

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

METODOLOGIAS PARA A SIMULAÇÃO SIMULTÂNEA DOS TRÊS
COMPONENTES DE ACELEROGRAMAS SÍSMICOS

por

Daniela Dalla Chiesa

Tese para obtenção do Título de
Doutor em Engenharia

Porto Alegre, Novembro de 2020

METODOLOGIAS PARA A SIMULAÇÃO SIMULTÂNEA DOS TRÊS
COMPONENTES DE ACELEROGRAMAS SÍSMICOS

por

Daniela Dalla Chiesa

Mestre em Modelagem Matemática

Tese submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Doutor em Engenharia

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof^a. Dr^a. Letícia Fleck Fadel Miguel

Aprovada por:

Prof^a. Dr^a. Graciela Nora Doz de Carvalho PECC / UnB

Prof. Dr. Jorge Daniel RieraPPGEC / UFRGS

Prof. Dr. Walter Jesus Paucar CasasPROMEC / UFRGS

Prof. Dr. Fernando Marcelo Pereira

Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 18 de Novembro de 2020

AGRADECIMENTOS

Agradeço, inicialmente, aos meus pais Luís Henrique Dalla Chiesa e Alda Spadini Dalla Chiesa e a minha tia Fátima Arlei Dalla Chiesa por todo o incentivo, ajuda, paciência e compreensão e em especial a minha avó Eva Maria Mayer Dalla Chiesa que sempre me incentivou a prosseguir nos estudos, que me deu coragem e não me deixou desistir diante das dificuldades. A minha orientadora Letícia Fleck Fadel Miguel pela amizade, pelas horas de pesquisa e estudo, pela paciência e compreensão.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro para o desenvolvimento desta pesquisa.

RESUMO

São frequentes as notícias que dizem respeito a mortes e destruições provocadas por abalos sísmicos. Atualmente, sabe-se que não existe uma forma de prever, de forma confiável, quando um grande terremoto irá ocorrer e qual será seu potencial a dano. Diante disso, uma das formas disponíveis para reduzir o grande número de mortes e destruições, provocadas por um terremoto, é a aplicação efetiva de princípios da engenharia, isto é, elaborar projetos de estruturas que sejam resistentes a sismo, as chamadas estruturas sismo-resistentes. Nesse contexto, é essencial modelar a excitação sísmica. Sabe-se que, devido às características aleatórias do fenômeno, essa tarefa é muito difícil, portanto inúmeros estudos foram desenvolvidos a fim de preencher algumas lacunas e melhorar os modelos existentes na literatura. Partindo desse pressuposto, o presente trabalho tem a finalidade de propor duas metodologias para a geração simultânea dos três componentes da aceleração do solo. A primeira metodologia tem como objetivo a geração simultânea dos três componentes da aceleração do solo com características predeterminadas, isto é, pico de aceleração do solo, duração do movimento forte e conteúdo de frequência e a segunda metodologia tem como objetivo a geração simultânea dos três componentes da aceleração do solo em locais próximos a uma estação sismológica. As duas metodologias utilizam um método de otimização evolutiva, o Backtracking Search Optimization Algorithm, para determinar os parâmetros apropriados de cada modelo para a geração simultânea dos três componentes da aceleração do solo.

Palavras-chave: Acelerograma sísmico; Backtracking Search Optimization Algorithm; Ondas sísmicas; Três componentes da aceleração do solo.

ABSTRACT

News reports of deaths and destruction caused by earthquakes are frequent. It is now known that there is no way to reliably predict when a major earthquake will occur and what its potential will be to damage. In view of this, one of the ways available to reduce the large number of deaths and destructions caused by an earthquake is the effective application of engineering principles, that is, the design of structures that are resistant to earthquakes and called seismic resistant structures. In this context, it is very important to model the seismic excitation. It is known that due to the random characteristics of the phenomenon, it is very difficult to elaborate such a model, therefore, numerous studies have been developed in order to fill some gaps and to improve the existing models in the literature. Based on this assumption, the present work has the objective of collaborating with these studies, proposing two numerical models for the simultaneous generation of the three components of the ground acceleration. The first methodology aims to simultaneously generate the three components of the ground acceleration with predetermined characteristics (i.e., peak ground acceleration, duration of strong motion, and frequency content) and the second methodology aims to simultaneously generate the three components of the ground acceleration at locations on the surface close to the seismic station. The two methodologies used an evolutionary optimization method, the Backtracking Search Optimization Algorithm, to determine the appropriate parameters for each model for simultaneous generation of the three components of the ground acceleration.

Keywords: Seismic accelerogram; Backtracking Search Optimization Algorithm, Seismic waves, Three components of the ground acceleration.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivos	5
1.2	Organização do trabalho	6
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	11
3.1	Principais características do movimento do solo	11
3.1.1	Amplitude do movimento do solo	11
3.1.2	Duração do movimento forte do solo	12
3.1.3	Conteúdo de frequência	13
3.1.4	Outros parâmetros do movimento do solo	16
3.2	Otimização	17
3.2.1	Conceitos básicos de otimização	17
3.2.2	Problema de otimização	18
3.2.3	Algoritmos evolucionários	19
3.3	Conceitos básicos de sismologia	24
3.3.1	Epicentro, hipocentro e distâncias da fonte	24
3.3.2	Ondas sísmicas	25
4	SIMULAÇÃO DOS TRÊS COMPONENTES DE ACELE- ROGRAMAS SÍSMICOS COM CARACTERÍSTICAS PRE- DETERMINADAS	27
4.1	Equação para a geração dos três componentes da aceleração do solo	27
4.2	Função Modulação	28
4.3	Problema de otimização	28
4.4	Metodologia passo a passo	29

5	SIMULAÇÃO DOS TRÊS COMPONENTES DE ACELE- ROGRAMAS SÍSMICOS EM LOCAIS PRÓXIMOS A UMA ESTAÇÃO SISMOLÓGICA	31
5.1	Hipóteses adotadas	31
5.2	Modelo analítico de cada onda sísmica	31
5.3	Problema de otimização	34
5.4	Geração dos três componentes de acelerogramas sísmicos em pontos próximos à estação sismológica	35
5.4.1	Cálculo da velocidade e do tempo de chegada de cada onda no ponto B .	35
5.4.2	Atenuação no ponto B	36
5.4.3	Outros parâmetros das ondas sísmicas	36
6	RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DOS TRÊS COMPO- NENTES DE ACELEROGRAMAS SÍSMICOS COM CA- RACTERÍSTICAS PREDETERMINADAS	38
6.1	Estação AMT	39
6.2	Estação MTR	43
6.3	Análise dos resultados	47
7	RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DOS TRÊS COMPO- NENTES DE ACELEROGRAMAS SÍSMICOS EM PON- TOS PRÓXIMOS À ESTAÇÃO SISMOLÓGICA	48
7.1	Estação PDM	48
7.2	Estação CR4	57
7.3	Análise dos resultados	65
7.4	Resultados que embasam a escolha da função para a modelagem de cada onda sísmica	66
7.4.1	Estação PDM	68
7.4.2	Estação CR4	70
7.4.3	Análise dos resultados	84
8	CONCLUSÕES	85
8.1	Proposta para a continuidade do trabalho	87

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87
APÊNDICE A Parâmetros das ondas	93
APÊNDICE B Publicações	97

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1	Espectro de amplitude de Fourier para o componente NS do sismo El Centro (1940).	14
Figura 3.2	Espectro de resposta de projeto, regulamentado pela NBR 15.421 [ABNT, 2006], para um pico de aceleração do solo de 0,15g e classe do terreno D.	17
Figura 3.3	Pseudocódigo do BSA. Adaptado de Civicioglu, 2013, pág. 8125.	23
Figura 3.4	Notação geométrica de um terremoto.	24
Figura 3.5	Distâncias da fonte à estação.	24
Figura 3.6	Ondas sísmicas. Adaptado de Sucuoglu e Akkar 2014, pág. 20.	26
Figura 4.1	Fluxograma do procedimento proposto para simular os três componentes da aceleração sísmica.	30
Figura 5.1	Modelo de onda sísmica.	32
Figura 5.2	Ilustração da direção de propagação de cada onda sísmica.	33
Figura 5.3	Localização da estação sismológica e do ponto B.	35
Figura 6.1	Três componentes dos acelerogramas registrados e simulados na estação AMT. (a) Componente EW. (b) Componente NS. (c) Componente vertical.	40
Figura 6.2	Espectro de potência dos três componentes dos acelerogramas registrados e simulados na estação AMT. (a) Componente EW. (b) Componente NS. (c) Componente vertical.	41
Figura 6.3	Escalogramas registrados e simulados na estação AMT. (a) Componente EW registrado. (b) Componente EW simulado. (c) Componente NS registrado. (d) Componente NS simulado. (e) Componente vertical registrado. (f) Componente vertical simulado.	42
Figura 6.4	Três componentes dos acelerogramas registrados e simulados na estação MTR. (a) Componente EW. (b) Componente NS. (c) Componente vertical.	44

