parametrizados pelo fator de escoamento, C , e apresentados para os casos Sismo0,1g, Sismo1g, Sismo 0,1g+Pi e Sismo 1g+Pi-7%.

4.2.2. Análise geral para carga sísmica

O aspecto geral dos espectros de utilidade (Figura 4.1 a 4.4) é o de uma função de transferência da cinemática do ponto de controle para os nós do SSS e através do SP (Figura 4.6). Em razão disto o espectro apresenta três regiões distintas.

Região central - identificada pelas frequências do SSS que se aproximam das frequências naturais do SP na direção da solitação sísmica, esta região coincide com o canhão principal da função de transferência de potência do sismo para o sistema secundário e, no presente ensaio, coincide com o intervalo 5-15 Hz.

Ainda nesta região, pode ser sentido o comportamento característico dos sistemas não lineares inelásticos de se apresentarem como sistemas mais flexíveis, acarretando uma queda nas suas frequências naturais, e uma maior possibilidade de dissipação de energia por histerese. Estas duas propriedades respaldam a largura desta região e os valores máximos do fator de utilidade obtidos para diferentes valores de C .

Os fatores de utilidade, nesta região, são da ordem de 15 para fator de escoamento, C , igual a 0,2 e da ordem de 3 para C igual a 0,4. Para C igual a 0,8, μ é menor que 1,2.

Mesmo para valores distintos de aceleração máxima do sismo (Figura 4.1), o fator de ductilidade permanece constante quando não há presença da pressão interna. Lembra-se que a tensão de escoamento é estabelecida a partir da tensão elástica máxima para cada caso em particular. Assim sendo, isto seria de se esperar, pois os deslocamentos e tensões são reduzidos de um fator igual ao utilizado para normalização da aceleração máxima do sismo e o fator de ductilidade é calculado a partir da razão entre os trabalhos total e elástico.

No entanto, a presença da pressão interna altera estas relações, pois sendo constante, seja associada ao sismo 0,1g ou ao sismo 1g, tem influência relativa muito maior no caso em que o sismo tem menor amplitude, conforme é comentado posteriormente.

Região extrema esquerda - caracterizada por um percurso assintótico ao comportamento do SS com a rigidez da tubulação decrescendo progressivamente por redução do módulo de elasticidade, E. (Figura 4.7a).

À medida que a tubulação perde rigidez seu comportamento tende ao de um sistema inteiramente flexível que permanece parado assistindo a vibração do SP e a de seus apoios neste, já que a rigidez dos apoios permanece constante e, no modelo, há massa concentrada nos nós intermediários tubo-apoio, o 206, por exemplo. Desta maneira, a ductilidade do SS é resultante do efeito conjunto dos apoios que oscilam isoladamente sob a tubulação parada.

Região extrema direita - encontra-se o SSS tendendo para uma situação de extrema rigidez interna da tubulação na qual ele transforma-se em um sistema com um grau de liberdade, com massa única, a da tubulação, ligada ao SP pelos apoios que são mantidos com os coeficientes de rigidez constantes, ainda que com um nível de escoamento variando com o fator C. Este sistema apresenta, no limite, uma frequência natural de 69,2 Hz e as assíntotas para as curvas de ductilidade para C variável, são as correspondentes a tal situação, Figura 4.7b.

4.2.3. Pressão interna

Na análise desta situação convém iniciar refletindo quanto aos efeitos gerais da presença da pressão interna sobre o comportamento do SSS.

Em primeiro lugar, a pressão interna impõe um nível de tensão equivalente positivo que provoca um deslocamento do gráfico de tensões equivalentes, devido ao sismo, nos elementos de tubo. Desta forma, os picos negativos de tensão têm a sua amplitude reduzida e a dos positivos aumentada; as incursões não lineares, em consequência, são reduzidas em número.

O resultado deste efeito é uma antecipação do escoamento e uma redução do fator de ductilidade na região central do espectro. A antecipação do escoamento impede a avaliação da ductilidade na região esquerda do espectro, pois o sismo já encontra a tubulação escoada pelo efeito da pressão interna e, para alguns casos como o de $C = 0,2$, interrompe a avaliação na região central.

No entanto, isto só pode ser sentido quando as tensões devidas à pressão interna têm valor significativo em relação às devidas à amplitude do sismo, como é o caso para sismo $0,1g+P_i$.

Para níveis mais altos de aceleração do sismo, mantendo-se a pressão interna, o efeito se concentra, simplesmente, em uma redução da ductilidade na região central e de baixas frequências do espectro.

Os gráficos das Figuras 4.8 a 4.11 representam, para quatro frequências do SSS e para $C = 0,2$, os períodos elásticos e inelásticos do SSS para três casos de carregamento: sismo $1g$, sismo $1g+P_i$ e sismo $1g+P_i-\xi=7\%$. Na parte superior do gráfico, os pontos plotados correspondem aos instantes em que algum elemento do SSS, seja de apoio ou de tubulação, está em regime inelástico e, na parte inferior, quando todos estão em regime elástico linear.

Observa-se, então, para a frequência de 0,25Hz que o acréscimo da P_i (casos não amortecidos) resulta em um maior número de incursões inelásticas, nos primeiros instantes de aplicação do sismo, apesar disto, o fator de ductilidade pouco se altera, havendo inclusive uma redução deste (Figura 4.5). Já para as frequências de 5, 9 e 33 Hz, que representam sistemas menos deformáveis, os períodos de inelasticidade e elasticidade coincidem tanto para o caso de excitação sísmica isolada quanto para o caso de excitação sísmica associada à pressão interna, mas os valores numéricos de ductilidade são ligeiramente diferentes (menores). Isto ocorre porque apesar de o sistema total estar escoando nos mesmos períodos para os dois casos, a distribuição do escoamento é diferente dentro do SSS, modificando os deslocamentos nodais e, conseqüentemente, o fator de ductilidade associado.

4.2.4. Amortecimento

Com a inclusão do amortecimento, tem-se uma variação do fator de ductilidade, Figura 4.4, que pode ser positiva ou negativa dependendo da frequência e que é mais significativa na região central do espectro, como era de se esperar. Para a frequência de 9 Hz a redução é de 70%.

Voltando às Figuras 4.8 a 4.10, mas se detendo no efeito do amortecimento, observa-se que a quantidade e a extensão dos períodos inelásticos é maior com a inclusão do amortecimento nas frequências do SSS iguais a 0,25 Hz e 5 Hz. Nas frequências de 9 e 33 Hz, ocorre o oposto. Daí as variações observadas no parágrafo anterior.

Para explicar mais tal comportamento, recorda-se a forma de obtenção das tensões de escoamento para cada caso. É feita uma análise linear elástica e obtida a tensão equivalente máxima, que serve de parâmetro para a fixação do nível de escoamento. Ora, tomando-se como paradigma o elemento de tubo, número 399, o mais solicitado na análise linear, e se observando o gráfico das tensões equivalentes pode-se explicar o comportamento diferenciado nas frequências 5 e 9 Hz com a seguinte argumentação. As Figuras 4.12 e 4.13 mostram tais gráficos,

respectivamente, para estas frequências e para as respostas não amortecidas e amortecidas, e mostra ainda linhas que representam as tensões correspondentes ao nível de escoamento com $C=0,2$. A região do gráfico, em cada situação, amortecida ou não, em que os valores das tensões ultrapassam o seu correspondente nível de escoamento, identifica o potencial do seu desempenho inelástico. Desta maneira, comparando-se as duas respostas não amortecidas observa-se um potencial maior para a frequência de 9Hz enquanto que, para as respostas amortecidas, o potencial maior é para frequência de 5 Hz. Justifica-se assim, o aparente comportamento díspar, quanto ao fator de utilidade, entre as frequências de 5 e 9 Hz.

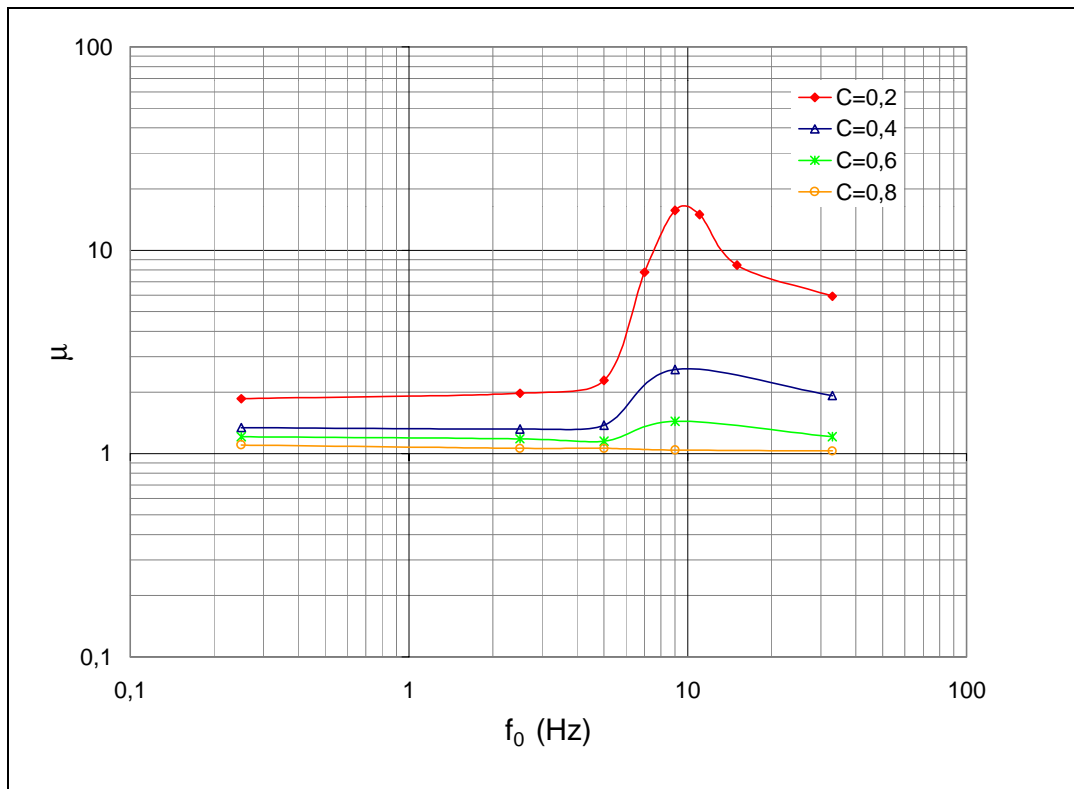


Figura 4.1 - Espectro de utilidade para o SSS acoplado ao SP, parametrizado pelo fator de escoamento, C. Sismo1g e Sismo0,1g

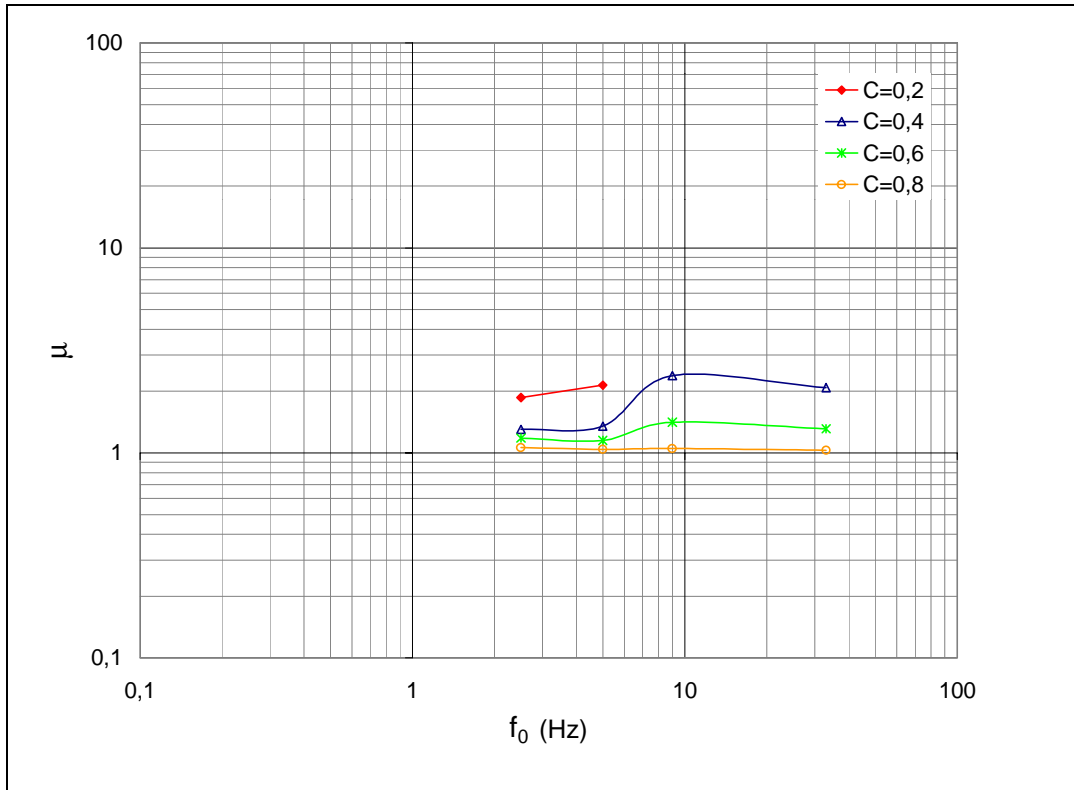


Figura 4.2 - Espectro de utilidade para o SSS acoplado ao SP, parametrizado pelo fator de escoamento, C. Sismo0,1g +Pi

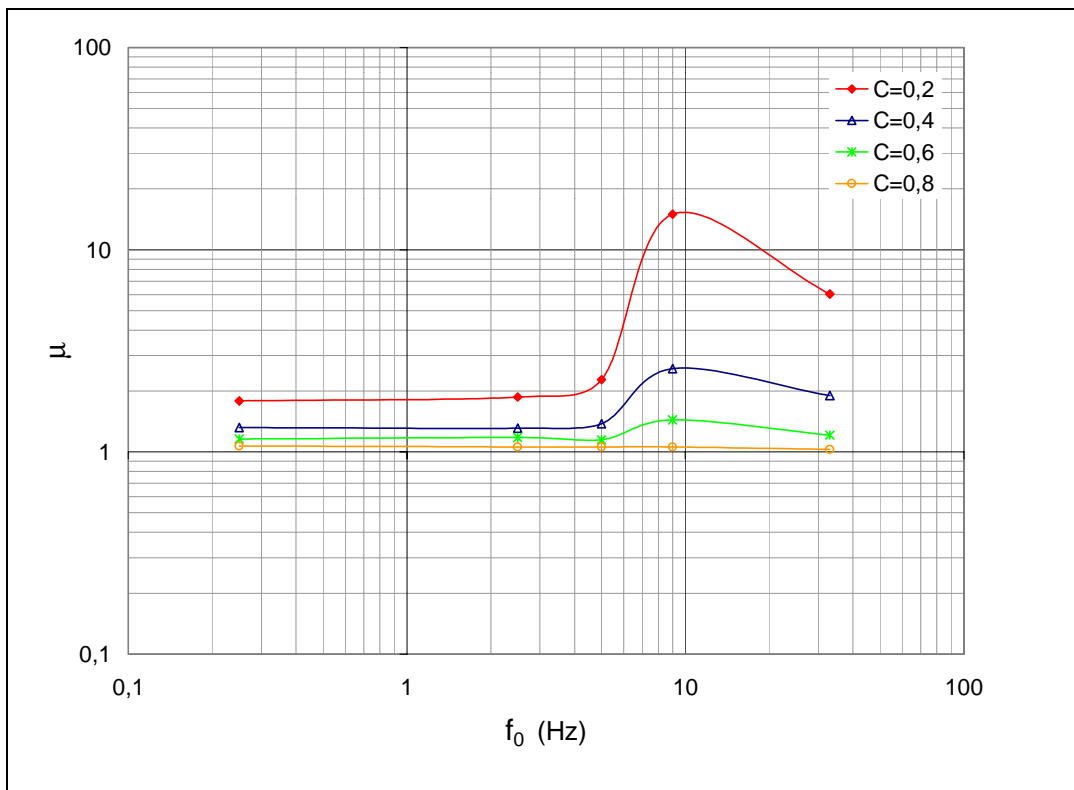


Figura 4.3 - Espectro de utilidade para o SSS acoplado ao SP, parametrizado pelo fator de escoamento, C. Sismo1g+Pi.

