



**Jair José dos Santos Gomes**

**A pressão interna e a variação de temperatura nos  
sistemas de tubulação e os espectros de resposta de  
projeto para cargas sísmicas**

**Dissertação de Mestrado**

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

Orientadores: João Luis Pascal Roehl  
Regina Augusta Campos Sampaio

Rio de Janeiro  
Abril de 2005



**Jair José dos Santos Gomes**

**A pressão interna e a variação de temperatura  
nos sistemas de tubulação e os espectros de resposta  
de projeto para cargas sísmicas**

Dissertação apresentada como requisito  
parcial para obtenção do título de Mestre pelo  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Civil da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão  
Examinadora abaixo assinada.

**Prof. João Luis Pascal Roehl**

Presidente / Orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

**Profa. Regina Augusta Campos Sampaio**

Co-Orientador

UFPA

**Dr. José Eduardo de Almeida Maneschy**

Eletronuclear

**Prof. Paulo Batista Gonçalves**

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

**Prof. José Eugênio Leal**

Coordenador Setorial

do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 15 de Abril de 2005

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

### **Jair José dos Santos Gomes**

Graduou-se em Engenharia Civil na Universidade Federal do Pará (UFPA), em Novembro de 2002.

#### Ficha Catalográfica

Gomes, Jair José dos Santos

A pressão interna e a variação de temperatura nos sistemas de tubulação e os espectros de resposta de projeto para cargas sísmicas / Jair José dos Santos Gomes; orientadores: João Luis Pascal Roehl, Regina Augusta Campos Sampaio. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2005.

v., 107 f.: il. ; 29,7 cm

Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil.

Incluí referências bibliográficas

1. Engenharia civil – Teses. 2. Sistemas secundários. 3. Pressão interna. 4. Variação de temperatura. 5. Espectro de resposta. 6. Comportamento inelástico. 7. Fator de utilidade. I. Roehl, João Luis Pascal. II. Sampaio, Regina Augusta Campos. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

Para toda minha família, especialmente à minha mãe  
Maria Nina e em memória de meu pai José P. Gomes.

## Agradecimentos

Em primeiro lugar à Deus, pela minha existência e por ter me dado força e determinação suficiente para a realização deste trabalho. A ele, minha gratidão é eterna;

Particularmente, ao Prof. João Luis Pascal Roehl, excelente mestre e amigo, por sua paciência e atenção, pelas críticas e sugestões e, por seu grande interesse em transmitir com sabedoria seus ensinamentos;

A Regina Sampaio, por toda a sua atenção e auxílio durante o desenvolvimento do trabalho;

A CAPES, pelo apoio financeiro e à PUC-Rio pela oportunidade;

Aos professores da Pós-Graduação e funcionários do Departamento de Engenharia Civil;

A todos os meus colegas e amigos da Pós-Graduação que conviveram comigo nesses anos e em particular àqueles que me ajudaram direta e indiretamente neste trabalho;

A toda minha família, pelo apoio, amor e confiança depositados em mim durante esses anos, e em especial a minha querida mãe Maria Nina, que foi sem dúvida a grande responsável por mais esta conquista na minha vida;

A Carolina, por sua amizade, carinho, convivência e companhia durante esses anos.

