

# ESPECTROS DE RESPOSTA DE SISTEMAS SECUNDÁRIOS INELÁSTICOS

**Regina Augusta Campos Sampaio**

Departamento de Construção Civil. Universidade Federal do Pará.

Rua Augusto Corrêa, 01. Belém, PA, 66075-110 – Brasil.

[rsampaio@ufpa.br](mailto:rsampaio@ufpa.br)

**João Luis Pascal Roehl**

Departamento de Engenharia Civil. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Rua Marquês de São Vicente, 225. Rio de Janeiro, RJ, 22453-900 – Brasil.

[roehl@civ.puc-rio.br](mailto:roehl@civ.puc-rio.br)

**Resumo.** A análise sísmica espectral de sistemas secundários de instalações industriais, em particular de sistemas estruturais de usinas termonucleares, é um recurso valorizado pela multiplicidade, variedade e responsabilidade desses sistemas. Entretanto, em busca da simplicidade de análise têm sido usados espectros de resposta gerados com simplificações que introduzem, certas vezes, fontes de custos desnecessários, o que onera ainda mais o projeto, inspeção e manutenção destes sistemas. Trabalhos anteriores atentam para estas considerações no âmbito das usinas nucleares brasileiras, incorporando os efeitos de acoplamento, do movimento relativo dos suportes e da interação solo-estrutura à rotina de obtenção de espectros de resposta. Propõe-se, agora, uma avaliação do comportamento inelástico dos sistemas secundários através de um sistema secundário simplificado obtido de um trecho de tubulação real e adaptado, em termos de massa e freqüência, às relações requeridas com o sistema principal. Tal sistema é submetido, através do sistema principal, à excitação sísmica. Também é proposta uma forma de definição do fator de escoamento e de um fator de dutilidade global para o sistema secundário. Um exemplo de obtenção de espectros de resposta acoplada e de espectros de dutilidade é apresentado e discutido.

**Palavras-chave:** sistema secundário, espectros de resposta, fator de dutilidade, análise sísmica

## 1. INTRODUÇÃO

A importância dos projetos de usinas nucleares e a necessidade de que estas sejam projetadas para seguramente resistir a 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 o sistema principal e o secundário, o movimento relativo dos suportes, a consideração dos modos rígidos e a 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. No entanto, ainda há a necessidade da consideração de comportamento inelástico dos sistemas secundários.

## 2. BASES

### 2.1. Análise modal espectral de sistemas secundários, suas razões e consequências.

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 discriminação 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 é decomposta em vários sistemas com um grau de liberdade (modos de vibração), e à cada um deles é atribuída a amplificação máxima prescrita no espectro de resposta (de projeto) para o oscilador simples com a freqüência e o amortecimento correspondentes ao modo em consideração.

Uma análise modal e espectral, por suas características de simplicidade e generalidade, atende aos reclamos de um grupo muito grande de SS sobre o qual focaliza-se a atenção do presente desenvolvimento. Assim, a análise espectral encontra, neste novo contexto, circunstâncias específicas:

- 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 freqüências próximas às do  $SP$ ;
- A interação entre os dois sistemas, presidida pela relação entre a frequência do sistema secundário,  $\omega_{ss}$ , e a freqüência,  $\omega_{sp}$  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).
- 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);
- Os sistemas secundários são estruturas relativamente flexíveis e formadas por elementos de material dítil 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).

### 2.2. Consideração de não linearidades

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 freqüência do sistema e a resposta resultante segue, naturalmente, o padrão de uma estrutura mais flexível. Dependendo da composição de freqüências da excitação, ou do espectro de resposta, este deslocamento da freqüência 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 dutilidade suficiente 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 dutilidade na metodologia de análise dos sistemas secundários. Verificando, também, que há um conjunto relativamente numeroso de sistemas secundários cuja análise mais conveniente é a modal espectral tem-se uma expectativa de um espectro de resposta acoplada útil 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 dutilidade do sistema (Vidic et al, 1994, Fajfar e Novak, 1995).e os que buscam avaliar diretamente os espectros de resposta inelásticos (Aoki e Watanabe, 2000 e Adam e Fotiu, 2000). A última opção é a que produz resultados mais exatos, no entanto, a aproximação que tem atraído maior atenção é a primeira.

