4 Espectros de resposta inelástica dos SS

4.1. Análise do cenário linear

4.1.1. O cenário introdutório

Na busca do entendimento do desempenho inelástico de sistemas secundários de tubulação, através de espectros de resposta, quando se aplica à base do sistema principal uma excitação sísmica definida por um acelerograma do terreno, é conveniente começar-se por um cenário introdutório linear de modo a serem caracterizados os protagonistas principais, nas suas condições originais. Assim sendo, relacionam-se:

- o sistema principal (SP);
- o sistema secundário (SS);
- o sismo-amostra;
- espectros de resposta linear-elástica

4.1.2. Sistema principal

Como base para simulação das características dinâmicas de um sistema principal, adota-se a estrutura mostrada nas Figuras 4.1 e 4.2, já empregada em estudos anteriores por Diniz de Almeida (2000) e Sampaio (2003). Trata-se de um pórtico fechado de concreto armado constituído por elementos de barra e placa e com as massas dos andares concentradas em nós separados por uma das diagonais, totalizando 1350 t que é a massa total do SP. Sendo assim, o sistema principal possui um total de 30 graus de liberdade (3 em cada nó com massa m) e a seqüência de suas freqüências naturais e massas modais com dominância na direção x é indicada na Tabela 4.1.



Figura 4.1 - Representação do sistema principal (SP) em concreto armado



Figura 4.2 – Representação do modelo do sistema principal, seus elementos de barra e massas concentradas

modo	f _{0isp} (Hz)	m _i (t)
1	4,59	592,51
2	4,60	596,69
3	4,82	0
4	4,94	0
5	12,32	0
6	12,37	50,32
7	12,91	47,79
8	13,34	0
9	17,32	0
10	17,53	1,59
11	20,45	16,21
12	20,49	0
13	20,52	16,18
14	20,57	0
15	29,89	0

Tabela 4.1 – Quinze primeiras freqüências naturais do sistema principal, $f_{0\text{isp}},$ e suas massas modais, m_i

4.1.3. Sistema secundário

Esse sistema pode ser constituído para um oscilador simples, S1GL, com freqüência variável (0,25-2,5-5,0-9,0 e 33 Hz), com ou sem amortecimento linear viscoso.

Alternativamente, pode ser utilizado o modelo do sistema secundário simplificado (SSS) da Figura 4.3 proposto inicialmente por Gastañaga (1998) e obtido a partir de um trecho real de um sistema de tubulação de prédio do reator de uma usina termonuclear, tendo suas propriedades geométricas e mecânicas ajustadas de tal maneira a representar as características dinâmicas de um sistema de tubulação real. As relações das freqüências naturais e de massas do SSS com o sistema principal são mantidas.



Figura 4.3 – Representação esquemática do sistema secundário simplificado (SSS)

O SSS é modelado no ANSYS através de elementos uniaxiais de tubo, retos e curvos, e seus suportes (pontos de apoio no SP) são representados por elementos de mola, dos tipos: (a) translacional e rotacional nas ligações 205-165 (SP) e 217-81(SP), nos três eixos cartesianos (x, y e z); (b) translacional na ligação 210-46 (SP) nas direções y e z; e (c) translacional apenas na direção x na ligação 206-85 (SP).

Assim como o S1GL, o SSS também é considerado com ou sem amortecimento, sendo que a variação de sua freqüência fundamental é obtida pela intervenção direta sobre o módulo de elasticidade longitudinal, E, dos elementos de tubo, retos e curvos. A tabela 4.2 apresenta as cinco freqüências fundamentais do SSS utilizadas no estudo e, os correspondentes valores dos módulos de elasticidade dos elementos de tubo:

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

Tabela 4.2 – Freqüências fundamentais e módulos de elasticidade do SSS

A seguir, na Tabela 4.3, são apresentados os valores das relações entre as demais freqüências naturais (modos de vibração) do SSS e as suas fundamentais.

$f_{01} = 0,25$	f ₀₁ =2,5	f ₀₁ =5	f ₀₁ =9	f ₀₁ =33
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
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 4.3 - Valores das relações de $f_{0i}/f_{01,}$ das primeiras 15 freqüências do SSS para a sua freqüência fundamental

O sistema secundário, S1GL ou SSS, pode também ser utilizado acoplado ao SP como sugerido por Sampaio (2003) o que conduz a resultados que se afastam dos valores espectrais para o caso não-acoplado, podendo a diferença ser para mais ou para menos, dependendo do valor da freqüência em consideração, mas conduzindo sempre a valores mais coerentes com a realidade. Sampaio (2003) mostra ainda, sobre um sistema ideal com dois graus de liberdade, que tais diferenças são uma conseqüência da interação das massas e freqüências naturais dos SP (massa 1) e SS (massa 2), Figura 4.4, tendo como parâmetros, as relações entre essas grandezas:

$$\gamma = \frac{massa_{ss}}{massa_{sp}} = \frac{m_2}{m_1}$$
(4.1)

$$\beta = \frac{\omega_{ss}}{\omega_{sp}} \tag{4.2}$$

Espectros de resposta inelástica dos SS

$$\eta_{\rm i} = \frac{\omega_{\rm 0i}}{\omega_{\rm sp}} \tag{4.3}$$

onde: ω_{0i} representa as duas freqüências naturais circulares do S2GL.



Figura 4.4 - Freqüências naturais circulares, $\omega_{0i},$ para os dois modos de vibração do S2GL

Na Figura 4.5 é ilustrada a representação esquemática para a situação de acoplamento entre os sistemas secundário simplificado e o principal, onde são destacados os pontos (nós) de apoio do SSS no SP.



Figura 4.5 – Representação esquemática do sistema acoplado (SSS+SP)

4.1.4. Sismo-amostra

Na Figura 4.6, é apresentado o sismo a ser usado no estudo, sismo-amostra, por suas funções temporais da aceleração, da velocidade e do deslocamento do terreno, na direção x, normalizadas para uma aceleração máxima do terreno de 0,1g e, assim, designado por "sismo-x-0,1g". As funções de velocidade e deslocamento são obtidas diretamente através da integração numérica sucessiva dos valores temporais de aceleração do terreno. Esse acelerograma apresenta a função densidade de espectro de potência (FDEP) representada na Figura 4.7 a qual segue, em linhas gerais, a função usada para gerar sismos artificiais no contexto do projeto de usinas nucleares brasileiras.



Figura 4.6 – Funções da aceleração, velocidade e deslocamento do terreno correspondentes ao sismo-x-0,1g



Figura 4.7 – FDEP para o sismo-x-0,1g

Observa-se, na Figura 4.6, que as três funções, com duração de 15s, mantêm o aspecto constantemente verificado em situações semelhantes, concentrando-se a função velocidade em três a quatro pulsos principais, e a função deslocamento do solo reduzindo-se praticamente a um pulso.

Para compor ainda o cenário sísmico apresentam-se, na Figura 4.8, os valores médios das mesmas funções que as expostas na Figura 4.6, só que agora, referidas aos nós de apoio do SSS no SP, quando o sismo-x-0,1g é aplicado na base do SP isolado. Como se esperava, o acelerograma foi o que mais se modificou deixando transparecer o efeito de filtro associado com a freqüência fundamental do SP, \approx 5 Hz, ampliando o nível máximo das acelerações de quase 10 vezes.



Figura 4.8 – Valores médios das funções de aceleração, velocidade e deslocamento dos nós de apoio do SSS no SP para o sismo-x-0,1g aplicado na base do SP (ξ =0) isolado

Para o caso de consideração do amortecimento no SP (ξ =0,07), as funções anteriores são apresentadas na Figura 4.9, onde se percebe que o aspecto geral do sinal sísmico filtrado nos nós de apoio do SSS no SP é mantido praticamente o mesmo daquele aplicado na base do SP. A única alteração, naturalmente, é evidenciada na função temporal de aceleração, onde se observa que o nível de aceleração máxima é ampliado apenas cerca de duas vezes em relação ao original; evidenciando assim o efeito do amortecimento no SP.



Figura 4.9 – Valores médios das funções de aceleração, velocidade e deslocamento dos nós de apoio do SSS no SP para o sismo-x-0,1g aplicado na base do SP isolado e amortecido (ξ =0,07)

Na Figura 4.10, são mostradas as FDEP das acelerações do terreno, para o sismo-x-0,1g, e para o acelerograma médio dos nós de apoio do SSS no SP com e sem amortecimento, quando é aplicado o sismo-x-0,1g à base do SP. Destaca-se a grande amplificação das ordenadas nas regiões vizinhas às freqüências 5 e 12 Hz no caso sem amortecimento, que são, respectivamente, a freqüência fundamental e a 2^a freqüência natural do SP, com dominância na direção x, e, em seqüência para outras freqüências mais elevadas.

Para o caso do sinal sísmico amortecido, nota-se que apenas na região vizinha à freqüência fundamental do SP que é presenciada certa amplificação das ordenadas, observando-se em seguida uma redução das ordenadas nas freqüências mais elevadas, onde ficam até inferiores às ordenadas relativas ao sismo-x-0,1g.



Figura 4.10 – FDEP para o sismo-x-0,1g e para os acelerogramas médios obtidos nos nós de apoio do SSS no SP com e sem amortecimento

4.1.5. Espectros de resposta linear-elástica

Esses espectros, para os sistemas sem amortecimento, constituem-se em referência para a avaliação e o entendimento dos espectros de resposta inelástica.

Na Figura 4.11, são apresentados seis espectros de resposta seguindo a prática do gráfico das quatro escalas, numerados de 1 a 6. O espectro do caso 1 refere-se diretamente ao próprio sismo-x-0,1g aplicado na base de um S1GL desacoplado; o caso 2 é também obtido com um S1GL desacoplado, mas solicitado pela função temporal média em aceleração da Figura 4.8; já o caso 3 considera o espectro de resposta para o SSS não acoplado ao SP devido a aplicação da mesma função em aceleração anterior na base do SSS e o caso 4 é o do espectro para o SSS acoplado ao SP para o sismo-x-0,1g aplicado na base desse último. Os casos 6 e 5 referem-se respectivamente, aos espectros de resposta obtidos para o SSS acoplado e não

acoplado ao SP considerando a inclusão do amortecimento viscoso no sistema correspondente a ξ =0,07.

Os espectros de resposta, relativos ao SSS (SVGL), quer acoplado ou não ao SP, são médios e obtidos em nós representativos do mesmo.



Figura 4.11 – Comparação entre espectros de resposta linear-elástica obtidos para o SSS (ξ =0 e 0,07) acoplado e não-acoplado ao SP, e aqueles obtidos para um S1GL (ξ =0), sismo-x-0,1g

A comparação dos casos 1 e 2 revela a variação do sinal sísmico, em termos da resposta de um S1GL, devida à sua transmissão desde a base do SP até os nós de apoio do SSS no SP. Chama a atenção a grande amplificação para f01=5 Hz, quando essa freqüência do S1GL coincide com a freqüência fundamental do SP.

Particularmente, nos extremos esquerdo e direito, as curvas tendem assintoticamente para as linhas que indicam um deslocamento relativo e uma aceleração, constantes e iguais às mesmas grandezas cinemáticas máximas do sismo.