## Resumo

Gomes, Jair J. Santos; Roehl, João Luis Pascal; Sampaio, Regina Augusta Campos. **A pressão interna e a variação de temperatura nos sistemas de tubulação e os espectros de resposta de projeto para cargas sísmicas.** Rio de Janeiro, 2005. 107p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A análise de estruturas de sistemas secundários sujeitos a cargas sísmicas é um assunto em aberto e especial no projeto de instalações industriais. Dois pontos particulares atraem a atenção dos especialistas no esforço a caminho de um projeto mais realista, abrangente e econômico: a interação das propriedades dinâmicas entre os sistemas principal e secundário e a quantidade de ductilidade do sistema secundário que pode ou deveria ser considerada no projeto. Está muito evidente nesse estágio que a decisão do projetista tem de ser bem assessorada porque dependendo das circunstâncias os resultados finais podem mostrar muitas surpresas. O contexto das experiências nesse assunto, na PUC-Rio, inclui uma série de iniciativas. Entre elas, se pode dar especial menção às seguintes: o estudo e proposta de uma metodologia para desenvolver um espectro de resposta acoplada (Valverde, 1998); o desenvolvimento de um modelo de sistema secundário simplificado: com vários graus de liberdade, linear-elástico, formado por elementos tubulares, conexões e suportes com molas (Castañaga, 1998); a introdução do efeito inelástico nos elementos tubulares e suportes do sistema secundário simplificado e definição de um fator de ductilidade global do sistema para relacionar, qualitativa e quantitativamente, o espectro de resposta acoplada do sistema secundário simplificado, sob comportamento elástico e inelástico (Sampaio, 2003). Agora, um outro avanço é incorporado, com o presente estudo, o da influência de cargas estáticas nos elementos devidas à pressão interna e variação de temperatura, nessas relações do espectro de resposta elástica e inelástica. Também é feita uma comparação dos espectros de resposta elástica e inelástica do sistema secundário acoplado e não acoplado. Espectros médios aproximados para a resposta inelástica acoplada do sistema secundário simplificado são também propostos.

## Palavras-chave

Sistemas secundários, pressão interna, variação de temperatura, espectro de resposta, comportamento inelástico, fator de ductilidade

## Abstract

Gomes, Jair J. Santos; Roehl, João Luis Pascal (advisor); Sampaio, Regina Augusta Campos (advisor). **Effects of the internal pressure and temperature variations on seismic response spectra of tubular systems.** Rio de Janeiro, 2005. 107p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The analysis of secondary structure systems to seismic loads is a special and open subject in the design of industrial installations. Two particular points attract specialist attention and effort on the way of a more realist, comprehensive and economical design: the dynamical properties interaction between the secondary and principal systems and the amount of the secondary system ductility which can or should be considered in the design. It is very clear at this stage that the designer decision has to be well advised because depending on circumstances the final results may show very surprising. The context of experiences on this subject, at PUC-Rio, includes a series of initiatives. Among them, one may to give special mention to the following: the study and proposal of a methodology to develop a coupled floor response spectrum (Valverde, 1998); the development of a simplified secondary system model: multi-degree, linear-elastic, tubular elements and connexions and spring supports (Castañaga, 1998); the introduction of inelastic action in the tubular elements and supports of the simplified secondary system and the definition of a system overall ductility factor to relate, qualitative and quantitatively, the simplified secondary system coupled response spectrum under elastic and inelastic behavior (Sampaio, 2003). Now, another advancement is enhanced with this study on the influence of element static loads due to internal pressure and temperature variation on these elastic and inelastic response spectrum relationships. Comparison also is made into coupled and uncoupled secondary system elastic and inelastic response spectra. Approximated medium response spectra for the inelastic coupled response of a simplified secondary system are also proposed.

## Keywords

Secondary systems, internal pressure, temperature variation, response spectrum, inelastic behavior, ductility factor

## Sumário

1. Introdução	21
2. Considerações iniciais	25
3. Situação no assunto	28
4. Espectros de resposta inelástica dos SS	32
4.1. Análise do cenário linear	32
4.1.1. O cenário introdutório	32
4.1.2. Sistema principal	32
4.1.3. Sistema secundário	35
4.1.4. Sismo-amostra	39
4.1.5. Espectros de resposta linear-elástica	43
4.2. Definição do cenário inelástico	48
4.2.1. Definição e comportamento não-linear inelástico dos elementos do SSS	48
4.2.2. Definição e variação dos parâmetros	50
4.3. Ensaios e análise dos resultados	56
4.3.1. Espectros de utilidade	57
4.3.1.1. SSS acoplado ao SP	57
4.3.1.2. SSS não acoplado ao SP	68
4.3.2. Espectros de resposta	75
4.3.2.1. SSS acoplado ao SP	76
4.3.2.1.1. Influência da variação da potência do sismo	88
4.3.2.2. SSS não acoplado ao SP	91
5. Conclusões	103
6. Referências bibliográficas	106