### **3. METODOLOGIA**

Apresenta-se uma metodologia para estudo dos efeitos nos espectros de resposta de sistemas secundários devido a fatores como: acoplamento entre os sistemas secundário e principal, movimento relativo dos suportes, contribuição dos modos rígidos e inelasticidades no SS. Esta metodologia baseia-se na análise, através de espectros de resposta e espectros de dutilidade, de um sistema secundário simplificado que representa as características dinâmicas de um sistema de tubulações real. A modelagem dos sistemas principal e secundário é feita no programa comercial Ansys (1995). Propõe-se ainda um fator de escoamento dependente da tensão elástica máxima e um fator de dutilidade global para o sistema.

#### **3.1. Espectros de resposta acoplada – metodologia de Valverde (1998)**

Um dos pontos que tem sido discutido e recebido contribuições a respeito das consequências do acoplamento dos sistemas que compõem a estrutura é a interação das propriedades dinâmicas dos SP e 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 SS tem um número expressivamente maior de graus de liberdade que o SP – 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. Valverde (1998) propõe espectros de resposta acoplados para o cálculo de SS onde um S1GL 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 (1) mostra esquematicamente este procedimento. 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.

#### **3.2. Sistema Secundário Simplificado (SSS) e Sistema principal (SP)**

O sistema secundário simplificado (SSS), esquematicamente representado na Fig. (2), foi primeiramente proposto por Gastañaga (1998) . O modelo é composto de trechos retos e curvos de tubulação apoiados sobre molas translacionais e rotacionais que representam os aparelhos de apoio e uma camada de isolamento que atua apenas como um carregamento estático adicional. Este modelo é obtido a partir de um trecho real de um sistema de tubulação do prédio do reator da usina Angra3 e suas propriedades geométricas e mecânicas são modificadas, de tal forma que este represente as características dinâmicas de um sistema de tubulação real, mantendo a relação de massas com o sistema principal (= 0,02) e as freqüências naturais. Desta forma, tanto há interação

entre as massas nas freqüências de sintonia entre os dois sistemas como se trabalha com uma relação próxima da realidade.

Para obtenção de espectros de resposta acoplada pela metodologia de Valverde (1998), o sistema secundário é um S1GL, o que simplifica a manipulação da sua freqüência natural. No caso do SSS temos um conjunto de freqüências para cada posição do espectro e não apenas uma; e, há vários pontos no SSS onde podem ser lidas as respostas. Escolhe-se, então, a freqüência fundamental do SSS como determinante desses conjuntos e são adotados valores seguindo as recomendações do Regulatory Guide 1.60 - USAEC (Tab. 3). 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 freqüências que se queira trabalhar (Tab. 1). Ressalta-se que o coeficiente de rigidez inicial do material dos suportes (Tab. 2) é mantido inalterado.

O sistema principal é uma estrutura tridimensional genérica em concreto armado, em forma de pórtico retangular fechado 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 freqüências deste sistema cobre as típicas de um prédio de reator (Tab. 4). A massa total do prédio é igual a 1350 t.

