



Tarcísio de Freitas Cardoso

**Visão geral sobre espectros de resposta sísmica para
sistemas secundários**

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.

Orientador: João Luis Pascal Roehl
Co-orientadora: Andréia Abreu Diniz de Almeida

Rio de Janeiro, setembro de 2008



Tarcísio de Freitas Cardoso

**Visão geral sobre espectros de resposta sísmica para
sistemas secundários**

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.

João Luis Pascal Roehl

Orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Andréia Abreu Diniz de Almeida

Co-orientadora

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Tereza Denyse Pereira de Araújo

Universidade Federal do Ceara – UFC

Rodolfo Luiz Martins Suanno

Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ

Raul Rosas e Silva

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do

Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 08 de setembro de 2008

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

Tarcísio de Freitas Cardoso

Graduou-se em Engenharia Civil, pela Universidade Federal do Rio de Janeiro em dezembro de 1980. Kursou pós-graduação em Mecânica dos Solos, na COPPE/UFRJ, pelo projeto Urânio em 1981. Ingressou na NUCLEN em março de 1982, atuando nas áreas de Análise Sísmica e de Estruturas metálicas. Atualmente trabalha na ELETRONUCLEAR, na Gerência de Análise de Tensões, atuando na área de dinâmica das estruturas.

Ficha Catalográfica

Cardoso, Tarcísio de Freitas

Visão geral sobre espectros de resposta sísmica para sistemas secundários / Tarcísio de Freitas Cardoso; orientador: João Luis Pascal Roehl; co-orientadora: Andréia Abreu Diniz de Almeida. - Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2008

v., 190 f: il.; 29,7 cm

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

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Civil - Teses. 2. Espectro de Resposta 3. Sistemas Secundários. 4. Análise Sísmica. 5. Sistemas Acoplados 6. Espectro de Resposta Uniformemente Provável I. Roehl, João Luis Pascal. II. Pontifícia Universidade Católica. Departamento de Engenharia Civil. III. Título

CDD: 624

*"PARA SER GRANDE, sê inteiro: nada
TEU exagera ou exclui.
Sê todo em cada coisa. Põe quanto és
No mínimo que fazes.
Assim em cada lago a lua toda
Brilha, porque alta vive."*

(Fernando Pessoa, como Ricardo Reis 14/2/1933)

A meu pai, Edyo Cardoso.
O exemplo permanece.

Agradecimentos

À Irene, pela presença, cumplicidade e partilha de vida, que nos fazem tão felizes.

À minha mãe, Taís, que com seu carinho, compreensão e firmeza continua me educando para a vida.

Ao prof. Roehl, pela dedicação, compreensão, transmissão de conhecimentos e principalmente pelos sábios ensinamentos de vida, mais profundos e importantes.

À ELETRONUCLEAR e à PUC-Rio, pela confiança e suporte.

Aos professores e funcionários do DEC, compreensivos, prestativos e atenciosos.

Aos colegas Marcelo, Waldo, Marcos, Regina, Andréia, Denyse e Jair, que me antecederam na pesquisa e cujo trabalho apenas complemento. Aos colegas da ETN, principalmente os mais próximos e os da GAN.T, pelo apoio e incentivo. Aos colegas da pós-graduação, pelo afeto e carinho, que fizeram as nossas atividades transcorrerem com alegria e esperança, fazendo-me sentir jovem novamente.

À Paôla e à Andréia, amigas, que foram estímulo constante e a parceria que tornou possível a realização desse trabalho.

Ao amigo Prates, incentivo permanente, pelas discussões e sugestões, e à Maria Teresa, pela revisão cuidadosa do texto.

Aos amigos e aos irmãos, pelo encorajamento e apoio imprescindível para superar os momentos difíceis, causados pelas tribulações ocorridas nos últimos anos.

Ao Tarcísio e ao Tiago, por serem a confirmação concreta do valor do empenho e atitude na tentativa de um mundo melhor.

A Quem é a origem da VIDA, que é bela de se viver.