## Lista de figuras

Figura 3 - Procedimento esquemático para obtenção de espectros de resposta acoplada em vários pontos (Valverde, 1998)	29
Figura 4.1 – Representação do sistema principal (SP) em concreto armado	33
Figura 4.2 – Representação do modelo do sistema principal, seus elementos de barra e massas concentradas	33
Figura 4.3 – Representação esquemática do sistema secundário simplificado (SSS)	35
Figura 4.4 - Frequências naturais circulares, $\omega_{0i}$ , para os dois modos de vibração do S2GL	38
Figura 4.5 – Representação esquemática do sistema acoplado (SSS+SP)	39
Figura 4.6 – Funções da aceleração, velocidade e deslocamento do terreno correspondentes ao sismo-x-0,1g	40
Figura 4.7 – FDEP para o sismo-x-0,1g	40
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 ( $\xi=0$ ) isolado	41
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 ( $\xi=0,07$ )	42
Figura 4.10 – FDEP para o sismo-x-0,1g e para o acelerogramas médios obtidos nos nós de apoio do SSS no SP com e sem amortecimento	43
Figura 4.11 – Comparação entre espectros de resposta linear-elástica obtidos para o SSS ( $\xi=0$ e $0,07$ ) acoplado e não-acoplado ao SP, e aqueles obtidos para um S1GL ( $\xi=0$ ), sismo-x-0,1g	44
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	46
Figura 4.13 – Geometria dos elementos PIPE20 e PIPE60	48

Figura 4.14 – (a) Translação da superfície de escoamento com a progressão do escoamento (encruamento cinemático); (b) comportamento bi linear dos elementos de tubo	49
Figura 4.15 – Elemento COMBIN40	50
Figura 4.16 – Comportamento bi linear inelástico dos suportes do SSS	50
Figura 4.17 – Tensões equivalentes elásticas máximas na tubulação do SSS acoplado ao SP, para $C=1$ , $f_{01SSS}=9$ Hz	52
Figura 4.18 – Espectros de utilidade do SSS acoplado ao SP, $C=0,2$ , sismo-x-0,1g- $\xi=0$	58
Figura 4.19 – Espectros de utilidade do SSS acoplado ao SP, $C=0,2$ , sismo-x-0,1g+ $\Pi+\Delta T$ - $\xi=0$	60
Figura 4.20 – Espectros de utilidade do SSS acoplado ao SP, $C=0,6$ , sismo-x-0,1g+ $\Pi+\Delta T$ - $\xi=0$	61
Figura 4.21 – Períodos de regime elástico e inelástico no SSS acoplado ao SP, $f_{01}=2,5$ Hz	63
Figura 4.22 – Espectros de utilidade do SSS acoplado ao SP. Comparação para o sismo-x-0,1g com e sem amortecimento no SSS, $C=0,2$	64
Figura 4.23 – Espectros de utilidade do SSS acoplado ao SP. Comparação para o sismo-x-0,1g com e sem amortecimento no SSS, $C=0,6$	64
Figura 4.24 – Espectros de utilidade do SSS acoplado ao SP. Comparação para o sismo-x-0,1g com e sem amortecimento no SSS sob $\Pi+\Delta T$ , $C=0,2$	65
Figura 4.25 – Espectros de utilidade do SSS acoplado ao SP. Comparação para o sismo-x-0,1g com e sem amortecimento no SSS sob $\Pi+\Delta T$ , $C=0,6$	66
Figura 4.26 – EMAD do SSS acoplado ao SP, $C=0,2$ , sismo-x-0,1g- $\xi=0$	67
Figura 4.27 – EMAD do SSS acoplado ao SP, $C=0,2$ , sismo-x-0,1g c/ SSS sob $\Pi+\Delta T$ - $\xi=0$ . Para valores de $N1$ e $N2$ entre 0,3 e 0,6	68
Figura 4.28 – Espectros de utilidade do SSS não acoplado, $C=0,2$ , sismo-x-0,1g- $\xi=0$	69