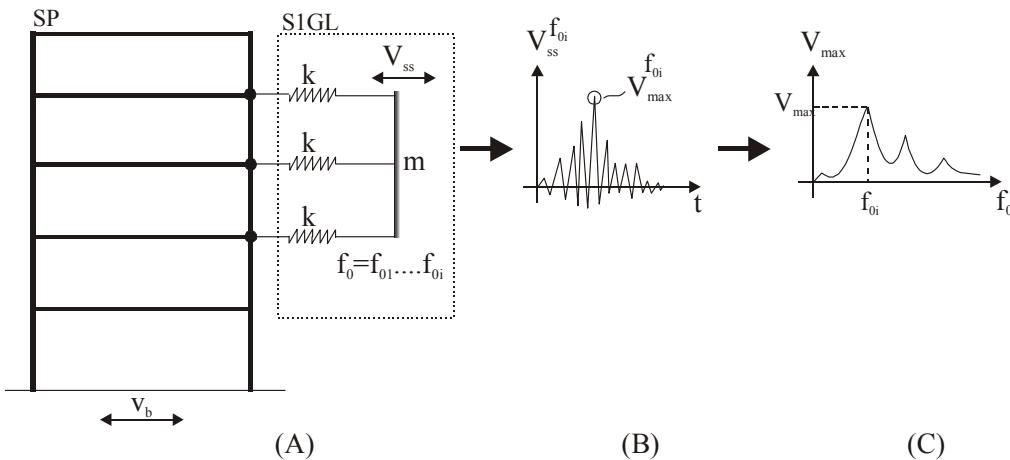


Figura 1. Procedimento esquemático para obtenção de espectros de resposta acoplada (Valverde, 1998). a) S1GL com frequência natural  $f_n$  apoiado em  $k$  pontos do SP que é excitado na base por  $V_b$ . b) obtenção da resposta na massa  $m$  para  $f_n$ . C) o valor máximo da resposta compõe uma ordenada do espectro de resposta.

Tabela 1. Módulos de elasticidade e freqüências fundamentais do SSS

$f_{01}$ (Hz)	E (kN/m <sup>2</sup> )
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	$243,60 \cdot 10^9$

Tabela 2. 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. Fig (1)