Figura 6.5	Espectro de potência dos três componentes dos acelerogramas registrados e simulados na estação MTR. (a) Componente EW. (b) Componente NS. (c) Componente vertical.	45
Figura 6.6	Escalogramas registrados e simulados na estação MTR. (a) Componente EW registrado. (b) Componente EW simulado. (c) Componente NS registrado. (d) Componente NS simulado. (e) Componente vertical registrado. (f) Componente vertical simulado.	46
Figura 7.1	Três componentes dos acelerogramas registrados e simulados na estação PDM. (a) Componente Leste-Oeste. (b) Componente NS. (c) Componente vertical.	50
Figura 7.2	Espectro de resposta de pseudo-aceleração dos três componentes dos acelerogramas registrados e simulados na estação PDM. (a) Componente EW. (b) Componente NS. (c) Componente vertical.	51
Figura 7.3	Três componentes dos acelerogramas simulados 3km antes da estação PDM. (a) Componente EW. (b) Componente NS. (c) Componente vertical.	52
Figura 7.4	Três componentes dos acelerogramas simulados 1km antes da estação PDM. (a) Componente EW. (b) Componente NS. (c) Componente vertical.	53
Figura 7.5	Três componentes dos acelerogramas simulados 1km depois da estação PDM. (a) Componente EW. (b) Componente NS. (c) Componente vertical.	54
Figura 7.6	Três componentes dos acelerogramas simulados 3km depois da estação PDM. (a) Componente EW. (b) Componente NS. (c) Componente vertical.	55
Figura 7.7	Espectros de resposta de pseudo-aceleração dos três componentes dos acelerogramas simulados. (a) Componente EW. (b) Componente NS. (c) Componente vertical.	56

Figura 7.8	Três componentes dos acelerogramas registrados e simulados na estação CR4. (a) Componente EW. (b) Componente NS. (c) Componente vertical.	58
Figura 7.9	Espectro de resposta de pseudo-aceleração dos três componentes dos acelerogramas registrados e simulados na estação CR4. (a) Componente EW. (b) Componente NS. (c) Componente vertical.	59
Figura 7.10	Três componentes dos acelerogramas simulados 3km antes da estação CR4. (a) Componente EW. (b) Componente NS. (c) Componente vertical.	60
Figura 7.11	Três componentes dos acelerogramas simulados 1km antes da estação CR4. (a) Componente EW. (b) Componente NS. (c) Componente vertical.	61
Figura 7.12	Três componentes dos acelerogramas simulados 1km depois da estação CR4. (a) Componente EW. (b) Componente NS. (c) Componente vertical.	62
Figura 7.13	Três componentes dos acelerogramas simulados 3km depois da estação CR4. (a) Componente EW. (b) Componente NS. (c) Componente vertical.	63
Figura 7.14	Espectros de resposta de pseudo-aceleração dos três componentes dos acelerogramas simulados. (a) Componente EW. (b) Componente NS. (c) Componente vertical.	64
Figura 7.15	Ilustração das funções dadas pelas Equações 7.1 à 7.3.	67
Figura 7.16	Três componentes dos acelerogramas registrados e simulados na estação PDM utilizando a parte imaginária da <i>wavelet</i> de Morlet.	72
Figura 7.17	Três componentes dos acelerogramas registrados e simulados na estação PDM utilizando a parte real da <i>wavelet</i> de Morlet.	73
Figura 7.18	Três componentes dos acelerogramas registrados e simulados na estação PDM utilizando a função de Bruna e Riera, 1988.	74
Figura 7.19	Espectro de resposta de pseudo-aceleração dos três componentes dos acelerogramas registrados e simulados na estação PDM utilizando a parte imaginária da <i>wavelet</i> de Morlet.	75

Figura 7.20	Espectro de resposta de pseudo-aceleração dos três componentes dos acelerogramas registrados e simulados na estação PDM utilizando a parte real da <i>wavelet</i> de Morlet.	76
Figura 7.21	Espectro de resposta de pseudo-aceleração dos três componentes dos acelerogramas registrados e simulados na estação PDM utilizando a função de Bruna e Riera, 1988.	77
Figura 7.22	Três componentes dos acelerogramas registrados e simulados na estação CR4 utilizando a parte imaginária da <i>wavelet</i> de Morlet.	78
Figura 7.23	Três componentes dos acelerogramas registrados e simulados na estação CR4 utilizando a parte real da <i>wavelet</i> de Morlet. . . .	79
Figura 7.24	Três componentes dos acelerogramas registrados e simulados na estação CR4 utilizando a função de Bruna e Riera, 1988.	80
Figura 7.25	Espectro de resposta de pseudo-aceleração dos três componentes dos acelerogramas registrados e simulados na estação CR4 utilizando a parte imaginária da <i>wavelet</i> de Morlet.	81
Figura 7.26	Espectro de resposta de pseudo-aceleração dos três componentes dos acelerogramas registrados e simulados na estação CR4 utilizando a parte real da <i>wavelet</i> de Morlet.	82
Figura 7.27	Espectro de resposta de pseudo-aceleração dos três componentes dos acelerogramas registrados e simulados na estação CR4 utilizando a função de Bruna e Riera, 1988.	83
Figura A.1	Parâmetros das ondas para a estação PDM.	93
Figura A.2	Parâmetros das ondas para a estação PDM.	94
Figura A.3	Parâmetros das ondas para a estação CR4.	95
Figura A.4	Parâmetros das ondas para a estação CR4.	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 6.1	Parâmetros utilizados em cada simulação.	38
Tabela 6.2	Resultados para a estação AMT.	39
Tabela 6.3	Resultados para a estação MTR.	43
Tabela 7.1	Parâmetros utilizados em cada simulação.	48
Tabela 7.2	Resultados para a estação PDM.	49
Tabela 7.3	Resultados para a estação CR4.	57
Tabela 7.4	Erro quadrático médio entre os espectros de pseudo-aceleração (diferença entre os espectros registrados e simulados) na esta- ção PDM, para o período de 0 a 2,5s.	68
Tabela 7.5	Erro relativo entre os picos dos espectros de pseudo-aceleração (diferença entre picos registrados e simulados) na estação PDM.	69
Tabela 7.6	Erro quadrático médio entre os acelerogramas registrados e simulados na estação PDM.	69
Tabela 7.7	Erro relativo entre os picos de aceleração do solo (diferença entre picos registrados e simulados), na estação PDM.	69
Tabela 7.8	Velocidade final dos acelerogramas simulados na estação PDM (<i>m/s</i>).	69
Tabela 7.9	Erro quadrático médio entre os espectros de pseudo-aceleração (diferença entre os espectros registrados e simulados) na esta- ção CR4, para o período de 0 a 2,5s.	70
Tabela 7.10	Erro relativo entre os picos dos espectros de pseudo-aceleração (diferença entre picos registrados e simulados) na estação CR4.	70
Tabela 7.11	Erro quadrático médio entre os acelerogramas registrados e simulados na estação CR4.	71
Tabela 7.12	Erro relativo entre os picos de aceleração do solo (diferença entre picos registrados e simulados), na estação CR4.	71
Tabela 7.13	Velocidade final dos acelerogramas simulados na estação CR4 (<i>m/s</i>).	71

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

1GDL	1 grau de liberdade
ABC	Artificial Bee Colony
AEs	Algoritmos evolucionários
EW	Leste-Oeste
BSA	Backtracking Search Optimization Algorithm
CLPSO	Comprehensive Learning Particle Swarm Optimizer
CMAES	Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy
JDE	Adaptive Differential Evolution
L	Love
NS	Norte-Sul
P	Primárias
PSO	Particle Swarm Optimization
R	Rayleigh
S	Secundárias
SADE	Self-Adaptive Differential Evolution
SH	Secundárias horizontais
SV	Secundárias verticais