À primeira vista, identificam-se na Figura 4.11, três regiões de comportamento distinto do espectro: a região esquerda (1), de baixas freqüências (<2,5 Hz), a (3) das altas freqüências (>33 Hz) e uma região central (2), com grandes variações nas ordenadas do espectro, associadas às freqüências predominantes do SP, ou do SP+SS, no caso 4. Esse comportamento das curvas espectrais segue, em linhas gerais, as indicações de qualquer espectro de resposta sísmica Newmark, Veletsos e Chelapati (1965), particularizadas agora pelo papel marcante das freqüências naturais do SP.

Ainda numa visão preliminar, nota-se que o espectro do caso 1 é envolvido por todos os demais casos não amortecidos indicando efeitos estruturais diretos, sem a transferência pelo SP.

O confronto dos casos 2 e 3 exibe as diferenças entre considerar um sistema secundário simplificado, com vários graus de liberdade, com a estrutura de um sistema de tubos e com múltiplos apoios no SP e, alternativamente, um sistema secundário, S1GL.

Os casos 3 e 4, vistos em paralelo, ilustram o significado do acoplamento do SSS ao SP na obtenção do espectro de resposta acoplada.

Finalmente, oa casos 6 e 5 mostram o efeito redutor na resposta espectral do SSS acoplado ou não ao SP proporcionado pela inclusão do amortecimento no sistema. No caso 5, a resposta é deslocada para baixo observando-se uma redução maior na freqüência de 5 Hz em relação à correspondente resposta não amortecida. Já no caso 6, o que se observa é um deslocamento constante para baixo da resposta amortecida em relação à correspondente não amortecida ao longo das freqüências fundamentais do SSS, porém mantendo-se o mesmo aspecto da anterior.

Para ampliar a visão e o entendimento das diversas situações, apresentam-se sobrepostas, na Figura 4.12, as FDEP dos acelerogramas médios dos nós de apoio do SSS no SP, para as situações e alternativas consideradas anteriormente.



Figura 4.12 – FDEP do sismo-x-0,1g e dos acelerogramas médios do nós de apoio do SSS no SP, considerado o SSS acoplado e não-acoplado

Analisando-se a Figura 4.12, sobressaem os seguintes pontos:

 ao longo da região (2) os ponderáveis efeitos da interação das freqüências naturais do SSS e SP, com maior destaque quando a freqüência do SSS iguala a fundamental do SP (≈5 Hz); nessa última situação, há uma redução grande na resposta dos nós de apoio no SP, uma vez que o SSS absorve a potência, funcionando como absorsor para o SP;

- a extensão da influência da ressonância das freqüências SSS-SP, sobre a região (2), reduzindo a resposta nos nós do SP;
- a característica de transição da região (2);
- a amplificação de cerca de 10 vezes da amplitude dos harmônicos nas vizinhanças da freqüência de 5 Hz, para as FDEP dos casos III, V e VI;
- a inclusão do amortecimento no SP conduz de maneira geral a uma redução na amplificação da amplitude dos harmônicos em toda a região (2) em relação aos demais casos não amortecidos, observando-se uma pequena amplificação das ordenadas nas vizinhanças da freqüência de 5 Hz em relação ao sinal sísmico original aplicado na base do SP.

4.2. Definição do cenário inelástico

O cenário inelástico no SSS é caracterizado por deformações (ou deslocamentos) inelásticas, iniciadas quando as tensões (ou forças) atuantes em seus elementos estruturais excedem o nível de escoamento considerado no material para as diversas situações de carregamento estudadas.

4.2.1. Definição e comportamento não-linear inelástico dos elementos do SSS

Como citado no item 4.1.3, a tubulação do SSS é discretizada no programa ANSYS através da utilização de elementos estruturais uniaxiais de tubo dos tipos PIPE20 e PIPE60, empregados respectivamente nos trechos retos e curvos.

Esses elementos possuem 6 deslocabilidades por nó, sendo 3 translações nas direções locais dos eixos x, y e z, e 3 rotações em torno dos eixos locais x, y e z e são considerados fechados em suas extremidades; a avaliação das tensões é feita em 8 pontos de integração ao longo da circunferência de sua seção transversal como mostrado na Figura 4.13.



Figura 4.13 - Geometria dos elementos PIPE20 e PIPE60

Para representar o comportamento inelástico dos elementos que compõem o SSS, é adotado, neste trabalho, o modelo bi-linear com encruamento cinemático, o qual obedece ao critério de escoamento de Von Mises, que é baseado numa tensão de comparação com a tensão de escoamento do material, denominada de tensão "equivalente" e definida por:

$$\sigma_{eq} = \frac{3}{2} (S_{ij} - \alpha_{ij}) \tag{4.4}$$

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.

A consideração do encruamento cinemático no comportamento bi- linear inelástico do material faz a superfície de escoamento transladar no espaço de tensões, mantendo a forma, o tamanho e a orientação da superfície inicial, Figura 4.14-(a).

Na Figura 4.14-(b), é mostrada a curva tensão-deformação para os elementos de tubo segundo o modelo adotado.



Figura 4.14 – (a) Translação da superfície de escoamento com a progressão do escoamento (encruamento cinemático); (b) comportamento bi-linear dos elementos de tubo

Quanto aos suportes (aparelhos de apoio) do SSS, esses são modelados através de elementos finitos discretos não-lineares plásticos que combinam propriedades de rigidez e amortecimento em paralelo. Cada elemento refere-se a um único grau de liberdade por nó, de translação ou rotação, e denominado no ANSYS de COMBIN40, Figura 4.15.



Figura 4.15 - Elemento COMBIN40

De acordo com a definição para o seu comportamento estrutural, a rigidez total, no trecho linear-elástico do diagrama força-deslocamento, corresponde ao valor da rigidez das duas molas em paralelo, até que a força atuante F atinja a força de escoamento F_y ; a partir de então, a rigidez do elemento passa a ser igual à da mola K₂. Dessa maneira o comportamento resultante é bi-linear, como mostrado na Figura 4.16 a seguir.



Figura 4.16 - Comportamento bi-linear inelástico dos suportes do SSS

4.2.2. Definição e variação dos parâmetros

Para o estudo abrangente da resposta do SSS, acoplado ou não ao SP, são relacionados a seguir os parâmetros escolhidos e suas faixas de variação através da variação de alguns fatores introduzidos na solução não-linear inelástica para as diversas situações de carregamento consideradas no problema.

- Fator de escoamento: O fator de escoamento, C, é definido como uma grandeza que relaciona a tensão de escoamento σ_y do material, e a tensão equivalente máxima da resposta elástica, σ_0 , atuante nos elementos de tubo, ou ainda, a relação entre a força de escoamento F_y e a força elástica máxima F_0 , no caso dos suportes, de acordo com a equação a seguir:

$$C = \frac{\sigma_y}{\sigma_0} = \frac{F_y}{F_0}, \quad C < 1$$
(4.5)

Os valores do fator de escoamento adotados no estudo são 0,2 e 0,6. As magnitudes de $\sigma_0 e F_0$ são obtidas a partir da solução linear-elástica, através de uma investigação das tensões e esforços máximos atuantes nos elementos de tubo e suportes, respectivamente. Além disso, o mesmo procedimento anterior é feito para cada uma das freqüências fundamentais do SSS e também para todas as situações de carregamento; a partir de então, e com os valores de C fixados, obtém-se o nível de escoamento desejado para cada caso inelástico considerado no estudo.

Ressalta-se que a fixação do nível de escoamento desejado nos elementos de tubo e nos suportes do SSS através dos valores adotados para o fator de escoamento C, é feita sempre levando-se em conta o nível máximo de esforços nesses elementos, seja no caso do sismo isolado ou associado aos carregamentos estáticos na tubulação, como pressão interna e temperatura.

A Figura 4.17 ilustra um exemplo do procedimento descrito anteriormente, no caso de fixação do nível de escoamento correspondente aos valores de C=0,2 e 0,6 na tubulação do SSS acoplado ao SP, para o sismo-x-0,1g aplicado na base do SP.



Figura 4.17 – Tensões equivalentes elásticas máximas na tubulação do SSS acoplado ao SP, para C=1, f_{01sss} =9 Hz

A partir dessa figura, pode-se ter uma idéia quantitativa dos períodos de regime elástico e plástico que o SSS vai experimentar durante a atuação do sismo, quando obtida a resposta inelástica para os níveis de escoamento considerados no presente caso. Salienta-se que a função temporal da tensão equivalente elástica máxima é sempre positiva, uma vez que essa é obtida, a partir da avaliação das tensões máximas normais (em módulo) atuantes ao longo dos pontos de integração da seção transversal dos elementos de tubo que, por sua vez, podem ser tensões de tração e compressão dependendo da situação de carregamento.

- Fatores de rigidez N1 e N2: Esses fatores relacionam a rigidez do trecho inicial e a do segundo trecho do diagrama bi-linear tensão-deformação da tubulação (N2) e do diagrama força-deslocamento dos suportes (N1). Considerando no item anterior, as Figuras 4.15 e 4.14-(b) respectivamente, definem-se os fatores N1 e N2, como sendo:

$$N1 = \frac{K_2}{K_a} \tag{4.6}$$

$$N2 = \frac{E_2}{E_t} \tag{4.7}$$

São adotados dois valores para N1 e N2, 0,3 e 0,6, e considerando ainda, as diversas combinações com o caso da solução linear-elástica do problema, ou seja, N1=1 e N2=1. O Quadro 4.1 resume as combinações dos pares de valores de N1 e N2.

	N1	N2	Elementos escoados no SSS
(a)	1	0,3	tubos
(b)	1	0,6	tubos
(c)	1	1	nenhum (resposta linear-elástica)
(d)	0,6	0,3	suportes e tubos
(e)	0,6	0,6	suportes e tubos
(f)	0,6	1	suportes
(g)	0,3	0,3	suportes e tubos
(h)	0,3	0,6	suportes e tubos
(i)	0,3	1	suportes

Quadro 4.1 - Fatores de rigidez N1 e N2, considerados no estudo

- **Fator de dutilidade** μ : Representa-se 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. Para a avaliação dessas parcelas de trabalho lança-se mão das forças externas ao sistema 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_{total} , e o somatório das parcelas do mesmo trabalho realizado durante as fases lineares elásticas da resposta de todo o sistema, $T_{elastico}$, 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, μ , a relação entre essas duas quantidades de trabalho.

$$\mu = \frac{T_{total}}{T_{elastico}}$$
(4.8)

- Fator de amortecimento (ξ): Em análises dinâmicas de estruturas tipicamente amortecidas e com comportamento linear, geralmente, não é necessário expressar o amortecimento por meio de uma matriz de amortecimento, uma vez que este é mais convenientemente representado através de fatores de amortecimento modais, ξ_i . Entretanto, no caso de análises dinâmicas não-lineares é mais adequada a inclusão de amortecimento no sistema através de uma matriz de amortecimento [C], uma vez que as suas configurações modais não são fixas, mas variam com as mudanças de rigidez.

Segundo Clough (1990), para o estado inicial elástico é apropriado definir uma matriz de amortecimento proporcional e admitir que as propriedades de amortecimento permaneçam constantes durante a resposta mesmo que a rigidez da estrutura possa alterar e induzir uma perda de energia por histerese somando-se às perdas provocadas pelo amortecimento viscoso.