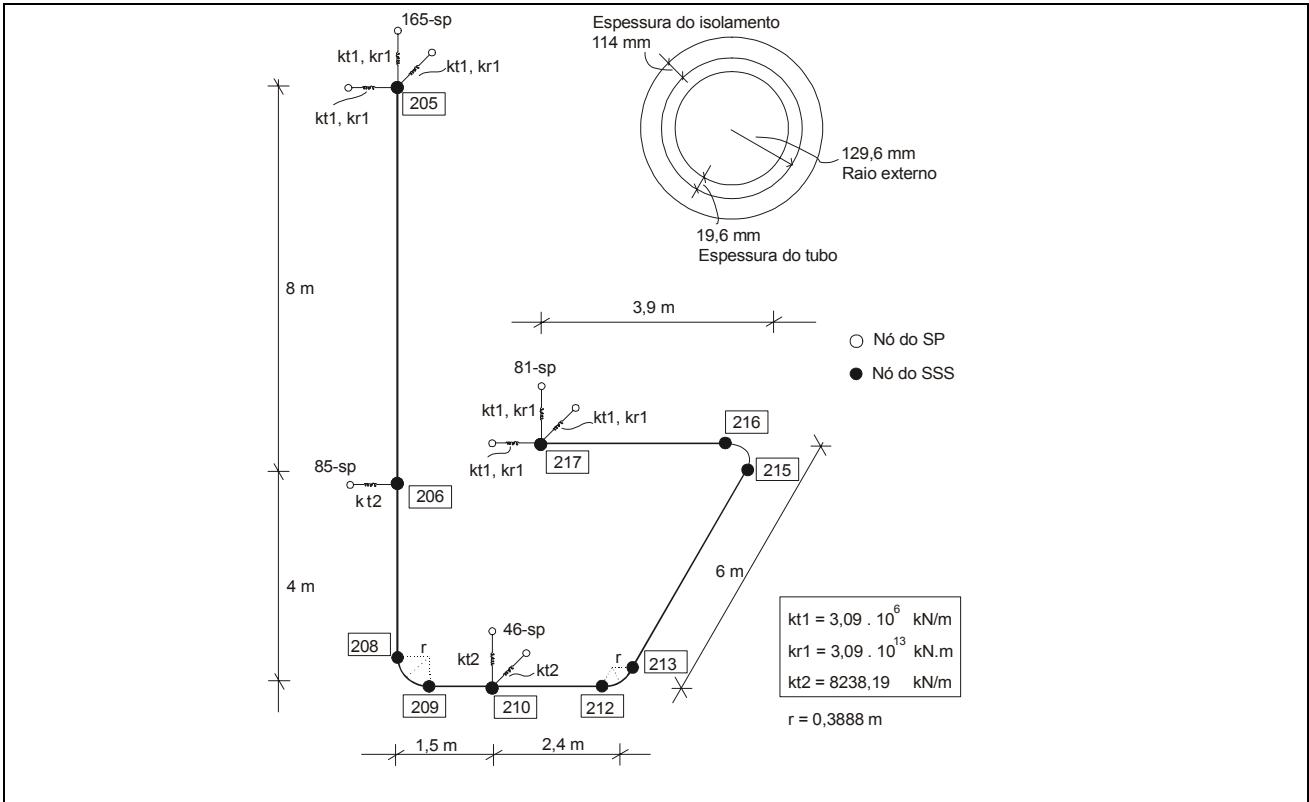


Figura 2. Representação esquemática do sistema secundário simplificado

Tabela 3. Valores das relações,  $f_{0i}/f_{01}$ , das 10 primeiras freqüências do SSS para a sua freqüência fundamental.

$f_{01} = 0,25 \text{ Hz}$	$f_{01} = 2,5 \text{ Hz}$	$f_{01} = 5 \text{ Hz}$	$f_{01} = 9 \text{ Hz}$	$f_{01} = 33 \text{ Hz}$
$f_{0i}/f_{01}$	$f_{0i}/f_{01}$	$f_{0i}/f_{01}$	$f_{0i}/f_{01}$	$f_{0i}/f_{01}$
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

Tabela 4. Dez primeiras freqüências do SP,  $f_{0pi}$ , e suas massas modais,  $m_i$ .

Modo i	$f_{0pi} (\text{Hz})$	$m_i (\text{t})$
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

### 3.3. Modelagem no programa Ansys e consideração do comportamento inelástico

A modelagem dos sistemas principal e secundário é feita no programa Ansys (1995). O sistema secundário, formado por tubos, cotovelos e aparelhos de apoio, é modelado com elementos PIPE20, PIPE60 e COMBIN40, respectivamente.

O PIPE20 (Fig. 3a) é usado para discretizar os trechos retos de tubulação enquanto o PIPE60 (Fig. 3b) é um elemento de tubo curvo, utilizado para modelar as conexões em curva, respectivamente. São elementos 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. 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. Nestes elementos de tubulação, para o comportamento inelástico, adota-se o critério de escoamento de Von Mises com regra de fluxo associada e encruamento cinemático definido pela Eq. (1). Onde  $S_{ij}$  é o

tensor de tensões desviadoras dado por  $S_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3}\sigma_{kk}\delta_{ij}$ ,  $\delta_{ij}$  o delta de Kronecker e  $\alpha_{ij}$  é a variável de encruamento que determina o centro da superfície de escoamento. E  $\sigma_{eq}$  é a função de tensões que delimita o domínio elástico determinando o nível de tensão para o qual o escoamento se inicia, chamada de função de escoamento e que pode ser interpretada como uma Tensão Equivalente. A tensão equivalente é uma tensão de comparação com a tensão de escoamento.