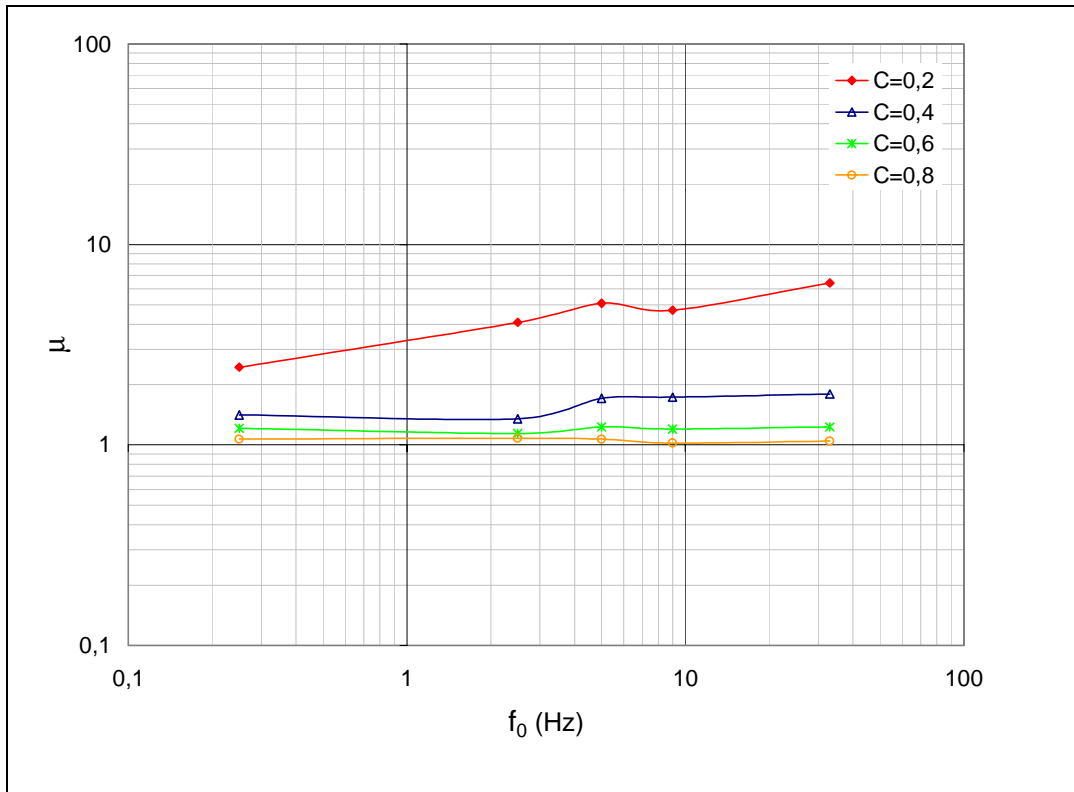


Figura 4.4 - Espectro de utilidade para o SSS acoplado ao SP, parametrizado pelo fator de escoamento, C.Sismo1g+Pi-7%.

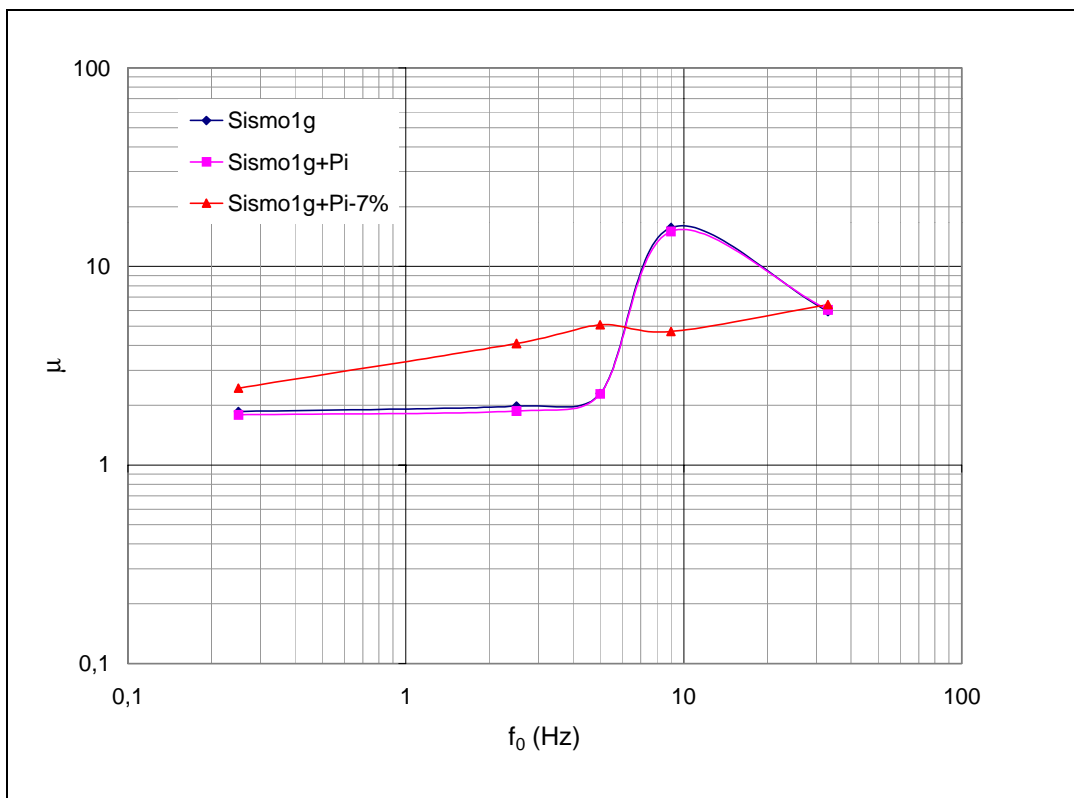


Figura 4.5 - Espectro de utilidade, C=0,2. Comparação dos casos.

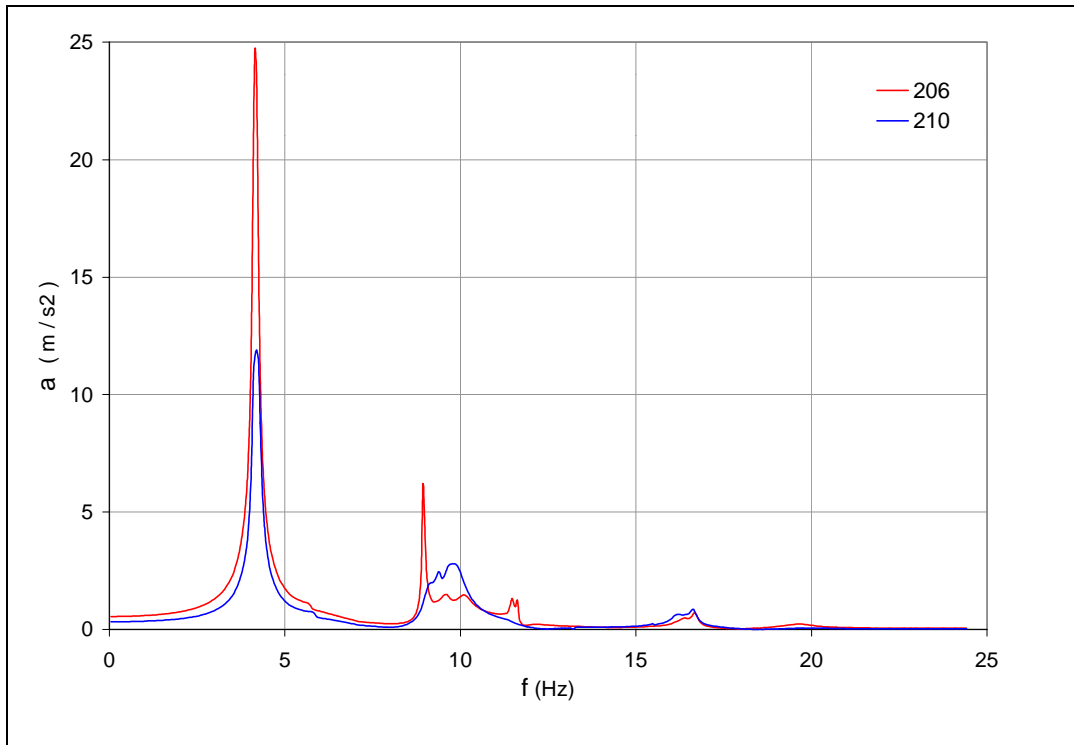


Figura 4.6 - Função de transferência de acelerações do ponto de controle do sismo para os nós 206 e 210 do SSS acoplado ao SP.

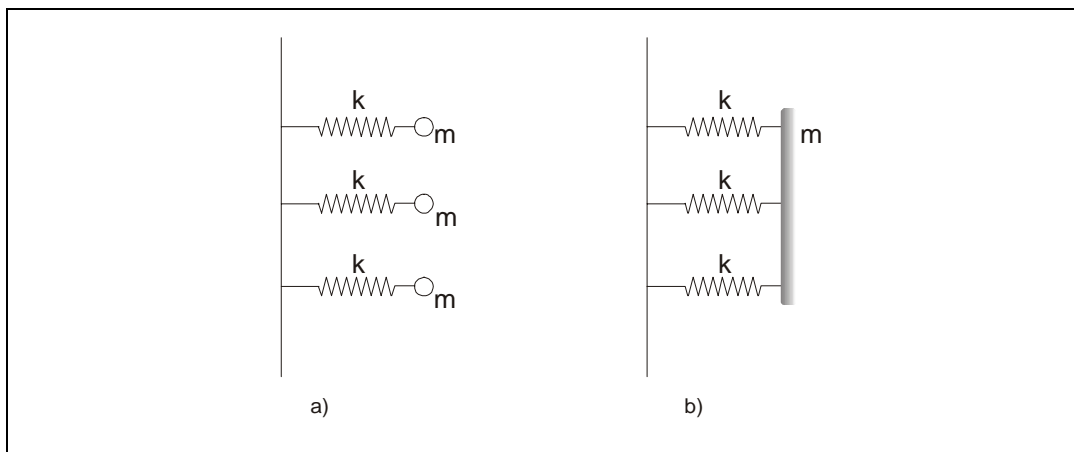


Figura 4.7 - a) Representação esquemática do SSS com tubulação muito flexível. b) Representação esquemática do SSS com tubulação rígida.

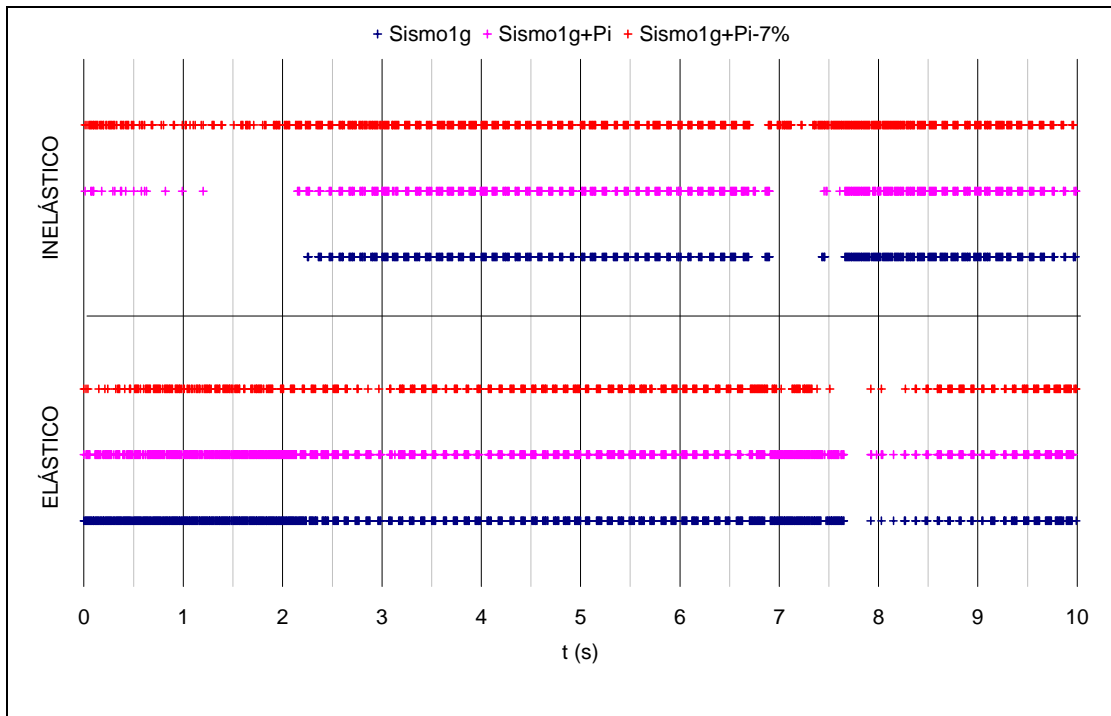


Figura 4.8 - Períodos de regime linear elástico e plástico do SSS, $f_{0s} = 0,25$ Hz, $C=0,2$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9916425/CA

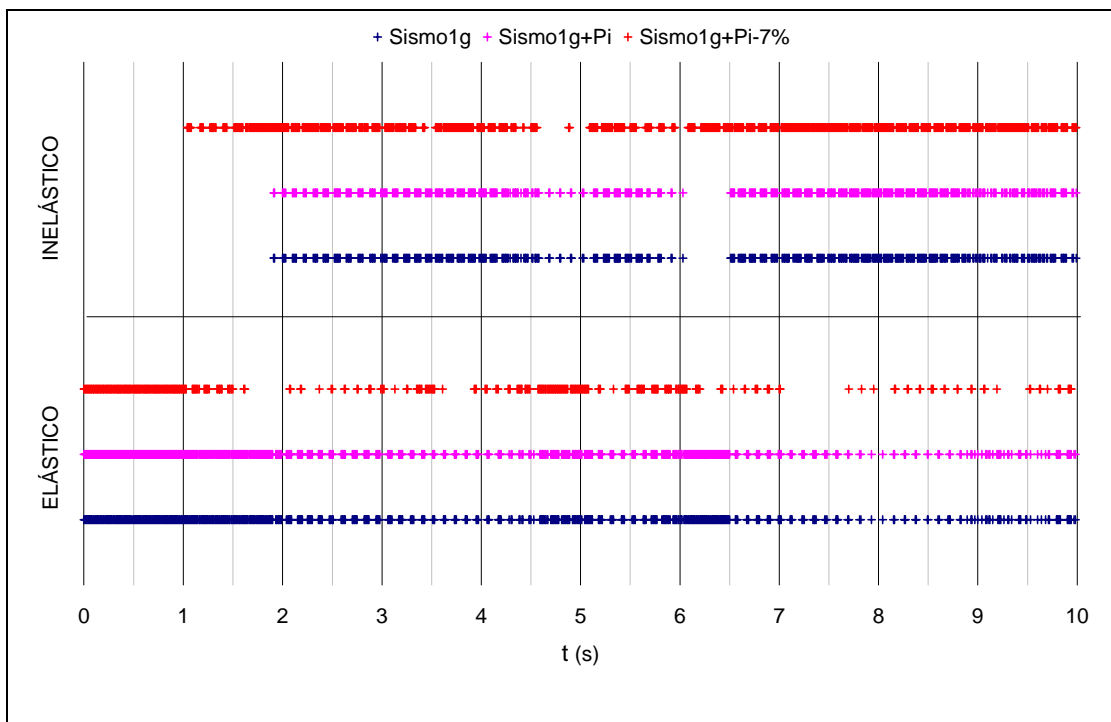


Figura 4.9 - Períodos de regime linear elástico e plástico do SSS, $f_{0s} = 5$ Hz, $C=0,2$

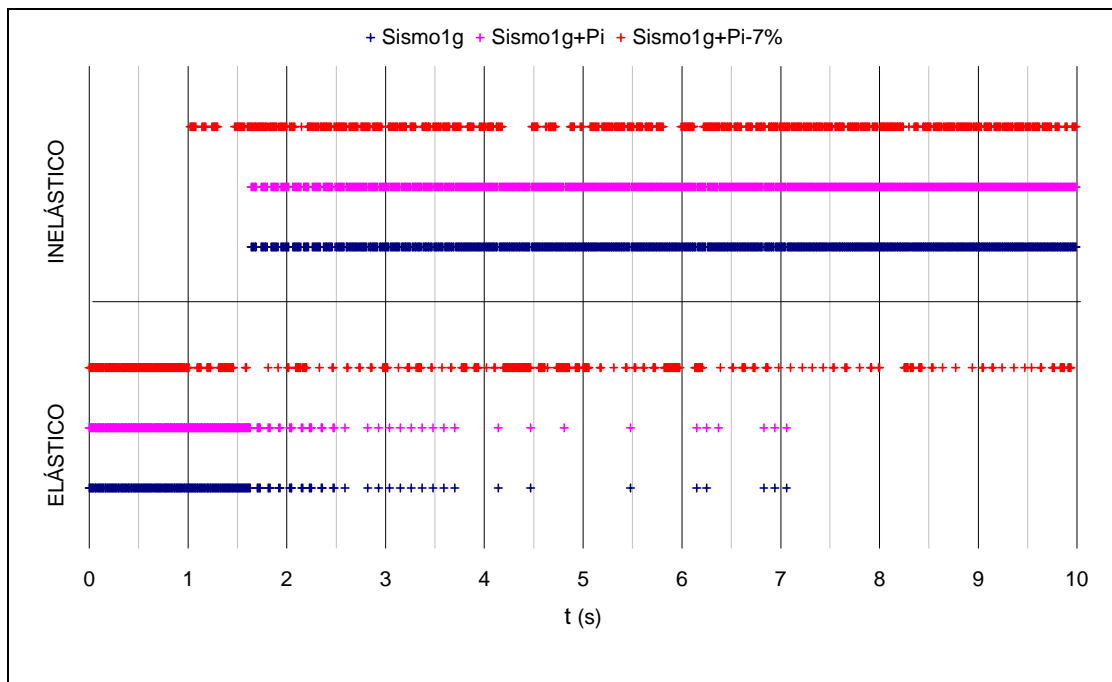


Figura 4.10 - Períodos de regime linear elástico e plástico do SSS, $f_{0s} = 9$ Hz, $C=0,2$.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9916425/CA

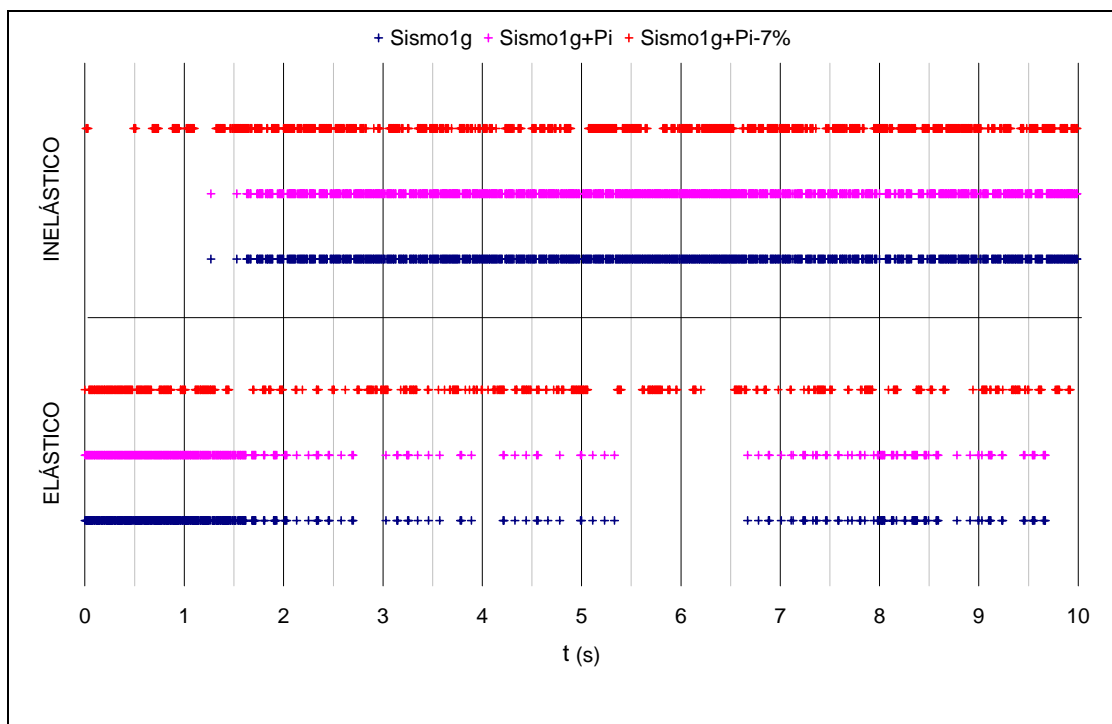


Figura 4.11 - Períodos de regime linear elástico e plástico do SSS, $f_{0s} = 33$ Hz, $C=0,2$.