O programa ANSYS define a matriz de amortecimento de acordo com a seguinte equação:

$$[C] = a_0[M] + a_1[K] + \sum_{j}^{NMAT} a_{ij}[K] + \sum_{k}^{NEL} [C_k]$$
(4.9)

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

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

- [M] matriz de massa da estrutura;
- a_1 constante de proporcionalidade em relação à matriz de rigidez;
- [K] matriz de rigidez da estrutura;

NMAT - número de materiais com amortecimento;

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

 $\left[K_{j}\right]$ - parte de matriz de rigidez relativa ao material j;

NEL - número de elementos com amortecimento especificado;

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

De acordo com o exposto anteriormente, em análises não-lineares não é apropriado expressar a parcela do amortecimento fornecido pelas constantes de proporcionalidade relativas à matriz de rigidez, $a_1 e a_{ij}$. Portanto, adota-se para o trabalho, a consideração de amortecimento na estrutura por meio da constante de proporcionalidade relativa à sua matriz de massa, a_0 ; tal que esta seja ajustada de maneira que ξ esteja definido para o modo fundamental de vibração do SSS isolado de acordo com a seguinte equação:

$$a_0 = 2\xi\omega_{01} \tag{4.10}$$

onde: ω_{01} - freqüência circular fundamental do SSS isolado;

 ξ - fator de amortecimento viscoso e adotado no trabalho igual a 0,07.

Admite-se que a freqüência de 5 Hz, é a fundamental do SP e predominante na maioria dos acelerogramas e adota-se esse valor de 5 Hz para o cálculo da constante de proporcionalidade a_0 para todos os casos amortecidos. Assim sendo:

$$a_0 = 2\xi\omega_{01sp} = 2x0,07x(2\pi5) = 20\pi x0,07 = 4,4$$
(4.11)

4.3. Ensaios e análise dos resultados

Apresenta-se o conjunto de ensaios numéricos realizados e, na seqüência, é feita a análise dos resultados. Além da obtenção da resposta referente ao carregamento sísmico isolado, é avaliada essa mesma resposta sobreposta a uma ação estática prévia da pressão interna e da variação de temperatura no SSS, com níveis constantes ao longo da tubulação e do tempo; objetiva-se assim verificar a influência desses efeitos internos nos espectros de dutilidade e de resposta devidos ao sismo.

O nível da pressão interna (Pi) aplicada é de 150 atm, o que equivale a uma tensão uniforme nas paredes dos elementos de tubo de $\approx 15810 \text{ kN/m}^2$. A variação de temperatura (ΔT) uniforme é de 120°C. Esses carregamentos são aplicados gradualmente na tubulação do SSS, de forma a serem evitados prováveis efeitos dinâmicos devidos a uma iniciação súbita.

A resposta do SSS é avaliada através de espectros de dutilidade e de espectros de resposta; sendo esses obtidos em nós representativos do SSS e escolhidos convenientemente para o estudo. Quando da consideração da Pi e Δ T no SSS, associados à aplicação do sismo, os valores iniciais de deslocamentos e esforços na estrutura devidos a esses carregamentos são deduzidos para a obtenção dos espectros de resposta de modo a serem obtidos espectros devidos ao sismo sob o efeito prévio da Pi e Δ T no SSS.

Na situação de não-acoplamento entre os SSS e SP, são realizados todos os ensaios resumidos no Quadro 4.2 a seguir, com exceção dos casos de carregamento (3), (6) e (7) devido principalmente à pouca influência dos efeitos decorrentes da pressão interna na resposta do SSS em (3), e os demais devido a apenas uma elevação nas ordenadas dos espectros decorrente do aumento na potência do sismo.

Casos de carregamento no	Fator	de		Fatores de rigidez,
SSS	escoan	nento (N1 e N2 (Quadro 4.1)
(1) sismo-x-0,1g-ξ=0	1	0,6	0,2	de (a) até (i)
(2) sismo-x-0,1g- ξ =0,07	1	0,6	0,2	(e) e (g)
(3) sismo-x-0,1g+Pi-ξ=0	1	0,6	0,2	de (a) até (i)
(4)sismo-x-0,1g+Pi+ΔT-ξ=0	1	0,6	0,2	de (a) até (i)
(5)sismo-x-0,1g+Pi+ Δ T- ξ =0,07	1	0,6	0,2	(e) e (g)
(6) sismo-x-1g-ξ=0	1	0,6	0,2	(g)
(7) sismo-x-1g+Pi+ Δ T- ξ =0	1	0,6	0,2	(g)

Quadro 4.2 - Resumo dos ensaios numéricos

4.3.1. Espectros de dutilidade

A dutilidade serve de base para avaliar-se a capacidade de deformação do SSS dentro do regime inelástico. Não são estabelecidos limites de comportamento para caracterizar uma ruptura do sistema; admitem-se como indicadores disso, eventuais mensagens de instabilidade numérica no próprio algoritmo do ANSYS; tais ocorrências são indicadas por um **XX** nas tabelas de resultados quando for o caso.

Os resultados dos ensaios estão resumidos em tabelas e figuras com alguns gráficos selecionados e são divididos em dois sub-conjuntos a saber:

- SSS acoplado ao SP
- SSS não-acoplado ao SP

4.3.1.1. SSS acoplado ao SP

Situações de carregamento: sismo-x-0,1g; sismo-x-0,1g + Pi; sismo-x-0,1g + Pi+ Δ T; Amortecimento ξ =0 e ξ =0,07;

	<u> </u>		regiã	io (1)		região (2)						
f ₀₁ (HZ)	0,	25	2	,5	4	5	9)	3	3	
N1	N2	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	
1,0	0,3	2,02	1,16	1,89	1,12	2,92	1,03	5,04	1,07	3,41	1,02	
	0,6	2,25	1,2	2,34	1,13	2,66	1,03	5,19	1,07	3,92	1,01	
	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	
0,6	0,3	2,02	1,16	1,91	1,12	2,88	1,03	4,87	1,07	3,39	1,02	
	0,6	2,25	1,2	2,28	1,13	2,81	1,03	5,09	1,07	3,83	1,01	
	1,0	1,23	1,0	1,35	1,0	1,23	1,0	1,46	1,0	1,42	1,0	
0,3	0,3	2,01	1,16	1,72	1,12	2,8	2,07	4,49	1,08	5,3	1,03	
	0,6	2,13	1,2	1,83	1,13	3,04	1,98	5,4	1,08	5,54	1,03	
	1,0	1,51	1,03	1,7	1,04	2,01	1,0	3,18	1,02	3,06	1,01	

Tabela 4.4 – Valores do fator de dutilidade, μ obtidos no SSS acoplado ao SP. Caso de carregamento: sismo-x-0.1q- ξ =0



Figura 4.18 – Espectros de dutilidade do SSS acoplado ao SP, C=0,2, sismo-x-0,1g-ξ=0

A partir da análise dos espectros de dutilidade da Figura 4.18 e dos dados na Tabela 4.4, sobressaem os pontos a seguir:

- A dutilidade mobilizada pelo sismo varia de maneira crescente com a freqüência do SSS atingindo o seu fator representativo, μ , o valor máximo de **5,54**, para C=0,2-N1=0,3-N2=0,6 na freqüência de 33 Hz. De maneira geral, os maiores

valores de μ concentram-se no centro da região (2) mostrada nos espectros e correspondente às freqüências predominantes do SP.

- A dutilidade já se mostra mobilizada para valores de $C \le 0,6$, sendo a contribuição expressivamente maior, nos elementos de tubo do que nos apoios.

Tabela 4.5 – Valores do fator de dutilidade, μ obtidos no SSS acoplado ao SP. Caso de carregamento: sismo-x-0,1g + Pi- ξ =0

			regiâ	io (1)		região (2)						
f ₀₁ (Hz)	0,	25	2	,5	4	5	9	9	3	3	
N1	N2	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,2 C=0,6 C=0,2 C=0,6		C=0,6	C=0,2	C=0,6	
1,0	0,3	2,39	1,37	1,89	1,12	2,68	1,03	5,05	1,07	3,48	1,02	
	0,6	2,48	1,34	2,36	1,13	2,44	1,03	5,16	1,07	4,01	1,01	
	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	
0,6	0,3	2,39	1,37	1,9	1,12	2,61	1,0	4,94	1,07	3,45	1,02	
	0,6	2,48	1,34	2,3	1,13	2,54	1,0	5,27	1,07	3,92	1,01	
	1,0	1,21	1,0	1,35	1,0	1,22	1,0	1,46	1,0	1,42	1,0	
0,3	0,3	2,3	1,37	1,75	1,12	2,79	1,01	4,48	1,07	5,41	1,03	
	0,6	2,31	1,33	1,85	1,13	3,11	1,01	5,59	1,07	5,67	1,03	
	1,0	1,52	1,03	1,7	1,04	2,01	1,0	3,18	1,02	3,06	1,01	

Tabela 4.6 – Relações entre os fatores de dutilidade da Tabela 4.5 e os seus correspondentes na Tabela 4.4 (sismo-x-0,1g- ξ =0)

			regiâ	io (1)		região (2)					
f ₀₁ (f ₀₁ (Hz) 0,25		25	2,5		5		9		33	
N1	N2	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6
0,6	0,6	1,102	1,116	1,008	1	0,904	0,971	1,035	1	1,023	1
0,3	0,3	1,144	1,181	1,017	1	0,996	0,488	0,997	0,991	1,021	1

A consideração da Pi no nível de 150 atm, em geral, aumenta de forma muito discreta os valores já obtidos para o sismo. Em valores numéricos, o acréscimo maior ocorre para as freqüências mais baixas do SSS, podendo atingir 18% para a freqüência de 0,25 Hz, Tabela 4.6. Para a freqüência do SSS de 5 Hz ocorrem reduções de até 51% para C=0,6.

			regiâ	io (1)				regiâ	io (2)		
f ₀₁ (Hz)	0,	25	2	,5	4	5	9)	3	3
N1	N2	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6
1,0	0,3	2,42	1,36	1,88	1,1	2,14	1,01	1,3	1,14	1,24	1,14
	0,6	2,51	1,32	2,29	1,11	2,02	1,01	1,32	1,14	1,25	1,13
	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
0,6	0,3	2,42	1,36	1,86	1,1	2,14	1,01	1,3	1,14	1,24	1,14
	0,6	2,51	1,32	2,26	1,11	2,01	1,01	1,32	1,14	1,27	1,13
	1,0	1,21	1,0	2,46	1,0	1,11	1,0	1,04	1,0	1,1	1,0
0,3	0,3	2,32	1,36	2,76	1,49	2,38	1,01	1,54	1,15	1,25	1,14
	0,6	2,33	1,32	3,28	1,55	2,23	1,01	1,58	1,14	1,26	1,13
	1,0	1,52	1,03	3,78	1,56	1,54	1,0	1,39	1,0	1,11	1,08

Tabela 4.7 – Valores do fator de dutilidade, μ obtidos no SSS acoplado ao SP. Caso de carregamento: sismo-x-0,1g + Pi+ ΔT - ξ =0

Tabela 4.8 – Relações entre os fatores de dutilidade da Tabela 4.7 e os seus correspondentes na Tabela 4.4 (sismo-x-0,1g - ξ =0)

	região (1)						região (2)						
f ₀₁ (Hz)		0,	0,25		2,5		5		9		33		
N1	N2	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6		
0,6	0,6	1,115	1,1	0,991	0,982	0,715	0,980	0,259	1,065	0,331	1,118		
0,3	0,3	1,154	1,172	1,604	1,330	0,85	0,49	0,343	1,065	0,236	1,106		



Figura 4.19 – Espectros de dutilidade do SSS acoplado ao SP, C=0,2, sismo-x-0,1g+Pi+ Δ T- ξ =0



Figura 4.20 – Espectros de dutilidade do SSS acoplado ao SP, C=0,6, sismo-x-0,1g+Pi+ Δ T- ξ =0

A presença prévia, cumulativa ao sismo já com o SSS sob Pi, de um acréscimo de temperatura de 120°C introduz grandes variações nos fatores de dutilidade; como o efeito geral sobre os elementos estruturais é a participação de uma força predominantemente compressiva, o resultado final é uma grande redução de μ para as freqüências mais altas do SSS e um relativamente pequeno aumento para μ , para os sistemas mais flexíveis; esses, por sua maior deformabilidade, são mais sensíveis ao efeito da presença de forças normais compressivas, Tabelas 4.7 e 4.8 e Figuras 4.19 e 4.20.