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

a_{rms}	Raiz do valor quadrático médio da aceleração do solo
a_q	Acelerograma sísmico simulado na direção q
a_{qj}	Aceleração da onda j na direção q
$a(t)$	Aceleração da onda sísmica
a^R	Acelerograma sísmico registrado
a_q^R	Acelerograma sísmico registrado na direção q
A	Amplitude da onda sísmica
A_j	Amplitude da onda j
A_B	Amplitude da onda o ponto B
A_{qj}	Amplitude da onda j na direção q
A_{min}	Amplitude mínima de cada onda
A_{max}	Amplitude máxima de cada onda
$a_{qhilbert}^R$	Transformada de Hilbert do acelerograma sísmico registrado na direção q
az_{S-E}	Azimute sismo-estação
b	Centro da onda sísmica
B	Ponto em que será simulado o acelerograma sísmico
c	Coefficiente de amortecimento viscoso de um oscilador
C_A	Coefficiente de atenuação
d	Número de restrições de desigualdade
D_{hip}	Distância do hipocentro à estação
D_{hipB}	Distância do hipocentro ao ponto B
e_q	Função modulação das ondas na direção q
E	Módulo de Young
\mathbf{E}_{pv}	Espectro de resposta de pseudo-velocidade
\mathbf{E}_{pa}	Espectro de resposta de pseudo-aceleração
E_{me}	Erro quadrático médio entre os espectros de pseudo-aceleração
E_{ma}	Erro quadrático médio entre os acelerogramas
E_{re}	Erro relativo entre os picos dos espectros de pseudo-aceleração
E_{ra}	Erro relativo entre os picos dos acelerogramas

f	Frequência da onda sísmica
f_j	Frequência da onda j
f_{min}	Frequência mínima
f_{max}	Frequência máxima
F	Transformada de Fourier
F_A	Espectro de amplitude de Fourier
f_o	Função objetivo
g	Aceleração da gravidade
G	Espectro de potência da aceleração do solo
h_α	Restrição de desigualdade
H	Função de Husid
I_a	Intensidade de Arias
k	Rigidez de um oscilador
l_β	Restrição de igualdade
m	Massa de um oscilador
n	Número de ciclos da onda sísmica
n_j	Número de ciclos da onda j
n_{min}	Restrição mínima ao número de ciclos
n_{max}	Restrição máxima ao número de ciclos
N_j	Número de ondas sísmicas
N_{dados}	Número de dados do espectro de potência
q	Direção ortogonal ($q = 1, 2, 3$)
r	Número de restrições de igualdade
s	Parâmetro que controla a largura da onda
$S_q(f)$	Espectros de potência do acelerograma simulado na direção q
$S_q^R(f)$	Espectros de potência do acelerograma registrado na direção q
t_{aB}	Tempo de chegada da onda no ponto B
t_a	Tempo de chegada da onda sísmica na estação sismológica
t_{a_j}	Tempo de chegada da onda j na estação sismológica
t_{aP}	Tempo médio de chegada das ondas P
t_{aS}	Tempo médio de chegada das ondas S
t	Tempo

t_d	Duração da onda sísmica
T_s	Duração do movimento forte do solo
T_s^R	Duração do movimento forte do acelerograma sísmico registrado na direção q
T_{s_q}	Duração do movimento forte do acelerograma sísmico simulado na direção q
T_d	Duração do movimento do solo
T_n	Período natural de vibração de um oscilador
\mathbf{u}	Deslocamento de um oscilador
$\dot{\mathbf{u}}$	Velocidade de um oscilador
$\ddot{\mathbf{u}}$	Aceleração de um oscilador
u_{max}	Espectro de resposta de deslocamento relativo de um oscilador
\dot{u}_{max}	Espectro de resposta de velocidade relativa de um oscilador
\ddot{u}_{max}	Espectro de resposta de aceleração absoluta de um oscilador
V_P	Velocidade das ondas primárias
V_S	Velocidade das ondas secundárias
V_B	Velocidade das ondas no ponto B
V_f	Velocidade final dos acelerogramas
\mathbf{X}	Vetor de variáveis de projeto
x_p	Variável de projeto
x_{inf}	Limite inferior para uma determinada variável de projeto
x_{max}	Limite superior para uma determinada variável de projeto
z_q	Função pré-envelope na direção q
W	Fator de ponderação
W_q	Fator de ponderação na direção q

Símbolos Gregos

ξ	Razão de amortecimento de um oscilador
ω	Frequência circular
ω_n	Frequência circular natural de vibração de um oscilador
ρ	Densidade
ν	Coefficiente de Poisson
φ_j	Ângulo de fase da onda j
ϕ	Ângulo vertical da onda
ϕ_j	Ângulo vertical da onda j

ϕ_{min}	Restrição mínima ao ângulo ϕ
ϕ_{max}	Restrição máxima ao ângulo ϕ
θ	Ângulo horizontal da onda
θ_j	Ângulo horizontal da onda j
θ_{min}	Restrição mínima ao ângulo θ
θ_{max}	Restrição máxima ao ângulo θ

Símbolos BSA

D	Dimensão do problema
F	Controlador de amplitude da matriz direção (<i>oldP</i>)
<i>low</i>	Valor mínimo da população
<i>map</i>	Matriz binária de valor inteiro
<i>maxit</i>	Número máximo de iterações
<i>mixrate</i>	Parâmetro de taxa de mistura
<i>Mutant</i>	População experimental.
N	Tamanho da população
<i>oldP</i>	População histórica
P	População
P_{best}	Melhor indivíduo da população
$U(\cdot)$	Distribuição uniforme
<i>up</i>	Valor máximo da população
T	População experimental

1 INTRODUÇÃO

"À medida que a capital japonesa vai sendo deixada para trás, os rastros de destruição causados pelo forte terremoto aumentam gradativamente no caminho para Sendai, uma das cidades mais devastadas pelo tremor e tsunami de sexta-feira. Desde a saída de Tóquio, no sábado, as barreiras para continuar a viagem em direção à cidade a nordeste da capital do Japão só aumentam [...]. Pelo caminho, casas destelhadas, asfalto rachado, placas caídas, lojas com vidros quebrados e a população ainda assustada com os tremores secundários são cenas comuns quando se entra na província de Fukushima." [Tobace, 2011].

As frases transcritas acima são relatos feitos pelo jornalista Ewerthon Tobace, publicadas em 13 de março de 2011 pelo UOL Notícias, sobre um forte terremoto, de magnitude de 8,3 M_s , seguido de um tsunami, ocorrido próximo à costa leste de Honshu, no Japão [USGS, 2017]. O terremoto foi o pior da história do país, vitimando quase 20.000 pessoas, desmantelando 1 milhão de casas e empresas, deixando 300.000 pessoas sem residência e destruindo reatores nucleares, o que provocou liberação de material radioativo no ar. Toda essa devastação gerou gastos ao governo japonês que ficaram na faixa de bilhões de dólares, ocasionando sérios danos econômicos ao país [Conca, 2016].

Devastações como essa não ocorreram somente no Japão. Por exemplo, em 2008, um terremoto de magnitude 8,1 M_s atingiu a cidade de Sichuan Oriental, na China, afetando várias regiões e províncias. Estima-se que pelo menos 69.195 pessoas morreram, 374.117 ficaram feridas e 18.392 desapareceram e presumidas mortas na região de Chengdu-Lixian-Guangyuan. No mínimo 15 milhões de pessoas foram evacuadas de suas residências e mais de 5 milhões ficaram sem ter onde morar. Estima-se, também, que 5,36 milhões de edifícios colapsaram e mais de 21 milhões foram danificados em Sichuan e em partes de Chongqing, Gansu, Hubei, Shaanxi e Yunnan. Toda essa destruição gerou uma perda econômica estimada em 86 bilhões de dólares [USGS, 2017].

Os exemplos acima mostram que terremotos são forças da natureza que provocam um número significativo de mortes e destruições. Estima-se que, somente entre os anos de 1990 a 2015, eles vitimaram 916.275 pessoas ao redor do mundo [USGS, 2017], além de serem os responsáveis pela destruição de inúmeras cidades e povoados, causando perdas econômicas anuais que giram em torno de bilhões de dólares. O fato de milhões de pessoas

viverem em áreas propensas a terremotos e o crescimento contínuo das cidades são fatores que aumentam a sua ameaça.

Um terremoto se manifesta como um tremor no solo causado pela repentina liberação de energia na crosta terrestre [Elnashai e Sarno, 2008]. Tal fenômeno pode ser ocasionado por diversas fontes, entretanto, os terremotos causados por forças tectônicas são os maiores e mais devastadores. Os terremotos são muito comuns, calcula-se que ocorram no mundo cerca de 500 mil terremotos detectáveis a cada ano, destes, 100 mil podem ser sentidos e 100 causam danos [USGS, 2017].

Os terremotos provocam efeitos diretos ou indiretos no ambiente. Os efeitos diretos envolvem falhas e vibração do solo, que geram efeitos indiretos como tsunamis, incêndios, deslizamento de terras e liquefação. Dentre esses efeitos, a vibração do solo é a principal causa de danos econômicos e mortes.

Durante um terremoto, o movimento do solo provoca vibrações nas construções, gerando esforços e deformações. Quando esses esforços e deformações excedem a capacidade estrutural, causam sérios danos e podem conduzir a estrutura ao colapso parcial ou total. Em países extremamente pobres, como o Haiti, onde as construções e condições de vida são precárias, as perdas aumentam significativamente, um exemplo disso foi após o terremoto que ocorreu em 2010. O Haiti já passava por uma situação social e econômica péssima, estando na 149^a posição, entre os 182 países no ano de 2009, no ranking do índice de desenvolvimento humano. O país tentava superar as perdas ocasionadas por vulcões que entraram em atividade em 2008, até que em 12 de janeiro de 2010, um terremoto de magnitude 7,3 M_s , o mais forte dos últimos 200 anos no Haiti, destruiu o país. Mais de 220 mil pessoas morreram e 300 mil sofreram ferimentos. Cerca de 105 mil casas foram completamente destruídas e 188 mil caíram ou sofreram danos. Quase 5 mil escolas foram danificadas, sendo que muitas dessas, foram fechadas após o tremor, 49 hospitais foram destruídos ou seriamente afetados. Construções como a Catedral, o Palácio Presidencial, o Parlamento e grande parte dos edifícios governamentais ruíram. Cerca de 2,3 milhões de pessoas foram deslocadas de suas casas por conta da sua destruição. Isso tudo gerou um prejuízo estimado em 7,8 bilhões de dólares, o que equivale a 120% do produto interno bruto do país [ONUBR, 2010]. Se esse mesmo terremoto tivesse ocorrido em um país desenvolvido, onde as construções fossem projetadas para resistir à ação sísmica, provavelmente, não teria provocado tantas perdas.