$$\sigma_{eq} = \frac{3}{2}(S_{ij} - \alpha_{ij}) \quad (1)$$

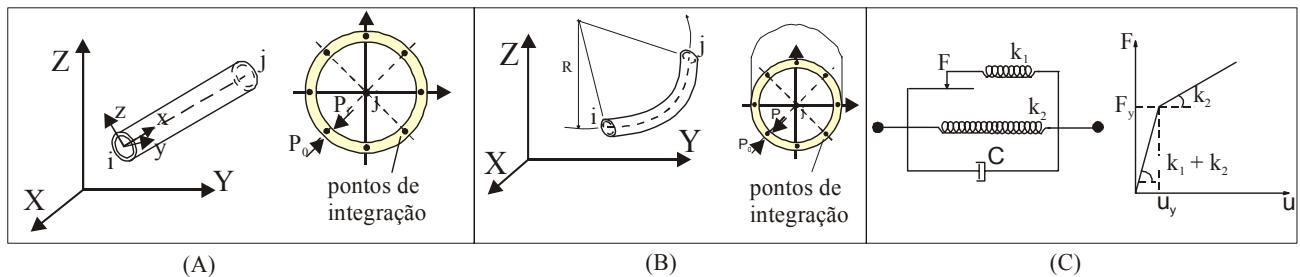


Figura 3. Elementos (A) PIPE20, (B) PIPE60 e (C) COMBIN40

O COMBIN40 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. 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 Fig. (3c).

### 3.4. Fatores 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 Eq. (2). 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. Na Eq. (2)  $\sigma_0$  é a tensão equivalente elástica máxima e  $\sigma_y$  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.

$$C = \frac{\sigma_0}{\sigma_y}, \quad C < 1 \quad (2)$$

### 3.5. Fatores de Dutilidade

Busca-se uma forma de exprimir a ocorrência de efeitos não-lineares e inelásticos no sistema secundário por um índice único, de maneira a propiciar, futuramente, a transposição das observações sobre o comportamento do SSS a um sistema de um grau de liberdade. 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 dutilidade 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 (Sampaio, 2003). 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 dutilidade do sistema,  $\mu$ , a relação entre estas duas quantidades de trabalho, Eq. (3). A parcela de  $\mu$  que excede a unidade passa a representar uma medida da dutilidade global do sistema em termos da sua capacidade elástica.

$$\mu = \frac{T_m}{T_e} \quad (3)$$

## 4. EXEMPLO E DISCUSSÃO

Estudos iniciais do efeito, nos espectros de resposta, da consideração do comportamento não linear do material são feitos usando-se a metodologia apresentada. Para tal, são obtidos espectros de resposta e espectros de dutilidade em função do fator de escoamento e da taxa de amortecimento viscoso, em dois pontos do SSS acoplado ao SP e submetido a carregamento sísmico na base do SP na direção do eixo global x-x. Escolhe-se um sismo de projeto proposto para utilização no projeto da usina Angra 3, normalizado para aceleração máxima de 1g e 0,1g (Sampaio, 2003).

### 4.1. Espectros de dutilidade

O aspecto geral dos espectros de dutilidade é o de uma função de transferência da cinemática do ponto de controle para os nós do SSS e através do SP (Fig. 4). Em razão disto o espectro apresenta três regiões distintas.

Região central - identificada pelas freqüências do SSS que se aproximam das freqüências naturais do SP na direção da solicitação 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. Pode ser sentido também o comportamento característico dos sistemas não lineares inelásticos de se apresentarem como sistemas mais flexíveis, acarretando uma queda nas suas freqüências 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 dutilidade obtidos para diferentes valores de C. Os fatores de dutilidade, 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,  $\mu$  é menor que 1,2.

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. 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 dutilidade 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 freqüência natural de 69,2 Hz e as assíntotas para as curvas de dutilidade para C variável, são as correspondentes a tal situação.

Se não há presença de outros carregamentos como a pressão interna ou uma variação de temperatura então o fator de dutilidade não modifica com a variação da aceleração máxima do sismo. Lembra-se que a tensão de escoamento é estabelecida a partir da tensão elástica máxima para cada caso. Assim sendo, os deslocamentos e tensões são reduzidos de um fator igual ao utilizado

para normalização da aceleração máxima do sismo e o fator de dutilidade é calculado a partir da razão entre os trabalhos total e elástico.

Com a inclusão do amortecimento, tem-se uma variação do fator de dutilidade, Fig. (5), que pode ser positiva ou negativa dependendo da freqüência e que é mais significativa na região central do espectro, como era de se esperar. Para a freqüência de 9 Hz a redução é de 70%.