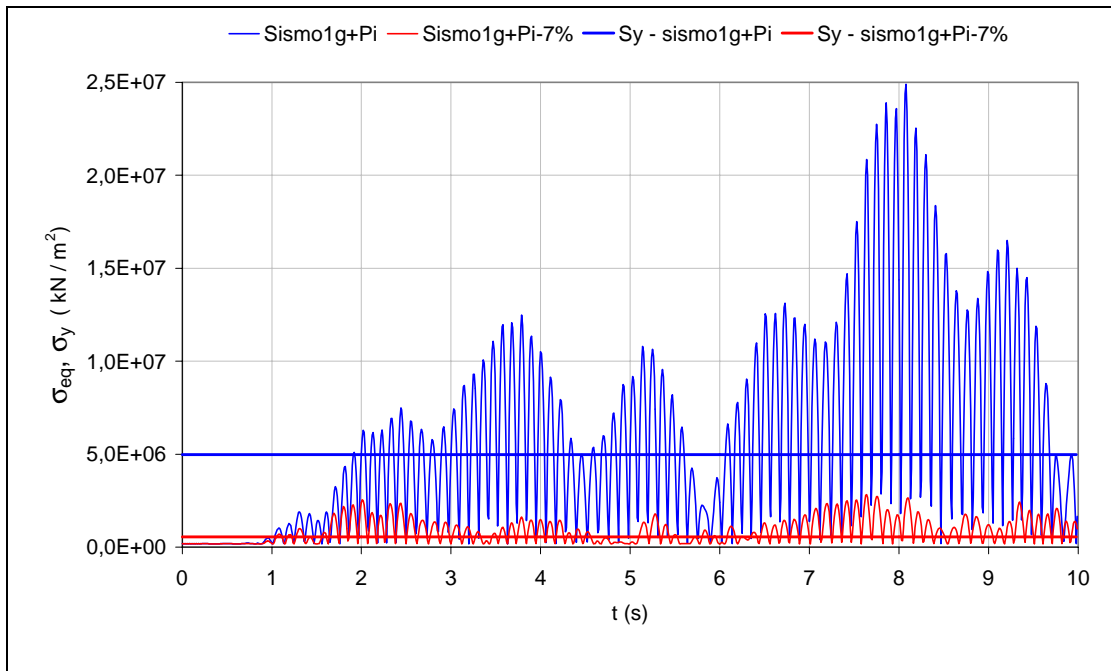


Figura 4.12 - Tensões equivalentes máximas para o elemento 399, $C=1$, $f_{0s} = 5$ Hz e tensões de escoamento para $C=0,2$.

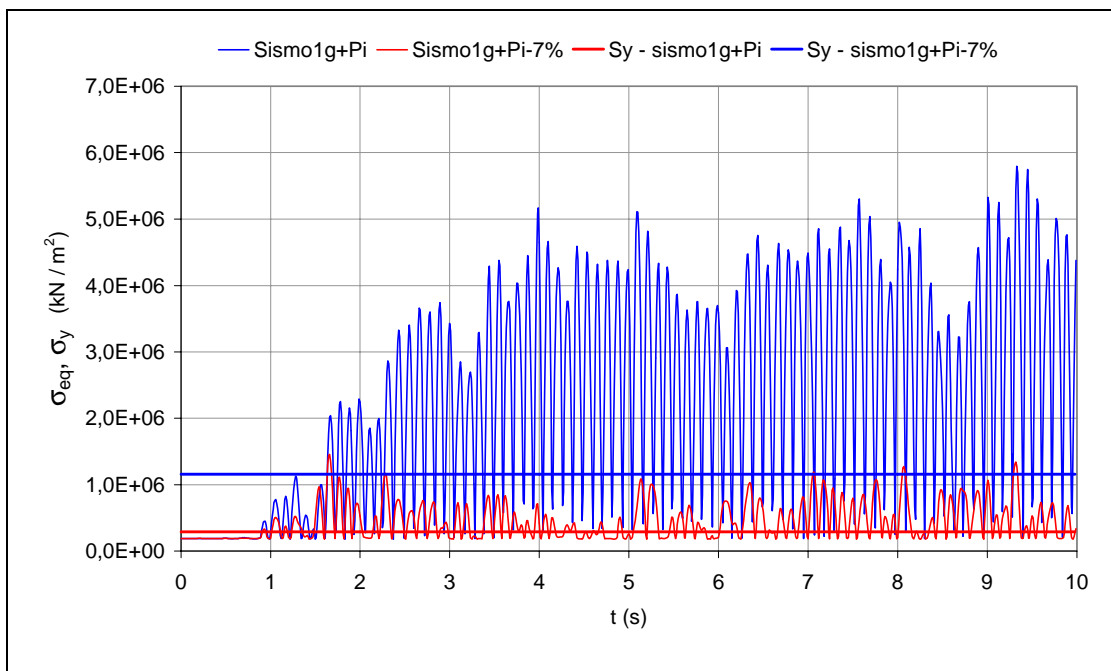


Figura 4.13 - Tensões equivalentes máximas para o elemento 399, $C=1$, $f_0 = 9$ Hz e tensões de escoamento para $C=0,2$.

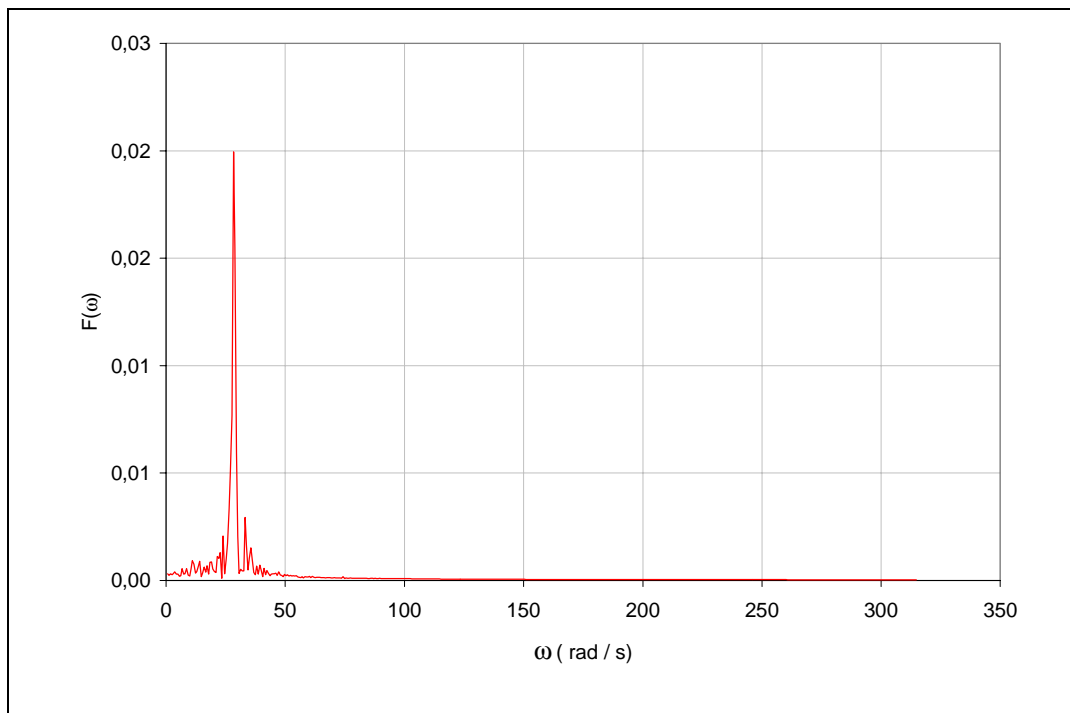


Figura 4.14 – Espectro de Fourier da resposta em deslocamento, u , do nó 85 do SP, com SSS acoplado, $f_0 = 5$ Hz e $C=1$. Sismo1g.

4.2.5. Dutilidade dos apoios

O projeto dos apoios de sistemas secundários é de grande importância no custo de instalações como as usinas nucleares, uma vez que estes são numerosos e de alto custo de manutenção. Sendo assim, tem-se estudado em diversos artigos a consideração do comportamento inelástico nos apoios de sistemas secundários com o intuito de reduzir a quantidade de suportes dos sistemas de tubulação (Aoki e Watanabe, 2000; Okeil e Tung, 1995; Endo et al, 1995). Neste trabalho, o comportamento inelástico é considerado tanto nos apoios quanto na tubulação, no entanto, devido ao método de cálculo da dutilidade e da focalização dos objetivos sobre a resposta global do sistema, a influência relativa da plasticidade nos apoios sobre a dutilidade de todo o sistema fica oculta.

Define-se a dutilidade como uma relação entre o trabalho total da força externa sobre as massas do SS e o realizado apenas quando o sistema como um todo trabalha elasticamente (item 2.8). Para fazer uma avaliação da influência da dutilidade dos apoios subtrai-se do trabalho total a parcela correspondente ao

trabalho das forças externas sobre os nós pertencentes aos apoios do SSS nos períodos em que apenas os apoios estão escoando. Assim:

$$\mu^* = \frac{T_m - T_p}{T_e} \quad (4.1)$$

fazendo $\frac{\mu^*}{\mu}$ tem-se:

$$\frac{\mu^*}{\mu} = 1 - \frac{T_p}{T_m} \quad (4.2)$$

A equação 4.2 dá uma idéia da parcela de ductilidade que corresponde aos apoios. Avalia-se o valor de μ^* para o caso de $f_0 = 9 \text{ Hz}$, $C=0,2$ e carregamento Sismo 0,1g e assim a relação mencionada torna-se:

$$\mu^* = 0,8 \cdot \mu \quad (4.3)$$

Ou seja, a ductilidade nos apoios representa 20% da ductilidade total do sistema, neste caso, o que mostra nesta única incursão a relevância do problema.

4.3. Espectros de resposta linear elástica

Apresentam-se os espectros de resposta linear elástica, $\xi=0$, nos nós 46 e 85 do SP, que são nós de apoio do SSS, para o sismo com aceleração máxima igual a 1g (Figuras 4.15 e 4.16). Ambos são apresentados sob a forma de um gráfico em quatro escalas como descrito no item 2.2.1.1 e obtidos através da metodologia proposta por Valverde (1998), comentada no item 2.3.2. O comportamento destes espectros serve de referência para a análise dos espectros de resposta acoplada para o SSS.

Salienta-se que o valor máximo da resposta em deslocamento relativo à base do SP, no extremo esquerdo dos espectros, é de aproximadamente 0,64, e o valor máximo da aceleração no extremo direito dos espectros é de 5 g.

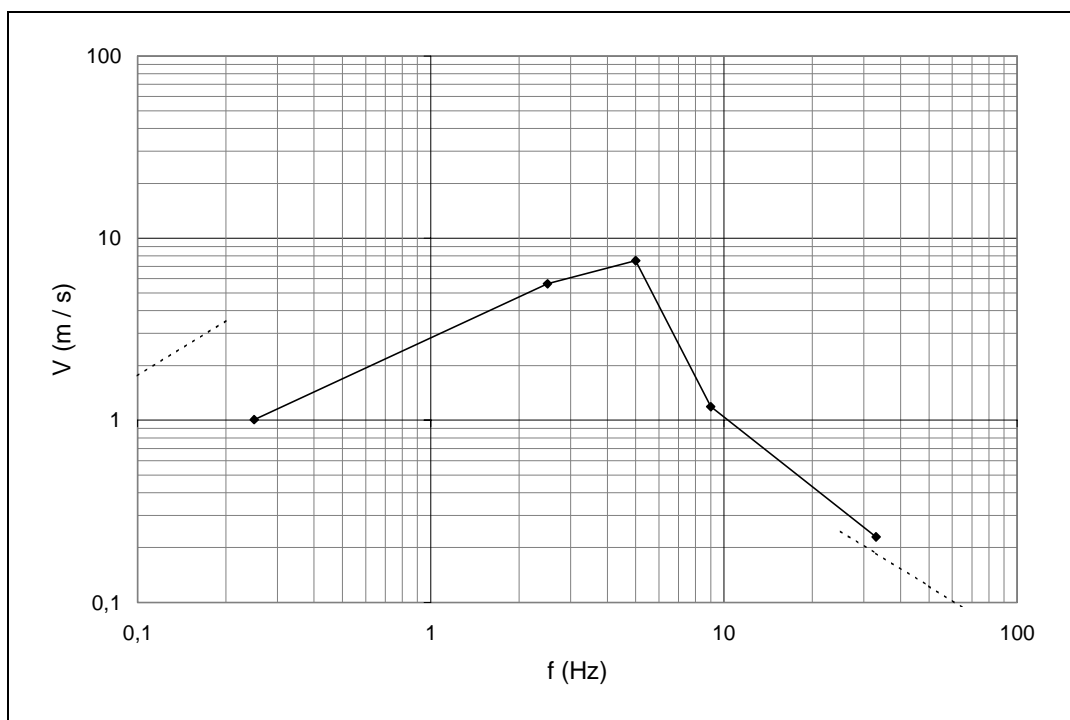


Figura 4.15 – Espectro de resposta acoplada linear elástica – metodologia de Valverde (1998).
Nó 46 do SP.

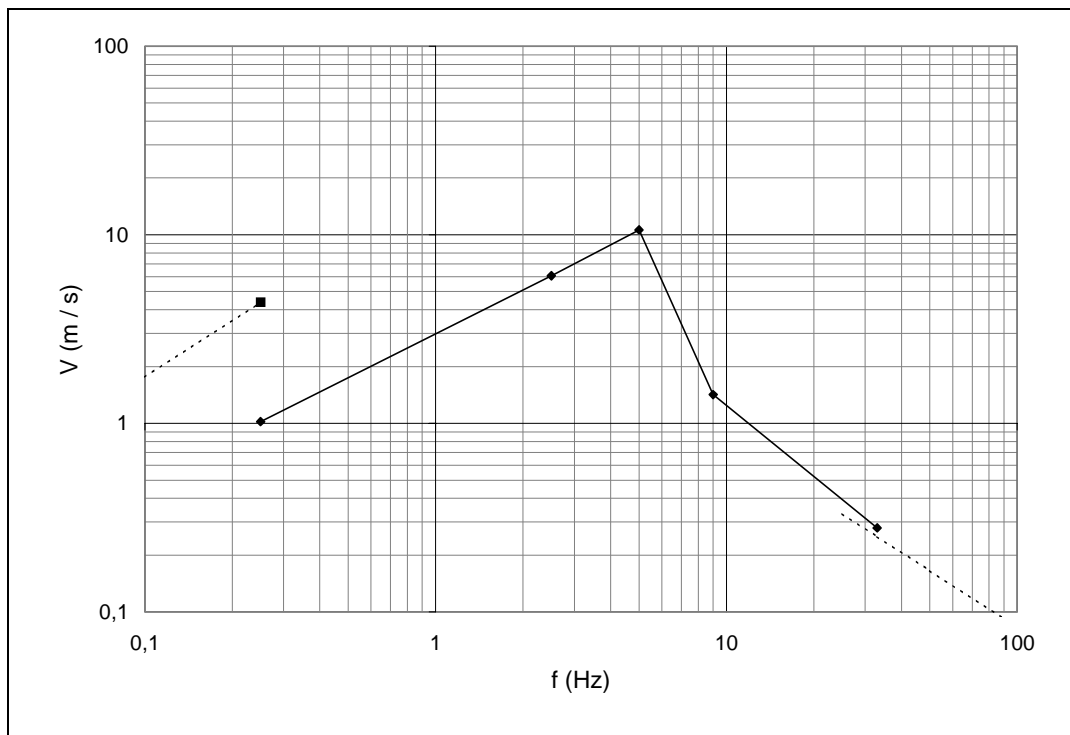


Figura 4.16 - Espectro de resposta acoplada linear elástica – metodologia de Valverde (1998).
Nó 85 do SP.