Diante de todos esses acontecimentos, a questão que surge é: Como se proteger de um terremoto? Uma resposta para essa pergunta é encontrar uma forma de prever, de forma confiável, quando eventos com maior potencial destrutivo irão ocorrer e quais serão os seus potenciais danos. Entretanto, apesar de terem surgido avanços científicos nas áreas geológica e sismológica, ainda hoje, devido à complexidade do fenômeno, não há uma forma precisa para realizar tal previsão.

Frente a essa incapacidade, Grotzinger e Jordan, 2013 citam algumas alternativas que podem ser adotadas para a redução do risco sísmico como: a caracterização do perigo sísmico em um determinado local, a restrição do uso do solo em locais de risco, como em falhas ativas, o planejamento e a preparação para lidar com situações de emergências a fim de minimizar as consequências de um grave terremoto, a publicação de avisos com certa antecedência à chegada das ondas sísmicas, a implantação de sistemas de aviso à chegada de tsunamis e a aplicação efetiva de princípios de engenharia.

Com respeito à última alternativa, a ideia básica consiste em projetar construções que sejam capazes de resistir, com o menor dano possível, aos efeitos do terremoto, isto é, elaborar projetos sísmo-resistentes. Neste contexto, a modelagem da excitação sísmica se torna o ponto central. A complexidade do fenômeno e o fato de que são necessários vários parâmetros para descrever o efeito que ele pode produzir em uma estrutura, são as maiores dificuldades encontradas em termos de modelagem do movimento do solo e análise estrutural e tem merecido crescente atenção da comunidade acadêmica nas últimas décadas.

O projeto e a construção de novas estruturas são regulamentados por normas técnicas elaboradas pelos governos e/ou outras entidades. Especificamente, uma norma técnica sísmica fixa os requisitos necessários na verificação da segurança das estruturas no que diz respeito às ações sísmicas esperadas no local em que haverá a construção.

No caso de construções de baixa altura, a análise e o projeto de estruturas sujeitas a carga sísmica são geralmente realizados empregando procedimentos simplificados que representam a excitação sísmica por meio de cargas estáticas equivalentes, conforme prescrito, por exemplo, pela norma brasileira NBR 15421 [ABNT, 2006]. No caso de construções altas ou de geometrias incomuns, normalmente recorrem-se a métodos dinâmicos lineares de análise, em conjunto com os espectros de projeto especificados pelas normas. Em algumas situações, no entanto, o uso de métodos não lineares de análise dinâmica deve

ser utilizado, exigindo a especificação de acelerogramas no local de interesse. É o caso quando o objetivo da análise é a determinação do grau de dano causado pela excitação sísmica, a probabilidade de falha ou o comportamento pós-pico de estruturas específicas.

Os primeiros estudos nesse último grupo de aplicações foram avaliações da resposta de estruturas sujeitas a um movimento sísmico horizontal unidirecional, tipicamente definido por um acelerograma. Para esse fim, um dos componentes horizontais das acelerações registradas durante eventos sísmicos reais era frequentemente utilizado. Como acelerogramas reais para a localização de interesse raramente estão disponíveis, também foram propostos procedimentos para modificar os registros existentes para explicar as diferenças nos parâmetros do projeto (magnitude do terremoto, distância epicentral, perfil do solo e outros). Nesse contexto, vários procedimentos para simular acelerogramas caracterizados por um espectro de resposta suave que deve se encaixar na resposta do projeto no local de acordo com a norma aplicável, foram sugeridos.

A maioria dos estudos para a geração de acelerogramas sísmicos artificiais trata da geração de apenas um dos componentes da aceleração do solo. Obviamente, pode-se recorrer à mesma abordagem para simular os outros dois componentes de forma independente; nesse caso, eles serão estatisticamente independentes ou apresentarão uma correlação desconhecida, ignorando assim as evidências físicas sobre o assunto. No entanto, em certas situações, é necessário obter os três componentes da excitação, como, por exemplo, quando um modelo espacial da estrutura é analisado.

Todo o exposto acima demonstra a necessidade de elaborar modelos sísmicos que sejam capazes de reproduzir da melhor forma possível o fenômeno. Sabe-se que encontrar um modelo que simule um sismo real é complexo, devido às características aleatórias de um terremoto, entretanto, é importante que estudos sejam desenvolvidos no sentido de preencher algumas lacunas e assim melhorar os modelos existentes na literatura. De fato não seria leviano dizer que a ciência tem um enorme desafio a ser cumprido. Partindo desse pressuposto, o presente trabalho tem o intuito de colaborar com essa pesquisa propondo duas metodologias para a geração simultânea dos três componentes da aceleração do solo.

A primeira metodologia tem como objetivo a geração simultânea dos três componentes da aceleração do solo com características predeterminadas, isto é, pico de aceleração do solo, duração do movimento forte e conteúdo de frequência. O modelo utiliza um método de otimização evolutiva, o Backtracking Search Optimization Algorithm (BSA), para

determinar os parâmetros apropriados de amplitude e frequência, de um modelo matemático relativamente simples, que permite gerar os três componentes da aceleração sísmica simultaneamente.

A segunda metodologia tem como objetivo a geração simultânea dos três componentes da aceleração do solo em locais próximos a uma estação sismológica. Cada componente de aceleração do solo é determinado por um somatório de várias ondas sísmicas, cujos parâmetros, isto é, amplitude, frequência, número de ciclos, tempo de chegada e direção, são determinados usando um algoritmo de otimização evolutiva, o BSA.

Como pôde ser observado, as duas metodologias têm em comum o fato de utilizarem o BSA para a geração simultânea dos três componentes da aceleração do solo. A principal diferença entre elas, além da função que modela cada onda sísmica, é o fato de que a segunda metodologia utiliza alguns parâmetros da fonte para a geração dos três componentes da aceleração do solo, enquanto que a primeira necessita apenas do registro dos três componentes da aceleração do solo.

1.1 Objetivos

O objetivo principal da tese é elaborar metodologias para a geração simultânea dos três componentes da aceleração sísmica. Especificamente, elaborar um método numérico que permita reproduzir simultaneamente os três componentes da aceleração sísmica de forma simples e eficiente, e que esse método possibilite gerar acelerogramas sísmicos artificiais passíveis de serem utilizados em aplicações práticas. Para tal finalidade, são definidos os objetivos específicos a seguir:

- Buscar registros sísmicos em que os três componentes estejam disponíveis;
- Ajustar e padronizar os acelerogramas sísmicos registrados;
- Desenvolver programas computacionais para a correção da linha base dos acelerogramas sísmicos, para o cálculo do espectro de potência, para o cálculo do espectro de resposta de pseudo-aceleração e para o cálculo da função de Husid;
- Estudar e implementar um algoritmo evolucionário para o desenvolvimento das metodologias para a geração simultânea dos três componentes da aceleração sísmica;

1.2 Organização do trabalho

O presente trabalho foi organizado em 8 capítulos como segue:

- Capítulo 1: O capítulo 1 é destinado à introdução e à organização do trabalho. Nele são expostos tanto a importância em estudar a modelagem de eventos sísmicos como os objetivos principal e específicos do trabalho.
- Capítulo 2: O capítulo 2 é destinado à revisão bibliográfica. Nele é apresentado ao leitor como alguns pesquisadores tem realizado a simulação de registros sísmicos artificiais. Tendo em vista a grande abrangência de métodos, apenas algumas contribuições significativas para este trabalho são citadas e comentadas neste capítulo.
- Capítulo 3: O capítulo 3 apresenta a fundamentação teórica. Neste capítulo são apresentadas, resumidamente, todas as equações, definições e teorias que servem como base para a pesquisa desenvolvida. Primeiramente, são apresentadas algumas características do movimento do solo, importantes no estudo de registros sísmicos e de engenharia sísmica. Na sequência, é feita uma breve exposição do problema de otimização, com alguns conceitos básicos e a sua formulação matemática, para então introduzir os algoritmos evolucionários e explicar qual o algoritmo utilizado neste trabalho. E, por fim, algumas definições de terminologias, utilizadas em sismologia, são elucidadas e algumas características das ondas sísmicas são comentadas.
- Capítulo 4: O capítulo 4 descreve a metodologia para a geração simultânea dos três componentes da aceleração do solo com características predeterminadas.
- Capítulo 5: O capítulo 5 descreve a metodologia para a geração simultânea dos três componentes da aceleração do solo em locais próximos a uma estação sismológica.
- Capítulo 6: O capítulo 6 é destinado aos resultados da metodologia para a geração simultânea dos três componentes da aceleração do solo com características predeterminadas.
- Capítulo 7: O capítulo 7 é destinado aos resultados da metodologia para a geração simultânea dos três componentes da aceleração do solo em locais próximos a uma estação sismológica. O capítulo também descreve o procedimento adotado para a escolha da função para a modelagem de cada onda sísmica.