## 4.2. Espectros de resposta

São obtidos espectros de resposta para os nós 206 e 210, (Fig.6), no entanto por razões de espaço são apresentados os resultados apenas para o nó 206, mas as observações aplicam-se. Fazendo-se uma análise geral para carregamento sísmico, os espectros de resposta do SSS apresentam-se também em três regiões com características distintas:

Região central – nesta região as maiores amplificações ocorrem, como esperado, nas vizinhanças da freqüência 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 freqüência 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 freqüência do SSS.

Identificam-se assim, nesta região, três freqüências marcantes. Uma, a de 5 Hz, por ser a freqüência 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 freqüência 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 é mostrada na Fig. 8.

Região extrema esquerda – Esta corresponde ao SSS com baixas freqüências fundamentais, e, assim, os valores especrais tendem para os do nó de apoio, como já visto. Mas, o SSS tem um limite mínimo de freqüência 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 (Fig. 7a). No nó 206 a relação é igual a 0,38.

Região extrema direita – É caracterizada pelas altas freqüências do SSS, o modelo responde como um corpo rígido de massa igual à massa total do SSS apoiada sobre os elementos de mola (Fig 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.

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. O resultado sobre as respostas inelásticas,  $C<1$ , é de aproximá-las da elástica, deslocando a freqüência de transição para a qual  $V/V_0$  é igual a 1, para a esquerda, aproximando-a da freqüência de 5 Hz ( $f_{01}/f_{01p} = 1$ ), como pode ser observado na Fig. 9.

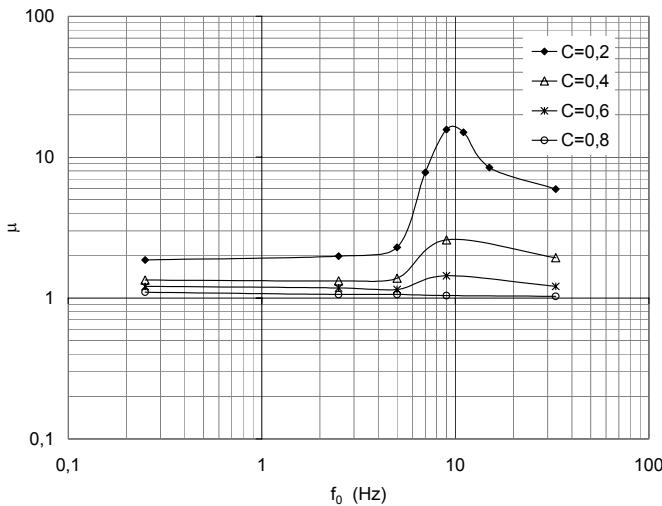


Figura 4. Espectro de dutilidade para o SSS acoplado ao SP, parametrizado pelo fator de escoamento, C. Sismo 1g e 0,1g.

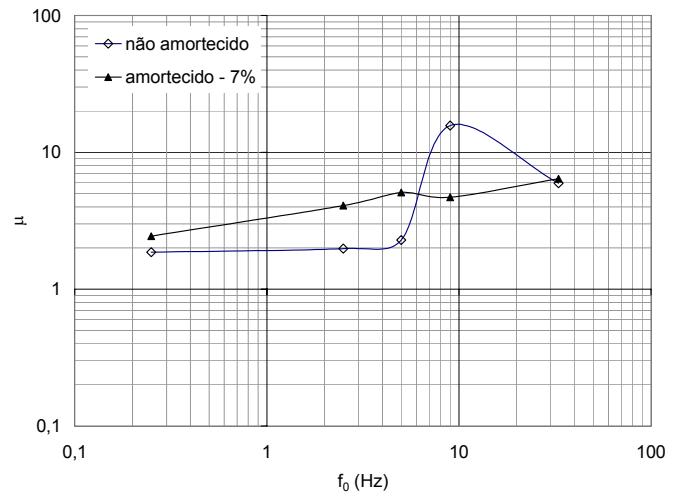


Figura 5. Espectro de dutilidade, C=0,2.