Resumo

Cardoso, Tarcísio de Freitas. **Visão geral sobre espectros de resposta sísmica para sistemas secundários**. Rio de Janeiro, 2008. 223p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A indústria de geração elétrica de fonte nuclear baseia-se em princípios de segurança e, nos critérios de projeto, considera-se a hipótese de terremoto. Os sistemas necessários à segurança são projetados para resistir e manter a operabilidade durante e após eventos sísmicos postulados. Propõe-se um roteiro para a produção de espectros de resposta sísmica para projeto de sistemas secundários, SS, incluindo a influência do acoplamento e em base probabilística. O roteiro utiliza a ferramenta SASSI, pode ser utilizado em situações gerais de cálculo e fornece um conjunto de programas para considerar modelos tridimensionais e suas respostas para uma excitação genérica em 3 direções ortogonais; representar os efeitos de acoplamento entre o SS e o sistema principal, SP; incluir a influência dos deslocamentos relativos entre os nós de apoio do sistema secundário no sistema principal; utilizar os fatores de transposição entre espectros elásticos e inelásticos; permitir a análise probabilística e a obtenção de Espectros de Resposta Uniformemente Prováveis, acoplados ou não; incluir interfaces para a utilização de seus resultados com outros programas de utilização geral, como o MS-EXCEL. O elevado grau de automatização permite a produção de espectros de resposta com refinamentos de modelagem, alcançando uma análise mais realista, sem a necessidade de esforços adicionais aos já requeridos pela metodologia convencional. A metodologia proposta enquadra-se no encaminhamento para o contexto atual de análise sísmica de instalações nucleares, com a utilização de espectros de resposta de projeto de ameaça uniforme, específico para o sítio da instalação, e o projeto sísmico de risco consistente.

Palavras-chave

Análise Sísmica; Espectro de Resposta; Sistemas Secundários; Sistemas Secundários Acoplados; Espectro de Resposta Uniformemente Provável

Abstract

Cardoso, Tarcísio de Freitas. **Overview on secondary system seismic response spectra**. Rio de Janeiro, 2008. 223p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The electric power reactor industry is based on rigid safety principles. The design criteria include seismic scenario. All safety related systems are designed to resist and to keep the operability during and after a postulated earthquake. It is suggested a procedure for the generation of in-structure seismic response spectra for secondary system design. A probabilistic approach is used and coupling effects between primary and secondary systems are taken into account. The proposed script uses SASSI system and can be used in general situations. A set of computer programs is developed to consider three-dimensional models and their responses for a generic base excitation, acting in 3 orthogonal directions; represent the coupling effect between primary and secondary systems, include the influence, on the response spectra, of the secondary system supports relative displacements; include approximated factors for transposition of elastic into inelastic response spectra; produce Uniformly Probable Response Spectra, including or not coupling effects; consider interfaces with other general programs, as the MS-EXCEL, for pos-processing purpose. The degree of automation, allows the production of response spectra including modeling refinements, reaching a more realistic analysis, without additional efforts beyond those already required by the conventional methodology. The proposed methodology is in the way of a site specific uniform hazard design response spectra, and of a consistent-risk seismic design.

Keywords

seismic analysis; response spectrum; secondary system; coupled secondary system; uniformly probable response spectra

Sumário

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1 Introdução | 25 |
| 1.1. Aspectos Gerais | 25 |
| 1.2. Pesquisas anteriores no DEC | 28 |
| 1.3. Objetivos | 30 |
| 1.4. Organização do Texto | 31 |
| 2 Ambientação das Análises de Sistemas Secundários | 32 |
| 2.1. Tipos de Sistemas Secundários Típicos em uma PWR | 32 |
| 2.2. Considerações sobre o Espectro de Resposta e a Análise Modal Espectral | 35 |
| 2.3. Linha de Pesquisa de Respostas Sísmicas de Sistemas Secundários | 37 |
| 3 Representação do Sistema Principal com o Programa Sassi | 42 |
| 3.1. Análise no domínio da frequência | 42 |
| 3.2. O programa SASSI | 44 |
| 3.3. Sistemas Principais em estudo | 50 |
| 4 Excitações e Respostas nos Sistemas Secundários | 73 |
| 4.1. Excitações de projeto | 73 |
| 4.2. Respostas nos sistemas secundários | 79 |
| 5 Roteiro de Cálculo | 98 |
| 5.1. Requisitos iniciais | 98 |
| 5.2. Roteiro para obtenção de Espectros de Resposta de Projeto de Sistemas Secundários | 99 |
| 5.3. Roteiro para Sistemas Secundários Específicos | 106 |
| 6 Exemplos de Utilização do Roteiro | 107 |
| 6.1. Aspectos gerais | 107 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.2. Comparação dos ER obtidos através do roteiro proposto e da forma convencional | 108 |
| 6.3. Resultados finais nos SS obtidos com a utilização dos ER, ERUP e ERAUP | 130 |
| 6.4. Comentários sobre os resultados comparados | 141 |
| 7 Conclusões, comentários e sugestões | 142 |
| 7.1. Conclusões | 142 |
| 7.2. Comentários | 144 |
| 7.3. Sugestões | 146 |
| 8 Referências | 149 |
| ANEXO 1: Características dinâmicas do modelo utilizado para representar a | |
| RIS – modelo A1ERE | 153 |
| A1.1. Rigidez global da fundação – modelo A1ERE | 153 |
| A1.2. Verificações da resposta sísmica do modelo – modelo A1ERE | 161 |
| ANEXO 2: Manual do programa SomaMOT | 172 |
| A2.1. Introdução | 172 |
| A2.2. Dados de Entrada | 173 |
| A2.3. Arquivos de entrada e saída | 174 |
| A2.4. Lista das rotinas | 175 |
| A2.5. Fluxograma simplificado | 176 |
| ANEXO 3: Manual de utilização do programa GFiBase | 179 |
| A3.1. Introdução | 179 |
| A3.2. Dados de Entrada | 180 |
| A3.3. Arquivos de entrada e saída | 183 |
| A3.4. Lista dos arquivos e das rotinas | 184 |
| A3.5. Fluxograma simplificado | 185 |
| ANEXO 4: Manual do programa ExConf | 187 |
| A4.1. Introdução | 187 |