- Capítulo 8: O capítulo 8 é destinado às conclusões e às propostas para a continuidade deste trabalho.
- O Apêndice A lista os parâmetros das ondas sísmicas.
- O Apêndice B lista as principais publicações que esta pesquisa originou.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A necessidade de geração de acelerogramas sísmicos artificiais é reconhecida há muito tempo, um exemplo disso é a geração de acelerogramas sísmicos artificiais para a análise não linear da resposta dinâmica de estruturas. Partindo de necessidades como essa, surgiram numerosos estudos com o objetivo de criar metodologias para a geração de tais acelerogramas.

Uma abordagem alternativa para descrever a excitação sísmica consistiu na introdução, em meados do século 20, da suposição de que a aceleração do solo pode ser modelada como um processo aleatório unidimensional. As primeiras aplicações assumiram que a aceleração do solo era um ruído branco estacionário [Housner, 1952; Bycroft, 1960; Rosenblueth e Bustamante, 1962; Housner e Jennings, 1964]. Mais tarde, um ruído branco filtrado estacionário foi empregado por Kanai, 1961 e Tajimi, 1960.

O modelo Kanai-Tajimi foi bem aceito pela comunidade científica e, portanto, foi amplamente utilizado na análise da resposta dinâmica quando se trata da teoria das vibrações aleatórias. Com base no modelo Kanai-Tajimi, muitos autores, como Hu e Zhou, 1962, Ruiz e Penzien, 1969, Clough e Penzien, 1993 e Hongjing et al., 2008, propuseram espectros de potência para geração de acelerogramas.

Posteriormente, modelos estocásticos não estacionários foram propostos para dar conta das características transitórias dos movimentos sísmicos observados no solo. Os primeiros modelos estocásticos não estacionários surgiram com a introdução de uma função determinística, denominada função envelope ou função modulação, empregada, por exemplo, por Shinozuka e Sato, 1967, Amin e Ang, 1968 e Iyengar e Yengar, 1969.

As funções envelope propostas, embora modelem corretamente a evolução da intensidade do movimento do solo, não levam em conta uma característica dos registros sísmicos, ou seja, a alteração da frequência predominante com o tempo. Partindo dessa premissa, modelos de processos aleatórios não estacionários foram propostos com base em diferentes técnicas, por exemplo: Polhemus e Cakmak, 1981, Scherer et al., 1982, Lin e Yong, 1987, Deodatis e Shinozuka, 1989, Fan e Ahmadi, 1990, Sabetta e Pugliese, 1996, Conte e Peng, 1997, Rofooei et al., 2001, Lee e Han, 2002, Suárez e Montejo, 2005, Rajasekaran et al., 2006, Amiri et al., 2009, Cacciola, 2010, Cacciola e Deodatis, 2011, Amiri et al., 2011, Yamamoto e Baker, 2013, Vlachos et al., 2015, Huang e Wang, 2017, Amiri

et al., 2018 e Sharbati et al., 2019. Douglas e Aochi, 2008 apresentam uma revisão de vários métodos, destacando suas vantagens e limitações.

A maioria das referências mencionadas acima trata da geração de apenas um dos componentes de aceleração do solo. No entanto, em certas situações, é necessário descrever os três componentes da excitação, por exemplo, quando um modelo espacial da estrutura é analisado [Trovato et al., 2017]. No que diz respeito a geração dos três componentes da aceleração do solo, a literatura é escassa. Uma das razões pelas quais isso ocorre deve-se ao pressuposto de que é possível simular os três componentes independentemente (componentes principais) e, eventualmente, realizar uma transformação linear. Nesse caso, os procedimentos propostos na literatura para simular um único componente podem ser facilmente estendidos aos três componentes, entretanto, os três componentes da aceleração do solo serão estatisticamente independentes ou apresentarão uma correlação desconhecida, ignorando assim as evidências físicas sobre o assunto.

Bruna e Riera, 1988 e mais recentemente Dalla Chiesa e Miguel, 2019 voltaram sua atenção para a geração simultânea dos três componentes (Leste-Oeste (EW), Norte-Sul (NS) e Vertical) da aceleração do solo em um dado local adotando novas abordagens.

Bruna e Riera, 1988 realizaram a simulação dos três componentes da aceleração do solo em um ponto da superfície da rocha. Utilizaram algumas funções, denominadas funções de base, para caracterizar os três componentes. As funções de base foram definidas em termos de amplitude, frequência, tempo de chegada e duração e serviam para modelar as características de cada onda sísmica e estão associadas a um tipo de onda, por exemplo onda de corte ou de compressão. Um ponto importante é que essas funções satisfazem a condição de velocidade final nula, quando o número de ciclos é um valor inteiro. O tempo de chegada foi considerado uma variável aleatória e está diretamente relacionado às características geométricas da falha e às propriedades do meio. É importante destacar que a pesquisa de Bruna e Riera, 1988 serviu como base para a elaboração das metodologias desenvolvidas neste trabalho.

O trabalho de Dalla Chiesa e Miguel, 2019 é oriundo desta pesquisa e será detalhado no capítulo 4.

No contexto atual, parece claro que há uma necessidade urgente de desenvolver métodos que preencham algumas lacunas na literatura, como a simulação dos três componentes da aceleração do solo, contribuindo assim para a simulação de acelerogramas

sísmicos cada vez mais próximos dos acelerogramas registrados.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão apresentadas, resumidamente, as definições e teorias que servem como base para a pesquisa desenvolvida. Primeiramente, são apresentadas algumas características do movimento do solo que são importantes no estudo de registros sísmicos. Na sequência, é feita uma exposição do problema de otimização, com alguns conceitos fundamentais e a formulação matemática, para então introduzir os algoritmos evolucionários e explicar qual foi o algoritmo evolucionário utilizado neste trabalho. E, por fim, algumas definições de terminologias, utilizadas em sismologia, são elucidadas.

3.1 Principais características do movimento do solo

Em engenharia sísmica, existem algumas características do movimento do solo que são importantes, são elas [Mohraz e Sadek, 2001; Clough e Penzien, 1993; Kramer, 1996]:

- Amplitude;
- Duração do movimento forte;
- Conteúdo de frequência. .

Essas três características são determinantes na resposta estrutural. As amplitudes do movimento do solo influenciam nas amplitudes das vibrações de uma estrutura. O conteúdo de frequência determina as características da resposta estrutural, por exemplo, se as frequências naturais da estrutura estão próximas às frequências da excitação sísmica, a estrutura poderá entrar em ressonância e conseqüentemente apresentar dano. A duração do movimento forte do solo está relacionada à gravidade do tremor, isto é, um movimento do solo de longa duração e com um pico de aceleração do solo moderado poderá causar mais dano do que um movimento do solo de baixa duração e um pico de aceleração do solo maior [Mohraz e Sadek, 2001].

3.1.1 Amplitude do movimento do solo

Normalmente são três os parâmetros que descrevem a amplitude do movimento do solo: pico de aceleração, de velocidade e de deslocamento.

O pico de aceleração corresponde ao maior valor absoluto da aceleração dos três acelerogramas registrados. É a medida mais utilizada devido a sua relação com as forças inerciais. As maiores forças dinâmicas horizontais induzidas em estruturas muito rígidas estão relacionadas com o pico de aceleração horizontal. As acelerações verticais não são muito utilizadas pois as margens de segurança, adotadas em construções, contra as forças verticais estáticas induzidas pela gravidade, geralmente, proporcionam adequada resistência às forças dinâmicas induzidas pelas acelerações sísmicas verticais [Kramer, 1996].

Na literatura, estão disponíveis equações que relacionam o pico de aceleração horizontal com alguns fatores como distância epicentral, magnitude, características da falha e condições de solo. Esses tipos de equações são chamadas de relações de atenuação. No trabalho de Mohraz e Sadek, 2001 são apresentadas algumas dessas relações.

O pico de velocidade horizontal é uma medida de mais acurácia para caracterizar movimentos do solo com frequências intermediárias. Na análise de estruturas, nessa faixa de frequência, o pico de velocidade horizontal é o parâmetro mais indicado para determinar o potencial de dano [Kramer, 1996].

Os picos de deslocamentos estão associados aos componentes de frequências mais baixas e são menos utilizados do que os picos de velocidade e de aceleração.