Figura 4.29 – Espectros de utilidade do SSS não acoplado, $C=0,2$ , sismo- $x-0,1g+P_i+\Delta T-\xi=0$	70
Figura 4.30 – Espectros de utilidade do SSS não acoplado. Comparação para o sismo- $x-0,1g$ com e sem amortecimento no SSS, $C=0,2$	72
Figura 4.31 – Espectros de utilidade do SSS não acoplado. Comparação para o sismo- $x-0,1g$ com e sem amortecimento no SSS sob $P_i+\Delta T$ , $C=0,2$	73
Figura 4.32 – EMAD do SSS não-acoplado ao SP, $C=0,2$ , sismo- $x-0,1g$ - $\xi=0$	74
Figura 4.33 – EMAD do SSS não-acoplado ao SP, $C=0,2$ , sismo- $x$ - $0,1g+P_i+\Delta T-\xi=0$	74
Figura 4.34 – EMR inelástica em pseudo-velocidade do SSS acoplado ao SP, $C=0,2$ , sismo- $x-0,1g-\xi=0$	77
Figura 4.35 – EMR inelástica, normalizados pela resposta linear-elástica ( $V_0$ ) do SSS acoplado ao SP, $C=0,2$ , sismo- $x-0,1g-\xi=0$	77
Figura 4.36 – EMR inelástica em pseudo-velocidade do SSS acoplado ao SP, $C=0,2$ , sismo- $x-0,1g+P_i+\Delta T-\xi=0$	81
Figura 4.37 – EMR inelástica, normalizados pela resposta linear-elástica ( $V_0$ ) do SSS acoplado ao SP, $C=0,2$ , sismo- $x-0,1g+P_i+\Delta T-\xi=0$	81
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	82
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	83
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 $P_i+\Delta T$	84
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 $P_i+\Delta T$	84
Figura 4.42 – EMARIN normalizada obtida no SSS acoplado ao SP, $C=0,2$ , sismo- $x-0,1g-\xi=0$	86

Figura 4.43 – EMARIN normalizada obtida no SSS acoplado ao SP, $C=0,2$ , sismo- $x-0,1g+P_i+\Delta T-\xi=0$	86
Figura 4.44 – EMARIN ( $V/V_0$ ) e EMAD ( $\mu$ ) do SSS acoplado ao SP, $C=0,2$ , sismo- $x-0,1g-\xi=0$	87
Figura 4.45 – EMARIN ( $V/V_0$ ) e EMAD ( $\mu$ ) do SSS acoplado ao SP, $C=0,2$ , sismo- $x-0,1g+P_i+\Delta T-\xi=0$	88
Figura 4.46 – EMR inelástica do SSS acoplado ao SP, $C=0,2$ , $N_1=0,3$ - $N_2=0,3$ e $\xi=0$	89
Figura 4.47 – EMR inelástica normalizada do SSS acoplado ao SP, $C=0,2$ , $N_1=0,3$ - $N_2=0,3$ e $\xi=0$	89
Figura 4.48 – EMR inelástica normalizada do SSS acoplado ao SP. Comparação para variação na potência do sismo, com e sem $P_i+\Delta T$ no SSS e $\xi=0$ , $C=0,2$ - $N_1=0,3$ - $N_2=0,3$	90
Figura 4.49 – EMR inelástica em pseudo-velocidade do SSS não- acoplado, $C=0,2$ , sismo- $x-0,1g-\xi=0$	92
Figura 4.50 – EMR inelástica, normalizados pela resposta linear-elástica ( $V_0$ ) do SSS não-acoplado, $C=0,2$ , sismo- $x-0,1g-\xi=0$	93
Figura 4.51 – EMR inelástica em pseudo-velocidade do SSS não- acoplado, $C=0,2$ , sismo- $x-0,1g+P_i+\Delta T-\xi=0$	95
Figura 4.52 – EMR inelástica, normalizados pela resposta linear-elástica ( $V_0$ ) do SSS não-acoplado, $C=0,2$ , sismo- $x-0,1g+P_i+\Delta T-\xi=0$	95
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	96
Figura 4.54 – EMR inelástica em pseudo-velocidade do SSS não- acoplado, $C=0,2$ . Comparação para o sismo- $x-0,1g+P_i+\Delta T$ com e sem amortecimento no SSS	97
Figura 4.55 – EMARIN normalizada obtida no SSS não-acoplado ao SP, $C=0,2$ , sismo- $x-0,1g-\xi=0$	98
Figura 4.56 – EMARIN normalizada obtida no SSS não-acoplado ao SP, $C=0,2$ , sismo- $x-0,1g+P_i+\Delta T-\xi=0$	99
Figura 4.57 – EMARIN ( $V/V_0$ ) e EMAD ( $\mu$ ) do SSS não-acoplado ao SP,	