| | |
|------------------------------------------------------|---------|
| A4.2. Descrição do programa | 187 |
| A4.3. Dados de Entrada | 188 |
| A4.4. Arquivos de entrada e saída | 193 |
| A4.5. Lista dos arquivos e das rotinas | 194 |
| A4.6. Fluxograma simplificado | 198 |
| ANEXO 5: Manual do programa <i>ExeSASS/</i> | 202 |
| A5.1. Introdução | 202 |
| A5.2. Descrição do Programa | 203 |
| A5.3. Arquivos de entrada e saída | 206 |
| A5.4. Lista das rotinas | 210 |
| ANEXO 6: Manual para utilização do módulo ACOPLA | 211 |
| A6.1. Introdução | 211 |
| A6.2. Descrição do programa | 212 |
| A6.3. Dados de Entrada | 214 |
| A6.4. Lista das rotinas | 217 |
| A6.5. Fluxograma simplificado | 219 |
| ANEXO 7: Glossário | 221 |

Lista de figuras

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1.1 - Visão esquemática das barreiras de proteção de uma Usina PWR (fonte: ETN) | 26 |
| Figura 2.1 - Visão esquemática funcionamento de uma Usina PWR (fonte: ETN) | 32 |
| Figura 3.1 Modelo de subestruturação do volume flexível. (a)Sistemas Total (b)Sítio original, com indicação dos nós da fundação (c)Estrutura, com indicação dos nós da estrutura e de interação. (Fonte: manual teórico do SASSI2000) | 45 |
| Figura 3.2 - Vista esquemática do modelo A3Reator – (fonte: SAMPAIO 1999) | 51 |
| Figura 3.3 - Vista esquemática dos elementos da laje de fundo – modelo A3Reator (fonte: SAMPAIO 1999) | 52 |
| Figura 3.4 - FT para os nós 177/178 – excitação horizontal – modelo A3Reator | 53 |
| Figura 3.5 - FT para os nós 177/178 – excitação vertical – modelo A3Reator | 53 |
| Figura 3.6 - Vista esquemática do prédio do reator - ERE | 55 |
| Figura 3.7 - Esquema em corte das estruturas dos prédio do reator e de segurança | 56 |
| Figura 3.8 - Esquema do modelo dos prédios do reator e de segurança | 58 |
| Figura 3.9 - Esquema do modelo da fundação | 61 |
| Figura 3.10 - FT de acelerações – ERE – SB – excitação em X1 – onda SV | 63 |
| Figura 3.11 - FT de acelerações – ERE – SC – excitação em X1 – onda SV | 63 |
| Figura 3.12 - FT de acelerações – ERE – RIS topo – excitação em X1 – onda SV | 64 |
| Figura 3.13 - FT de acelerações – ERE – RIS +6.95m – excitação em X1 – onda SV | 64 |
| Figura 3.14 - FT de acelerações – ERE – base – excitação em X1 – onda SV | 65 |
| Figura 3.15 - FT de acelerações – ESG – excitação em X1 – onda SV | 65 |
| Figura 3.16 - FT de acelerações – ERE – SB – excitação em X2 – onda SH | 66 |
| Figura 3.17 - FT de acelerações – ERE – SC – excitação em X2 – onda SH | 67 |
| Figura 3.18 - FT de acelerações – ERE – RIS topo – excitação em X2 – onda SH | |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| | 67 |
| Figura 3.19 - FT de acelerações – ERE – RIS +6.95m – excitação em X2 – onda SH | 68 |
| Figura 3.20 - FT de acelerações – ERE – base – excitação em X2 – onda SH | 68 |
| Figura 3.21 - FT de acelerações – ESG – base – excitação em X2 – onda SH | 69 |
| Figura 3.22 - FT de acelerações – ERE – SB – excitação em X3 – onda P | 70 |
| Figura 3.23 - FT de acelerações – ERE – SC – excitação em X3 – onda P | 70 |
| Figura 3.24 - FT de acelerações – ERE – RIS topo – excitação em X3 – onda P | 71 |
| Figura 3.25 - FT de acelerações – ERE – RIS +6.95m – excitação em X3 – onda P | 71 |
| Figura 3.26 - FT de acelerações – ERE – base – excitação em X3 – onda P | 72 |
| Figura 3.27 - FT de acelerações – ESG – base – excitação em X3 – onda P | 72 |