4.4.

Espectros de resposta do sistema secundário simplificado

4.4.1.

Apresentação

Os espectros de resposta obtidos para os nós do SSS, Figuras 4.17 a 4.22, são apresentados para cada caso de carregamento e amortecimento, sendo identificados da mesma forma que para os espectros de utilidade e parametrizados pelo fator de escoamento, C . O deslocamento e a aceleração máxima do nó do SP associado diretamente ao nó em questão do SSS são representados por linhas tracejadas; no caso da Figura 4.17, por exemplo, tais valores são, 0,07 m, e 5,2 g, respectivamente, e aproximam-se dos níveis observados nas Figuras 4.15 e 4.16. De forma semelhante, o mesmo ocorre nas demais figuras dependendo da aceleração máxima do sismo.

Nas Figuras 4.23 a 4.28 os espectros são normalizados em relação à resposta elástica, $C=1$, caracterizando o afastamento entre este caso e os de fator de escoamento menor que a unidade.

4.4.2. Análise Geral para a carga sísmica

Os espectros de resposta do SSS comportam-se de forma semelhante aos espectros de resposta acoplada linear elástica (Figuras 4.15 e 4.16) e, igualmente a estes, apresentam-se em três regiões com características distintas. As diferenças entre os dois conjuntos de espectros são:

- no modelo do SS que, no primeiro, é um S1GL e, no segundo, um SVGL;
- na variação da rigidez dos elementos elásticos para obter os níveis adequados de frequência, uma vez que no SSS os apoios são mantidos com rigidez constante e;
- pela consideração de inelasticidade no SSS.

Região central – nesta região as maiores amplificações ocorrem, como esperado, nas vizinhanças da frequência fundamental do sistema principal, 5 Hz, e, de um modo geral, observa-se que a relação entre a resposta espectral inelástica e a linear elástica depende do parâmetro de frequência do sistema secundário e do nível de escoamento, conforme já descrito por Veletsos et al (1965). Entendem-se estas relações entre as respostas elástica e inelástica lembrando-se que os sistemas inelásticos diferem do elástico por dissiparem energia em ciclos de histerese, diminuindo o valor máximo da resposta e, por serem sistemas mais flexíveis, ocasionam respostas superiores ou inferiores à elástica dependendo da frequência do SSS.

Identificam-se assim, nesta região, três frequências marcantes. Uma, a de 5 Hz, por ser a frequência de sintonia entre os dois sistemas ($f_{01}/f_{01p} = 1$). Outra, a de 9 Hz, ($f_{01}/f_{01p} = 1,8$) onde se verificam as maiores amplificações. A última, que está associada às duas anteriores e localizada entre elas, determina um ponto de transição além do qual a resposta elástica, V_0 , passa a ser inferior à inelástica, V , ou seja, nesta frequência a relação V/V_0 é igual a 1, e em todos os casos não amortecidos estudados, o seu valor está em torno de 6 Hz ou $f_{01}/f_{01p} = 1,2$.

Esta modificação da resposta do sistema em relação à resposta elástica ($C=1$), nos casos não amortecidos (Figuras 4.23 a 4.26) é mostrada na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Valores de V/V_0 para os casos não amortecidos.

C	$f_{01} = 9 \text{ Hz}$	$f_{01} = 5 \text{ Hz}$
0,2	$V/V_0 = 3,00$	$V/V_0 = 0,60$
0,4	$V/V_0 = 1,30$	$V/V_0 = 0,85$
0,6	$V/V_0 \approx 1$	$V/V_0 \approx 1$

Região extrema esquerda – Esta corresponde ao SSS com baixas frequências fundamentais, e, assim, os valores espectrais tendem para os do nó de apoio, como já visto. Mas, o SSS tem um limite mínimo de frequência possível, uma vez que a redução desta, como se sabe, é feita reduzindo-se o módulo de elasticidade dos tubos, mantendo-se constante a rigidez dos apoios; isto resulta na degradação do modelo para o de sistemas massa – mola independentes. A relação V/V_0 , nesta região, é mais significativa no nó 206 que no 210, pois é um nó ligado diretamente a um apoio com rigidez na direção de aplicação do sismo, e, nesta região, a dutilidade está associada aos apoios isolados (Figura 4.7a), como discutido anteriormente. Neste nó 206 a relação é igual a 0,38.

Região extrema direita – É caracterizada pelas altas frequências do SSS, o modelo responde como um corpo rígido de massa igual à massa total do SSS apoiada sobre os elementos de mola (Figura 4.7b). A tendência do espectro elástico e inelástico, nesta região, é para um valor único o da aceleração máxima do apoio; o afastamento que se observa para a linha tracejada é devido à influência das rotações que existem no modelo do SSS. Assim sendo, a relação das respostas inelásticas com a elástica é aproximadamente 1.

4.4.3. Pressão interna

A combinação de pressão interna constante de 250 atm e sismo com aceleração máxima tanto de 1g como de 0,1g não provoca variações importantes nos valores espectrais em qualquer das três regiões dos espectros de resposta como é possível observar na Figura 4.27 para $C=0,2$ e $\xi = 0\%$. Tal é devido ao critério que norteia a fixação do nível da tensão de escoamento geral do SSS como $\sigma_y = C \cdot \sigma_0$. Desta maneira, ao ser variado o sismo ou a pressão interna a relação da tensão elástica máxima para a de escoamento é mantida constante.

As pequenas diferenças observadas entre os dois casos de Sismo 0,1g são devidas à diferença relativa entre as tensões do sismo e as devidas à pressão interna, pois o nível de escoamento é reduzido com a redução das amplitudes de aceleração do sismo; tal que o sistema pode até partir do repouso já escoado (Figura 4.2).

4.4.4. Amortecimento

A influência do amortecimento é uma consequência do efeito preponderante deste na resposta elástica e se manifesta com expressão somente na região central do espectro, ítem 4.2.4. O resultado sobre as respostas inelásticas, $C < 1$, é de aproximá-las da elástica, deslocando a frequência de transição para a qual V/V_0 é igual a 1, para a esquerda, aproximando-a da frequência de 5 Hz ($f_{01}/f_{01p} = 1$), como pode ser observado nas Figuras 4.28 e 4.29.

Em $f_{01} = 9\text{Hz}$ tem-se V/V_0 igual a 1,7 quando $C=0,2$ e igual a 1,15 para $C = 0,4$. No caso de fatores de escoamento maiores que 0,4 a relação V/V_0 é muito próxima de 1.

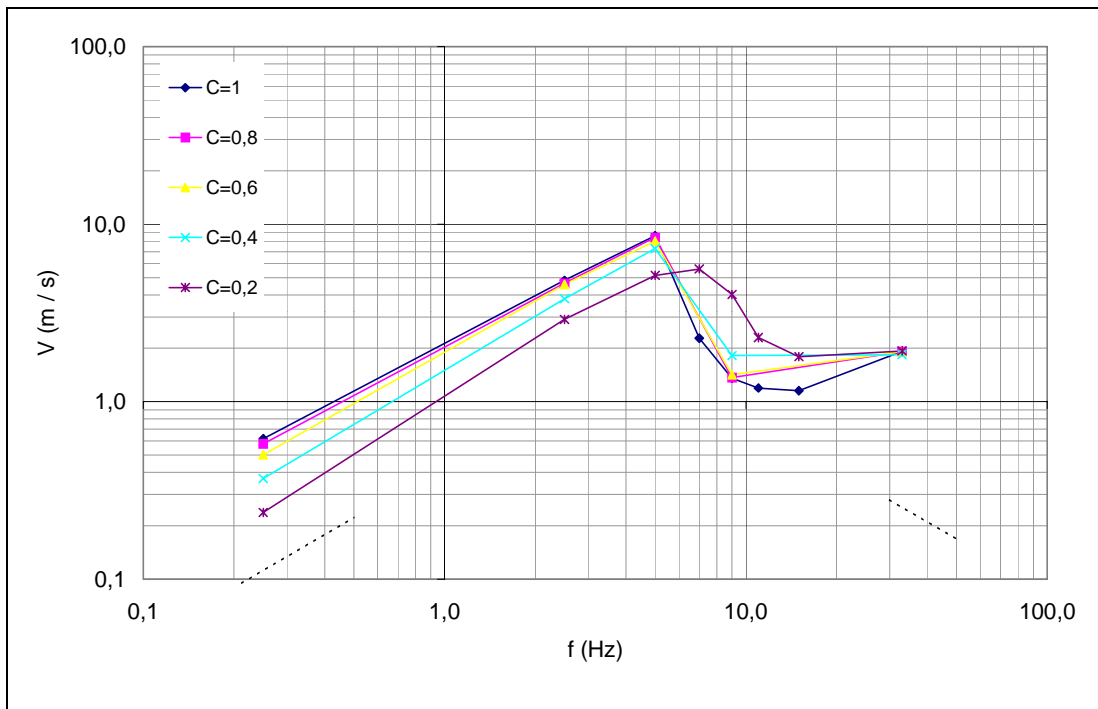


Figura 4.17 – Espectro de resposta em pseudovelocidade do nó 206 do SSS. Sismo1g.

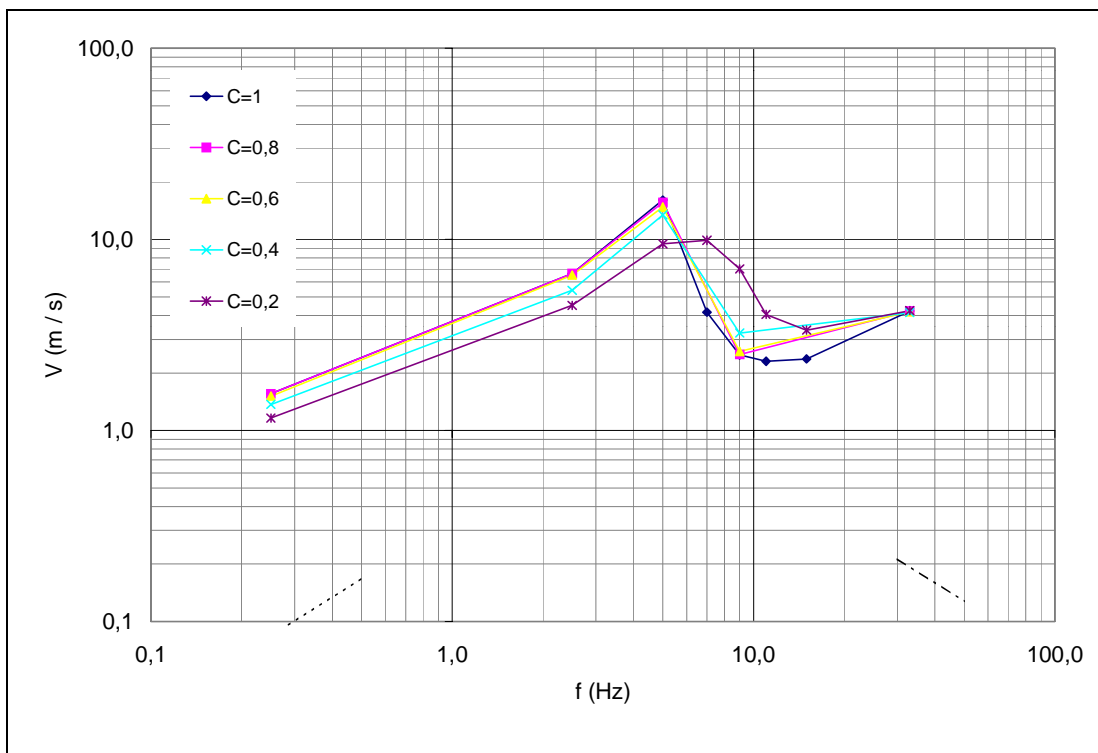


Figura 4.18 – Espectro de resposta em pseudovelocidade do nó 210 do SSS. Sismo1g.

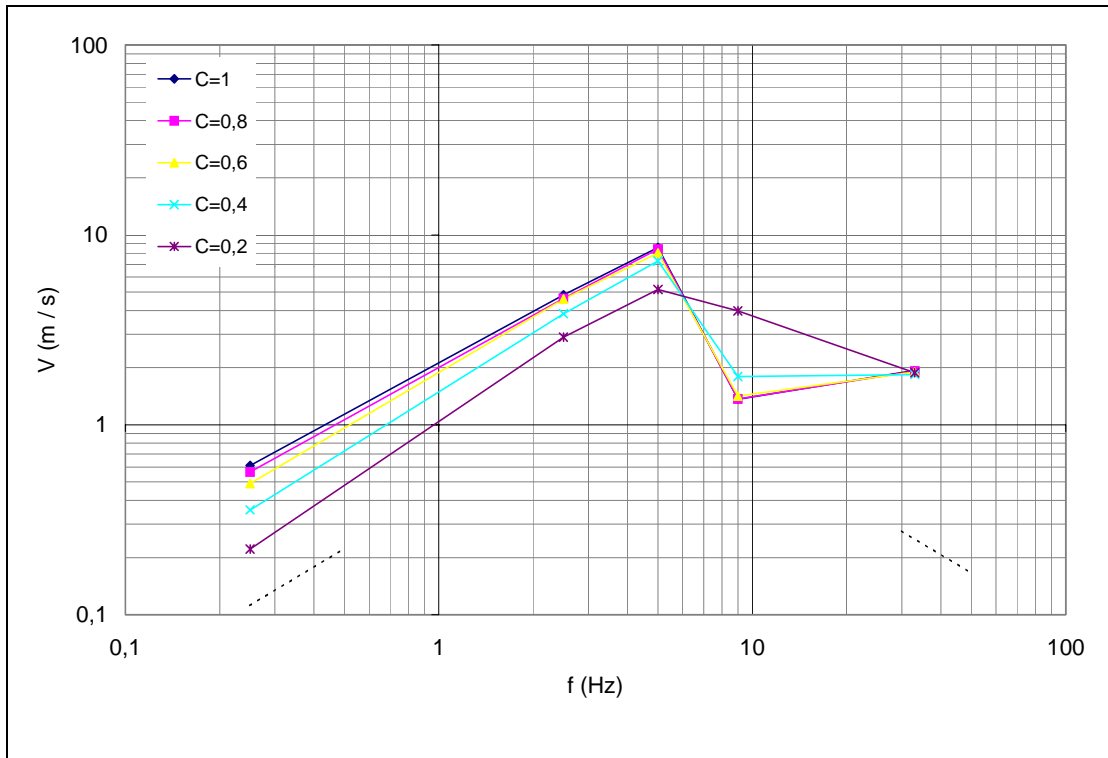


Figura 4.19 - Espectro de resposta em pseudovelocidade para o nó 206 do SSS. Sismo1g+Pi.

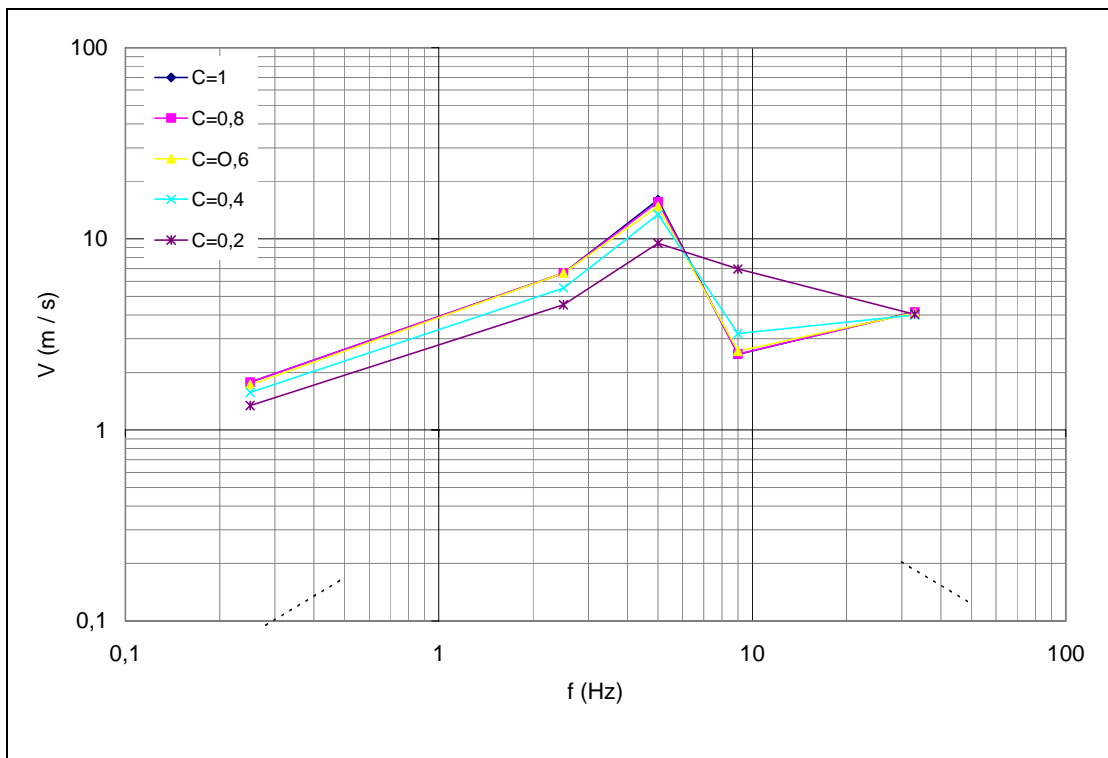


Figura 4.20 - Espectro de resposta em pseudovelocidade para o nó 210 do SSS. Sismo1g+Pi.