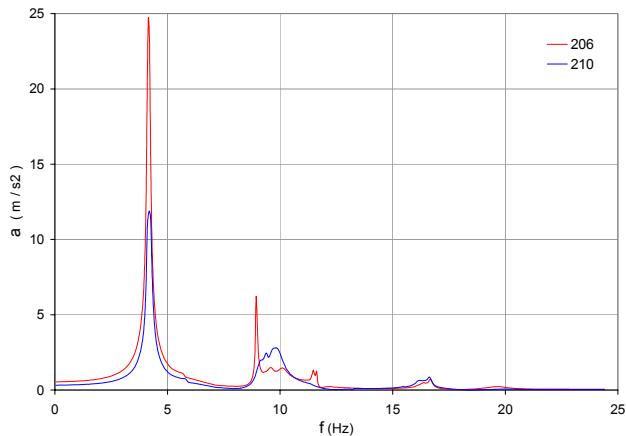


Figura 6. Função de transferência de acelerações do ponto de controle do sismo para os nós 206 e 210 do SSS acoplado ao SP.

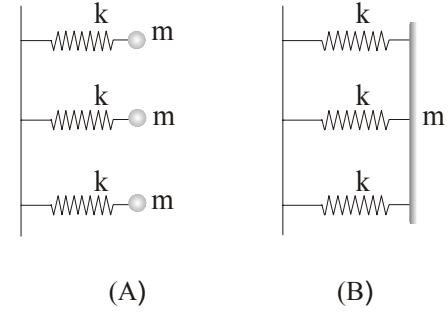


Figura 7. Representação esquemática do SSS. (A) com tubulação muito flexível. (B) com tubulação rígida.

## 5. CONCLUSÃO

No desenvolvimento dos trabalhos destacam-se como importantes contribuições: a formulação de um coeficiente de dutilidade global para o sistema secundário baseado na relação entre o trabalho positivo total e o elástico produzido pelo carregamento sobre o sistema; a fixação de um fator de escoamento, C, com base na maior resposta linear elástica de cada caso de sistema e carregamento; a obtenção de relações entre os espectros de resposta, elástico e inelástico, parametrizados pelo fator de escoamento C; a incorporação de sensibilidade quanto às configurações dos espectros de dutilidade do sistema secundário e dos seus suportes e quanto às configurações de espectros de resposta acoplada inelásticos;

A metodologia para a geração de espectros de resposta de projeto considera: o movimento relativo entre os suportes; o acoplamento entre os sistemas principal e secundário; e o comportamento inelástico do sistema secundário e seus suportes. O exemplo apresentado produz considerações iniciais que estão condicionadas ao contexto dos modelos utilizados, quer computacional, quer matemáticos e mecânicos e traduzidos principalmente pelos parâmetros empregados e respectivas faixas de sua exploração.

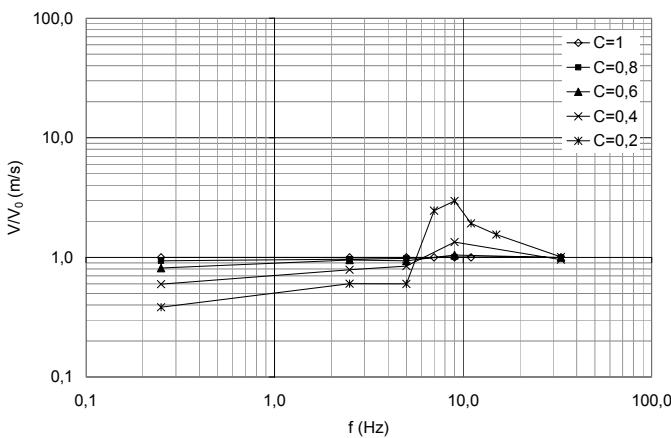


Figura 8. Espectro de resposta em pseudo velocidade normalizado pela resposta linear elástica ( $C=1$ ) e parametrizado pelo fator,  $C$ . Nô 206 do SSS.  $\xi=0$ .