| Figura 4.1 - Espectro de Resposta de Projeto – ERP – amortecimento 7% | 74 |
| Figura 4.2 – Função Densidade de Espectro de Potência de Projeto – FDEPP | 75 |
| Figura 4.3 - THD7N7 – excitação na base atuando na direção X | 77 |
| Figura 4.4 - THD7N47 – excitação na base atuando na direção Y | 77 |
| Figura 4.5 - THD7N17 – excitação na base atuando na direção Z | 77 |
| Figura 4.6 - THD7N7 – Amplitude dos Coeficientes de Fourier – direção X | 78 |
| Figura 4.7 - THD7N47 – Amplitude dos Coeficientes de Fourier – direção Y | 78 |
| Figura 4.8 - THD7N17 – Amplitude dos Coeficientes de Fourier – direção Z | 78 |
| Figura 4.9 – A3Reator – Nó 178 (elev. +29,15m; R=39m) FT resultante para a direção vertical Z | 85 |
| Figura 4.10 - A3Reator – Nó 178 (elev. +29,15m; R=39m) ERZ – soma resultante para a direção vertical Z ERZ – mcX – para excitação em X – THD7N7 ERZ – mcZ – para excitação em Z – THD47N7 | 85 |
| Figura 4.11 - Esquema de transferência do movimento de controle no PC para um ponto no interior da estrutura: SASSI e SomaMOT | 88 |
| Figura 4.12 - SS representado por um S1GL apoiado no ponto s da estrutura | 89 |
| Figura 4.13 - comparação típica entre o ER e ERUP – excitação horizontal em X A3Reator – nó 178 (elev.+29,15m R=39m) – $\xi=3\%$; $p=84\%$ | 90 |
| Figura 4.14 – A3Reator – ER (nó 178 elev.+29,15m R=39m) ERAUP (SA6 - 27,5t) e (SA7 -13,8t) $\xi=3\%$; $p=84\%$ | 94 |
| Figura 4.15 – A3Reator – ER (nó 176 elev +16,65m) e ERAUP (SA4 - 27,5t) e | |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| (SA5 -13,8t) $\xi=3\%$; $p=84\%$ | 95 |
| Figura 4.16 – ER e ERNL – A3Reator, nó 176 elev.+16,65m – $\xi=3\%$ para SS específico com Fator de escoamento $C=0,4$ e amortecimento SS 7% | 97 |
| Figura 5.1 –Roteiro de cálculo e obtenção de ER, ERUP e ERAUP | 100 |
| Figura 6.1 - Vista esquemática de um circuito primário de 2 “loops” de uma usina tipo PWR (fonte: ETN) | 109 |
| Figura 6.2 - Vista esquemática do modelo da RIS para a obtenção dos espectros de resposta nos pontos de apoio do RPV, RCP e SG | 110 |
| Figura 6.3 - A1ERE - RPV – elev. +6,95m – nó 116 Comparação entre Espectros de Resposta, ER – $\xi = 4\%$ – obtidos deterministicamente SASSI2000 x STRUDYN | 112 |
| Figura 6.4 - A1ERE - RPV – elev. +6,95m – nó 116 – direção horizontal X Comparação entre os Espectros de Resposta: ER; ERUP; ERAUP – $\xi = 4\%$; $p=84\%$ | 113 |
| Figura 6.5 - A1ERE - RPV – elev. +6,95m – nó 116 – direção horizontal Y Comparação entre os Espectros de Resposta: ER; ERUP; ERAUP – $\xi = 4\%$; $p=84\%$ | 113 |
| Figura 6.6- A1ERE - RPV – elev. +6,95m – nó 116 – direção vertical Z Comparação entre os Espectros de Resposta: ER; ERUP; ERAUP – $\xi = 4\%$; $p=84\%$ | 114 |
| Figura 6.7 - Vista esquemática da RCP em um circuito primário de uma usina PWR (fonte: ETN) | 116 |
| Figura 6.8 - A1ERE - RCP – elev. +3,70m/+6,95m – nós 127/135 Comparação entre Espectros de Resposta, ER, $\xi = 4\%$ - obtidos deterministicamente SASSI2000 x STRUDYN | 118 |
| Figura 6.9 - A1ERE - RCP – elev. +8,26m – nó 135– direção horizontal X Comparação entre os Espectros de Resposta: ER; ERUP; ERAUP – $\xi = 4\%$; $p=84\%$ | 119 |
| Figura 6.10 – A1ERE - RCP – elev. +8,26m – nó 135– direção horizontal Y Comparação entre os Espectros de Resposta: ER; ERUP; ERAUP – $D=4\%$; $p=84\%$ | 119 |
| Figura 6.11 - A1ERE - RCP – elev. +3,70m – nó 127 – direção vertical Z | |