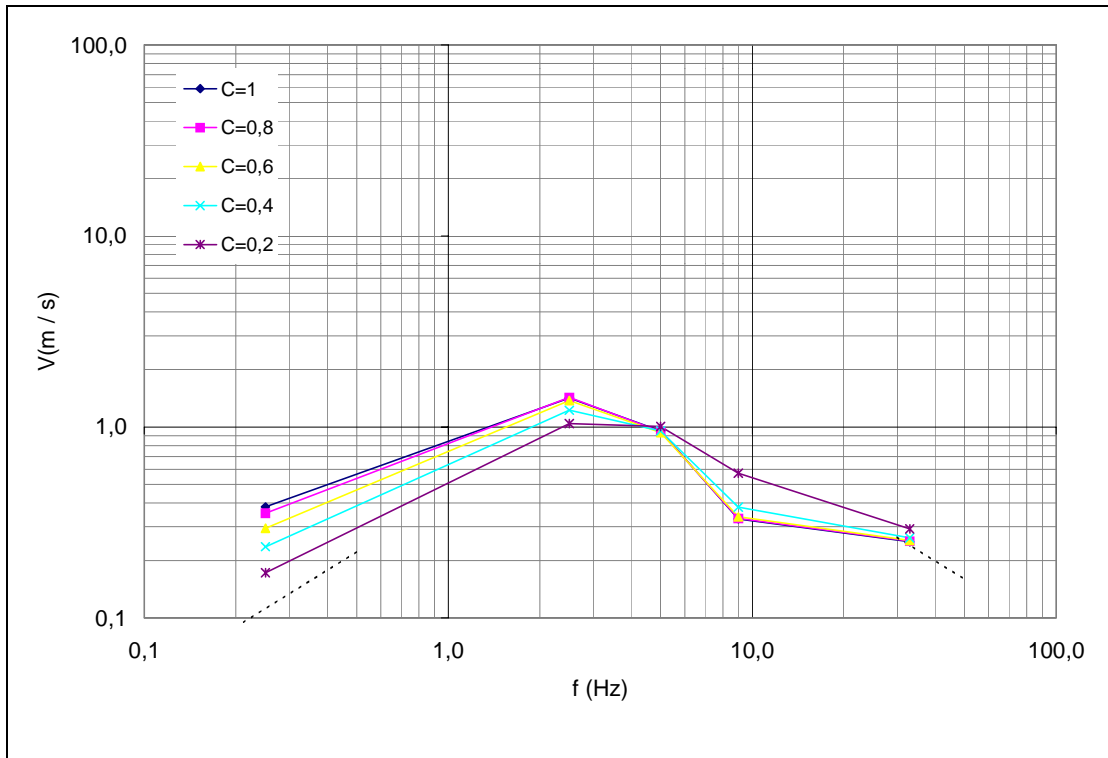


Figura 4.21 - Espectro de resposta em pseudovelocidade do nó 206 do SSS. Sismo1g+Pi-7%.

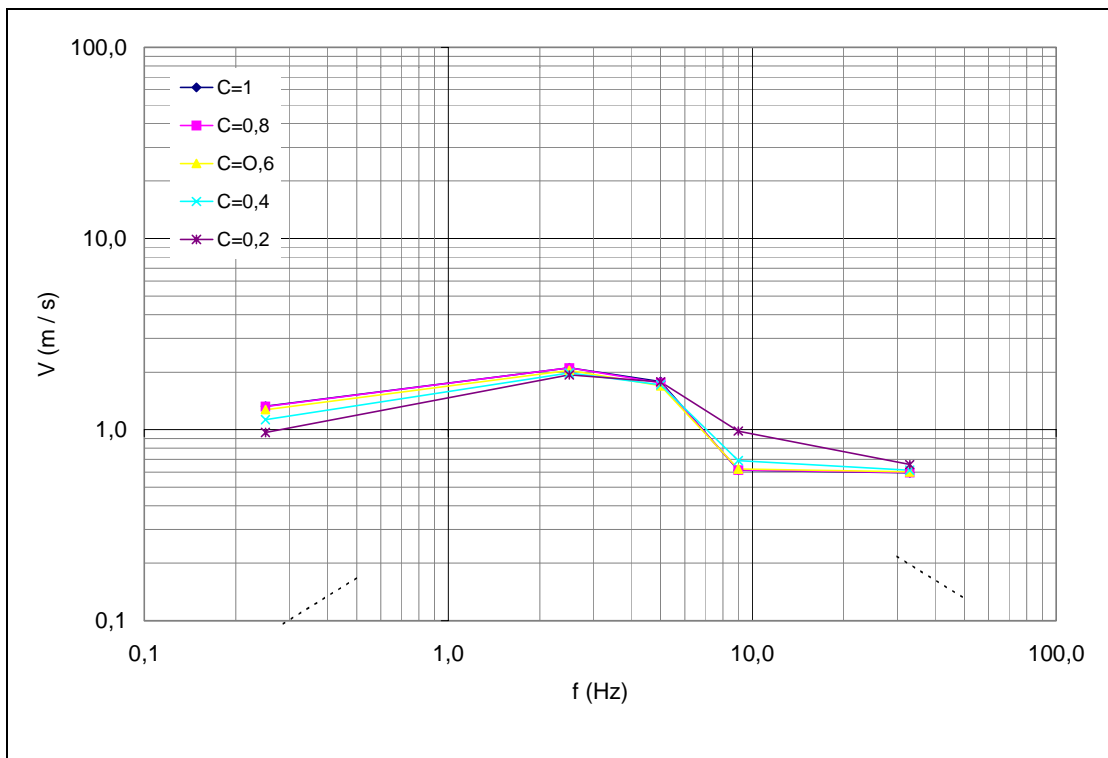


Figura 4.22 - Espectro de resposta em pseudovelocidade do nó 210 do SSS. Sismo1g+Pi-7%.

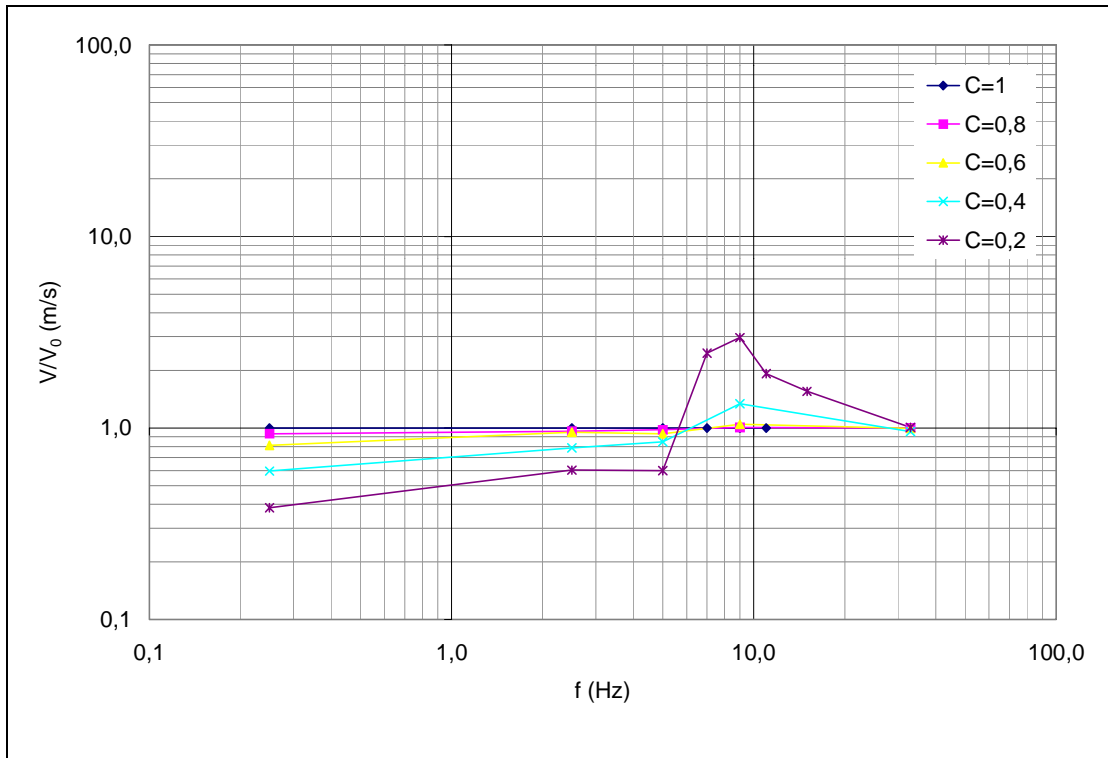


Figura 4.23 – Espectro de resposta em pseudo velocidade normalizado pela resposta linear elástica (C=1) e parametrizado pelo fator de escoamento, C. Nó 206 do SSS. Sismo1g.

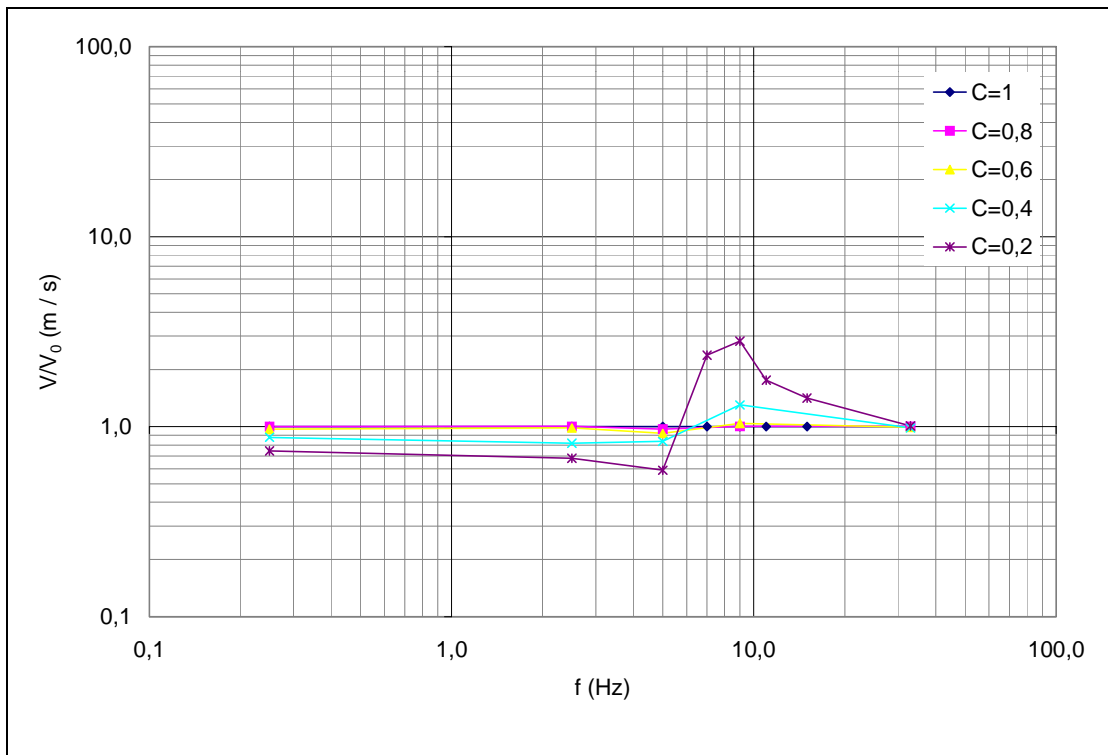


Figura 4.24 - Espectro de resposta em pseudo velocidade normalizado pela resposta linear elástica (C=1) e parametrizado pelo fator de escoamento, C. Nó 210 do SSS. Sismo1g.

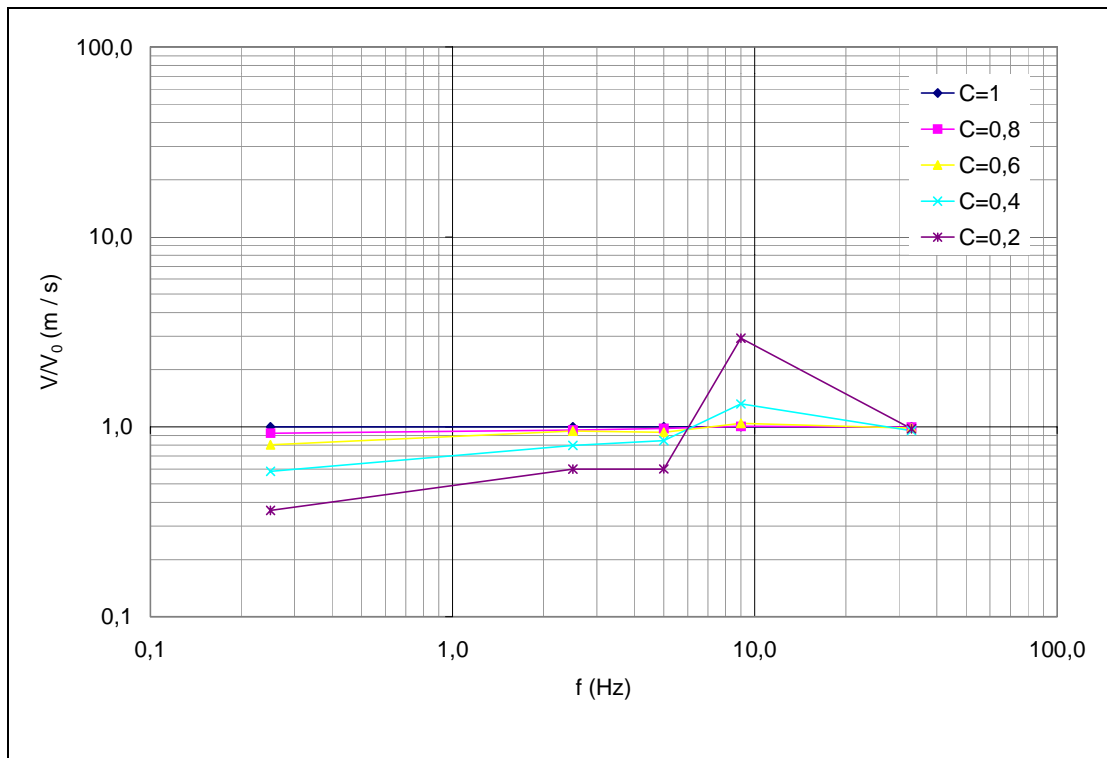


Figura 4.25 – Espectro de resposta em pseudo velocidade normalizado pela resposta linear elástica ($C=1$) e parametrizado pelo fator de escoamento, C . Nó 206 do SSS. Sismo1g+Pi.

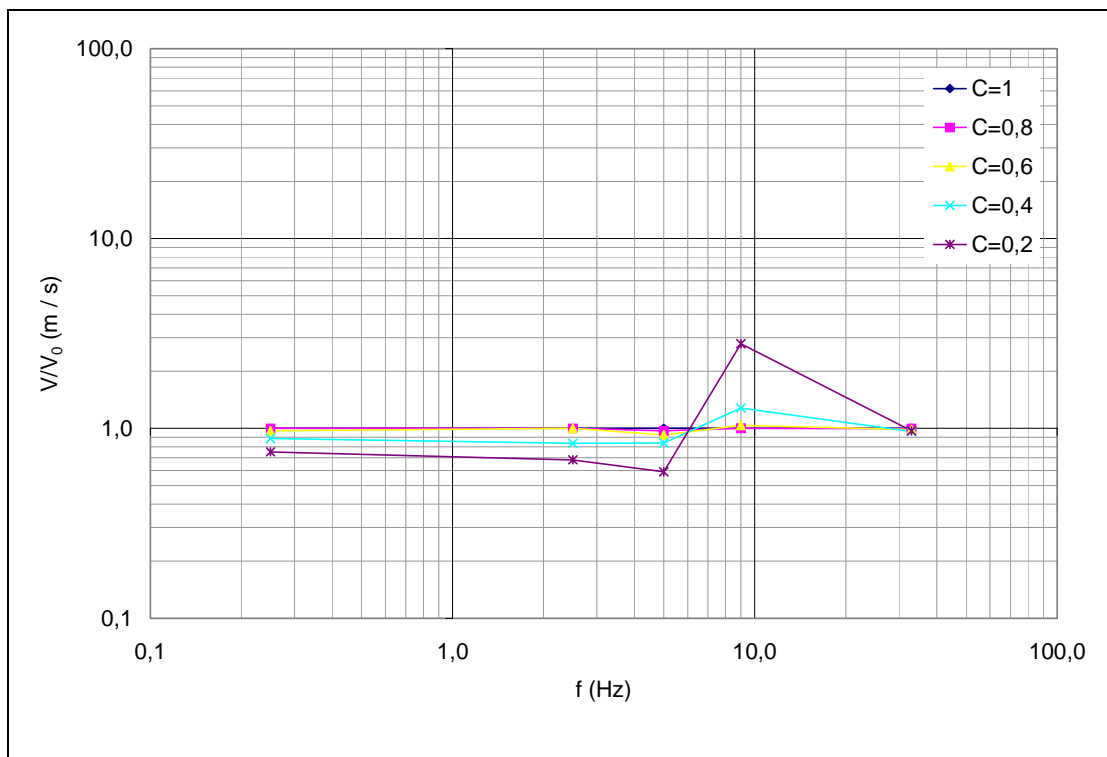


Figura 4.26 – Espectro de resposta em pseudo velocidade normalizado pela resposta linear elástica ($C=1$) e parametrizado pelo fator de escoamento, C . Nó 210 do SSS. Sismo1g+Pi.