C=0,2, sismo-x-0,1g- $\xi=0$  100

Figura 4.58 – EMARIN ( $V/V_0$ ) e EMAD ( $\mu$ ) do SSS não-acoplado ao SP,

C=0,2, sismo-x-0,1g+Pi+ $\Delta T$ - $\xi=0$  100

Figura 4.59 – EMARIN normalizada, C=0,2, sismo-x-0,1g- $\xi=0$

Comparação SSS acoplado ao SP versus SSS não-acoplado ao SP 101

Figura 4.60 – EMARIN normalizada, C=0,2, sismo-x-0,1g+Pi+ $\Delta T$ - $\xi=0$

Comparação SSS acoplado ao SP versus SSS não-acoplado ao SP 101

## Lista de tabelas

Tabela 4.1 – Quinze primeiras freqüências naturais do sistema principal, $f_{0isp}$ , e suas massas modais, $m_i$	34
Tabela 4.2 – Freqüências fundamentais e módulos de elasticidade do SSS	36
Tabela 4.3 - Valores das relações de $f_{0i}/f_{01}$ , das primeiras 15 freqüências do SSS para a sua freqüência fundamental	37
Tabela 4.4 – Valores do fator de ductilidade, $\mu$ obtidos no SSS acoplado ao SP. Caso de carregamento: sismo-x-0,1g- $\xi=0$	58
Tabela 4.5 – Valores do fator de ductilidade, $\mu$ obtidos no SSS acoplado ao SP. Caso de carregamento: sismo-x-0,1g+ $P_i$ - $\xi=0$	59
Tabela 4.6 – Relações entre os fatores de ductilidade da Tabela 4.5 e os seus correspondentes na Tabela 4.4 (sismo-x-0,1g- $\xi=0$ )	59
Tabela 4.7 – Valores do fator de ductilidade, $\mu$ obtidos no SSS acoplado ao SP. Caso de carregamento: sismo-x-0,1g+ $P_i+\Delta T$ - $\xi=0$	60
Tabela 4.8 – Relações entre os fatores de ductilidade da Tabela 4.7 e os seus correspondentes na Tabela 4.4 (sismo-x-0,1g- $\xi=0$ )	60
Tabela 4.9 – Número de incursões não-lineares (INL) no SSS durante os 15 s do sismo	62
Tabela 4.10 – Valores do fator de ductilidade, $\mu$ obtidos no SSS acoplado ao SP. Caso de carregamento: sismo-x-0,1g- $\xi=0,07$	63
Tabela 4.11 – Relações entre os fatores de ductilidade da Tabela 4.10 e os seus correspondentes na Tabela 4.4 (sismo-x-0,1g- $\xi=0$ )	63
Tabela 4.12 – Valores do fator de ductilidade, $\mu$ obtidos no SSS acoplado ao SP. Caso de carregamento: sismo-x-0,1g+ $P_i+\Delta T$ - $\xi=0,07$	65
Tabela 4.13 – Relações entre os fatores de ductilidade da Tabela 4.12 e os seus correspondentes na Tabela 4.7 (sismo-x-0,1g+ $P_i+\Delta T$ - $\xi=0$ )	65
Tabela 4.14 – Valores do fator de ductilidade, $\mu$ obtidos no SSS não-acoplado. Caso de carregamento: sismo-x-0,1g- $\xi=0$	68
Tabela 4.15 – Valores do fator de ductilidade, $\mu$ obtidos no SSS não-	