Outra constatação do efeito da presença de forças normais é o deslocamento dos valores máximos de μ na coluna correspondente à freqüência do SSS de 9 Hz, para valores até inferiores a 5 Hz, Tabelas 4.7 e 4.8 e Figura 4.19. Essa última figura evidencia também que os elementos de apoio são menos sensíveis à presença da força normal.

Para auxiliar a análise dessas variações na dutilidade devidas ao acréscimo de temperatura no SSS, a Tabela 4.9 apresenta o panorama inelástico em termos do

número total de incursões não-lineares ocorridas durante os 15 s de atuação do sismo. Faz-se um confronto entre as situações em que o sismo atua com e sem a presença prévia de forças normais no SSS para as freqüências fundamentais de 2,5 e 9 Hz.

		:	sismo-x-	0,1g-ξ=()	sismo-x-0,1g+Pi+ΔT-ξ=0				
f ₀₁ ((Hz)	2	,5	9)	2	,5	9		
N1	N2	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	
1	0,3	633	144	1068	140	629	138	644	229	
1	0,6	725	168	1084	138	726	163	618	224	
0,6	0,3	623	144	1029	140	627	138	645	226	
0,6	0,6	693	168	1077	138	702	163	625	224	
0,6	1	312	0	473	0	757	133	102	0	
0,3	0,3	508	143	965	144	831	418	793	237	
0,3	0,6	564	171	1061	143	896	435	780	221	
0,3	1	500	63	845	45	998	434	522	21	

Tabela 4.9 - Número de incursões não-lineares (INL) no SSS durante os 15 s do sismo

Analisando-se os valores de dutilidade nas Tabelas 4.4 e 4.7 e o panorama da inelasticiadade do SSS apresentada na Tabela 4.9 para as freqüências de 2,5 e 9 Hz, revela-se a forte relação entre esses dados, uma vez que a dutilidade do SSS leva em consideração a parcela de trabalho inelástico, justificando as variações nessa região de freqüências. Isso pode ser percebido no caso apresentado na Figura 4.21 a seguir, onde na situação da presença de forças normais compressivas no SSS, o sismo já entra no SSS escoado, o que consequentemente provoca um pequeno acréscimo dos fatores de dutilidade para as freqüências mais baixas do SSS.



Figura 4.21 – Períodos de regime elástico e inelástico no SSS acoplado ao SP, f_{01} =2,5 Hz

Por outro lado, a redução de dutilidade observada nas freqüências mais elevadas, é conseqüência do deslocamento positivo no gráfico das tensões equivalentes devido ao sismo para um nível consideravelmente alto, em razão da forte presença de forças normais devidas à temperatura na tubulação do SSS. Desta forma, os picos de tensão negativos têm a sua amplitude reduzida e a dos positivos aumentada, ocasionando a redução no número de incursões não-lineares observada na Tabela 4.9 para f_{01} =9 Hz e C=0,2 em relação ao caso do sismo isolado.

Tabela 4.10 – Valores do fator de dutilidade, μ obtidos no SSS acoplado ao SP. Caso de carregamento: sismo-x-0,1g- ξ =0,07

			regiã	io (1)		região (2)						
f ₀₁ (Hz)		0,25		2,5		5		9		33		
N1	N2	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	
0,6	0,6	12,09	1,18	5,24	1,12	2,22	1,03	3,72	1,03	4,91	1,06	
0,3	0,3	11,13	1,19	6,85	1,11	2,65	1,03	5,13	1,03	5,06	1,06	

Tabela 4.11 – Relações entre os fatores de dutilidade da Tabela 4.10 e os seus correspondentes na Tabela 4.4 (sismo-x-0,1g - ξ=0)

			regiâ	io (1)		região (2)					
f ₀₁ ((Hz)	0,	25	2,5		5			9	3	3
N1	N2	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6
0,6	0,6	5,37	0,983	2,298	0,991	0,79	1	0,731	0,962	1,282	1,049
0,3	0,3	5,537	1,026	3,982	0,991	0,946	0,497	1,142	0,953	0,954	1,029



Figura 4.22 – Espectros de dutilidade do SSS acoplado ao SP. Comparação para o sismo-x-0,1g com e sem amortecimento no SSS, C=0,2



Figura 4.23 – Espectros de dutilidade do SSS acoplado ao SP. Comparação para o sismo-x-0,1g com e sem amortecimento no SSS, C=0,6

			regiâ	io (1)		região (2)							
f ₀₁ (Hz)		0,25		2,5		5)	3	3		
N1	N2	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6		
0,6	0,6	2,1	1,56	1,70	1,06	1,27	1,07	1,14	1,07	1,13	1,07		
0,3	0,3	4,99	1,71	1,66	1,08	1,25	1,06	1,16	1,09	1,12	1,07		

Tabela 4.12 – Valores do fator de dutilidade, μ obtidos no SSS acoplado ao SP. Caso de carregamento: sismo-x-0,1g +Pi+ Δ T- ξ =0,07

Tabela 4.13 – Relações entre os fatores de dutilidade da Tabela 4.12 e os seus correspondentes na Tabela 4.7 (sismo-x-0,1g+Pi+ Δ T- ξ =0)

			regiâ	io (1)		região (2)						
f ₀₁ (Hz)		0,25		2,5		5)	3	3	
N1	N2	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	
0,6	0,6	0,836	1,181	0,752	0,955	0,632	1,059	0,863	0,938	0,889	0,947	
0,3	0,3	2,150	1,257	0,601	0,725	0,525	1,049	0,753	0,948	0,896	0,938	



Figura 4.24 – Espectros de dutilidade do SSS acoplado ao SP. Comparação para o sismo-x-0,1g com e sem amortecimento no SSS sob Pi+ Δ T, C=0,2



Figura 4.25 – Espectros de dutilidade do SSS acoplado ao SP. Comparação para o sismo-x-0,1g com e sem amortecimento no SSS sob Pi+ Δ T, C=0,6

A inclusão de amortecimento no sistema secundário produz efeitos sem um padrão definido, quanto à dutilidade mobilizada pelo sistema:

- na análise para o sismo-x-0,1g, sem outros carregamentos, a inclusão do amortecimento produz um aumento de mobilização da dutilidade nas freqüências mais baixas do SSS para C=0,2, Tabela 4.11 e Figura 4.22; ocorrendo o maior decréscimo para a freqüência de 5 Hz com C=0,6, Tabela 4.11 e Figura 4.23.

- para o caso sismo-x-0,1g com o SSS sob Pi+ Δ T, a consideração do amortecimento no SSS resulta em reduções da mobilização de dutilidade, especialmente para C=0,2, em todas as freqüências do SSS com exceção do aumento observado na freqüência de 0,25 Hz para o caso N1=0,6-N2=0,6; ocorrem acréscimos nas freqüências de 0,25 e 5 Hz para C=0,6, Tabela 4.13 e Figuras 4.24 e 4.25.

Entre todo o conjunto de dados apresentados nas tabelas, ressalta-se que o máximo valor obtido para μ foi de **5,67**, correspondente à situação de sismo com o SSS sob Pi, localizado no endereço f₀₁=33 Hz, C=0,2, N1=0,3 e N2=0,6, Tabela 4.5.

De maneira geral, nesses espectros de dutilidade, observa-se que os traçados dos gráficos, que se referem à inelasticidade somente nos apoios, são diferentes dos demais, isto é, daqueles cuja inelasticidade é devida aos elementos de tubo somente ou aos elementos de tubo e de apoio. Isso está coerente com observação anterior de que a parcela da dutilidade concentrada nos elementos de tubo é maior que a dos apoios; por outro lado, sugere que se faça uma aproximação para a situação em que os elementos de tubo escoam, com C=0,2, N1 e N2 variando de 0,3 a 0,6, como indicado pelas linhas acentuadas nas Figuras 4.26 e 4.27. Esses espectros de dutilidade são denominados de espectros médios aproximados de dutilidade e designados por EMAD.



Figura 4.26 – EMAD do SSS acoplado ao SP, C=0,2, sismo-x-0,1g-ξ=0



Figura 4.27 – EMAD do SSS acoplado ao SP, C=0,2, sismo-x-0,1g c/ SSS sob Pi+ Δ T- ξ =0. Para valores de N1 e N2 entre 0,3 e 0,6

4.3.1.2. SSS não-acoplado ao SP

Situações de carregamento: sismo-x-0,1g e sismo-x-0,1g+Pi+ ΔT

Amortecimento: $\xi=0$ e $\xi=0,07$

			regiâ	io (1)				regiã	o (2)		
f ₀₁ (Hz)	0,	25	2	,5	5	;	9)	3.	3
N1	N2	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6
1,0	0,3	1,15	1,07	4,94	1,16	10,34	1,41	171,12	1,45	136,68	1,96
	0,6	1,21	1,09	9,26	1,2	314,43	1,38	69,57	1,44	84,99	1,03
	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
0,6	0,3	1,15	1,07	4,94	1,16	7,47	1,41	202,26	1,45	147,32	1,96
	0,6	1,21	1,09	10,53	1,2	39,08	1,38	70,85	1,44	94,29	1,9
	1,0	1,11	1,0	1, 5	1,0	3,63	1,0	3,21	1,0	4,1	1,0
0,3	0,3	1,15	1,07	6,13	1,16	5,67	1,42	256,15	1,46	187,73	2,16
	0,6	1,17	1,09	8,69	1,2	16,23	1,41	79,88	1,44	138,72	2,11
	1,0	1,09	1,04	5,82	1,04	32,81	1,18	23,21	1,07	43,48	1,16

Tabela 4.14 – Valores do fator de dutilidade, μ obtidos no SSS não-acoplado. Caso de carregamento: sismo-x-0,1g- $\xi=0$



Figura 4.28 – Espectros de dutilidade do SSS não acoplado, C=0,2, sismo-x-0,1g-ξ=0

O exame dos resultados contidos na Tabela 4.14 e da Figura 4.28, revela o seguinte:

- que as situações de acoplamento ou não, do SS ao SP, apresentam um comportamento muito semelhante, isto é, os valores dos fatores de dutilidade seguem as mesmas tendências ao longo das regiões 1 e 2, com grande expressão para a região 2 e, preponderância para a freqüência de 9 Hz;