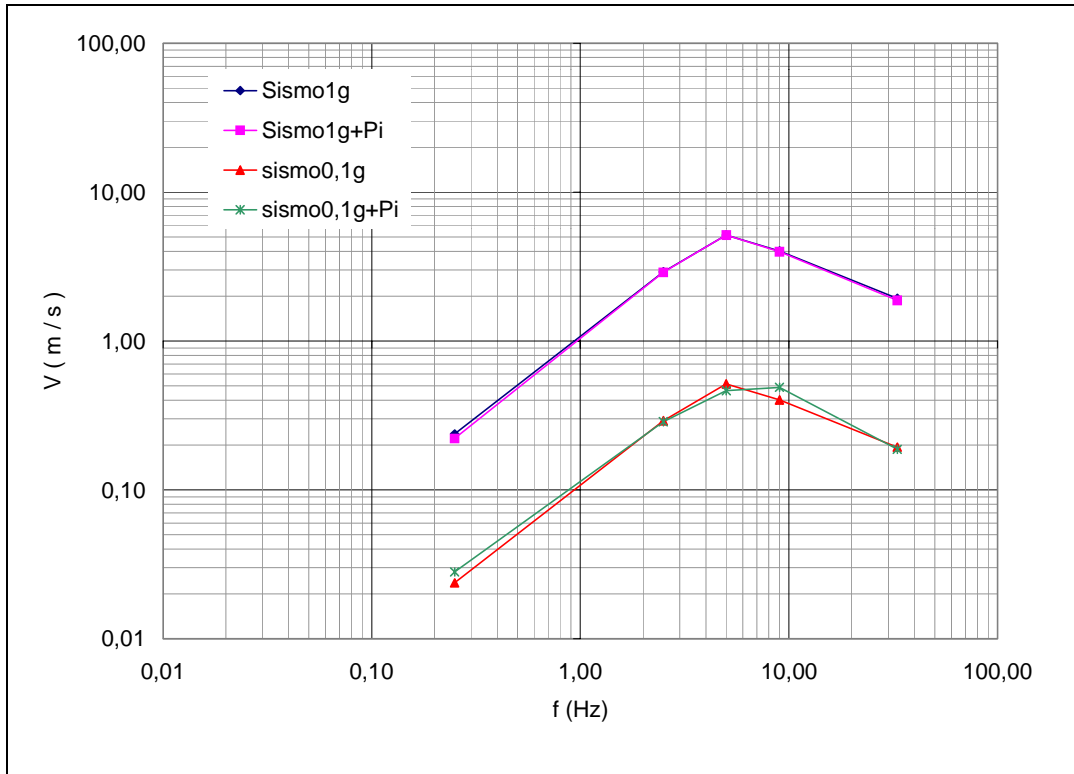


Figura 4.27 – Espectros de resposta do nó 206 do SSS. $C=0,2$. $\xi = 0$.

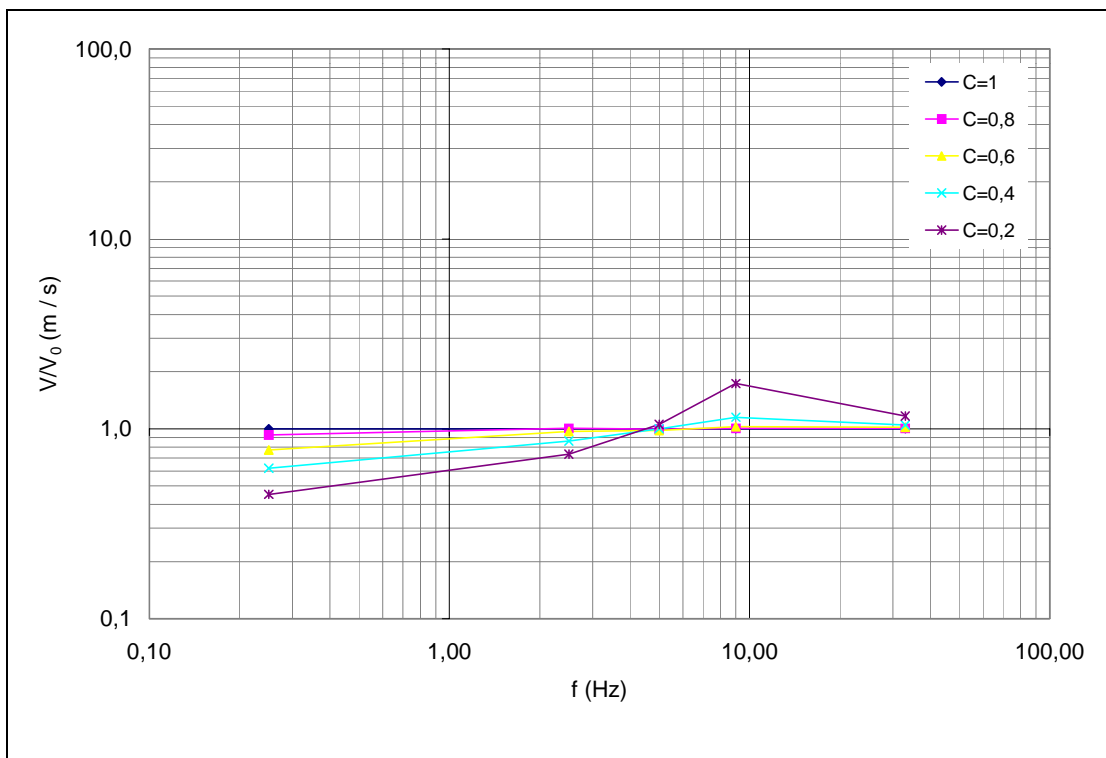


Figura 4.28 - Espectro de resposta em pseudo velocidade normalizado pela resposta linear elástica ($C=1$) e parametrizado pelo fator de escoamento, C . Nó 206 do SSS. Sismo1g+Pi-7%.

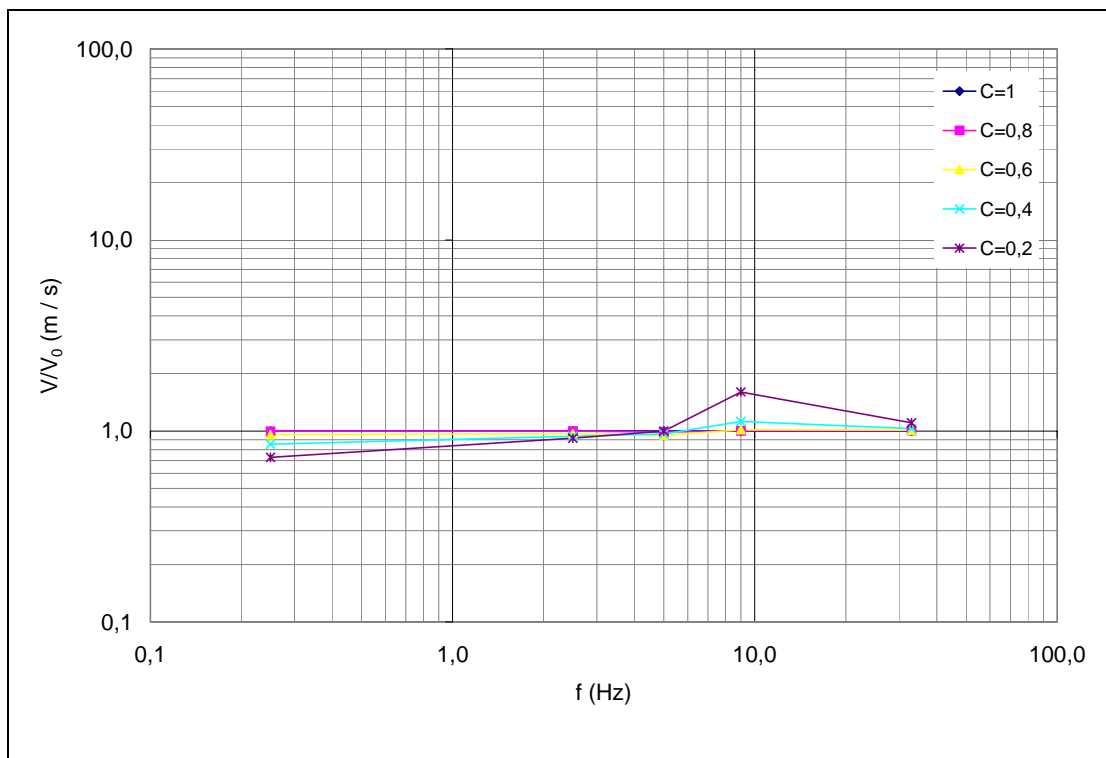


Figura 4.29 - Espectro de resposta em pseudo velocidade normalizado pela resposta linear elástica ($C=1$) e parametrizado pelo fator de escoamento, C . Nó 210 do SSS. Sismo1 g+Pi-7%.

4.5. Avaliação do catraqueamento

Segundo a bibliografia consultada, o catraqueamento pode ocorrer quando há presença de tensões axiais em conjunto com um carregamento cíclico. Ora, a pressão interna nos tubos de extremidade fechada do SSS provoca uma tensão na direção axial destes, e o sismo, embora não seja um carregamento cíclico, quando filtrado pelo SP e na sua fase permanente, pode ser considerado como tal. Então, é de se considerar a possibilidade da ocorrência deste fenômeno em sistemas de tubulação quando submetidos a pressão interna e sismo. Em vista disto e da indesejável ocorrência de um fenômeno como este que pode até produzir o colapso da estrutura, entende-se ser necessário aliar, às considerações já feitas a respeito da utilidade do SSS, uma outra sobre o efeito do catraqueamento.

No entanto, este é um efeito localizado e de difícil caracterização quando se trata com grandezas globais do sistema. Também é difícil a sua identificação,

principalmente no que diz respeito à discriminação dos seus períodos transiente e assintótico, já que o segundo é que deve ser considerado.

Faz-se então, uma indagação quanto à ocorrência do catraqueamento no SSS, observando-se o comportamento do gráfico de tensão-deformação em determinados pontos do sistema, pontos de integração, e para determinados casos de carga.

A seguir, utiliza-se o esquema usado por Burgreen (1975), no diagrama apresentado na Figura 2.9, para uma referência quanto à ocorrência ou não de catraqueamento no SSS, Figura 4.30. A pressão interna é a geradora da tensão primária, σ_p , e o sismo produz a tensão cíclica, σ_s . Define-se a grandeza q_i para cada frequência i do SSS como sendo:

$$q_i = \frac{\sigma_{pi}}{\sigma_{si}} \quad (4.4)$$

Localizados os pontos associados às diversas situações dos ensaios verifica-se que:

- para cada frequência de cálculo, f_{0i} , os pontos correspondentes a cada valor de C alinham-se em um segmento de linha reta, com inclinação $1/q_i$ com a horizontal, a partir da origem do gráfico.
- linhas retas fazendo ângulo de -45° com a horizontal reúnem pontos de igual valor de C entre as diversas frequências.

Olhando o conjunto dos pontos e tendo em mente o esquema usado por Burgreen (1975), Figura 2.9, e focalizado em miniatura na Figura 4.30, identifica-se que:

- a maioria dos pontos concentram-se na região de plasticidade alternada e de “shakedown” do gráfico de Burgreen.
- raros pontos adentram na região de ocorrência de catraqueamento.
- os pontos correspondentes a $C = 1$ situam-se sobre o limite de comportamento elástico.

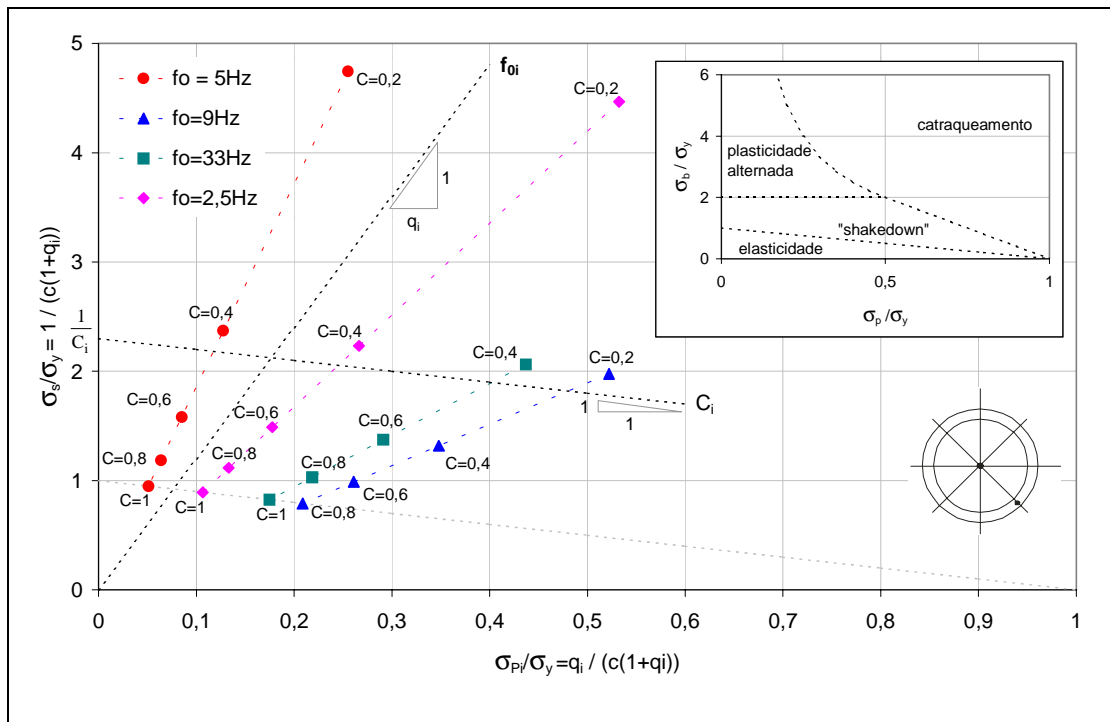


Figura 4.30 – Relações entre tensão devido ao sismo e à pressão interna normalizadas pela tensão de escoamento. Elemento 399, seção i, ponto de integração r.

Recorre-se agora a diversos gráficos de tensão-deformação axial para o ponto de integração na seção i do elemento 399, para duas situações de carga e várias situações de escoamento. As Figuras 4.31 e 4.32 são um exemplo do que acontece em todos os demais. Ocorrem ciclos sucessivos de histereses sem acúmulo de deformação plástica como é ilustrado na Figura 4.31.

Na Figura 4.32, comparam-se dois destes ciclos, um para o carregamento Sismo 0,1g, outro para Sismo 0,1g+Pi, ambos para $C=0,2$. Fica patente o deslocamento produzido pela pressão interna.

Em particular, avalia-se a situação do ponto $f_{01} = 2,5Hz$, $C=0,2$, na Figura 4.30. Para este, além do ponto de integração r, olham-se outros pontos e, em nenhum deles é possível assinalar a ocorrência de catraqueamento. Isto sugere um estudo mais extenso de modo a, se possível, propor um zoneamento semelhante ao de Burgreen para o contexto do SSS em estudo.

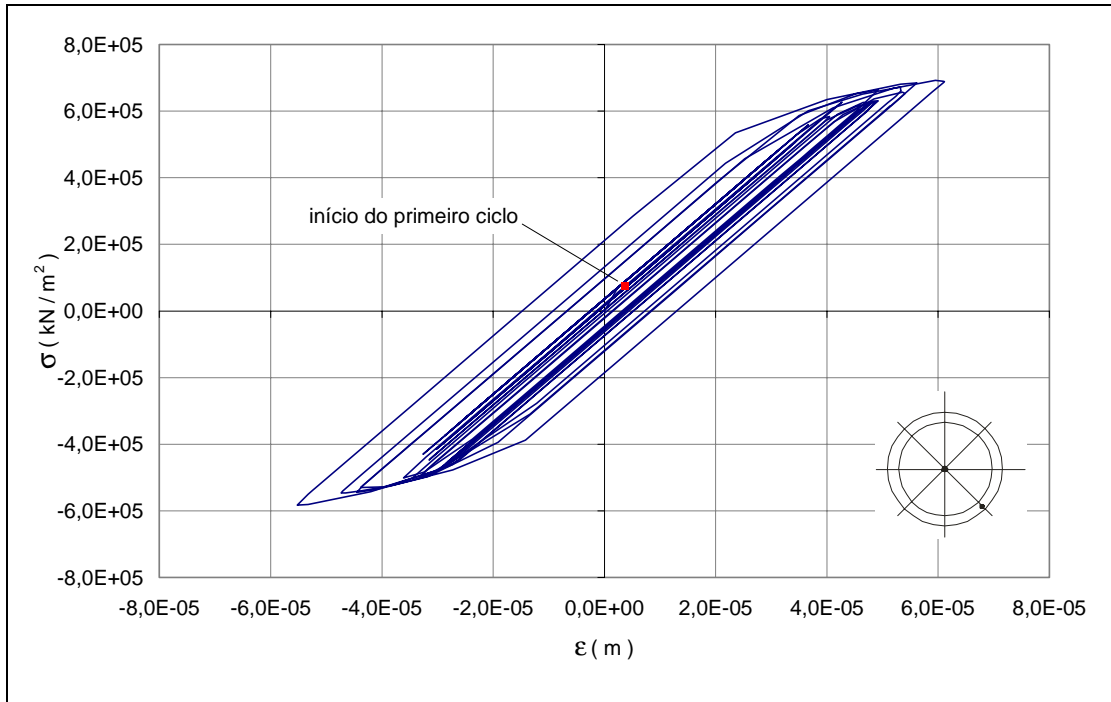


Figura 4.31 – Gráfico tensão-deformação. Elemento 399, seção i, ponto de integração r.