3.1.2 Duração do movimento forte do solo

A duração do movimento forte do solo, T_s , está relacionada com o tempo de liberação de energia de deformação acumulada pela ruptura ao longo da falha [Kramer, 1996]. Para fins de engenharia, somente esta parte do acelerograma é de interesse.

Vários trabalhos têm proposto modelos para determinar o tempo de duração do movimento forte do solo, entre eles destacam-se: Bolt, 1969, Trifunac e Brady, 1975 e McCann e Shah, 1979.

Bolt, 1969 propôs que a duração do movimento forte é dada pelo intervalo de tempo em que o pico da primeira e a da última aceleração ultrapassa um determinado valor (geralmente $0,05g$, onde g é a aceleração da gravidade). Trifunac e Brady, 1975 determinaram que a duração do movimento forte é dada pelo intervalo de tempo entre 5% e 95% da energia total registrada (valor da integral do acelerograma sísmico registrado, $a^R(t)$, ao quadrado $\int (a^R(t))^2 dt$). McCann e Shah, 1979 se basearam na raiz quadrática

média acumulada do acelerograma para estimar a duração do movimento forte do solo. Mohraz e Sadek, 2001 apresentam um comparativo entre esses métodos.

3.1.3 Conteúdo de frequência

O conteúdo de frequência descreve como a amplitude do movimento do solo é distribuída ao longo de diferentes frequências. Na literatura, existem, basicamente, três formas de caracterizar o conteúdo de frequência de um sismo, a saber: espectro de amplitude de Fourier, espectro de potência e espectro de resposta¹.

Uma distinção importante na teoria de processos aleatórios divide os mesmos em processos estacionários e processos transientes (isto é, não estacionários). Os espectros de Fourier e a função densidade espectral de potência, são aplicáveis somente no caso de processos estacionários. Seu emprego em outras situações (na definição da excitação sísmica, por exemplo, que por definição é não-estacionária) implica numa primeira aproximação, ou num erro, muitas vezes inadmissível. Já o espectro de resposta não admite, a priori, que a excitação seja estacionária.

3.1.3.1 Espectro de amplitude de Fourier

A transformada de Fourier, $\mathbf{F}(\omega)$, de um acelerograma sísmico registrado é dada por [Mohraz e Sadek, 2001]:

$$\mathbf{F}(\omega) = \int_0^{T_d} a^R(t) e^{-i\omega t} dt, \quad (3.1)$$

em que T_d é a duração do movimento do solo, ω é a frequência circular, t é o tempo e $i = \sqrt{-1}$. O espectro de amplitude de Fourier, $\mathbf{F}_A(\omega)$, é definido como a raiz quadrada da soma dos quadrados das partes real e imaginária de $\mathbf{F}(\omega)$ [Mohraz e Sadek, 2001]:

$$\mathbf{F}_A(\omega) = \sqrt{\left[\int_0^{T_d} a^R(t) \cos \omega t dt \right]^2 + \left[\int_0^{T_d} a^R(t) \sin \omega t dt \right]^2}. \quad (3.2)$$

O espectro de amplitude de Fourier mostra como a amplitude do movimento do solo é distribuída em relação a diferentes frequências [Kramer, 1996]. A Figura 3.1 ilustra o espectro de amplitude de Fourier para a componente Norte-Sul do sismo El Centro (1940).

¹O espectro de resposta não é uma representação direta da ação sísmica, mas sim uma representação dos seus efeitos sobre um conjunto de osciladores lineares com 1GDL.

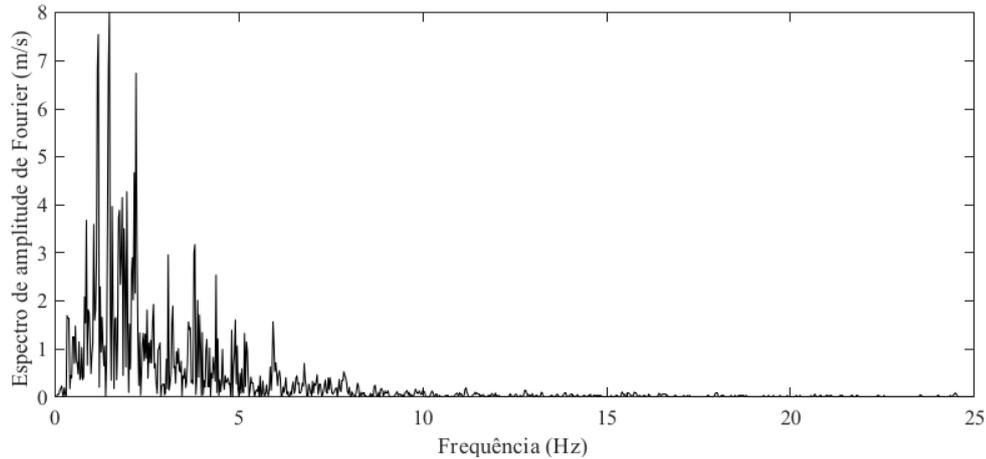


Figura 3.1 – Espectro de amplitude de Fourier para o componente NS do sismo El Centro (1940).

O período que corresponde ao valor de pico da amplitude de Fourier é denominado período predominante (geralmente é obtido com a suavização do espectro) e a faixa de frequência na qual algum nível de amplitude de Fourier é excedida é denominada largura de banda [Kramer, 1996].

3.1.3.2 Espectro de potência

O espectro de potência $\mathbf{G}(\omega)$ é utilizado para estimar as propriedades estatísticas do movimento do solo, assim como, para calcular a resposta estocástica usando técnicas de vibração aleatória [Kramer, 1996]. O espectro de potência é definido por [Mohraz e Sadek, 2001]:

$$\mathbf{G}(\omega) = \frac{1}{\pi T_d} |\mathbf{F}(\omega)|^2. \quad (3.3)$$

Um espectro de potência representativo do movimento do solo é calculado, na prática, através da média de espectros de potências de um conjunto de K acelerogramas [Mohraz e Sadek, 2001]:

$$\mathbf{G}(\omega) = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K \mathbf{G}_j(\omega), \quad (3.4)$$

em que $\mathbf{G}_j(\omega)$ é o espectro de potência do j -ésimo acelerograma. O espectro de potência é normalizado (área=1) dividindo seus valores pela área abaixo de sua curva [Kramer, 1996].

3.1.3.3 Espectro de resposta

O espectro de resposta (elástico) é uma ferramenta muito utilizada em projetos de estruturas e equipamentos. Um espectro de resposta descreve a resposta máxima de um oscilador linear com 1GDL, com razão de amortecimento (ξ), sujeito a uma determinada excitação, em função da frequência natural (ω_n em rad/s) ou período natural de vibração (T_n). Como o espectro de resposta é único para cada registro sísmico, pode-se dizer que ele também é uma forma de representar esse registro, contudo, essa representação não é direta, mas sim é uma representação dos efeitos do sismo sobre as estruturas.

Existe um espectro para cada parâmetro de interesse da resposta desejado:

$$u_{max}(T_n, \xi) = \max |\mathbf{u}(t, T_n, \xi)|, \quad (3.5)$$

$$\dot{u}_{max}(T_n, \xi) = \max |\dot{\mathbf{u}}(t, T_n, \xi)|, \quad (3.6)$$

$$\ddot{u}_{max}(T_n, \xi) = \max |\ddot{\mathbf{u}}(t, T_n, \xi)|, \quad (3.7)$$

em que u_{max} é o espectro de resposta de deslocamento relativo, \dot{u}_{max} é o espectro de resposta de velocidade relativa e \ddot{u}_{max} é o espectro de resposta de aceleração (aceleração absoluta), \mathbf{u} , $\dot{\mathbf{u}}$ e $\ddot{\mathbf{u}}$ são, nesta ordem, o deslocamento, a velocidade e aceleração do oscilador e podem ser obtidos resolvendo-se a seguinte equação linear do movimento:

$$m\ddot{\mathbf{u}}(t) + c\dot{\mathbf{u}}(t) + k\mathbf{u}(t) = -m\mathbf{a}^R(t), \quad (3.8)$$

onde m , c e k , são a massa, o coeficiente de amortecimento viscoso e a rigidez do oscilador. A Equação 3.8 pode ser resolvida utilizando algum método numérico de integração de equações diferenciais, como o método de Newmark, diferenças finitas, método de Wilson, entre outros.

Existem também espectros de resposta que são calculados diretamente do espectro de resposta de deslocamento relativo. Esses espectros denominam-se espectros de resposta de pseudo-velocidade (\mathbf{E}_{pv}) e de pseudo-aceleração (\mathbf{E}_{pa}) e são definidos por [Chopra, 2012]:

$$\mathbf{E}_{pv} = \omega_n u_{max}, \quad (3.9)$$

$$\mathbf{E}_{pa} = \omega_n^2 u_{max}. \quad (3.10)$$

Para $\xi = 0$ o espectro de velocidade relativa e o espectro de pseudo-velocidade diferem, numericamente, muito pouco, exceto para osciladores com longo período de vibração. Para sistemas amortecidos a diferença é maior e pode aumentar para 20% quando $\xi = 0,2$ [Clough e Penzien, 1993].