- quanto às magnitudes desses valores, há de se destacar que, na região 2, elas são até cinco dezenas de vezes maiores no caso não-acoplado, com expressão bem mais acentuada para o caso de C=0,2; isso faz sobressair um formidável efeito moderador do acoplamento dos dois sistemas, já observado de forma mais direta na análise do cenário linear;

			regiâ	io (1)				regiâ	io (2)		
f ₀₁ (Hz)	0,	25	2	,5	4	5	9)	3	3
N1	N2	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6
1,0	0,3	1,47	1,06	5,22	1,15	11,09	1,2	1,25	1,16	1,16	1,12
	0,6	1,48	1,09	10,12	1,18	170,8	1,19	1,26	1,12	1,12	1,11
	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
0,6	0,3	1,47	1,06	5,19	1,15	7,21	1,2	1,25	1,12	1,12	1,12
	0,6	1,48	1,09	10,67	1,18	40,35	1,19	1,25	1,11	1,11	1,11
	1,0	1,11	1,0	1,55	1,0	2,97	1,0	1,0	1,0	1,05	1,0
0,3	0,3	1,48	1,07	5,93	1,15	5,67	1,21	1,55	1,12	1,11	1,05
	0,6	1,44	1,09	10,36	1,18	17,9	1,22	1,52	1,11	1,08	1,04
	1,0	1,09	1,04	5,55	1,04	XX	1,12	1,52	1,07	1,04	1,02

Tabela 4.15 – Valores do fator de dutilidade, μ obtidos no SSS não-acoplado. Caso de carregamento: sismo-x-0,1g c/ SSS+ Pi+ ΔT - ξ =0

Tabela 4.16 – Relações entre os fatores de dutilidade da Tabela 4.15 e os seus correspondentes na Tabela 4.14 (sismo-x-0,1g- ξ =0)

			regiâ	io (1)		região (2)							
f ₀₁ (Hz)		0,25		2,5		5		C,	9	3	3		
N1	N2	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6		
0,6	0,6	1,223	1	1,013	0,983	1,032	0,862	0,017	0,771	0,011	0,584		
0,3	0,3	1,287	0,99	0,967	0,991	0,869	0,852	0,006	0,767	0,006	0,486		



Figura 4.29 – Espectros de dutilidade do SSS não acoplado, C=0,2, sismo-x-0,1g+Pi+ Δ T- ξ =0

Espectros de resposta inelástica dos SS

As Tabelas 4.15 e 4.16 e a Figura 4.29, por sua vez, reproduzem as conseqüências sobre a mobilização da dutilidade devidas à ação cumulativa do sismo e da variação de temperatura já constatados, para o sistema acoplado ao SP; naturalmente, os valores numéricos são muito diferentes devido aos valores extremos da Tabela 4.14.

- semelhantemente ao já observado para o SSS acoplado ao SP, ainda que com mais nitidez, transparece o efeito da presença da força axial compressiva, deslocando os valores máximos da freqüência de 9 para 5 Hz;

- a indicação XX, no endereço (f_{01} =5Hz, C=0,2, N1=0,3 e N2=1), corresponde a uma instabilidade numérica na solução, como já citado anteriormente;

Tabela 4.17 – Valores do fator de dutilidade, μ obtidos no SSS não-acoplado. Caso de carregamento: sismo-x-0,1g- ξ =0,07

	região (1)					região (2)							
f ₀₁ (Hz)		0,25		2,5		5		Ģ)	3	3		
N1	N2	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6		
0,6	0,6	5,30	1,1	7,5	1,09	1,52	1,07	1,68	1,01	1,58	1,01		
0,3	0,3	5,48	1,08	8,33	1,09	1,75	1,1	2,37	1,03	1,9	1,04		

Tabela 4.18 – Relações entre os fatores de dutilidade da Tabela 4.17 e os seus correspondentes na Tabela 4.14 (sismo-x-0,1g- ξ =0)

			regiã	io (1)		região (2)							
f ₀₁ (Hz)	0,25		2,5		5			9	3	3		
N1	N2	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6		
0,6	0,6	4,380	1,009	0,712	0,908	0,038	0,775	0,023	0,701	0,016	0,531		
0,3	0,3	4,765	1,009	1,358	0,939	0,308	0,774	0,009	0,705	0,010	0,481		



Figura 4.30 – Espectros de dutilidade do SSS não acoplado. Comparação para o sismo-x-0,1g com e sem amortecimento no SSS, C=0,2

Tabela 4.19 – Valores do fator de dutilidade, μ obtidos no SSS não-acoplado. Caso de carregamento: sismo-x-0,1g c/ SSS sob Pi+ ΔT - ξ =0,07

	região (1)					região (2)							
f ₀₁ (Hz)		0,25		2,5		5		Ģ)	3	3		
N1	N2	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6		
0,6	0,6	2,2	2,07	1,88	1,03	1,11	1,04	1,03	1,02	1,03	1,02		
0,3	0,3	3,14	2,18	1,92	1,05	1,14	1,04	1,02	1,03	1	1		

Tabela 4.20 – Relações entre os fatores de dutilidade da Tabela 4.19 e os seus correspondentes na Tabela 4.15 (sismo-x-0,1g+Pi+ Δ T- ξ =0)

			regiâ	io (1)		região (2)							
f ₀₁ (Hz)		0,	25	2,5		5		•)	3	3		
N1	N2	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6		
0,6	0,6	1,486	1,899	0,176	0,873	0,027	0,874	0,824	0,919	0,928	0,919		
0,3	0,3	2,121	2,056	0,323	0,913	0,231	0,859	0,658	0,919	0,901	0,952		



Figura 4.31 – Espectros de dutilidade do SSS não acoplado. Comparação para o sismo-x-0,1g com e sem amortecimento no SSS sob Pi+ Δ T, C=0,2

- as Tabelas 4.17 a 4.20 e, as Figuras 4.30 e 4.31 indicam um comportamento semelhante, do efeito da inclusão do amortecimento no SSS; ao já descrito para a situação do SSS acoplado ao SP, sendo aqui o aumento de dutilidade observada somente para a freqüência de 0,25 Hz do SSS.

A seguir nas Figuras 4.32 e 4.33 são sugeridos os espectros médios aproximados de dutilidade para o SSS não-acoplado ao SP da mesma forma apresentada no item anterior para o caso acoplado. Uma rápida observação nessas figuras evidencia o efeito redutor na dutilidade para região (2) e, um pequeno aumento na região (1) do espectro de freqüências do SSS devido à ação da elevação de temperatura, já mencionado durante a análise dos resultados anteriores.



Figura 4.32 – EMAD do SSS não-acoplado ao SP, C=0,2, sismo-x-0,1g- ξ =0



Figura 4.33 – EMAD do SSS não-acoplado ao SP, C=0,2, sismo-x-0,1g+Pi+ Δ T- ξ =0

4.3.2. Espectros de resposta

Os espectros de resposta acoplada são parametrizados da mesma maneira que é feita para os espectros de dutilidade, através dos parâmetros C, N1 e N2, e ainda com e sem a consideração de amortecimento viscoso no sistema para os casos de carregamento considerados no estudo.

Considerada a grandeza cinemática básica dos espectros de resposta o deslocamento relativo à base de um S1GL e tendo o SSS vários nós e, em decorrência, vários graus de liberdade, a apresentação dos espectros de resposta do SSS é feita sob a forma de seu deslocamento relativo médio dos seus seis nós (208, 209, 212, 213, 215 e 216) considerados representativos. Esses espectros são chamados espectros médios de resposta e designados por EMR.

Os dados obtidos estão expostos nas tabelas e representados graficamente através dos espectros médios para alguns casos selecionados, sendo esses em termos de pseudo-velocidade espectral (m/s) e na forma normalizada pela resposta linearelástica (V/V₀). Indicam-se por uma linha tracejada nos espectros, o deslocamento máximo e aceleração máxima dos nós de apoio do SSS no SP, respectivamente, na extrema esquerda da região (1) e na extrema direita da região (3). Os dados estão organizados da mesma maneira apresentados para a dutilidade.

4.3.2.1. SSS acoplado ao SP

-	J	-		, 0, 3							1
			regiã	io (1)				regiã	io (2)		
f ₀₁ (Hz)	0,	25	2	,5	4	5	9)	3	3
N1	N2	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6
1,0	0,3	0,1695	0,1944	0,3560	0,4022	0,4424	0,5583	0,5629	0,2991	0,5156	0,5035
	0,6	0,1905	0,2029	0,3939	0,4119	0,5625	0,5687	0,3700	0,2917	0,4890	0,5035
	1,0	0,2227	0,2227	0,4260	0,4260	0,5895	0,5895	0,2861	0,2861	0,5035	0,5035
		,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,									
0,6	0,3	0,195	0,1944	0,3518	0,4022	0,4178	0,5583	0,6055	0,2991	0,5196	0,5035
	0,6	0,1905	0,2029	0,3741	0,4119	0,5333	0,5687	0,3867	0,2917	0,5096	0,5035
	1,0	0,2115	0,2161	0,4003	0,4260	0,5639	0,5895	0,2938	0,2861	0,5094	0,5035
0,3	0,3	0,1671	0,1944	0,2691	0,4010	0,4149	0,5572	0,6548	0,3038	0,5186	0,5049
	0,6	0,1891	0,2029	0,2812	0,40	0,5022	0,5717	0,4170	0,2971	0,5340	0,5049
	1,0	0,2006	0,2150	0,2867	0,4033	0,6079	0,5702	0,3147	0,2900	0,5628	0,5049

Tabela 4.21 – Valores espectrais médios em pseudo-velocidade (m/s) para o SSS acoplado ao SP. Carregamento: sismo-x-0,1g- ξ =0

Tabela 4.22 – Valores espectrais médios normalizados pela resposta elástica (V/V₀), para o SSS acoplado ao SP. Carregamento: sismo-x-0,1g- ξ =0

			regiã	io (1)				regiâ	io (2)		
f ₀₁ (Hz)	0,	25	2	,5	4	5	9	9	3	3
N1	N2	C=0,2	C=0,6								
1,0	0,3	0,7609	0,8728	0,8357	0,9441	0,7504	0,9469	1,9672	1,0455	1,0240	0,9999
	0,6	0,8552	0,9110	0,9245	0,9669	0,9541	0,9646	1,2932	1,0195	0,9712	0,9999
	1,0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0,6	0,3	0,7609	0,8728	0,8257	0,9441	0,7087	0,9469	2,1164	1,0455	1,0320	0,9999
	0,6	0,9498	0,9110	0,8781	0,9669	0,9046	0,9646	1,3515	1,0195	1,0121	0,9999
	1,0	1,0102	1	0,9397	1	0,9566	1	1,0267	1	1,0117	1
0,3	0,3	0,7504	0,8728	0,6316	0,9413	0,7038	0,9452	2,2887	1,0619	1,0300	1,0027
	0,6	0,8491	0,9110	0,6601	0,9387	0,8518	0,9698	1,4574	1,0382	1,0605	1,0027
	1,0	0,9006	0,9654	0,6729	0,9466	1,0312	0,9672	1,0998	1,0134	1,1178	1,0027



Figura 4.34 – EMR inelástica em pseudo-velocidade do SSS acoplado ao SP, C=0,2, sismo-x-0,1g- ξ =0



Figura 4.35 – EMR inelástica, normalizados pela resposta linear-elástica (V₀) do SSS acoplado ao SP, C=0,2, sismo-x-0,1g- ξ =0

A análise dos resultados para a carga sísmica isolada revela o seguinte: - como era de se esperar as maiores variações na amplificação da resposta espectral inelástica ocorrem na região (2) dos espectros, devido ao efeito provocado pela interação de freqüências entre os dois sistemas e também pela alteração de rigidez que há no SSS em razão do seu comportamento não-linear inelástico, ocasionando de maneira geral uma redução nas freqüências fundamentais do SSS.

