

Marcos Pozzato Figueiredo

**Avaliação estatística de metodologia para
determinação de espectros de resposta de projeto
uniformemente prováveis**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Rio de Janeiro, Fevereiro de 2004



Marcos Pozzato Figueiredo

**Avaliação estatística de metodologia para determinação de
espectros de resposta de projeto uniformemente prováveis**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Civil da PUC-Rio como requisito parcial para
obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: João Luis Pascal Roehl

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2004



Marcos Pozzato Figueiredo

**Avaliação estatística de metodologia
para determinação de espectros de resposta
de projeto uniformemente prováveis**

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

Prof. João Luis P. Roehl

Presidente / Orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Sergio Hampshire de C. Santos

DME/UFRJ

Prof. Paulo Batista Gonçalves

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Dra. Andréia Abreu Diniz de Almeida

Pesquisador CNPq

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial

do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 10 de Fevereiro de 2004

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

Marcos Pozzato Figueiredo

Graduou-se em Engenharia Civil (Ênfase em Estruturas) na Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) em 2001. Atuou como Engenheiro Civil no Instituto Brasileiro da Qualidade Nuclear (IBQN). Atua como Engenheiro Civil nas Centrais Elétricas Brasileiras (ELETROBRAS).

Ficha Catalográfica

Figueiredo, Marcos Pozzato

Avaliação estatística de metodologia para determinação de espectros de resposta de projeto uniformemente prováveis / Marcos Pozzato Figueiredo ; orientador: João Luis Pascal Roehl. – Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Engenharia Civil, 2004.

125 f. : il. ; 30 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 sísmica. 3. Análise espectral. 4. Cargas sísmicas. I. Roehl, João Luis Pascal. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD: 624

Aos meus filhos: João Pedro e Maria Fernanda.

Agradecimentos

À Deus.

À Graciele, que me estimulou a nunca desistir dos meus sonhos.

Ao meu orientador João Luis Pascal Roehl pela dedicação e apoio nas horas mais difíceis deste trabalho e do meu curso de mestrado.

À PUC-Rio pelo auxílio concedido, sem o qual este trabalho não poderia ser realizado.

Ao apoio dado pelos amigos e colegas da Eletrobrás, Eletronuclear e IBQN.

Aos meus pais Angela e Fernando, por me ensinarem o que nunca aprenderia em curso algum.

Ao meu irmão Dudu pelo apoio.

Ao professor Rodolfo Suanno.

A todos os professores que contribuíram para minha vida e formação acadêmica, dedicando as suas, apesar dos infortúnios da profissão.

A todas às pessoas que não admitem conviver com injustiças e continuam lutando por um mundo mais justo para todos.

A todos os meus amigos. Principalmente ao Fabiano e Bernardo, pelo apoio na minha graduação.

Aos colegas da PUC-Rio e da UERJ.

Resumo

Figueiredo, Marcos Pozzato; Roehl, João Luis Pascal. **Avaliação estatística de metodologia para determinação de espectros de resposta de projeto uniformemente prováveis**. Rio de Janeiro, 2004. 125p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Apresenta-se uma avaliação numérica estatística de metodologia para obtenção de espectros de resposta uniformemente prováveis, ERUP, Diniz [2], fundamentada na determinação da distribuição de probabilidade dos valores extremos da resposta de um sistema com um grau de liberdade, submetido a movimentos de terreno oriundos de terremotos. Tais movimentos são caracterizados por funções de densidade de espectro de potência, cada uma das quais representando uma família de sismos.

Para tal, utiliza-se uma função densidade de espectro de potência, FDEP, como base à avaliação. A partir da FDEP, são gerados acelerogramas artificiais utilizando o programa SISMOSINV, desenvolvido internamente ao trabalho. Empregam-se estes acelerogramas para obterem-se espectros de resposta, utilizando o programa SAP2000. Os ERUP são então calculados, utilizando as distribuições de probabilidade acumulada dos valores espectrais obtidas por técnicas adequadas de estatística, implementadas especialmente para o caso. Efetua-se a comparação entre os ERUP obtidos estatisticamente e os produzidos pela metodologia probabilística e são formuladas conclusões e recomendações sobre os limites de emprego desta última.