acoplado. Caso de carregamento: sismo-x-0,1g c/ SSS+ $P_i+\Delta T-\xi=0$	70
Tabela 4.16 – Relações entre os fatores de ductilidade da Tabela 4.15 e os seus correspondentes na Tabela 4.14 (sismo-x-0,1g- $\xi=0$ )	70
Tabela 4.17 – Valores do fator de ductilidade, $\mu$ obtidos no SSS não-acoplado. Caso de carregamento: sismo-x-0,1g- $\xi=0,07$	71
Tabela 4.18 – Relações entre os fatores de ductilidade da Tabela 4.17 e os seus correspondentes na Tabela 4.14 (sismo-x-0,1g- $\xi=0$ )	71
Tabela 4.19 – Valores do fator de ductilidade, $\mu$ obtidos no SSS não-acoplado. Caso de carregamento: sismo-x-0,1g c/ SSS sob $P_i+\Delta T-\xi=0,07$	72
Tabela 4.20 – Relações entre os fatores de ductilidade da Tabela 4.19 e os seus correspondentes na Tabela 4.15 (sismo-x-0,1g+ $P_i+\Delta T-\xi=0$ )	72
Tabela 4.21 – Valores espectrais médios em pseudo-velocidade (m/s) para o SSS acoplado ao SP. Carregamento: sismo-x-0,1g- $\xi=0$	76
Tabela 4.22 – Valores espectrais médios normalizados pela resposta elástica ( $V/V_0$ ), para o SSS acoplado ao SP. Carregamento: sismo-x-0,1g- $\xi=0$	76
Tabela 4.23 – Valores espectrais médios em pseudo-velocidade (m/s) para o SSS acoplado ao SP. Carregamento: sismo-x-0,1g+ $P_i-\xi=0$	79
Tabela 4.24 – Valores espectrais médios normalizados pela resposta elástica ( $V/V_0$ ), para o SSS acoplado ao SP. Carregamento: sismo-x-0,1+ $P_i-\xi=0$	79
Tabela 4.25 – Valores espectrais médios em pseudo-velocidade (m/s) para o SSS acoplado ao SP. Carregamento: sismo-x-0,1g+ $P_i+\Delta T-\xi=0$	80
Tabela 4.26 - Valores espectrais médios normalizados pela resposta elástica ( $V/V_0$ ), para o SSS acoplado ao SP. Carregamento: sismo-x-0,1g+ $P_i+\Delta T-\xi=0$	80
Tabela 4.27 – Valores espectrais médios em pseudo-velocidade (m/s) para o SSS acoplado ao SP. Carregamento: sismo-x-0,1g- $\xi=0,07$	82
Tabela 4.28 – Valores espectrais médios normalizados pela resposta elástica ( $V/V_0$ ), para o SSS acoplado ao SP. Carregamento: sismo-x-0,1g- $\xi=0,07$	82

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

83

Tabela 4.30 – Valores espectrais médios normalizados pela resposta elástica ( $V/V_0$ ), para o SSS acoplado ao SP. Carregamento: sismo-x-0,1g c/ SSS sob Pi+ΔT-ξ=0,07

83

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

91

Tabela 4.32 – Valores espectrais médios normalizados pela resposta elástica ( $V/V_0$ ), para o SSS não-acoplado. Carregamento: sismo-x-0,1g-ξ=0

92

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

94

Tabela 4.34 - Valores espectrais médios normalizados pela resposta elástica ( $V/V_0$ ), para o SSS não-acoplado. Carregamento: sismo-x-0,1g+Pi+ΔT-ξ=0