Comparação entre os Espectros de Resposta: ER; ERUP; ERAUP – $\xi = 4\%$
; $p=84\%$ 120

Figura 6.12 - Vista esquemática da suportação típica do SG de um circuito primário de uma usina do tipo PWR (fonte: ETN) 121

Figura 6.13 - A1ERE - SG – elev. +3,70m/+9,57m – nós 129/136 Comparação entre Espectros de Resposta, ER, $\xi = 4\%$, obtidos deterministicamente SASSI2000 x STRUDYN 123

Figura 6.14 - A1ERE - SG – elev. +3,70m/+15,5m – nós 129/138 Comparação entre Espectros de Resposta, ER, $\xi = 4\%$, obtidos deterministicamente SASSI2000 x STRUDYN 123

Figura 6.15 - A1ERE - SG – elev. +9,5m/+17,5m – nós 136/138 – direção X Comparação entre os tipos de resposta acoplada: ERUP; ERAUP – $\xi = 4\%$; $p=84\%$ 125

Figura 6.16- A1ERE - SG – elev. +9,5m/+17,5m – nós 136/138 – direção Y Comparação entre os tipos de resposta acoplada: ERUP $\xi = 4\%$; $p=84\%$ 125

Figura 6.17- A1ERE - SG – elev. +3,7m – n  129 – direção Z Comparação entre os tipos de resposta acoplada: ERUP; $\xi = 4\%$; $p=84\%$ 126

Figura 6.18 - A1ERE - SG – elev.+9,5/+17,5m apoio nos nós 136/138– direção horizontal X Comparação entre os Espectros de Resposta: ER; ERUP; ERAUP - $\xi = 4\%$; $p=84\%$ 127

Figura 6.19 - A1ERE - SG – elev.+9,5/+17,5m apoio nos nós 136/138– direção horizontal Y Comparação entre os Espectros de Resposta: ER; ERUP; ERAUP - $\xi = 4\%$; $p=84\%$ 128

Figura 6.20 - A1ERE - SG – elev.+3,70m - apoio no nó 129– direção horizontal Z Comparação entre os Espectros de Resposta: ER; ERUP; ERAUP - $\xi = 4\%$; $p=84\%$ 128

Figura 6.20 - Vista esquemática de um modelo de circuito primário de refrigeração do reator com 2 “loops” de uma usina do tipo PWR 131

Figura 6.21 - Vista esquemática de um modelo para análise do SS acoplado ao SP (Fonte ETN) 139