- os espectros inelásticos seguem mais ou menos o mesmo padrão do espectro linearelástico, observando-se uma redução da resposta na região (1) e parte da região (2) até f_{01sss} =6 Hz, onde a partir de então as amplificações em relação à resposta linearelástica crescem até a freqüência de 9 Hz, Tabelas 4.21 e 4.22 e Figuras 4.34 e 4.35. O valor máximo representativo da resposta espectral inelástica para este caso é de **0,6548** m/s, obtido na freqüência de 9 Hz do SSS, C=0,2-N1=N2=0,3, ultrapassando um pouco mais de duas vezes a resposta linear-elástica, Tabela 4.21.

-salienta-se que a ocorrência do valor máximo citado anteriormente, pode ser entendida levando-se em conta a perda de rigidez que há no SSS, fazendo deslocar sua freqüência original 9 Hz para uma próxima da freqüência de sintonia entre os SSS e o SP que é de 5 Hz, resultando em uma situação de maior amplificação da resposta obtida no SSS;

 - evidencia-se o afastamento observado dos espectros na região (3) em relação à linha que corresponde a aceleração máxima dos nós de apoio do SSS no SP, provocado principalmente pela influência das rotações existentes no modelo do SSS, Figura 4.34;

- observa-se a maior expressão da resposta espectral nos casos em que o escoamento dos elementos de tubo está presente, assim como já verificado na avaliação da dutilidade do SSS.

			regiã	io (1)	·			regiâ	io (2)		
f ₀₁ (Hz)	0,	25	2	,5	4	5	9	9	3	3
N1	N2	C=0,2	C=0,6								
1,0	0,3	0,1763	0,1981	0,3570	0,4024	0,4399	0,5574	0,5605	0,2989	0,5157	0,5035
	0,6	0,1892	0,2037	0,3933	0,4120	0,5619	0,5683	0,3693	0,2915	0,4891	0,5035
	1,0	0,2227	0,2227	0,4260	0,4260	0,5895	0,5895	0,2861	0,2861	0,5035	0,5035
0,6	0,3	0,1763	0,1981	0,3532	0,4024	0,4160	0,5788	0,6024	0,2989	0,5196	0,5035
	0,6	0,1892	0,2037	0,3741	0,4120	0,5323	0,5836	0,3859	0,2915	0,5098	0,5035
	1,0	0,2004	0,2166	0,4002	0,4260	0,5639	0,5895	0,2937	0,2861	0,5094	0,5035
0,3	0,3	0,1790	0,1981	0,2682	0,4018	0,4150	0,5698	0,6510	0,3037	0,5186	0,5049
	0,6	0,1840	0,2044	0,2809	0,4002	0,5016	0,5695	0,4161	0,2969	0,5338	0,5049
	1,0	0,2003	0,2153	0,2870	0,4033	0,6079	0,5702	0,3146	0,2899	0,5628	0,5049

Tabela 4.23 – Valores espectrais médios em pseudo-velocidade (m/s) para o SSS acoplado ao SP. Carregamento: sismo-x-0,1g+Pi- ξ =0

Tabela 4.24 – Valores espectrais médios normalizados pela resposta elástica (V/V₀), para o SSS acoplado ao SP. Carregamento: sismo-x-0,1+Pi- ξ =0

			regiã	io (1)				regiâ	io (2)		
f ₀₁ (Hz)	0,	25	2	,5	4	5	9	9	3	3
N1	N2	C=0,2	C=0,6								
1,0	0,3	0,7915	0,8896	0,8381	0,9446	0,7462	0,9456	1,9588	1,0450	1,0242	0,9999
	0,6	0,8495	0,9146	0,9233	0,9670	0,9532	0,9640	1,2908	1,0189	0,9714	0,9999
	1,0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0,6	0,3	0,7915	0,8896	0,8290	0,9446	0,7057	0,9817	2,1054	1,045	1,0320	0,9999
	0,6	0,8495	0,9146	0,8780	0,9670	0,9029	0,9898	1,3487	1,0189	1,0125	0,9999
	1,0	0,9517	0,9726	0,9393	1	0,9566	1	1,0267	1	1,0117	1
0,3	0,3	0,8037	0,8896	0,6296	0,9430	0,7039	0,9665	2,2751	1,0614	1,0301	1,0027
	0,6	0,8237	0,9179	0,6593	0,9394	0,8508	0,9668	1,4544	1,0377	1,0603	1,0027
	1,0	0,8996	0,9668	0,6737	0,9466	1,0312	0,9672	1,0997	1,0133	1,1178	1,0027

A inclusão da Pi no SSS no nível de 150 atm conduz a pequenas alterações na resposta espectral para C=0,2 na região de baixas freqüências do SSS quase imperceptíveis, Tabelas 4.23 e 4.24.

			regiã	io (1)				regiã	io (2)		
f ₀₁ (Hz)	0,	25	2.	,5	4	5	9)	3	3
N1	N2	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6
1,0	0,3	0,1763	0,1987	0,3797	0,3980	0,4773	0,5929	0,3121	02920	0,5220	0,5225
	0,6	0,1884	0,2049	0,3821	0,4089	0,5411	0,5894	0,3030	0,2924	0,5218	0,5229
	1,0	0,2227	0,2227	04260	0,4260	0,5895	0,5895	0,2861	0,2861	0,5035	0,5035
		• •,, •,, •.									
0,6	0,3	0,1763	0,1987	0,3698	0,3980	0,4584	0,5929	0,3091	0,2920	0,5232	0,5225
	0,6	0,1884	0,2049	0,3880	0,4089	0,5121	0,5895	0,3037	0,2924	0,5229	0,5229
	1,0	0,2121	0,2169	0,3960	0,4243	0,5669	0,5907	0,2925	0,2927	0,5240	0,5232
0,3	0,3	0,1793	0,1987	0,3024	0,3995	0,4026	0,5874	0,3085	0,2927	0,5244	0,5232
	0,6	0,1827	0,2057	0,3420	0,4121	0,5157	0,5836	0,3065	0,2931	0,5232	0,5236
	1,0	0,2017	0,2155	0,3500	0,4295	0,5610	0,5853	0,2948	0,2934	0,5240	0,5239

Tabela 4.25 – Valores espectrais médios em pseudo-velocidade (m/s) para o SSS acoplado ao SP. Carregamento: sismo-x-0,1g+Pi+ Δ T- ξ =0

Tabela 4.26 - Valores espectrais médios normalizados pela resposta elástica (V/V₀), para o SSS acoplado ao SP. Carregamento: sismo-x-0,1g + Pi+ Δ T- ξ =0

			regiã	io (1)				regiã	io (2)		
f ₀₁ (Hz)	0,	25	2	,5	4	5	9)	3	3
N1	N2	C=0,2	C=0,6								
1,0	0,3	0,7917	0,8923	0,8913	0,9342	0,8097	1,0058	1,0910	1,0206	1,0367	1,0377
	0,6	0,8460	0,9203	0,8968	0,9599	0,9178	0,9998	1,0590	1,0219	1,0363	1,0385
	1,0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0,6	0,3	0,7917	0,8923	0,8679	0,9342	0,7775	1,0058	1,0804	1,0207	1,039	1,0377
	0,6	0,8460	0,9203	0,9109	0,9599	0,8687	0,9998	1,0614	1,0219	1,038	1,0385
	1,0	0,9525	0,9737	0,9296	0,9959	0,9616	1,0021	1,0225	1,0232	1,040	1,0390
0,3	0,3	0,8052	0,8923	0,7099	0,9377	0,6828	0,9963	1,0783	1,0230	1,0415	1,0392
	0,6	0,8206	0,9236	0,8028	0,9674	0,8747	0,990	1,0714	1,0244	1,0390	1,0399
	1,0	0,9056	1,9675	0,8216	1,0081	0,9516	0,9929	1,0302	1,0256	1,0407	1,0404



Figura 4.36 – EMR inelástica em pseudo-velocidade do SSS acoplado ao SP, C=0,2, sismo-x-0,1g+ Pi+ Δ T- ξ =0



Figura 4.37 – EMR inelástica, normalizados pela resposta linear-elástica (V₀) do SSS acoplado ao SP, C=0,2, sismo-x-0,1g +Pi+ Δ T- ξ =0

A presença de forças normais predominantemente compressivas devidas à elevação de temperatura na tubulação do SSS associada à carga sísmica, provoca

alterações nos espectros de resposta, mais sentidas na região (2), precisamente em f_{01} =9 Hz, onde de maneira geral é observada uma redução da resposta inelástica em direção à linear-elástica, Tabelas 4.25 e 4.26 e Figuras 4.36 e 4.37.

<u> 3F. C</u>	Jane	jamenio.	3131110-7	-0, ig- <u>5</u> -1	5,07									
	região (1)						região (2)							
f ₀₁ (f ₀₁ (Hz) 0,25		25	2,5		5		9		3	3			
N1	N2	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6			
1,0	1,0	0,0338	0,0338	0,0987	0,0987	0,1377	0,1377	0,0592	0,0592	0,1134	0,1134			
0,6	0,6	0,0380	0,0338	0,0905	0,0987	0,1416	0,1355	0,0739	0,0593	0,1142	0,1134			
0,3	0,3	0,0434	0,0334	0,0931	0,0987	0,1251	0,1305	0,1277	0,0597	0,1186	0,1139			

Tabela 4.27 – Valores espectrais médios em pseudo-velocidade (m/s) para o SSS acoplado ao SP. Carregamento: sismo-x-0,1g- ξ =0,07

Tabela 4.28 – Valores espectrais médios normalizados pela resposta elástica (V/V₀), para o SSS acoplado ao SP. Carregamento: sismo-x-0,1g- ξ =0,07

			região (1)				região (2)						
f ₀₁ (Hz)	0,25		2,5		5		Ū,	9	3	3		
N1	N2	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6		
1,0	1,0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
0,6	0,6	1,1231	0,9994	0,9173	1	1,0285	0,9844	1,249	1,0031	1,0074	1		
0,3	0,3	1,282	0,9879	0,9436	1	0,9088	0,9483	2,157	1,0093	1,0459	1,0046		



Figura 4.38 – EMR inelástica em pseudo-velocidade do SSS acoplado ao SP, C=0,2. Comparação para o sismo-x-0,1g com e sem amortecimento no SSS



Figura 4.39 – EMR inelástica em pseudo-velocidade do SSS acoplado ao SP, C=0,6. Comparação para o sismo-x-0,1g com e sem amortecimento no SSS

Tabela 4.29 – Valores espectrais médios em pseudo-velocidade (m/s) para o SSS acoplado ao SP. Carregamento: sismo-x-0,1g+ Pi+ Δ T- ξ =0,07

			regiã	lo (1)		região (2)						
f ₀₁ (Hz)		0,25		2,5		5		C,)	3	3	
N1	N2	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	
1,0	1,0	0,0338	0,0338	0,0987	0,0987	0,1377	0,1377	0,0592	0,0592	0,1134	0,1134	
0,6	0,6	0,0548	0,0535	0,1024	0,1012	0,1321	0,1406	0,0644	0,0652	0,1229	0,1237	
0,3	0,3	0,0485	0,0481	0,1081	0,0991	0,1296	0,1420	0,0628	0,0650	0,1237	0,1239	

Tabela 4.30 – Valores espectrais médios normalizados pela resposta elástica (V/V₀), para o SSS acoplado ao SP. Carregamento: sismo-x-0,1g+Pi+ Δ T- ξ =0,07

			regiâ	io (1)		região (2)						
f ₀₁ (Hz)	0,	25	2,5		5)	3	3	
N1	N2	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	
1,0	1,0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
0,6	0,6	1,6191	1,5795	1,038	1,0258	0,9597	1,0215	1,0882	1,1016	1,0845	1,0914	
0,3	0,3	1,4338	1,4217	1,0952	1,0041	0,9414	1,0314	1,0614	1,0989	1,0915	1,0933	



Figura 4.40 – EMR inelástica em pseudo-velocidade do SSS acoplado ao SP, C=0,2. Comparação para o sismo-x-0,1g com e sem amortecimento no SSS sob Pi+ Δ T



Figura 4.41 – EMR inelástica em pseudo-velocidade do SSS acoplado ao SP, C=0,6. Comparação para o sismo-x-0,1g com e sem amortecimento no SSS sob Pi+ Δ T

Com a consideração de amortecimento no SSS, pode-se verificar facilmente sua influência na resposta espectral, quer seja na resposta linear-elástica ou na nãolinear inelástica, impondo uma significativa redução em seus valores através de um deslocamento praticamente constante dos espectros ao longo de toda a faixa de freqüências do SSS, Tabelas 4.27 e 4.28 e Figuras 4.38 e 4.39. Seu efeito segue um padrão que é também observado no caso da presença de forças normais axiais predominantemente compressivas decorrentes da variação de temperatura, Tabelas 4.29 e 4.30 e Figuras 4.40 e 4.41.