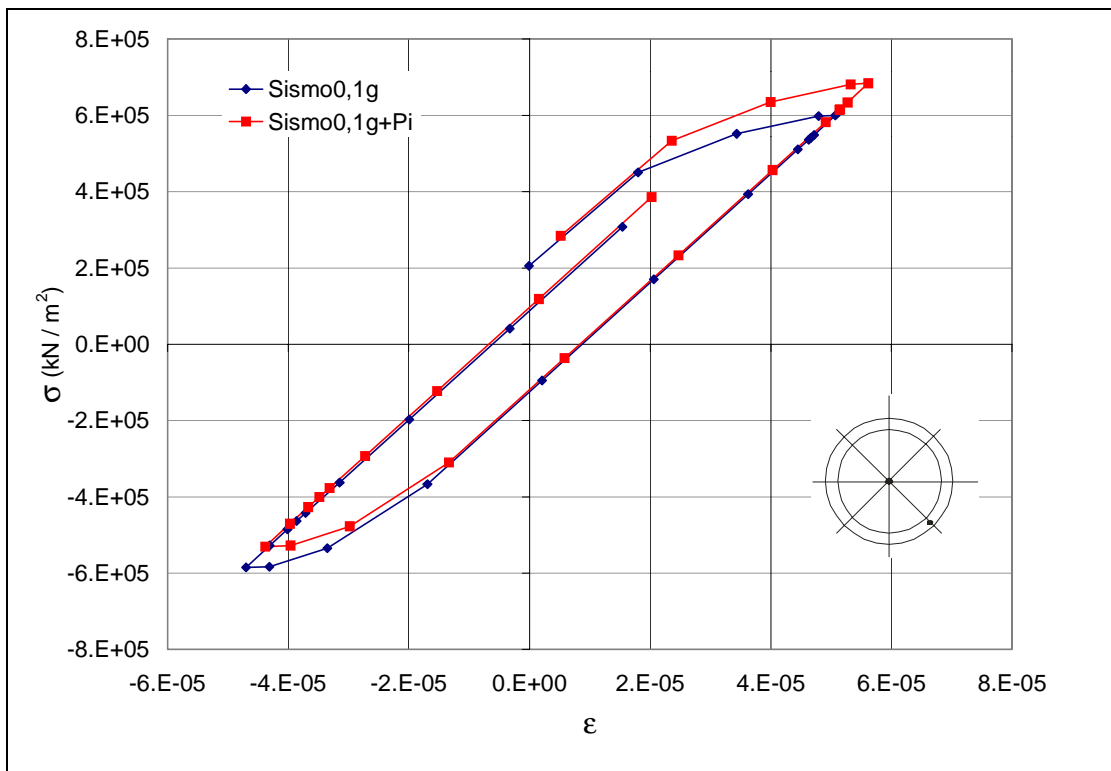


Figura 4.32 – Gráficos de tensão deformação para Sismo0,1g+Pi e Sismo0,1g. Elemento 399, seção i, ponto de integração r.

4.6. Síntese das variações espectrais devidas à utilidade

Partindo-se do estudo paramétrico realizado sobre o modelo de sistema secundário simplificado, com características dinâmicas ajustadas de forma a representar um sistema de tubulação real, pode-se resumir os dados obtidos nas análises feitas até aqui em curvas que dependem do fator de escoamento e do de amortecimento e que podem, com boa aproximação, representar o comportamento de um sistema secundário que siga características dinâmicas semelhantes às do modelo utilizado. Neste estudo, discutido e comentado nos itens 4.2 a 4.5, são avaliados os efeitos da amplitude do carregamento sísmico, da combinação deste com a pressão interna, do fator de escoamento e do de amortecimento. Tais curvas agora são apresentadas na Figura 4.33, em função da frequência fundamental do sistema secundário simplificado parametrizadas pela frequência fundamental do sistema principal para os casos de $\xi = 0\%$ e 7% . Os casos de C igual a $0,6$ e $0,8$ não apresentam, praticamente, modificações significativas em relação à resposta elástica.

Os espectros da Figura 4.33 podem assim servir de referência para aproximar a representação de um espectro inelástico a partir do elástico correspondente, para sistemas cujas características se insiram no contexto dos sistemas estudados. A afirmação é, portanto, também válida para a aproximação de um espectro de resposta acoplada uniformemente provável para o sistema inelástico a partir de um espectro de resposta acoplada uniformemente provável para o sistema linear elástico. Na Tabela 4.2 têm-se os fatores que relacionam o espectro elástico com o inelástico para o caso amortecido e não amortecido.

Tabela 4.2 – Fator de relação entre os espectros elástico e inelástico

f_{0s}/f_{osp}	C = 0,2		C = 0,4		C = 0,6	
	$\xi = 0$	$\xi = 7\%$	$\xi = 0$	$\xi = 7\%$	$\xi = 0$	$\xi = 7\%$
0,05	0,4	0,45	0,6	0,62	1,0	1,0
1,0	0,6	1,0	0,8	1	1,0	1,0
1,2	1,0	1,2	1,0	1,05	1,0	1,0
1,8	3,0	1,7	1,3	1,15	1,0	1,0
6,6	1,0	1	1,0	1,0	1,0	1,0

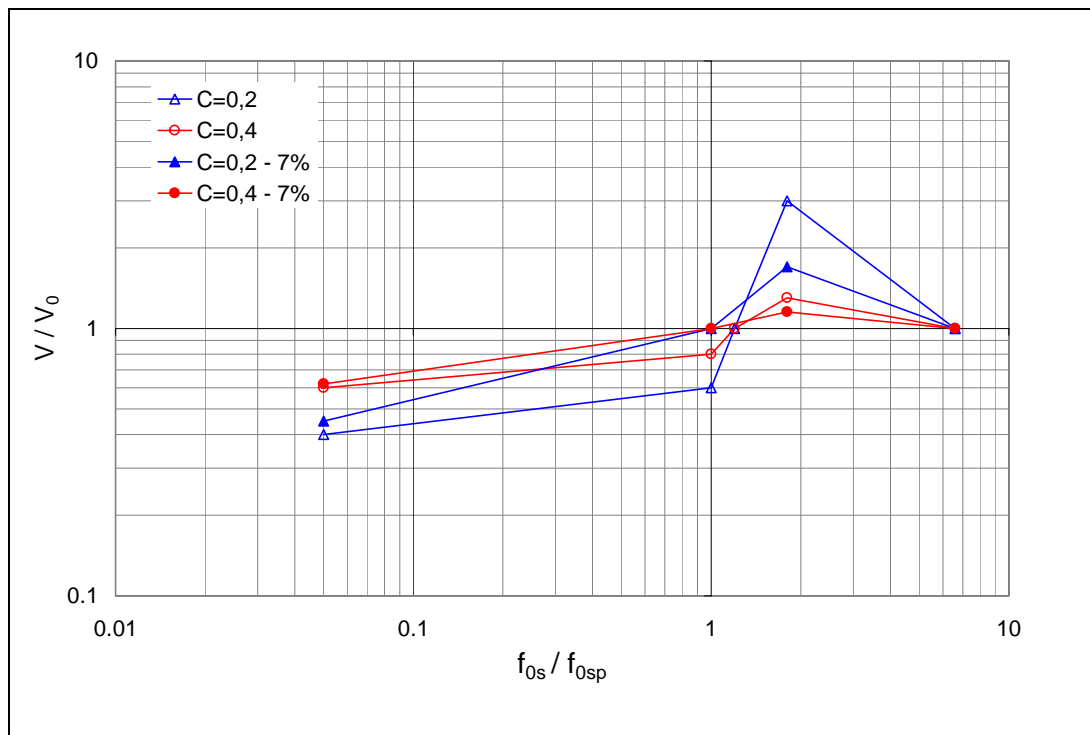


Figura 4.33 – $V/V_0 \times f_{os}/f_{osp}$ em função de C , $\xi = 0$ e $\xi = 7\%$

4.7.

Exemplo de aplicação

4.7.1.

Apresentação

Com o intuito de ilustrar a metodologia desenvolvida, são gerados exemplos de espectros de resposta acoplada uniformemente prováveis. Utiliza-se o modelo 2D do prédio do reator da usina de Angra3. A geração desses espectros é feita, para o sistema secundário linear elástico, utilizando a metodologia descrita em 4.9 e, uma transposição destes para um espectro de resposta acoplada uniformemente provável para o sistema secundário inelástico.

4.7.2.

Modelo do reator, excitação e sistema secundário

O modelo do prédio do reator é composto por elementos de barra lineares elásticos na superestrutura. Neste modelo as estruturas, externa, interna e a contenção de aço são representadas por três ramos que são interligados por barras rígidas nos níveis $y = 0,15$ m e $y = 10,86$ m. A estrutura anelar é representada por

elementos de mola que interligam as estruturas externa e interna. A massa e a rigidez da estrutura são distribuídas considerando-se a estrutura como axissimétrica, sendo as massas concentradas em nós discretos. A base do prédio é modelada por elementos finitos tridimensionais e elementos de barra de alta rigidez que circundam todo o seu perímetro e que ligam as extremidades desta na direção radial fazendo assim a base aproximadamente rígida. A estrutura é conectada sobre a barra rígida radial, sendo o ramo representativo da estrutura interna ligada no centro e o da estrutura externa deslocada de 0,05 m na direção do eixo x, Figuras 4.34 e 4.35.

O modelo está superficialmente ligado ao solo através dos nós da face inferior da base. O solo é considerado como um semi-espaço, pois a região da usina Angra 3 tem subsolo rochoso e suas propriedades não variam com a profundidade.

O sistema secundário é um sistema de massa-mola-amortecedor conectado ao sistema principal no ponto onde se deseja obter o espectro de resposta e cuja frequência é variada através de sua massa e rigidez de modo a trabalhar com relações de massa próximas das reais. A taxa de amortecimento, relativa ao amortecimento crítico, considerada no SS é de 7%.

Três casos são considerados no que se refere ao acoplamento do sistema secundário ao sistema principal; acoplamento em um ponto, acoplamento em dois pontos e em quatro pontos. Assim sendo, o S1GL é acoplado ao sistema principal nas três formas seguintes:

- acoplado ao nó 178 (A1P);
- acoplado aos nós 174 e 178 (A2P) e;
- acoplado aos nós 174, 178, 146 e 148 (A4P).

A excitação sísmica é definida por uma densidade espectral de potência objetivo utilizado no contexto da usina de Angra 3 (Figura 4.36).

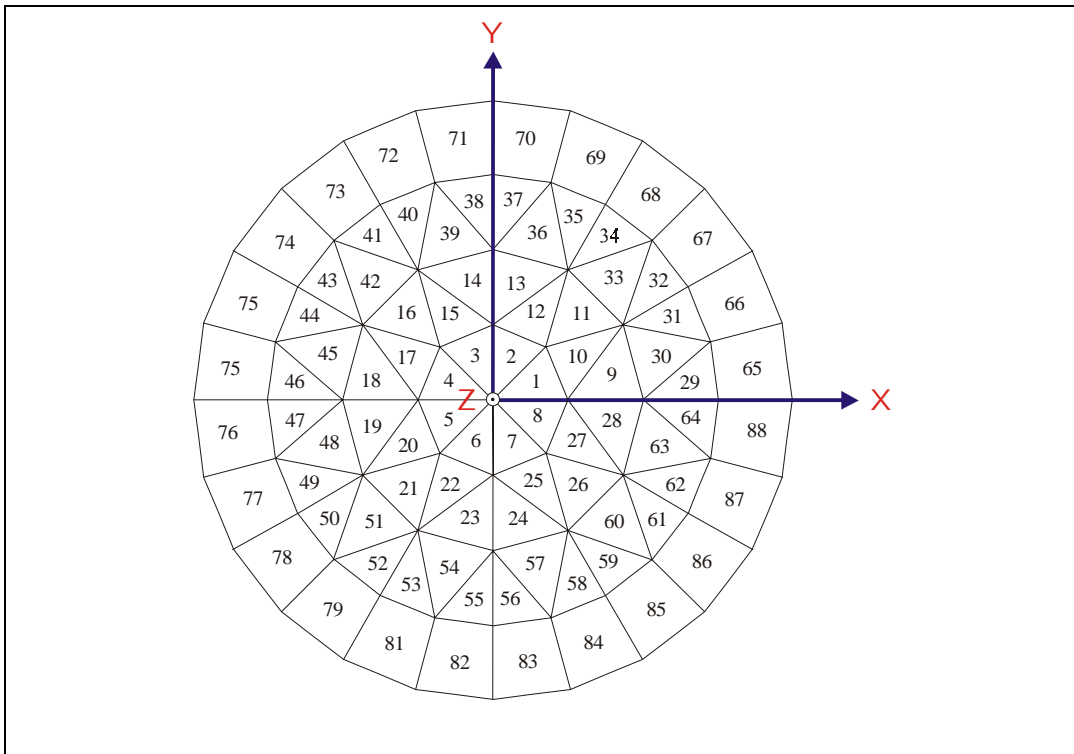


Figura 4.35 – Modelo da base do prédio do reator

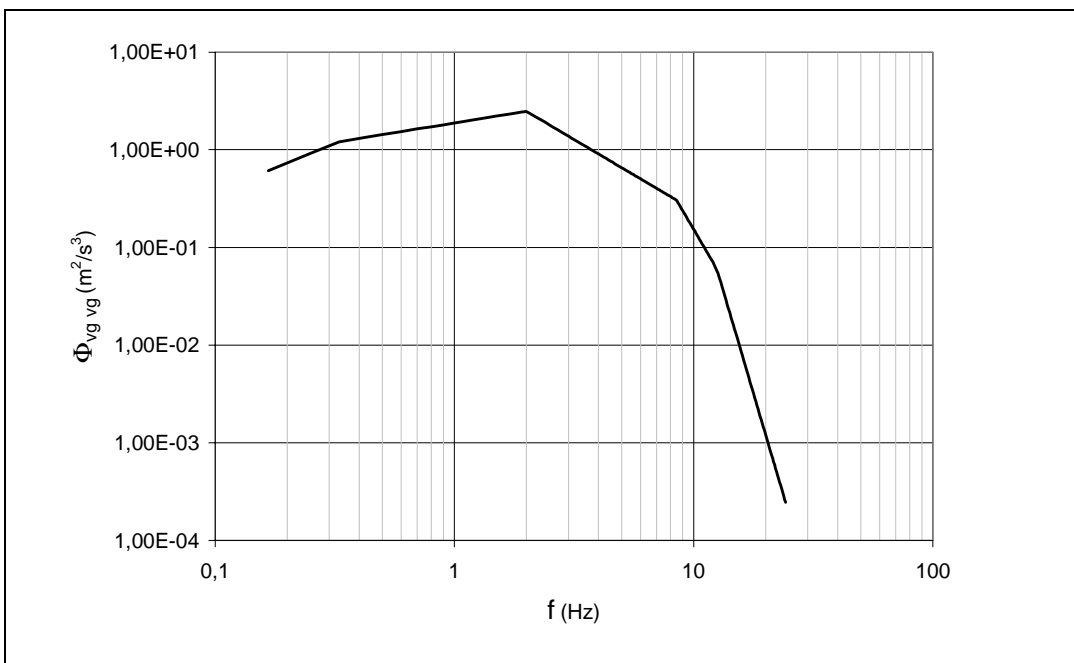


Figura 4.36 – Densidade espectral de potência objetivo para o sítio de Angra 3 (Weston Geophysical Research Inc,1972).

4.7.3. Espectro de resposta acoplada uniformemente provável

Resume-se a obtenção do ERAUPE (item 3.9) para o exemplo nos seguintes passos:

- discretização do modelo acoplado no programa SASSI 2000 (Lysmer et al, 1999) com o S1GL com frequência $f_{0,j}$.
- análise no domínio da frequência para obtenção da função de transferência da aceleração do sismo para a resposta em aceleração no nó de apoio do SS;
- cálculo da densidade espectral de potência da resposta em aceleração no ponto de apoio do SS;
- cálculo da função de transferência de uma aceleração na base de um S1GL para o deslocamento relativo na massa do mesmo;
- cálculo da densidade espectral de potência da resposta em deslocamento relativo na massa do S1GL;
- cálculo do deslocamento máximo na massa do S1GL com uma determinada probabilidade de não ser ultrapassado;
- modificação da frequência do S1GL, retornando para o primeiro passo.

Para a análise no domínio da frequência utiliza-se o programa SASSI (2000). Este é um programa de análise estrutural de sistemas solo-estrutura sob carregamento dinâmico. A metodologia utilizada tem como base principal o método de análise de subestruturação de volume flexível. O método é formulado no domínio da frequência usando técnicas de elementos finitos.

A obtenção das densidades espectrais no nó do S1GL, a determinação das distribuições de probabilidade e, a determinação dos valores máximos de resposta do SS que apresentam a mesma probabilidade de não serem ultrapassados, é feita com dois programas, GFIBASE e EXCONF, ambos de autoria de Diniz de Almeida (2002).

Nos casos de acoplamento em mais de um ponto faz-se conveniente ainda realizar uma média ponderada entre as densidades espectrais de cada ponto de apoio. Esta ponderação é feita pela rigidez de cada apoio em relação à rigidez equivalente.

$$\Phi_{\ddot{v}_b \ddot{v}_b} = \sum_{i=1}^n \alpha_i \Phi_{\ddot{v}_{bi} \ddot{v}_{bi}} \quad (4.5)$$

$$\alpha_i = \frac{k_i}{\sum k_i} \quad (4.6)$$

onde: k_i - coeficiente de rigidez da mola i ;

$\Phi_{\ddot{v}_{bi} \ddot{v}_{bi}}$ - densidade espectral de potência em cada apoio do S1GL.

