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

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 "Sismo1g+Pi-7%" e, seguindo este raciocínio, têm-se também os outros três casos: Sismo 0,1g, Sismo 0,1g+Pi e Sismo 1g+Pi. A duração da carga sísmica é limitada aos 10 s de sua fase mais intensa.

4.2. Espectros de dutilidade

4.2.1. Apresentação

Os espectros de dutilidade são gráficos que representam o fator de dutilidade em função da freqüência 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 dutilidade (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.

<u>Região central</u> - 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.

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 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, μ é menor que 1,2.

Mesmo para valores distintos de aceleração máxima do sismo (Figura 4.1), o fator de dutilidade 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 dutilidade 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.

<u>Região extrema esquerda</u> - 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 dutilidade do SS é resultante do efeito conjunto dos apoios que oscilam isoladamente sob a tubulação parada.

<u>Região extrema direita</u> - 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, 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 conseqüência, são reduzidas em número.

O resultado deste efeito é uma antecipação do escoamento e uma redução do fator de dutilidade na região central do espectro. A antecipação do escoamento impede a avaliação da dutilidade 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 sismo0,1g+Pi.

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

Os gráficos das Figuras 4.8 a 4.11 representam, para quatro freqüências do SSS e para C = 0,2, os períodos elásticos e inelásticos do SSS para três casos de carregamento: sismo1g, sismo1g+Pi e sismo1g+Pi- ξ =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 freqüência de 0,25Hz que o acréscimo da Pi (casos não amortecidos) resulta em um maior número de incursões inelásticas, nos primeiros instantes de aplicação do sismo, apesar disto, o fator de dutilidade pouco se altera, havendo inclusive uma redução deste (Figura 4.5). Já para as freqüências 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 dutilidade 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 dutilidade associado.

4.2.4. Amortecimento

Com a inclusão do amortecimento, tem-se uma variação do fator de dutilidade, Figura 4.4, 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%.

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 freqüências do SSS iguais a 0,25 Hz e 5 Hz. Nas freqüências 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 freqüências 5 e 9 Hz com a seguinte argumentação. As Figuras 4.12 e 4.13 mostram tais gráficos,

71

respectivamente, para estas freqüências 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 freqüência de 9Hz enquanto que, para as respostas amortecidas, o potencial maior é para freqüência de 5 Hz. Justifica-se assim, o aparente comportamento díspar, quanto ao fator de dutilidade, entre as freqüências de 5 e 9 Hz.



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



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



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



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



Figura 4.5 - Espectro de dutilidade, 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



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.



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:

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

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

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

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

$$\mu^{*} = 0.8 \cdot \mu \tag{4.3}$$

Ou seja, a dutilidade nos apoios representa 20% da dutilidade 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, ξ =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 dutilidade 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 freqüência, uma vez que no SSS os apoios são mantidos com rigidez constante e;
- pela consideração de inelasticidade no SSS.

<u>Região central</u> – 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 (Figuras 4.23 a 4.26) é mostrada na Tabela 4.1.

С	$f_{01} = 9 \mathrm{Hz}$	$f_{01} = 5 \mathrm{Hz}$
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	$V/V_0 \approx 1$	$V/V_0 \approx 1$

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

<u>Região extrema esquerda</u> – Esta corresponde ao SSS com baixas freqüências fundamentais, e, assim, os valores espectrais 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. 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.

<u>Região extrema direita</u> – 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 (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 conseqüência 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 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 nas Figuras 4.28 e 4.29.

Em $f_{01} = 9$ 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 4.28 - 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 dutilidade 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 freqüência i do SSS como sendo:

$$q_i = \frac{\sigma_{pi}}{\sigma_{si}} \tag{4.4}$$

Localizados os pontos associados às diversas situações dos ensaios verificase que:

- para cada freqüência 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 freqüências.

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, identificase 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 dutilidade

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 freqüência fundamental do sistema secundário simplificado parametrizadas pela freqüência 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

	C = 0,2		C = 0,4		C = 0,6	
f_{0s}/f_{osp}	ξ = 0	ξ = 7%	ξ = 0	ξ = 7%	ξ = 0	ξ = 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 freqüência 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 4.34 – Modelo da superestrutura do prédio do reator



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 Geophisycal 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 freqüência f_{0j} .
- análise no domínio da freqüência 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 freqüência do S1GL, retornando para o primeiro passo.

Para a análise no domínio da freqüência 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 freqüência 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.

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

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

onde: k_i - coeficiente de rigidez da mola i;

 $\Phi_{\vec{v}_{bi}\vec{v}_{bi}}$ - 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 ξ = 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 ξ = 7%. Sistema principal -modelo do prédio do reator da usina Angra 3. Acoplamento em um ponto.

103

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.