De maneira geral, em todos os espectros, os valores espectrais obtidos para N2=0,6 são superiores aos obtidos para N2=0,3, com exceção do que ocorre nas freqüências de 9 e 33 Hz. Isso pode ser explicado, novamente levando-se em conta o deslocamento que ocorre nas freqüências do SSS, que no caso de N2=0,3 é mais acentuado, fazendo reduzir mais ainda a resposta dentro da faixa de freqüências menores que 6 Hz. Além disso, percebe-se que os resultados obtidos para C=0,6, ficam muito próximos da própria resposta linear-elástica, podendo em alguns casos se igualar a essa.

Assim como feito para os resultados em termos de fatores de dutilidade obtidos no SSS acoplado ao SP, sinteticamente, os gráficos das Figuras 4.42 e 4.43 resumem de forma aproximada o comportamento dos EMR inelástica para (N1, N2) $\in [0,3, 0,6]$ e C=0,2. O valor C=0,6 representa um nível a partir do qual a resposta inelástica passa a apresentar diferenças maiores do que 5% da resposta linear-elástica. Esses espectros são denominados de espectros médios aproximados para a resposta inelástica e designados por EMARIN.



Figura 4.42 – EMARIN normalizada obtida no SSS acoplado ao SP, C=0,2, sismo-x-0,1g- ξ =0



Figura 4.43 – EMARIN normalizada obtida no SSS acoplado ao SP, C=0,2, sismo-x-0,1g+Pi+ Δ T- ξ =0

Reportando-se agora às Figuras 4.26 e 4.27 referentes aos espectros médios aproximados de dutilidade do SSS acoplado ao SP, que justapostas às Figuras 4.42 e 4.43 da forma como mostrada nas Figuras 4.44 e 4.45, permitem escrever:

- a resposta inelástica do SSS em termos de espectros médios aproximados de dutilidade e espectros médios aproximados de resposta seguem um padrão de comportamento muito semelhante ao longo do espectro de freqüências do SSS;

- as duas grandezas estão fortemente relacionadas entre si, ou seja, uma redução ou aumento na resposta inelástica do SSS em termos de pseudo-velocidade espectral $(V_{\max i} = \omega_{0isss}U_{\max i})$ implica em uma redução ou aumento na dutilidade de acordo com o observado em cada região de freqüências do SSS;



Figura 4.44 – EMARIN (V/V_0) e EMAD (μ) do SSS acoplado ao SP, C=0,2, sismo-x-0,1g-\xi=0



Figura 4.45 – EMARIN (V/V_0) e EMAD (µ) do SSS acoplado ao SP, C=0,2, sismo-x-0,1g+Pi+ $\Delta T\$ =0

4.3.2.1.1 Influência da variação da potência do sismo

Para avaliar a influência da variação da potência total do sismo nos resultados anteriores, são obtidas e analisadas situações para o sismo-x-1g.

Nas Figuras 4.46 e 4.47 são ilustrados os EMR inelástica do SSS acoplado ao SP sem a inclusão do amortecimento, para o sismo isolado e associado à presença de $Pi+\Delta T$ no SSS.



Figura 4.46 – EMR inelástica do SSS acoplado ao SP, C=0,2, N1=0,3-N2=0,3 e ξ =0



Figura 4.47 – EMR inelástica normalizada do SSS acoplado ao SP, C=0,2, N1=0,3-N2=0,3 e $\xi{=}0$

O comportamento desses espectros de resposta segue o mesmo padrão dos correspondentes casos obtidos para o sismo-x-0,1g; mantém-se porém mais discreto o

efeito na resposta inelástica quando da presença de uma variação de temperatura na tubulação do SSS; a diferença geral observada é da elevação de suas ordenadas.

A Figura 4.48 apresenta os espectros da Figura 4.47 justapostos aos seus correspondentes obtidos para o sismo-x-0,1g, de forma a justificar as observações já expostas.



Figura 4.48 – EMR inelástica normalizada do SSS acoplado ao SP. Comparação para variação na potência do sismo, com e sem Pi+ Δ T no SSS e ξ =0, C=0,2-N1=0,3-N2=0,3

Ressalta-se que no caso dos espectros de dutilidade do SSS referentes às respostas inelásticas apresentadas, esses são os mesmos obtidos para o sismo-x-0,1g, uma vez que o cálculo do fator de dutilidade global do sistema independe da potência do sismo, tendo em vista a parametrização empregada.

4.3.2.2. SSS não-acoplado ao SP

Os espectros médios de resposta obtidos no SSS não-acoplado, seguem a mesma parametrização feita na solução inelástica para a situação acoplada, sendo também aqui considerada a inclusão do amortecimento e de uma variação de temperatura na tubulação. No entanto, evidencia-se que o sinal sísmico aplicado nos nós de apoio do SSS agora isolado, é representado por um acelerograma médio obtido nesses mesmos nós de apoio a partir da aplicação do sismo-x-0,1g na base do SP isolado, conforme descrito no item 4.1.4.

Um outro ponto importante que deve ser lembrado nessa situação de nãoacoplamento entre os sistemas, é que o SSS não está mais sujeito aos efeitos de rotação e torção provocados pelo SP junto aos nós de ligação entre os dois sistemas quando acoplados, sendo agora a cinemática desses nós estabelecida estritamente na direção de aplicação da excitação sísmica (direção x).

			regiã	io (1)				regiã	io (2)		
f ₀₁ (Hz)	0,2	25	2	,5	4	5	9)	3	3
N1	N2	C=0,2	C=0,6								
1,0	0,3	0,2189	0,2631	0,3575	0,4735	1,0595	0,6929	0,4348	0,1399	0,0648	0,0378
	0,6	0,2177	0,2700	0,4548	0,4827	3,4654	0,7035	0,1931	0,1421	0,0435	0,0361
	1,0	0,3111	0,3111	0,5184	0,5184	0,7033	0,7033	0,1474	0,1474	0,0347	0,0347
0,6	0,3	0,2189	0,2631	0,3575	0,4735	0,9399	0,6929	0,5111	0,1399	0,0692	0,0378
	0,6	0,2177	0,2700	0,4015	0,4827	2,1175	0,7035	0,2025	0,1421	0,0469	0,0361
	1,0	0,2553	0,3111	0,4250	0,5184	0,8968	0,7033	0,1460	0,1475	0,0377	0,0347
0,3	0,3	0,2187	0,2631	0,3035	0,4735	0,8430	0,6750	0,6443	0,1402	0,0872	0,0433
	0,6	0,2203	0,2700	0,3064	0,4827	1,5141	0,6919	0,2219	0,1421	0,0635	0,0411
	1,0	0,2315	0,2909	0,3035	0,5184	1,1845	0,6925	0,1513	0,1473	0,0533	0,0391

Tabela 4.31 – Valores espectrais médios em pseudo-velocidade (m/s) para o SSS não-acoplado. Carregamento: sismo-x-0,1g-ξ=0

	•		regiã	io (1)				regiã	io (2)		
f ₀₁ (Hz)	0,	25	2	,5	4	5	9)	3	3
N1	N2	C=0,2	C=0,6								
1,0	0,3	0,7038	0,8457	0,6895	0,9133	1,5063	0,9851	2,9484	0,9487	1,8659	1,0894
	0,6	0,6998	0,8682	0,8772	0,9310	4,9269	1,0001	1,3091	0,9639	1,2542	1,0398
	1,0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0,6	0,3	0,7038	0,8457	0,6895	0,9133	1,3364	0,9851	3,4654	0,9487	1,9928	1,0894
	0,6	0,6998	0,8682	0,7745	0,9310	3,0105	1,0001	1,3731	0,9639	1,3524	1,0398
	1,0	0,8208	1	0,8198	1	1,2751	1	0,9897	1	1,0874	1
		_			_	_	_				
0,3	0,3	0,7030	0,8457	0,5854	0,9133	1,1985	0,9597	4,3685	0,9510	2,5126	1,2460
	0,6	0,7080	0,8682	0,5909	0,9310	2,1527	0,9837	1,5050	0,9636	1,8295	1,1848
	1,0	0,7443	0,9351	0,5854	0,9998	1,6841	0,9846	1,0262	0,9985	1,5339	1,1257

Tabela 4.32 – Valores espectrais médios normalizados pela resposta elástica (V/V₀), para o SSS não-acoplado. Carregamento: sismo-x-0,1g- ξ =0



Figura 4.49 – EMR inelástica em pseudo-velocidade do SSS não-acoplado, C=0,2, sismo-x-0,1g- ξ =0



Figura 4.50 – EMR inelástica, normalizados pela resposta linear-elástica (V₀) do SSS não-acoplado, C=0,2, sismo-x-0,1g- ξ =0

O exame dos resultados expostos revela o seguinte:

- numa análise preliminar para a carga sísmica, observa-se que os espectros obtidos apresentam um comportamento muito semelhante entre si, tendo as maiores amplificações da resposta espectral inelástica na freqüência de 5 Hz do SSS, ao invés de ser na de 9 Hz, que foi o caso na situação acoplada, Figuras 4.49 e 4.50.