Comparam-se, ainda, os ERUP obtidos pelo procedimento estatístico com o espectro de resposta de projeto recomendado pela USNRC [13] para avaliar o compromisso entre estes espectro e a FDEPo da USNRC [1].

Palavras-chave

Espectro de Resposta Sísmica; Análise Espectral; Cargas Sísmicas.

Abstract

Figueiredo, Marcos Pozzato; Roehl, João Luis Pascal (Advisor). **Statistic evaluation of the methodology for determination of uniformly probable response spectra.** Rio de Janeiro, 2004. 125p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Civil, Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

One presents a statistic evaluation of Diniz methodology [2], to obtain uniformly probable response spectra, UPRS, based on the determination of the probability distribution of the response extreme values of a single-degree of freedom structure, under a ground movement caused by an earthquake. Such movements are characterized by power spectrum density functions, each one of them representing a family of seismic events.

On this way, one considers a power spectral density function, PSD, as a basis for the evaluation. Using the PSD, one generates artificial ground acceleration functions with the program SISMOSINV, developed within this work. From these artificial ground acceleration functions one obtains the response spectra with the SAP2000 program. Then, the UPRS are calculated, using the spectral value distributions, by adequate statistical techniques, implemented for the case. One then compares the UPRS obtained statistically with those obtained by the probabilistic methodology and conclusions and recommendations are formulated concerning the applicability limits of this methodology

One still compares the statistically obtained UPRS with the design response spectrum prescribed by the USNRC [13] to evaluate the compromise between this spectrum and the target power spectral density function, TPSD, prescribed by the USNRC [1].

Keywords

Seismic Response Spectrum; Spectral Analysis; Seismic Loads.

Sumário

1 Introdução	17
1.1. Situação Geral	18
1.2. Situação Particular	20
1.3. Objetivo	22
2 Estratégia de Trabalho	23
3 Fundamentação Teórica	25
3.1. Espectros de Resposta	25
3.2. Análise modal espectral	27
3.3. Densidade de Espectro de Potência	28
3.4. Sismos Artificiais	31
3.4.1. Geração de sismos artificiais	31
3.4.1.1. Método da Superposição de Oscilações	32
3.4.1.2. Função intensidade	33
3.4.1.3. Correção da Linha Base.	35
3.5. Embasamento Estatístico	36
3.5.1. Variáveis aleatórias discretas	36
3.5.2. Média amostral	36
3.5.3. Variância	37
3.5.4. Desvio Padrão	37
3.5.5. Função de Distribuição de Probabilidade Acumulada	37
3.6. Espectro de Resposta Uniformemente Provável (ERUP)	38
4 Desenvolvimento	40
4.1. Função densidade de espectro de potência (FDEP) de entrada	40
4.2. Geração da família de sismos artificiais	40

4.2.1. Programa para geração de sismos artificiais - SISMOSINV.	41
4.2.1.1. Organização do programa	41
4.2.2. Família de sismos artificiais gerada	46
4.2.3. Exemplo de sismos gerados	46
4.3. Geração dos Espectros de Resposta	49
4.3.1. Exemplos de espectros de resposta gerados	55
4.3.2. Envoltória de Espectros de Resposta	56
4.4. Determinação dos Espectros de Resposta Uniformemente Prováveis	57
4.4.1. Determinação da distribuição de probabilidade da PSV para as frequências de referência	58
4.4.1.1. Programa para determinação da distribuição de probabilidades acumuladas - PROB.	58
4.4.1.2. Distribuição de probabilidades de PSV obtidas para as frequências de referência	60
4.4.2. Espectro de Resposta Uniformemente Provável - 50% (ERUP-50%)	62
4.4.3. Espectro de Resposta Uniformemente Provável - 84% (ERUP-84%)	63
4.5. ERUP* gerados com base probabilística pelo procedimento de Diniz [2]	64
4.5.1. Espectro de Resposta Uniformemente Provável - 50% (ERUP*-50%)	64
4.5.2. Espectro de Resposta Uniformemente Provável - 84% (ERUP*-84%)	65
4.6. Comparação e análise dos resultados	66
5 Verificação do compromisso probabilístico entre as funções básicas, ERP e FDEPo, prescritas pela USNRC.	71
5.1. Par de funções ERP e FDEPo.	71
5.2. Comparação entre ERUP oriundos da FDEPo e o ERP prescrito	