Figura A1.1 – FT de deslocamentos para carga $F_X=1$ – variação na direção X 156

Figura A1.2 – FT de deslocamentos para carga $F_X=1$ – variação na direção Y 156

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura A1.3 – FT de deslocamentos para carga $FY=1$ – variação na direção X | 157 |
| Figura A1.4 – FT de deslocamentos para carga $FY=1$ – variação na direção Y | 157 |
| Figura A1.5 – FT de deslocamentos para carga $FZ=1$ – variação na direção X | 158 |
| Figura A1.6 – FT de deslocamentos para carga $FZ=1$ – variação na direção Y | 158 |
| Figura A1.7 – Variação do amortecimento e da rigidez global da fundação com a frequência - translação | 159 |
| Figura A1.8 – Variação do amortecimento e da rigidez global da fundação com a frequência - rotação | 160 |
| Figura A1.9 – FT de acelerações – base ERE – excitação em X1 – onda SV | 163 |
| Figura A1.10 – FT de acelerações – base ESG – excitação em X1 – onda SV | 163 |
| Figura A1.11 – FT de acelerações – base ERE – excitação em X2 – onda SH | 164 |
| Figura A1.12 – FT de acelerações – base ESG – excitação em X2 – onda SH | 164 |
| Figura A1.13 – FT de acelerações – base ERE – excitação em X3 – onda P | 165 |
| Figura A1.14 – FT de acelerações – base ESG – excitação em X3 – onda P | 165 |
| Figura A1.15 – FT acel. – bases ESG (nó 100) e ERE (nó 103)– excitação em X1 – onda SV | 166 |
| Figura A1.16 – FT acel. – bases ESG (nó 100) e ERE (nó 103)– excitação em X2 – onda SH | 166 |
| Figura A1.17 – FT acel. – bases ESG (nó 100) e ERE (nó 103)– excitação em X3 – onda P | 167 |
| Figura A1.18 – FT acel. – centro ERE e borda da fundação – excitação em X1 – onda SV | 167 |
| Figura A1.19 – FT acel. – centro ERE e borda da fundação – excitação em X2 – onda SH | 168 |
| Figura A1.20 – FT acel. – centro ERE e borda da fundação – excitação em X3 – onda P | 168 |
| Figura A1.21 – FT acel. – pontos alinhados em X1 – excitação em X1 – onda SV | 169 |
| Figura A1.22 – FT acel. – pontos alinhados em X2 – excitação em X1 – onda SV | 169 |
| Figura A1.23 – FT acel. – pontos alinhados em X1 – excitação em X2 – onda SH | 170 |
| Figura A1.24 – FT acel. – pontos alinhados em X2 – excitação em X2 – onda SH | |

Figura A1.25 – FT acel. – pontos alinhados em X1 – excitação em X3 – onda P

Figura A1.26 – FT acel. – pontos alinhados em X2 – excitação em X3 – onda P

Lista de tabelas

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 3.1 - Propriedades dos materiais usados nas análises | 57 |
| Tabela 3.2 - Correlação dos nós com as massas concentradas do modelo | 59 |
| Tabela 3.3 - Frequências naturais com a estrutura fixa na base [Hz] | 60 |
| Tabela 4.1 - Limites recomendados para escolha de análise acoplada | 91 |
| Tabela 6.1 - Coeficientes de rigidez global da fundação | 108 |
| Tabela 6.2 - Frequências naturais [Hz] e pesos modais do RPV, desacoplado do SP | 111 |
| Tabela 6.3 - Frequências naturais de vibração [Hz] e pesos modais das RCP, consideradas desacopladas do SP | 116 |
| Tabela 6.4 - Frequências naturais de vibração [Hz] e pesos modais dos SG, considerados desacoplados do SP | 122 |
| Tabela 6.5 - Descrição dos casos de comparação | 130 |
| Tabela 6.6 - D47 ER STRUDYN x D49 ER SASSI - comparação de acelerações [g] | 133 |
| Tabela 6.7 - D47 ER STRUDYN x D49 ER SASSI - comparação de deslocamentos [cm] | 133 |
| Tabela 6.8 - D47 ER STRUDYN x D49 ER SASSI - comparação de forças nos suportes dos SGs – [kN] | 133 |
| Tabela 6.9 - D49 ER SASSI x D50 ERUP SASSI x A51 ERAUP comparação de acelerações | 134 |
| Tabela 6.10 - D49 ER SASSI x D50 ERUP SASSI x A51 ERAUP comparação de deslocamentos | 135 |
| Tabela 6.11 - D49 ER SASSI x D50 ERUP SASSI x A51 ERAUP comparação de forças nos suportes dos SG – [kN] | 135 |
| Tabela 6.12 - ERAUP Tipos 1, 2, 3 e 4 - comparação de acelerações [g] | 137 |
| Tabela 6.13 - ERAUP Tipos 1, 2, 3 e 4 - comparação de deslocamentos [cm] | 137 |
| Tabela 6.14 - ERAUP Tipos 1, 2, 3 e 4 - comparação de forças nos suportes do SG Forças Normais - [kN] | 137 |
| Tabela 6.15 - Resultados em aceleração obtidos por diferentes métodos - [g] | 139 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 6.16 - Resultados em deslocamento obtidos por diferentes métodos - [cm] | 140 |
| Tabela A1.1 - Pontos utilizados para comparação das FT de deslocamentos | 154 |
| Tabela A1.2 - Coeficientes de rigidez global da fundação | 159 |
| Tabela A.5.1 - Nomenclatura dos arquivos *.inp. | 207 |
| Tabela A5.2 - Nomenclatura dos arquivos *.out gerados | 208 |
| Tabela A5.3 - Nomenclatura dos arquivos *.tap gerados. | 209 |