Para $0 < \xi < 0,2$, a relação entre o espectro de aceleração absoluta e o espectro de pseudo-aceleração é basicamente satisfeita [Clough e Penzien, 1993].

Como visto, os espectros de resposta informam a resposta estrutural à excitação causada por um sismo, entretanto, existe uma limitação à sua aplicação: a resposta deve ser elástica linear, ou seja, eles não podem representar com exatidão o dano esperado, uma vez que, o dano envolve deformações inelásticas (não-lineares).

Tendo em vista a aleatoriedade do fenômeno, cada sismo que ocorreu ou que venha a ocorrer, em uma determinada região, pode ter características completamente diferentes. Em virtude disso, o projeto de construções resistentes a sismos (sismo-resistentes) e a verificação de segurança de construções existentes são regulamentados por normas técnicas que adotam espectros de respostas que são suavizados, a esses espectros dá-se o nome de espectro de resposta de projeto.

O espectro de resposta de projeto representa a possível sismicidade no local, sua elaboração considera o efeito de vários sismos e cada espectro é, geralmente, obtido por procedimentos estatísticos². A Figura 3.2 ilustra o espectro de resposta de projeto regulamentado pela NBR 15.421 [ABNT, 2006], para um pico de aceleração do solo de $0,15g$ e classe do terreno D.

3.1.4 Outros parâmetros do movimento do solo

Outros parâmetros de movimento do solo, que frequentemente aparecem na literatura, são: a raiz do valor quadrático médio da aceleração, a intensidade de Arias e a função de Husid.

A raiz do valor quadrático médio da aceleração do solo, a_{rms} , é um parâmetro que inclui os efeitos do conteúdo de frequência e amplitude do movimento forte do solo e é definida como [Kramer, 1996]:

$$a_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} [a^R(t)]^2 dt}, \quad (3.11)$$

²Consultar Chopra, 2012 para mais detalhes sobre a construção dos espectros de resposta de projeto.

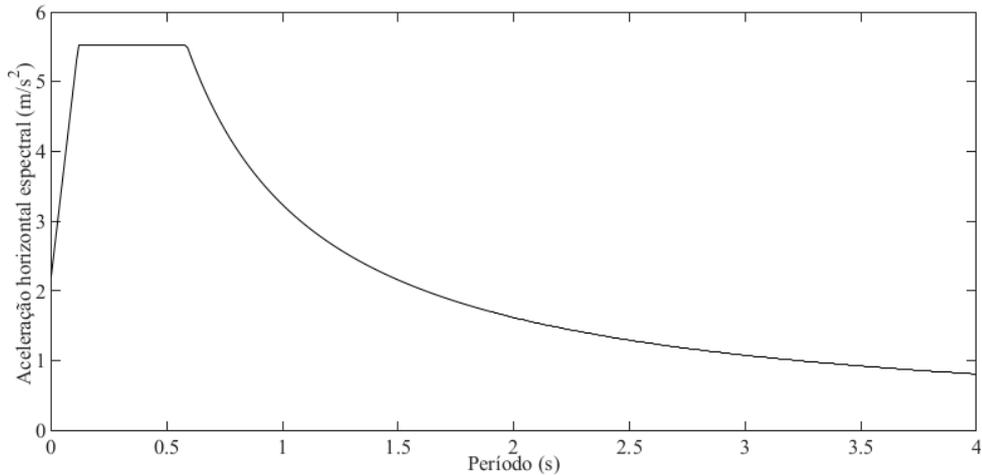


Figura 3.2 – Espectro de resposta de projeto, regulamentado pela NBR 15.421 [ABNT, 2006], para um pico de aceleração do solo de $0,15g$ e classe do terreno D.

A intensidade de Arias, I_a , é um parâmetro relacionado ao valor da a_{rms} e é definida por [Kramer, 1996]:

$$I_a = \frac{\pi}{2g} \int_0^{\infty} [a^R(t)]^2 dt. \quad (3.12)$$

A função de Husid, $H(t)$, nada mais é do que o valor da intensidade de Arias acumulada [Husid, 1969]:

$$H(t) = \frac{\int_0^t [a^R(t)]^2 dt}{\int_0^{T_d} [a^R(t)]^2 dt}. \quad (3.13)$$

Na Equação 3.13 $0 \leq H(t) \leq 1$.

3.2 Otimização

Nesta seção é realizada uma breve exposição do problema de otimização, com alguns conceitos básicos e a sua formulação matemática, para então introduzir os algoritmos evolucionários e explicar qual o algoritmo utilizado neste trabalho.

3.2.1 Conceitos básicos de otimização

Antes de definir, matematicamente e conceitualmente, um problema de otimização, torna-se necessário, para um melhor entendimento, explicar a nomenclatura básica utilizada em problemas de otimização:

- Função Objetivo: É a representação matemática da medida que deseja-se otimizar.

Segundo Rao, 2009 a escolha da função objetivo pode ser uma das decisões mais importantes do problema.

- Variável de projeto: São os parâmetros que são alterados durante o processo de otimização. Esses parâmetros devem satisfazer as restrições do problema.
- Restrições: São condições que devem ser cumpridos durante o processo de otimização. Podem ser restrições de igualdade, restrições de desigualdade ou restrições laterais às variáveis de projeto.
- Espaço de busca ou domínio viável: É a região que satisfaz todas às restrições do problema. As soluções do problema devem estar dentro do espaço de busca.
- Ponto Ótimo: Corresponde ao vetor das variáveis de projeto que minimiza ou maximiza a função objetivo e que satisfaz todas as restrições impostas ao problema.
- Valor Ótimo: É o valor da função objetivo correspondente ao ponto ótimo.

3.2.2 Problema de otimização

Otimização é o ato de obter o melhor resultado sob determinada circunstância [Rao, 2009]. Um problema de otimização consiste em encontrar um resultado otimizado, minimizando ou maximizando uma função objetivo, através da melhor seleção de variáveis de projeto, sendo que essa seleção de variáveis de projeto deve satisfazer restrições que porventura sejam necessárias ao problema. Matematicamente, um problema de otimização, com restrições, possui a seguinte estrutura:

$$\text{Encontrar } \mathbf{X} = \left\{ \begin{array}{c} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{array} \right\}, \text{ que minimiza ou maximiza } f_o(\mathbf{X})$$

Sujeito às restrições:

$$\begin{aligned} h_\alpha(\mathbf{X}) &\leq 0, \quad \alpha = 1, 2, \dots, d \\ l_\beta(\mathbf{X}) &= 0, \quad \beta = 1, 2, \dots, r \\ x_{inf} &\leq x_p \leq x_{sup}, \quad p = 1, 2, \dots, o \end{aligned}$$

(3.14)

em que \mathbf{X} é o vetor n -dimensional de variáveis de projeto, $f_o(\mathbf{X})$ é a função objetivo, $h_\alpha(\mathbf{X})$ é a α -ésima restrição de desigualdade, $l_\beta(\mathbf{X})$ é a β -ésima restrição de igualdade, d é o número de restrições de desigualdades, r é o número de restrições de igualdades, x_{inf} e x_{sup} são o limite inferior e superior, respectivamente, da variável de projeto x_p .

Não existe um único método para resolver todos os problemas de otimização com eficiência. Uma intensa atividade de pesquisa resultou em muitos algoritmos de otimização. Entre estes métodos estão os algoritmos evolucionários que pertencem a uma classe moderna e avançada de algoritmos de otimização e têm atraído muita atenção da comunidade acadêmica nas últimas décadas.

3.2.3 Algoritmos evolucionários

Nem todos os problemas de otimização são fáceis de se resolver. Existem alguns problemas que são intratáveis para métodos tradicionais de otimização. Os algoritmos evolucionários (AEs) podem ser aplicados a problemas em que soluções determinísticas não estão disponíveis ou geralmente levam a resultados insatisfatórios.

Os AEs oferecem algumas vantagens para pesquisadores que enfrentam problemas difíceis de otimização, entre estas vantagens estão a simplicidade da abordagem, sua flexibilidade, sua resposta robusta à mudança de circunstâncias, entre outras [Fogel, 1999]. Matematicamente, eles são métodos de ordem zero, ou seja, necessitam apenas de uma avaliação da função objetivo, eles podem trabalhar com problemas não-lineares, definidos em espaços de busca discretos, contínuos ou mistos, irrestritos ou restritos. Além disso, a ergodicidade dos operadores de evolução os torna globais em escopo (em probabilidade) [Michalewicz et al., 1999].