pela USNRC	73
5.3. Avaliação do critério, recomendado pela USNRC, para atribuição de nível e distribuição de potência ao sismo de projeto	74
5.3.1. Comparação do ERUP - 50% e do ERUP – 84%, para 0,8 e 1,3FDEPo, com o ERP prescrito pela USNRC	75
5.3.2. Comparação da Envoltória Mínima dos Espectros de Resposta obtidos estatisticamente, para 0,8 e 1,3FDEPo, com o ERP prescrito pela USNRC	78
5.3.3. Comparação da Envoltória Máxima dos Espectros de Resposta obtidos estatisticamente, para 0,8 e 1,3FDEPo, com o ERP prescrito pela USNRC	79
5.4. Conclusão	80
6 Conclusões e Recomendações	81
7 Referências Bibliográficas	82
Apêndice I Procedimentos para correção da linha base.	83
Apêndice II Programa para geração de sismos artificiais - SISMOSINV	88
All.1 Dados de entrada	88
All. 2. Processamento	89
All. 2. 1 Rotina principal (Sismos)	89
All. 2. 2 Subrotina TRF	100
All. 3. Arquivos de saída.	101
All. 3. 1. Arquivo <i>sismo-fdepf.out</i>	101
All. 3. 2. Arquivo <i>sismo-fdepw.out</i>	101
All. 3. 3. Arquivo <i>sismo-linbase.out</i>	101
All. 3. 4. Arquivo <i>sismo-acel.out</i>	102
All. 3. 5. Arquivo <i>sismo-norm.out</i>	102
All. 3. 6. Arquivo <i>sismo-integra.out</i>	Erro! Indicador não definido.

All. 3. 7. Arquivo <i>sismo-fdeptrf.out</i>	102
All. 3. 8. Arquivo <i>sismo-SAP.out</i>	103
All. 4. Exemplo de utilização do programa	103
All. 4. 1. Arquivo de entrada (<i>sismo.inp</i>)	103
All. 4. 2. Arquivos de saída	103
All. 4. 2. 1. Arquivo <i>sismo-fdepf.out</i> .	103
All. 4. 2. 2. Arquivo <i>sismo-fdepw.out</i> .	104
All. 4. 2. 3. Arquivo <i>sismo-linbase.out</i> .	105
All. 4. 2. 4. Arquivo <i>sismo-acel.out</i> .	105
All. 4. 2. 5. Arquivo <i>sismo-norm.out</i> .	106
All. 4. 2. 6. Arquivo <i>sismo-integra.out</i> .	106
All. 4. 2. 6. Arquivo <i>sismo-fdeptrf.out</i> .	107
All. 4. 2. 7. Arquivo <i>sismo-SAP.out</i> .	109
All. 5. Testes realizados para verificação do programa.	110
All. 5. 1. Correção da linha de base	110
All. 5. 2. Relação entre FDEP original e FDEP gerada utilizando TRF e TDF.	112
All. 5. 2. 1. FDEP obtido a partir de acelerograma com duração de 10 segundos.	113
All. 5. 2. 2. FDEP obtido a partir de acelerograma com duração de 15 segundos.	114
All. 5. 2. 3. Limitações da TRF	115
All. 6. Referências Bibliográficas	115
Apêndice III. Programa PROB.	116
AIII. 1. Dados de Entrada.	116
III. 2. Rotina <i>Prob</i> .	116
AIII. 3. Dados de Saída	120
AIII. 4. Exemplo de utilização do programa PROB	121
AIII. 4. 1 Dados de Entrada	121
AIII. 4. 2. Dados de Saída	122