Lista de símbolos

Romanos:

| | |
|--------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| a, a, a_i | coeficientes constantes |
| A, B | constantes |
| C | matriz de rigidez global, complexa |
| \tilde{C} | matriz de amortecimentos |
| d_{\max} | maior distância entre nós de interação |
| E | módulo de elasticidade |
| $E(t)$ | energia total de um sistema oscilatório |
| f_{\max} | maior frequência de interesse |
| $f(t)$ | força, no domínio do tempo |
| $F(\omega)$ | força, no domínio da frequência |
| $F_s(\omega)$ | espectro de Fourier de uma função temporal $\ddot{u}_s(t)$ |
| $H(\omega)$ | função de transferência |
| $\overline{H}_X(\omega)$ | função de transferência combinada, para a direção X, das excitações aplicadas às direções X, Y e Z |
| $k_{n,j}(\omega_{0i})$ | parcela da rigidez de acoplamento, referente ao nó n , para a frequência ω_{0i} |
| $ksp_{n,j}(\omega_{0i})$ | rigidez local do sistema principal, referente ao nó n , para a frequência ω_{0i} |
| K | matriz de rigidez complexa |
| $K(\omega_{0i})$ | rigidez global de acoplamento, para a frequência ω_{0i} |
| \tilde{K} | matriz de rigidez, complexa |
| $L_T(t^*)$ | probabilidade de nenhuma ultrapassagem pela barreira durante o intervalo de tempo $[0, t^*)$ |
| m | massa |

| | |
|------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| M | matriz de massas, complexa |
| \tilde{M} | matriz de massas |
| P | probabilidade de não ultrapassagem de uma barreira |
| r, r_i | coeficientes constantes |
| $Sa(\xi, \omega)$ | espectro de pseudo-acelerações |
| $Sv(\xi, \omega)$ | espectro de pseudo-velocidades |
| $Sd(\xi, \omega)$ | espectro de deslocamentos |
| t, t_i | tempo |
| $T(t)$ | energia cinética de um sistema oscilatório |
| u, \dot{u}, \ddot{u} | deslocamento, velocidade e aceleração, no domínio do tempo |
| \ddot{u}_b | aceleração na base |
| $u_s, \dot{u}_s, \ddot{u}_s$ | deslocamento, velocidade e aceleração, em um ponto na estrutura |
| U | vetor de deslocamentos, no domínio da frequência |
| U'_f | vetor de deslocamento de campo livre, no domínio da frequência |
| \ddot{U}_s | vetor de acelerações, no domínio da frequência |
| v | velocidade de propagação de onda |
| $V(t)$ | energia potencial de um sistema oscilatório |
| X_{ff} | matriz de impedância, no domínio da frequência |
| Z | probabilidade do processo se iniciar abaixo do valor da barreira |
| $Z(\omega)$ | impedância |

Gregos:

| | |
|---------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| α | razão de decréscimo da probabilidade de primeira ultrapassagem |
| β | razão entre frequências |
| $\Delta\omega$ | intervalo de frequências |
| ξ | amortecimento |
| λ_i | momento espectral de i-ésima ordem |
| ς | deslocamento |
| γ | peso específico |
| τ | intervalo de tempo |
| ν | coeficiente de Poisson |
| ω | frequência |
| ω_0 | frequência natural |
| ω_D | frequência natural do sistema amortecido |
| Φ | modo de vibração, deslocamentos |
| $\Phi_{u_s}(\omega)$ | Função Densidade de Espectro de Potência para a função $\ddot{u}_s(t)$ |
| $\eta, \dot{\eta}, \ddot{\eta}$ | deslocamento, velocidade e aceleração de um oscilador de 2GL |