- o endereço f_{01} =5 Hz, C=0,2, N1=1 e N2=0,6 na Tabela 4.31 revela o valor máximo representativo da resposta espectral em termos de pseudo-velocidade que é **3,4654** m/s obtida no SSS não-acoplado, que ocorre exatamente na freqüência de maior potência do sinal sísmico nos nós de apoio do SSS. Ressalta-se que o valor observado anteriormente, chega a ser cerca de 6 vezes superior ao mesmo caso, quando considerado o acoplamento entre o SSS e o SP;

- semelhantemente ao observado na situação acoplada, ocorre uma redução da resposta inelástica em relação à linear-elástica nas freqüências mais baixas do SSS, presenciada agora até em torno das freqüências de 3,5 a 4 Hz; destaca-se ainda o

Espectros de resposta inelástica dos SS

mesmo aspecto nos espectros dos casos N1=1-N2=0,3 e N1=0,3-N2=0,3, Figura 4.49, observado na resposta acoplada na freqüência de 9 Hz.

			regiâ	io (1)				regiâ	io (2)		
f ₀₁ (Hz)	0,	25	2	,5	4	5		9	3	3
N1	N2	C=0,2	C=0,6								
1,0	0,3	0,2141	0,5695	0,3783	0,4783	1,1020	0,7059	0,1388	0,1423	0,0359	0,0351
	0,6	0,2368	0,2735	0,4688	0,4865	2,6652	0,7009	0,1437	0,1449	0,0355	0,0349
	1,0	0,3111	0,3111	0,5184	0,5184	0,7033	0,7033	0,1474	0,1474	0,0347	0,0347
0,6	0,3	0,2141	0,2695	0,3740	0,4783	0,9558	0,7059	0,1403	0,1423	0,0361	0,0351
	0,6	0,2368	0,2735	0,4325	0,4865	2,1211	0,7009	0,1443	0,1449	0,0351	0,0349
	1,0	0,2550	0,3127	0,4841	0,5180	0,8839	0,7035	0,1472	0,1470	0,0346	0,0348
0,3	0,3	0,216	0,2695	0,3366	0,1617	0,8803	0,6932	0,1419	0,1428	0,0356	0,0349
	0,6	0,2343	0,2735	0,3427	0,4743	1,5301	0,6866	0,1439	0,1453	0,0349	0,0348
	1,0	0,2305	0,2924	0,3020	0,5156	XX	0,6925	0,1461	0,1476	0,0352	0,0356

Tabela 4.33 – Valores espectrais médios em pseudo-velocidade (m/s) para o SSS não-acoplado. Carregamento: sismo-x-0,1g + Pi+ Δ T- ξ =0

Tabela 4.34 - Valores espectrais médios normalizados pela resposta elástica (V/V₀), para o SSS não-acoplado. Carregamento: sismo-x-0,1g+ Pi+ Δ T- ξ =0

			regiã	io (1)				regiã	io (2)		
f ₀₁ (Hz)	0,2	25	2	,5	4	5	ļ)	3	3
N1	N2	C=0,2	C=0,6								
1,0	0,3	0,6882	0,8664	0,7297	0,9225	1,5668	1,0035	0,9415	0,9648	1,0356	1,0097
	0,6	0,7613	0,8792	0,9042	0,9384	3,7892	0,9964	0,9744	0,9824	1,0228	1,0054
	1,0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0,6	0,3	0,6882	0,8664	0,7214	0,9225	1,3589	1,0035	0,9517	0,9648	1,0400	1,0097
	0,6	0,7613	0,8792	0,8342	0,9384	3,0157	0,9964	0,9786	0,9824	1,0101	1,0054
	1,0	0,8197	1,0039	0,9337	0,9990	1,2567	1,0001	0,9985	0,9972	0,9962	1,0011
			_			_	_		_		
0,3	0,3	0,6801	0,8664	0,6492	0,8905	1,2515	0,9855	0,9627	0,9685	1,0262	1,0062
	0,6	0,7532	0,8792	0,6609	0,9149	2,1754	0,9761	0,9757	0,9853	1,0044	1,0037
	1,0	0,7411	0,9400	0,5825	0,9946	XX	0,9846	0,9912	1,0009	1,0137	1,0254



Figura 4.51 – EMR inelástica em pseudo-velocidade do SSS não-acoplado, C=0,2, sismo-x-0,1g + Pi+ Δ T- ξ =0



Figura 4.52 – EMR inelástica, normalizados pela resposta linear-elástica (V₀) do SSS não-acoplado, C=0,2, sismo-x-0,1g+Pi+ Δ T- ξ =0

A inclusão do efeito da temperatura no SSS faz praticamente desaparecer as diferenças existentes entre a resposta espectral inelástica e a linear-elástica nas freqüências de 9 e 33 Hz, através da clara redução na resposta observada nessa região de freqüências, Tabelas 4.33 e 4.34 e Figuras 4.51 e 4.52.

Tabela 4.35 – Valores espectrais médios em pseudo-velocidade (m/s) para o SSS não-acoplado. Carregamento: sismo-x-0,1g- ξ =0,07

			regiã	io (1)		região (2)						
$f_{01}(Hz)$		0,25		2,5		5		9		33		
N1	N2	N2 C=0,2 C=0,6		C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	
1,0	1,0	0,2143	0,2143	0,2474	0,2474	0,6115	0,6115	0,1348	0,1348	0,0351	0,0351	
0,6	0,6	0,1584	0,1915	0,2772	0,2548	0,8492	0,5952	0,2010	0,1368	0,0470	0,0362	
0,3	0,3	0,1513	0,1895	0,2339	0,2587	0,6096	0,5683	0,4595	0,1404	0,0840	0,0418	

Tabela 4.36 – Valores espectrais médios normalizados pela resposta elástica (V/V₀), para o SSS não-acoplado. Carregamento: sismo-x-0,1g- ξ =0,07

			regiã	io (1)		região (2)						
f_{01} (Hz)		0,25		2,5		5		9		33		
N1	N2	N2 C=0,2 C=0,6		C=0,2	C=0,6	C=0,2 C=0,6		C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	
1,0	1,0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
0,6	0,6	0,7393	0,8934	1,1204	1,0302	1,3886	0,9733	1,4916	1,0149	1,3390	1,0315	
0,3	0,3	0,7059	0,8840	0,9457	1,0460	0,9968	0,9292	3,4093	1,0420	2,3932	1,1920	



Figura 4.53 – EMR inelástica em pseudo-velocidade do SSS não-acoplado, C=0,2. Comparação para o sismo-x-0,1g com e sem amortecimento no SSS

			regiã	io (1)		região (2)						
f ₀₁ (Hz)		0,25		2,5		5		9		33		
N1	N2	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	
1,0	1,0	0,2143	0,2143	0,2474	0,2474	0,6115	0,6115	0,1348	0,1348	0,0351	0,0351	
0,6	0,6	0,1552	0,1892	0,2944	0,2566	0,8126	0,6106	0,1349	0,1346	0,0361	0,0348	
0,3	0,3	0,1613	0,1886	0,2545	0,2585	0,6281	0,6107	0,1349	0,1346	0,0361	0,0348	

Tabela 4.37 – Valores espectrais médios em pseudo-velocidade (m/s) para o SSS nãoacoplado. Carregamento: sismo-x-0,1g+ Pi+ Δ T- ξ =0,07

Tabela 4.38 – Valores espectrais médios normalizados pela resposta elástica (V/V₀), para o SSS não-acoplado. Carregamento: sismo-x-0,1g+Pi+ Δ T- ξ =0,07

			regiã	io (1)		região (2)						
f ₀₁ (Hz)		0,25		2,5		5		9		33		
N1	1 N2 C=0,2 C=0,6		C=0,6	C=0,2	C=0,6	C=0,2 C=0,		C=0,2	C=0,6	C=0,2	C=0,6	
1,0	1,0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
0,6	0,6	0,7242	0,8829	1,1902	1,0375	1,3287	0,9979	1,0064	0,9877	1,0222	1,4522	
0,3	0,3	0,7525	0,8802	1,0287	1,0452	1,0271	0,9986	1,0009	0,9985	1,0280	0,9920	



Figura 4.54 – EMR inelástica em pseudo-velocidade do SSS não-acoplado, C=0,2. Comparação para o sismo-x-0,1g+Pi+ Δ T com e sem amortecimento no SSS

O efeito do amortecimento no SSS isolado é uma redução da resposta elástica e inelástica como era de se esperar, e segue um comportamento semelhante ao já observado para situação de acoplamento entre o SSS e o SP. Para a carga sísmica, sem outros carregamentos no SSS, o aspecto da resposta amortecida é muito semelhante à correspondente resposta não amortecida, evidenciando-se ainda uma pequena amplificação na freqüência fundamental de 5 Hz do SSS, Tabelas 4.35 e 4.36 e Figura 4.53. Já para a situação do SSS sob Pi+ Δ T, essas amplificações desaparecem e os espectros médios para a resposta amortecida, elástica e inelástica, permanecem praticamente iguais entre si, Tabelas 4.37 e 4.38 e Figura 4.54.

Uma característica observada nesses espectros com o SSS sem amortecimento, tanto para o sismo isolado quanto para o sismo associado ao efeito da temperatura e pressão interna, é a forte tendência nos seus extremos para as grandezas máximas da cinemática dos nós de apoio.

As Figuras 4.55 e 4.56 mostram a forma aproximada do comportamento dos EMR inelástica para a situação de não-acoplamento entre o SSS e o SP, seguindo o mesmo padrão de apresentação feito para o caso acoplado do item anterior.



Figura 4.55 – EMARIN normalizada obtida no SSS não-acoplado ao SP, C=0,2, sismo-x-0,1g- ξ =0



Figura 4.56 – EMARIN normalizada obtida no SSS não-acoplado ao SP, C=0,2, sismo-x-0,1g+Pi+ Δ T- ξ =0

Na seqüência, as Figuras 4.57 e 4.58 mostram justapostos os espectros de dutilidade média e os espectros médios aproximados da resposta inelástica do SSS não-acoplado ao SP, de maneira a serem observadas as características comuns inerentes ao comportamento desses espectros, já vistas para o caso do SSS acoplado ao SP, valendo assim, para a presente situação, as mesmas observações feitas naquela ocasião.



Figura 4.57 – EMARIN (V/V_0) e EMAD (μ) do SSS não-acoplado ao SP, C=0,2, sismo-x-0,1g-\xi=0



Figura 4.58 – EMARIN (V/V₀) e EMAD (μ) do SSS não-acoplado ao SP, C=0,2, sismo-x-0,1g+Pi+ Δ T- ξ =0

Com o intuito de proporcionar um melhor entendimento dos efeitos decorrentes do acoplamento entre os dois sistemas (SSS e SP) utilizados no estudo,

são mostrados justapostos nas Figuras 4.59 e 4.60 os espectros médios aproximados para a resposta inelástica do SSS acoplado e não ao SP.



Figura 4.59 – EMARIN normalizada, C=0,2, sismo-x-0,1g- ξ =0. Comparação SSS acoplado ao SP versus SSS não-acoplado ao SP



Figura 4.60 – EMARIN normalizada, C=0,2, sismo-x-0,1g+Pi+ Δ T- ξ =0. Comparação SSS acoplado ao SP versus SSS não-acoplado ao SP

A partir do exame dos espectros anteriores sobressaem os seguintes pontos:

- numa análise preliminar para a carga sísmica isolada, o acoplamento entre os sistemas conduz a uma resposta inelástica mais próxima da linear-elástica tanto na região (1) quanto na região (2) do espectro de freqüências do SSS. Observa-se também uma tendência dos espectros para um mesmo valor da resposta espectral na freqüência de 33 Hz do SSS;

- no caso acoplado, as maiores amplificações da resposta inelástica estão concentradas próximas da freqüência de 9 Hz do SSS; já no caso não-acoplado essas amplificações podem ser presenciadas também na freqüência de 5 Hz;

- as amplificações máximas da resposta inelástica para a situação não-acoplada, chegam a ser cerca de duas vezes maior do que as observadas na situação acoplada;

- na consideração dos efeitos devidos a uma variação de temperatura, o que se observa é um comportamento muito semelhante entre as duas respostas (acoplada e não-acoplada) na região (1), com grandes diferenças na região (2) onde se presencia ainda uma amplificação da resposta inelástica não-acoplada na freqüência de 5 Hz do SSS. A partir da freqüência de 9 Hz as duas respostas seguem um mesmo comportamento em direção às suas correspondentes respostas linear-elásticas. De maneira geral, entretanto, as conseqüências da variação de temperatura são mais discretas no caso não acoplado.