Lista de figuras

Figura 1 - Compromisso entre FDEPo e ERP.	19
Figura 2 – Esquema de obtenção de ERUP, proposto por Diniz [2]	21
Figura 3 – Esquema da estratégia de trabalho correspondente ao objetivo principal, passos 1 ao 4.	24
Figura 4 – Espectro de resposta. Acelerações espectrais são os valores da pseudo-aceleração do S1GL em resposta à mesma excitação. Kramer [14].	25
Figura 5 – Representação de um espectro de resposta de quatro escalas logarítmicas.	27
Figura 6 - Acelerograma, com duração de 15s, gerado a partir da FDEPo.	33
Figura 7 – Função intensidade, para um sismo com duração total de 15s.	35
Figura 8 - Acelerograma após a aplicação da função intensidade.	35
Figura 9 – Esquema de obtenção de um ERUP.	38
Figura 10 – Função densidade de espectro de potência utilizada.	40
Figura 11 – Sismo nº 13 – Aceleração X Tempo.	46
Figura 12 – Sismo nº 13 – Velocidade X Tempo.	47
Figura 13 – Sismo nº 13 – Deslocamento X Tempo.	47
Figura 14 – Sismo nº 25 – Aceleração X Tempo.	48
Figura 15 – Sismo nº 25 – Velocidade X Tempo.	48
Figura 16 – Sismo nº 25 – Deslocamento.	49
Figura 17 – ER do Sismo nº 13.	55
Figura 18 – ER do Sismo nº 25.	56
Figura 19 – Envoltória de valores máximos e mínimos de ER e comparação com os ER dos sismos 13 e 25.	57
Figura 20 – Distribuição de probabilidade acumulada da PSV para $f = 0,25\text{Hz}$.	60
Figura 21 – Distribuição de probabilidade acumulada da PSV para $f = 2,5\text{Hz}$.	60
Figura 22 – Distribuição de probabilidade acumulada da PSV para $f = 5\text{Hz}$.	61
Figura 23 – Distribuição de probabilidade acumulada da PSV para $f = 9\text{Hz}$.	61
Figura 24 – ERUP-50%.	62
Figura 25 – ERUP-84%	63

Figura 26 – ERUP*-50%	64
Figura 27 – ERUP*-84%.	65
Figura 28 – Comparação do ERUP*-50% com o ERUP-50%.	66
Figura 29 – Comparação do ERUP*-84% com o ERUP-84%.	67
Figura 30 – ERUP-50% e ERUP*-50% com L. I. igual a 0,25, 0,2 e 0,15Hz.	69
Figura 31 – ERUP-84% e ERUP*-84% com L. I. igual a 0,25, 0,2 e 0,15Hz.	69
Figura 32 – Espectro de Resposta de Projeto da USNRC [13].	72
Figura 33 – Função Densidade de Espectro de Potência Objetivo, FDEPo, da USNRC [1].	72
Figura 34 - Comparação do ERUP-50% e do ERUP-84% com o ERP da USNRC [13]	73
Figura 35 - Comparação dos ERUP-50%, para 0,8 e 1,3FDEPo, com o ERP da USNRC [13].	76
Figura 36 - Comparação dos ERUP-84%, para 0,8 e 1,3FDEPo, com o ERP da USNRC [13].	77
Figura 37 - Comparação de ENV-MIN-2%, para 0,8 e 1,3FDEPo, com o ERP da USNRC [13].	78
Figura 38 - Comparação de ENV-MAX-2%, para 0,8 e 1,3FDEPo, com o ERP da USNRC [13].	79
Figura 39 – Aceleração de entrada.	110
Figura 40. – Velocidade correspondente à aceleração de entrada.	111
Figura 41 – Aceleração com a linha base corrigida.	111
Figura 42 – Velocidade correspondente à aceleração com a linha base corrigida.	112
Figura 43 – FDEP ruído branco de entrada, e de saída utilizando TRF.	113
Figura 44 – FDEP ruído branco de entrada, e de saída utilizando TDF.	113
Figura 45 – FDEP ruído branco de entrada, e de saída utilizando TRF (CS - Com Suavização e SS – Sem Suavização).	114
Figura 46 – FDEP ruído branco de entrada, e de saída utilizando TDF (CS - Com Suavização e SS – Sem Suavização).	114