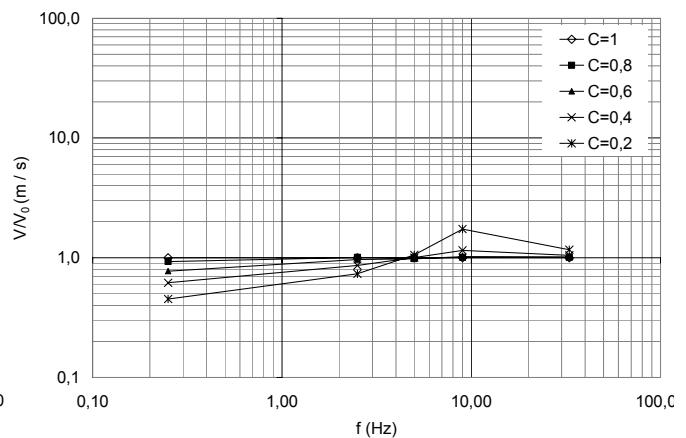


Figura 9. Espectro de resposta em pseudo velocidade normalizado pela resposta linear elástica ( $C=1$ ) e parametrizado pelo fator  $C$ . Nô 206 do SSS.  $\xi=7\%$ .

## AGRADECIMENTOS

Ao CNPq e à Capes pelo financiamento da pesquisa e à Eletronuclear pela colaboração no fornecimento de informações e dados.

## REFERÊNCIAS

- 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.
- FAJFAR, P.; NOVAK, D. Floor response spectra for inelastic structures. INTERNATIONAL CONFERENCE ON STRUCTURAL MECHANICS IN RECTOR TECHNOLOGY, 13. , 1995. Porto Alegre. **Transactions...** Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul , Escola de Engenharia, p. 259-264.
- 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. K. Response spectrum method in seismic analisys and design of structures. Tokio: CRC Press, 1986.
- 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.
- SAMPAIO, R. A. C. **Espectro de resposta de projeto uniformemente provável para sistemas secundários inelásticos**. 2003, 112 f. Tese (Doutorado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.
- 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**.

VELETOS, A. S.; NEWMARK, N. H.; CHELAPATI, C. V. Deformation spectra for Elastoplastic Systems subject to ground shock and earthquake motions. In: WORLD CONFERENCE ON EARTHQUAKE 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.

ENGINEERING, 11., 1996, Acapulco. **Proceedings...** Acapulco: [s.n.], 1996. n. 1444

## INELASTIC SECONDARY SYSTEM RESPONSE SPECTRUM

**Regina Augusta Campos Sampaio**

Civil Engineering Department

Federal University of Pará

66075-110, Augusto Corrêa, 01, Belém, PA, Brazil

[rsampaio@ufpa.br](mailto:rsampaio@ufpa.br)

**João Luis Pascal Roehl**

Civil Engineering Department

Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro

22453-900, Marquês de São Vicente, 225, Rio de Janeiro, RJ, Brazil

[roehl@civ.puc-rio.br](mailto:roehl@civ.puc-rio.br)

**Abstract.** The variability, multiplicity and responsibility of industrial building secondary systems, especially in nuclear power plant structures, are characteristics that make the spectral seismic analysis an important and usual working method. Nevertheless, the design response spectra are generated under some simplified considerations that, in some conditions, increase the design, construction, inspection and maintenance costs of these systems. Some previous works have discussed these problems, in a Brazilian nuclear power plant context, and a couple of propositions have been made related to the consideration of the secondary-primary structure coupling, of the soil-structure interaction and of the relative system support movements in response spectra generation procedures. Now, the inelastic behavior in secondary system materials is under consideration; on this way, one works with a previously developed secondary system model, attached to a primary structure model tuned to the frequency range of a nuclear power plant building. The seismic ground excitation is prescribed as an acceleration time-history on the primary structure base and some coupled inelastic time analyses are obtained. A global ductility factor is defined relating the inelastic to the overall work done by the seismic external forces on the secondary system and a yielding factor is also considered in a particular way. An example is presented and its results are discussed.

**Keywords:** secondary system, response spectrum, ductility factor, seismic analysis.