Lista de abreviaturas

| | |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------|
| A1ERE | nome de modelo de edifício do reator utilizado como exemplo |
| A3Reator | nome de modelo de edifício do reator utilizado como exemplo |
| C | Fator de escoamento |
| CQC | Combinação quadrática dos modos |
| D | Amortecimento |
| ER | Espectro de resposta no interior da estrutura |
| ERAUP | Espectro de resposta acoplada uniformemente provável |
| ERE | edifício do reator |
| ERNL | Espectro de resposta não linear |
| ERP | Espectro de Resposta de Projeto |
| ERUP | Espectro de resposta uniformemente provável |
| ESG | edifício de segurança |
| ETN | Eletronuclear |
| FDEP | Função densidade de espectro de potência |
| FDEPP | Função densidade de espectro de potência de projeto |
| FT | Função de transferência |
| FTD | Função de transferência de deslocamentos |
| GL | Grau de liberdade |
| IMR | Rotinas para consideração da influência dos modos rígidos |
| L | onda de superfície, do tipo de Love |
| MPRS | "Multi Point Response Spectra" - análise modal espectral com excitação múltipla |
| OBE | "Operating Basis Earthquake" - Terremoto de operação de projeto |
| p | probabilidade de não ultrapassagem |
| P | onda de corpo de compressão, do tipo P |
| PWR | "Pressurized Water Reactor" - Reator a água pressurizada |
| R | onda de superfície, do tipo de Rayleigh |

| | |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| RCL | "Reactor Coolant Loop" - Circuito primário de refrigeração do reator |
| RCP | "Reactor Coolant Loop" - Bomba principal do circuito primário de refrigeração do reator |
| RIS | "Reactor Internal Structure" - Estrutura interna do edifício do reator |
| RPV | "Reactor Pressure Vessel" - Vaso de pressão para o núcleo do reator |
| S1GL | Sistema com um grau de liberdade |
| S2GL | Sistema com dois graus de liberdade |
| SASSI | "System for Analysis of Soil-Structure Interaction" - Sistema de programas para análise de interação solo-estrutura |
| SB | "Shield Building" - Estrutura de proteção externa |
| SC | "Steel Containment" - Estrutura de aço de contenção |
| SG | "Steam Generator" - Gerador de Vapor |
| SH | componente horizontal da onda de corpo de cisalhamento, do tipo S |
| SP | Sistema principal |
| SS | Sistema secundário |
| SSE | "Safe Shutdown Earthquake" - Terremoto de desligamento seguro |
| SSS | Sistema secundário simplificado |
| SV | componente vertical da onda de corpo de cisalhamento, do tipo S |
| SVGL | Sistema com vários graus de liberdade |
| TF | Transformada de Fourier |
| UHRS | "Uniform Hazard Response Spectra" - Espectro de resposta de projeto uniformemente provável |
| URRS | "Uniform Risk Response Spectra" - Espectro de resposta de projeto de risco uniforme |
| v_p | velocidade de propagação da onda P |
| v_s | velocidade de propagação da onda S |
| X1, X2, X3 | Direções ortogonais do sistema global de eixo X, Y e Z |

Lista de programas

| | |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| SASSI | Sistema de programas para análise de interação solo-estrutura |
| SITE | Módulo do SASSI para análise do movimento de campo livre |
| POINT | Módulo do SASSI para calcular matriz de impedância |
| MOTOR | Módulo do SASSI para análise de forças harmônicas aplicadas |
| HOUSE | Módulo do SASSI para gerar modelo de elementos finitos |
| ANALYS | Módulo do SASSI para solução da equação do movimento |
| COMBIN | Módulo do SASSI para combinação de FT |
| MOTION | Módulo do SASSI para obtenção das respostas dinâmicas a uma excitação |
| ExeSASSI | Gerenciador para execução dos módulos do SASSI - linguagem visual Basic VB6 |
| SomaMOT | programa em FORTRAN para somar resultados do MOTION |
| ACOPLA | Módulo do ExeSASSI para possibilitar análises acopladas |
| GFiBase | programa em C++ para gerar FDEP nas posições escolhidas |
| ExConf | programa em C++ para fazer análise probabilística |
| ACS-SASSI | versão comercial do SASSI, pela firma Advanced Computed Softwares |
| SHAKE | programa para análise iterativa de campo-livre |
| STRUDYN | programa para análise análise estrutural dinâmica e estática |
| DYNRES | módulo do STRUDYN para gerar espectros de resposta |
| ANSYS | programa geral para análise de tensões, lineares e não lineares |
| PosExeSassi | modelo de planilha de cálculo, MS-EXCEL, para pós-processamento do ExeSASSI |
| PlotaFT | macro da planilha PosExeSASSI.xlt, em VB, para plotar FT |
| PloaEsp | macro da planilha PosExeSASSI.xlt, em VB, para plotar espectros e FDEP |