Lista de tabelas

Tabela 1 – ER dos cinco primeiros sismos gerados e a distribuição de probabilidade para o conjunto de valores do 1º. ao 5º. ER.	49
Tabela 2 – ER do 6º. ao 10º. sismo gerado e a distribuição de probabilidade para o conjunto de valores do 1º. ao 10º. ER.	50
Tabela 3 – ER do 11º. ao 15º. sismo gerado e a distribuição de probabilidade para o conjunto de valores do 1º. ao 15º. ER.	50
Tabela 4 – ER do 16º. ao 20º. sismo gerado e a distribuição de probabilidade para o conjunto de valores do 1º. ao 20º. ER.	50
Tabela 5 – ER do 21º. ao 25º sismo gerado e a distribuição de probabilidade para o conjunto de valores do 1º. ao 25º. ER.	51
Tabela 6 – ER do 26º. ao 30º. sismo gerado e a distribuição de probabilidade para o conjunto de valores do 1º. ao 30º. ER.	51
Tabela 7 – ER do 31º. ao 35º. sismo gerado e a distribuição de probabilidade para o conjunto de valores do 1º. ao 35º. ER	51
Tabela 8 – ER do 36º. ao 40º. sismo gerado e a distribuição de probabilidade para o conjunto de valores do 1º. ao 40º. ER.	52
Tabela 9 – ER do 41º. ao 45º. sismo gerado e a distribuição de probabilidade para o conjunto de valores do 1º. ao 45º. ER.	52
Tabela 10 – ER do 46º. ao 50º. sismo gerado e a distribuição de probabilidade para o conjunto de valores do 1º. ao 50º. ER.	52
Tabela 11 – ER do 51º. ao 55º. sismo gerado e a distribuição de probabilidade para o conjunto de valores do 1º. ao 55º. ER.	53
Tabela 12 – ER do 56º. ao 60º. sismo gerado e a distribuição de probabilidade para o conjunto de valores do 1º ao 60º ER.	53
Tabela 13 – ER do 61º. ao 65º. sismo gerado e a distribuição de probabilidade para o conjunto de valores do 1º. ao 65º. ER.	53
Tabela 14 – ER do 66º. ao 70º. sismo gerado e a distribuição de probabilidade para o	

conjunto de valores do 1º. ao 70º. ER.	54
Tabela 15 – ER do 71º. ao 75º. sismo gerado e a distribuição de probabilidade para o conjunto de valores do 1º. ao 75º. ER.	54
Tabela 16 – Valores de PSV correspondentes a cada frequência de referência.	57
Tabela 17 - Valores de PSV das frequências de referência do ERUP-50%.	62
Tabela 18 - Valores de PSV das frequências de referência do ERUP-84%.	63
Tabela 19 – Valores de PSV das frequências de referência do ERUP*-50%.	65
Tabela 20 - Valores de PSV das frequências de referência do ERUP*-84%	66
Tabela 21 - Comparação das PSV do ERUP*-50% e ERUP-50%.	67
Tabela 22 - Comparação das PSV do ERUP-84% e ERUP*-84%.	67
Tabela 23 – Valores de PSV do ERUP-50% e dos ERUP*-50% com L. I. igual a 0,25, 0,2 e 0,15Hz.	70
Tabela 24 – Valores de PSV do ERUP-84% e dos ERUP*-84% com L. I. igual a 0,25, 0,2 e 0,15Hz.	70
Tabela 25 - Valores de PSV do ERUP-50%, do ERUP-84% e do ERP da USNRC.	73
Tabela 26 - Valores dos ERUP-50%, para 0,8 e 1,3FDEPo, e os do ERP da USNRC [13].	76
Tabela 27 - Valores dos ERUP-84%, para 0,8 e 1,3FDEPo, e do ERP da USNRC [13].	77
Tabela 28 - Valores de ENV-MIN-2%, para 0,8 e 1,3FDEPo, e do ERP da USNRC [13].	78
Tabela 29 - Valores de ENV-MAX-2%, para 0,8 e 1,3FDEPo, e do ERP da USNRC [13].	79

Bem-aventurados os humildes de espírito, porque deles é o reino dos céus. Bem-aventurados os que choram, porque eles serão consolados. Bem-aventurados os mansos, porque eles herdarão a terra. Bem-aventurados os que têm fome e sede de justiça porque eles serão fartos. Bem-aventurados os misericordiosos, porque eles alcançarão misericórdia. Bem-aventurados os limpos de coração, porque eles verão a Deus. Bem-aventurados os pacificadores, porque eles serão chamados filhos de Deus.

Mt, 5, 3-9.