94

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

96

Tabela 4.36 – Valores espectrais médios normalizados pela resposta elástica ( $V/V_0$ ), para o SSS não-acoplado. Carregamento: sismo-x-0,1g-ξ=0,07

96

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

97

Tabela 4.38 – Valores espectrais médios normalizados pela resposta elástica ( $V/V_0$ ), para o SSS não-acoplado. Carregamento: sismo-x-0,1g+Pi+ΔT-ξ=0,07

97



## Lista de quadros

Quadro 4.1 – Fatores de rigidez N1 e N2, considerados no estudo	53
Quadro 4.2 – Resumo dos ensaios numéricos	57

## Lista de símbolos e abreviaturas

### Romanos

$a$	Aceleração
$a_0$	Constante de proporcionalidade relativa a matriz de massa
$a_1$	Constante de proporcionalidade relativa a matriz de rigidez
$A$	Pseudo aceleração espectral
$[C]$	Matriz de amortecimento
$C$	Fator de escoamento
$c_i$	Fator de participação no modo $i$
$E$	Módulo de elasticidade longitudinal
$E_t$	Módulo de elasticidade dos elementos de tubo no primeiro trecho do diagrama bi-linear tensão-deformação
$E_2$	Módulo de elasticidade dos elementos de tubo no segundo trecho do diagrama bi linear tensão-deformação
EMR	Espectro médio de resposta
EMARIN	Espectro médio aproximado para a resposta inelástica
EMAD	Espectro médio aproximado de dutilidade
$FAI_i$	Fator de amplificação instantâneo no modo $i$
FDEP	Função densidade de espectro de potência
$F_y$	Força correspondente ao escoamento
$F_0$	Força máxima elástica aplicada
$f_{0i}$	Frequência natural do sistema secundário
$f_{01ss}$	Frequência fundamental do sistema secundário simplificado
$f_{01sp}$	Frequência fundamental do sistema principal
$g$	Aceleração da gravidade
$[K]$	Matriz de rigidez
$k_r$	Coeficiente de rigidez rotacional
$k_t$	Coeficiente de rigidez translacional
$[M]$	Matriz de massa
$m$	Massa

$P_0$	Pressão externa no tubo
$P_i$	Pressão interna no tubo
$S_{ij}$	Tensor de tensões desviadoras
S1GL	Sistema de um grau de liberdade
S2GL	Sistema de dois graus de liberdade
SP	Sistema principal
SS	Sistema secundário
SSS	Sistema secundário simplificado
T	Período
$T_{\text{elastico}}$	Trabalho elástico realizado pelas forças externas no SSS
$T_{\text{total}}$	Trabalho total realizado pelas forças externas no SSS
$T_{\text{plastico}}$	Trabalho plástico realizado pelas forças externas no SSS
t	Instante de tempo
U	Deslocamento espectral
u	Deslocamento
$u_y$	Deslocamento correspondente ao início do escoamento
v	Velocidade
V	Pseudo velocidade espectral

## Gregos

$\alpha_{ij}$	Variável de encruamento que determina o centro da superfície de escoamento
$\Delta T$	Elevação de temperatura
$\phi_i$	Modo de vibração com frequência $\omega_{0i}$
$\beta$	Relação entre as frequências do sistema secundário e a do principal
$\Phi_{rr}$	Densidade espectral de potência da resposta r
$\gamma$	Relação entre as massas do sistema secundário e a do principal
$\eta$	Relação entre as frequências do sistema acoplado e a do principal
$\mu$	Fator de utilidade
$\sigma$	Tensão
$\sigma_0$	Tensão equivalente máxima elástica
$\sigma_{eq}$	Tensão equivalente que depende do critério de escoamento
$\sigma_y$	Tensão de escoamento
$\omega$	Frequência circular
$\omega_{0iss}$	Frequência circular natural i do SS
$\omega_{0isp}$	Frequência circular natural i do SP
$\xi$	Fator de amortecimento