Os espectros de resposta acoplada uniformemente prováveis, elásticos e inelásticos para os casos de acoplamento em um ponto, dois pontos e quatro pontos são apresentados na Figura 4.37.

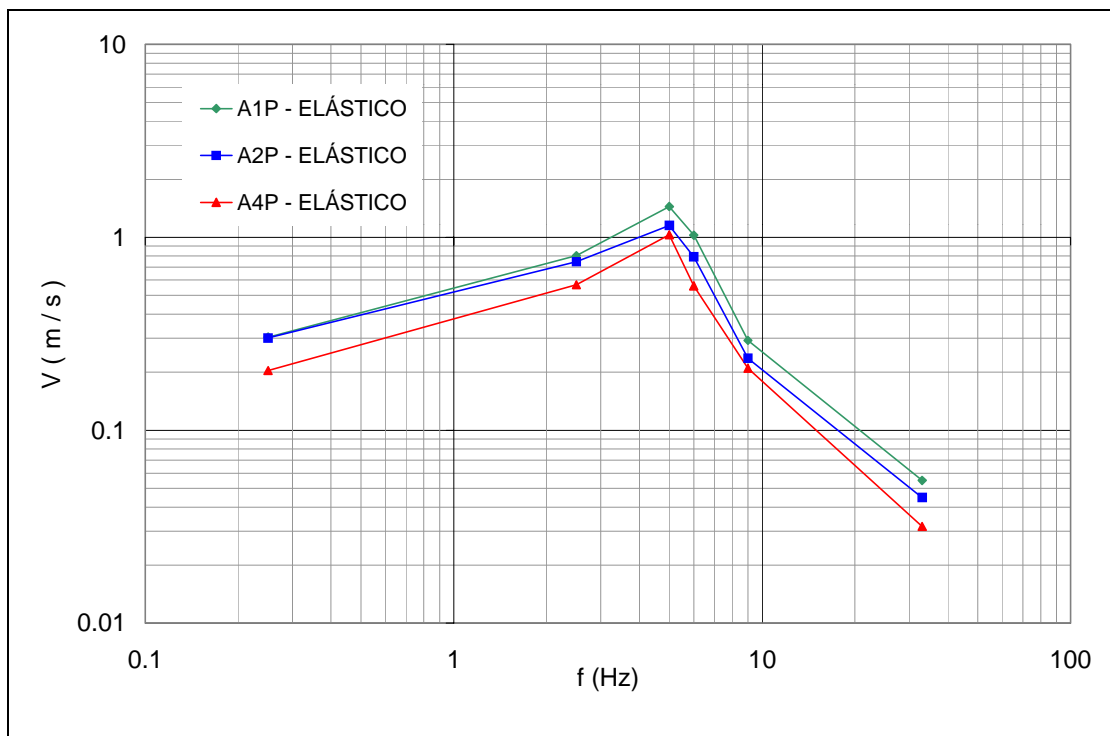


Figura 4.37 - Espectro de resposta acoplada de projeto uniformemente provável, elástico. Sistema secundário com $\xi = 7\%$. Sistema principal: modelo do prédio do reator da usina Angra 3. Acoplamento em um, dois e quatro pontos.

Observa-se o efeito do deslocamento entre suportes nos três casos, ao longo de todo espectro. Na região central a densidade espectral da excitação como uma média entre as densidades dos nós provoca o afastamento entre as curvas. À esquerda, com a rigidez do S1GL tendendo a zero, a massa deste tende a ficar em repouso e então, o afastamento entre as curvas também indica a diferença de deslocamento nos nós do SP que apóiam o S1GL. Na região direita com a rigidez do S1GL muito alta, a diferença entre as curvas mostra o quanto a aceleração nos outros nós diferem da do nó 178.

A transposição para espectros inelásticos é feita simplesmente aplicando-se os fatores da Tabela 4.2, caso $C=0,2$ e $\xi = 7\%$ sobre os espectros elásticos. Na Figura 4.38, como exemplo, têm-se os espectros, elástico e inelástico, para o caso de acoplamento em um ponto, nó 178. O caso de acoplamento em vários pontos segue procedimento semelhante.

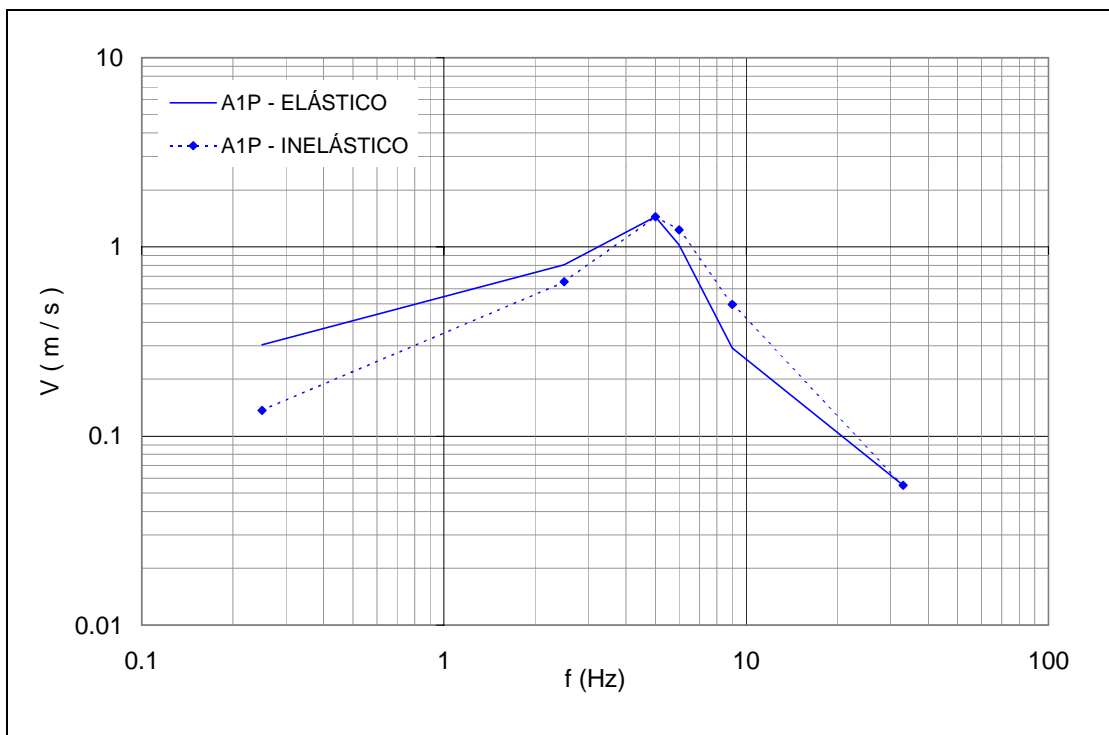


Figura 4.38 - Espectro de resposta acoplada uniformemente provável, elástico e inelástico. Sistema secundário com $\xi = 7\%$. Sistema principal -modelo do prédio do reator da usina Angra 3. Acoplamento em um ponto.

Desta maneira, fica demonstrada a aplicação da metodologia proposta na obtenção de Espectros de Resposta Acoplada, de Projeto Uniformemente Prováveis para Sistemas Secundários Inelásticos. Destaca-se o procedimento relativamente simples e a expressão extensa do conteúdo do resultado. Uma generalidade pode ainda ser obtida com a exploração de mais alguns parâmetros.

5 Conclusões

Inicialmente, ainda num quadro de análise de situação, chega-se às seguintes constatações:

- a relevância do esforço despendido no projeto de sistemas secundários no contexto do volume de trabalho de projeto nas usinas termonucleares;
- a multiplicidade e variedade dos sistemas secundários recomendam uma metodologia adequada de projeto a estas condições;
- a conveniência de levar em conta, no projeto, particularidades desses sistemas secundários, especialmente quanto ao acoplamento das respostas dos conjuntos do sistema principal e do secundário e da consideração de caráter inelástico na resposta deste último.

O desenvolvimento dos trabalhos permite destacar as seguintes contribuições e conclusões:

- formulação de um coeficiente de utilidade global para o sistema secundário baseado na relação entre o trabalho positivo total e o elástico produzido pelo carregamento sobre o sistema;
- fixação de um fator de escoamento, C , com base na maior resposta linear elástica de cada caso de sistema e carregamento;
- obtenção de relações entre os espectros de resposta elástico e inelástico, parametrizadas pelo fator de escoamento C ;
- incorporação de sensibilidade quanto às configurações dos espectros de utilidade do sistema secundário e dos seus suportes e quanto às configurações de espectros de resposta acoplada inelásticos;

- informações iniciais quanto à ocorrência do catraqueamento nos sistemas secundários submetidos à pressão interna;
- avaliação do potencial transferido para o comportamento inelástico dos sistemas em função da relação entre a pressão interna e a carga sísmica influenciadas pelo fator de amortecimento;

Como resultado deste desenvolvimento propõe-se uma metodologia para a geração de espectros de resposta de projeto considerando:

- o movimento relativo entre os suportes;
- acoplamento entre os sistemas principal e secundário;
- interação solo estrutura;
- um compromisso probabilístico entre as ordenadas do espectro e;
- comportamento inelástico do sistema secundário e seus suportes

Tal metodologia ao final resume-se, no que diz respeito à análise do sistema, na obtenção da função de transferência da base ao nó de apoio do sistema secundário para o qual deseja-se o espectro. No exemplo proposto utiliza-se o programa SASSI 2000, que a despeito das dificuldades de sua utilização, principalmente no que tange a saída e entrada de dados e ao ajuste das funções de transferência, corresponde satisfatoriamente na consideração de interação solo estrutura e análise no domínio da frequência.

Naturalmente, as conclusões estão condicionadas ao contexto dos modelos utilizados, quer computacionais, quer matemáticos e mecânicos e traduzidos principalmente pelos parâmetros empregados e respectivas faixas de sua exploração. Menciona-se, com destaque, os seguintes:

- variação das relações entre a rigidez inicial e final do comportamento bilinear do sistema de tubulação e seus suportes;

- variação das relações entre tensão deformação do material dos tubos e entre força deslocamento dos seus suportes;
- variação do valor relativo da pressão interna para o sismo;

Em conseqüência, sugere-se a extensão do estudo nessas direções de forma a consolidar a metodologia e inferir uma carta de recomendações para a elaboração de espectros de resposta acoplada uniformemente prováveis para sistemas secundários inelásticos de instalações industriais submetidas à solicitação sísmica.

6

Referências bibliográficas

ADAM, C; FOTIU, P. A. Dynamic analysis of inelastic primary-secondary systems. **Engineering Structures**, v. 22, p. 58-71, 2000.

AOKI, Shigeru; WATANABE, Takeshi. Analytical method of response of piping system with nonlinear support. **Journal of Pressure Vessel Technology**, v. 122, p. 437-442, Nov. 2000.

ASFURA, Alejandro; DER KIUREGHIAN, Armen. Floor response spectrum method for seismic analysis of multiply supported secondary systems. **Earthquake Engineering and Structural Dynamics**, v. 14, p. 245- 265, 1986.

BURGREEN, D. **Design methods for power plant structures**. New Jersey : Arcturus Publishers, 1975.

CHABOCHE, J. L. ; NOUAILHAS, D. Constitutive modeling of ratcheting effects- part II of some additional kinematic rules. **Journal of Engineering Materials and Technology**, v. 111, p. 409-416, Oct. 1989.

CLOUGH, Ray W.; PENZIEN, Joseph. **Dynamics of Structures**. 2nd. ed. New York: McGrawHill, 1993.

DINIZ de ALMEIDA, Andréia. **Análise probabilística de segurança sísmica de sistemas e componentes estruturais**. 2002. 140 f. Tese (Doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

ENDO, R.; MUROTA, M.; KAWAHATA, J. I.; SATO, T.; HIROSE, J.; NEKOMOTO, Y.; TAKAYAMA, Y.; KOBAYASHI, H. The development of design method of nuclear piping system supported by elasto-plastic support structures (part 2) . In : INTERNATIONAL CONFERENCE ON STRUCTURAL MECHANICS IN REACTOR TECHNOLOGY, 13. , 1995 , Porto Alegre, **Transactions...** Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, 1995. p. 459-464.

FAJFAR, P.; NOVAK, D. Floor response spectra for inelastic structures. INTERNATIONAL CONFERENCE ON STRUCTURAL MECHANICS IN REACTOR TECHNOLOGY, 13. , 1995. Porto Alegre. **Transactions...** Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul , Escola de Engenharia, p. 259-264.

FAJFAR, P.; VIDIC, T. Consistent inelastic design spectra: hysteretic and input energy. **Earthquake Engineering and Structural Dynamics**, v.23, p. 523-537, 1994.

GASTAÑAGA, W. J. O. Avaliação dos critérios para aplicação da análise espectral sísmica em sistemas de tubulações. Rio de janeiro, 1998. Dissertação (mestrado). Pontifícia Universidade Católica do rio de Janeiro, Rio de janeiro, 1998.

GUPTA, A; GUPTA, A.K. New developments in coupled seismic analysis of equipment and piping. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON STRUCTURAL MECHANICS IN REACTOR TECHNOLOGY, 13., 1995, Porto Alegre. **Transactions...** Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, v. 2, 1995.

GUPTA, A. K. Response spectrum method in seismic analisys and design of structures. Tokio: CRC Press, 1986.

HASSAN, Tasnim; ZHU, Yimin; MATZEN, Vernon C. Improved ratcheting analysis of piping components. **International journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 75, p. 643-652, 1998.

JIANG, Y; SEHITOGLU, H. Modeling of cyclic ratchetting plasticity, Part I: development of constitutive relations. **Journal of Applied Mechanics**, v. 63, p. 720- 733, Sept. 1996.

JOSHI, R. G.; GUPTA, I. D. On the relative performance of spectrum superposition methods considering modal interaction effects. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, v. 17, p. 357-369, 1998.

KRAMER, Steven L. **Geotechnical earthquake engineering**. New Jersey: Prentice Hall, 1996. 738 p.

LAZZERI, L. On the nonlinear response of piping to seismic locals. **Journal of Pressure Vessel Technology**, v. 123, p. 324-331, Aug. 2001.

LYSMER, J; OSTADAN, F; CHIN, C.C. SASSI 2000: a system for analysis of soil structure interaction. Berkeley: University of California, 1999.

LIN, J.; MAHIN, S.A. Seismic response of light subsystems on inelastic structures. **Journal of Structural Engineering**, v. 111, p. 400-417; 1997.

NEWLAND, D. E. **An introduction to vibrations and spectral analysis**. 2 ed. London: Longman, 1978. 284p.

OHNO, N. Constitutive modeling of cyclic plasticity with emphasis on ratcheting. **Jnt. J. Mech. Sci.** , v. 40, n. 2/3, p. 251-261, 1998.

OHNO, N. Current state of the art in constitutive modeling for ratcheting. JN: INTERNATIONAL CONFERENCE ON STRUCTURAL MECHANICS IN REACTOR TECHNOLOGY, 14. , 1997, Lyon. **Transactions...** Lyon: [s. e.], 1997. p. 201-212.

OKEIL, A. M. ; TUNG, C. C. Effects of ductility on seismic response of piping systems and qualification. **Nuclear Engineering and Design**, v. 166, p. 69-83, 1996.

OKEIL, A. M. ; TUNG, C. C. ; AMIN, M. Effect of ductility on seismic response of piping systems, JN: INTERNATIONAL CONFERENCE ON STRUCTURAL MECHANICS IN REACTOR TECHNOLOGY, 13., 1995, Porto Alegre: **Transactions...** Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, 1995. p. 483-488.

ROEHL, J. L. **Dynamic response of ground excited building frames**. 1971. Tese (Doutorado) – Rice University, Houston, 1971.

ROESSET, J. M. Seismic design of nuclear power plant – where are we now?. **Nuclear Engineering and Design**, v. 182, p. 3-15, 1998.

SAMPAIO, R. A. C. **Alternativa na análise de estruturas de usinas termonucleares para cargas sísmicas**. 1999, 146 f. Dissertação (Mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.

SAS IP (Ansys, Inc). Ansys reference manuals – revision 5.2, 1995

SLAGIS, G. C. Basis of current dynamic stress criteria for piping. **Welding Research Council Bulletin**, n. 367, Sept. 1991

USAEC. Regulatory Guide 1.6- **Design spectra for seismic design of nuclear power plants**.

VELETSOS, A. S.; NEWMARK, N. H.; CHELAPATI, C. V. Deformation spectra for Elastoplastic Systems subject to ground shock and earthquake motions. In: WORLD CONFERENCE ON EATHRQUAKE ENGINEERING, 3., 1965, Wellington. **Proceedings...** Wellington: R.E. Owen, 1965. v. 2, p. 663-680.

VALVERDE, M. C. **Desenvolvimento de espectros de resposta para análise estrutural sísmica em sistemas de tubulações**. 1998. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1998.

VIDIC, T.; FAJFAR, P.; FISCHINGER, M.. Consistent inelastic design spectra: strength and displacement. **Earthquake Engineering and Structural Dynamics**, v. 23, p. 523-537,1994.

SINGH, M. P.; CHANG R. S.; SUAREZ, L. E. Floor response spectrum amplification due to yielding of supporting structure. In: WORLD CONFERENCE ON EARTHQUAKE ENGINEERING, 11., 1996, Acapulco. **Proceedings...** Acapulco: [s.n.], 1996. n. 1444

USNRC. Standard review plan: office of reactor regulation. [S.l.], 1989. 12 f. (NUREG-0800, FORMELY nureg-75/087).

WESTON GEOPHYSICAL RESEARCH Inc. **Seismicity analysis and response spectra proposed Angra power plant prepared for Central Elétrica de Furnas**. [S.l.] 1972.