Os AEs são métodos de otimização estocástica³ inspirados tanto na seleção natural quanto na genética natural. O processo inicializa-se gerando uma população aleatória de indivíduos. Essa população evolui, seguindo o princípio Darwiniano da sobrevivência do mais apto. Novos indivíduos são gerados (descendentes) utilizando alguns operadores de variação, como mutação e cruzamento/recombinação⁴. A probabilidade de sobrevivência das soluções recém-geradas depende de sua aptidão (quão bem elas se comportam em

³A otimização estocástica ou probabilística, lida com problemas de otimização descritos por variáveis estocásticas. Dependendo da natureza do problema, as fontes de variáveis estocásticas podem ser várias [Rao, 2009].

⁴O operador de cruzamento/recombinação permite cruzar a informação dos pais enquanto a transmite para os seus descendentes e a mutação introduz inovação à população.

relação ao problema de otimização em questão). As melhores soluções são mantidas com alta probabilidade e as piores são descartadas [Michalewicz et al., 1999]. Este processo é usado atualmente por três diferentes correntes principais de AEs: Estratégias Evolutivas, Algoritmos Genéticos e Programação Evolutiva [Back, 1996]. Os detalhes dessas três correntes não serão abordados neste trabalho, para isso remete-se ao leitor a consultar a obra de Back, 1996.

3.2.3.1 Backtracking Search Optimization Algorithm (BSA)

O BSA, proposto por Civicioglu, 2013, é um AE utilizado para resolver problemas de otimização numérica de valor real. O desenvolvimento do BSA foi motivado por estudos que tentam desenvolver algoritmos de busca mais simples e eficazes. Segundo Civicioglu, 2013, em comparação com outros algoritmos de busca, o BSA⁵ tem as seguintes vantagens:

- Possui um único parâmetro de controle e o desempenho da solução de problemas com o BSA não é mais sensível ao valor inicial desse parâmetro;
- Tem uma estrutura simples, eficaz, rápida e capaz de resolver problemas multimodais e que permite a fácil adaptação a diferentes problemas de otimização;
- Inclui dois novos operadores de cruzamento e mutação, suas estratégias para gerar populações experimentais e controlar a amplitude da matriz de direção de busca e dos limites do espaço de busca proporcionam capacidades de exploração muito poderosas;
- Possui uma memória na qual armazena uma população de uma geração anterior escolhida aleatoriamente para uso na geração da matriz de direção de busca, o que permite aproveitar as experiências adquiridas de gerações anteriores quando gera uma população experimental.

A eficácia do BSA foi testada em 78 problemas por Civicioglu, 2013. Os resultados mostraram que a resolução com o BSA obteve mais sucesso se comparada com seis algoritmos evolucionários amplamente utilizados, a saber: *Particle Swarm Optimization* (PSO), *Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy* (CMAES), *Artificial Bee*

⁵Os códigos do BSA estão disponíveis em Matlab e podem ser acessados através de Civicioglu, 2018.

Colony (ABC), *Adaptive Differential Evolution* (JDE), *Comprehensive Learning Particle Swarm Optimizer* (CLPSO) e *Self-Adaptive Differential Evolution* (SADE).

Segundo Civicioglu, 2013, o BSA pode ser dividido em cinco etapas: Inicialização, Seleção-I, Mutação, Cruzamento e Seleção-II, Figura 3.3.

1. Inicialização

A população P é inicializada através da Equação 3.15:

$$P_{i,j} \sim U(low_j, up_j) \quad (3.15)$$

para $i = 1, 2, 3, \dots, N$ e $j = 1, 2, 3, \dots, D$, onde N e D são, respectivamente, o tamanho da população e a dimensão do problema, U é a distribuição uniforme e P_i é o indivíduo-alvo na população P .

2. Seleção I

A seleção I determina a população histórica $oldP$ a ser usada para determinar a direção da busca. A população histórica inicial é dada por:

$$oldP_{i,j} \sim U(low_j, up_j) \quad (3.16)$$

O BSA tem a opção de redefinir $oldP$ no início de cada iteração, através da Equação 3.17:

$$\text{Se } a < b \text{ então } oldP := P | a, b \sim U(0, 1), \quad (3.17)$$

em que $:=$ é a operação de atualização.

Após $oldP$ ser determinada, a Equação 3.18 é utilizada para alterar aleatoriamente a ordem dos indivíduos na $oldP$:

$$oldP := \text{permuting}(oldP) \quad (3.18)$$

3. Mutação

O processo de mutação gera a forma inicial da população experimental, denominada *Mutant*, através de:

$$Mutant = P + F(oldP - P), \quad (3.19)$$

em que F controla a amplitude da matriz direção-busca ($oldP$). Uma vez que a população histórica é usada no cálculo da matriz de busca-direção, o BSA gera uma população experimental, tirando proveito parcial de suas experiências de gerações anteriores.

4. Cruzamento

O cruzamento gera a forma final da população experimental, denominada T .

O valor inicial da população experimental é $Mutant$, é definido na Equação 3.19. Os indivíduos experimentais com melhores valores de aptidão para o problema de otimização são usados para evoluir os indivíduos da população-objetivo. A etapa de cruzamento do BSA tem dois passos. O primeiro passo é calcular uma matriz binária de valor inteiro (map) de tamanho $N \cdot D$, que indica os indivíduos de T a serem manipulados usando os indivíduos relevantes de P . Se $map_{n,m} = 1$, onde $n \in \{1, 2, 3, \dots, N\}$ e $m \in \{1, 2, 3, \dots, D\}$, T é atualizado com $T_{n,m} := P_{n,m}$.

A etapa de cruzamento proposta pelo BSA é bem diferente das estratégias de cruzamento utilizadas no algoritmo de evolução diferencial e suas variantes. O parâmetro de taxa de mistura ($mixrate$), na etapa de cruzamento do BSA, controla o número de elementos de indivíduos que sofrerão mutação em uma tentativa usando $\lceil mixrate \rceil \cdot rnd \cdot D$, onde $rnd \sim U(0, 1)$.

Duas estratégias pré-definidas são usadas aleatoriamente para definir o map . A primeira usa $mixrate$ e a segunda permite que um único indivíduo escolhido aleatoriamente sofra mutação em cada tentativa. A etapa de cruzamento do BSA é mais complexa que os processos usados no algoritmo de evolução diferencial. Alguns indivíduos da população do estudo, obtidos no final do estágio de cruzamento, podem ultrapassar os limites de espaço de busca permitido como resultado da estratégia de mutação.

5. Seleção II

Na seleção II, os T_i s que possuem melhores valores de aptidão do que os correspondentes P_i s, são usados para atualizar os P_i s. Se o melhor indivíduo de P (P_{best}) tiver um melhor valor de aptidão do que o valor mínimo global obtido até agora pelo BSA, o minimizador global é atualizado para ser P_{best} e o valor mínimo global é atualizado para ser o valor de ajuste do P_{best} .

```

Input: ObjFun, N, D, maxcycle, mixrate, low1:D, up1:D
Output: globalminimum, globalminimizer
// rnd ~ U(0,1), rndn ~ N(0,1), w = rndint(*), rndint(*) ~ U(1,*) | w ∈ {1,2,3,...,j}
function bsa(ObjFun, N, D, maxcycle, low,up)
//Inicialização
globalminimum = inf
for i from 1 to N do
    for j from 1 to D do
        Pij = rnd · (upj - lowj) + lowj //Inicialização da população, P.
        oldPij = rnd · (upj - lowj) + lowj //Inicialização da oldP.
    end
    fitnessPi = ObjFun(Pi)
end
for iteration from 1 to maxcycle do
    //Seleção I
    if (a < b | a, b ~ U(0,1)) then oldP := P end
    oldP := permuting(oldP)
    //Geração da População experimental
    //Mutação
    mutant = P + 3 · rndn · (oldP - P)
    //Cruzamento
    map1:N,1:D = 1
    if (c < d | c, d ~ U(0,1)) then
        for i from 1 to N do
            mapi,u(1:mixrate·rnd·D)} = 0 | u = permuting ((1,2,3,...,D))
        end
    else
        for i from 1 to N do
            mapi,rnd·D = 0
        end
    end
    //Geração da população experimental
    T := mutant
    for i from 1 to N do
        for j from 1 to D do
            if mapi,j = 1 then Tij := Pij
            end
        end
    end
    // Mecanismo de controle
    for i from 1 to N do
        for j from 1 to D do
            if (Tij < lowj) ou (Tij > upj) then
                Tij = rnd · (upj - lowj) + lowj
            end
        end
    end
end
//Seleção II
fitnessT = ObjFnc(T)
for i from 1 to N do
    if fitnessTi < fitnessPi then
        fitnessPi := fitnessTi
        Pi = Ti
    end
end
fitnessPbest = min (fitnessP) | best ∈ {1,2,3,...,N}
if fitnessPbest < globalminimum then
    globalminimum := fitnessPbest
    globalminimizer := Pbest
//Exporta o globalminimum e o globalminimizer
end
end

```

Figura 3.3 – Pseudocódigo do BSA. Adaptado de Civicioglu, 2013, pág. 8125.

3.3 Conceitos básicos de sismologia

Nesta seção são apresentados algumas definições de terminologias utilizadas na pesquisa.

3.3.1 Epicentro, hipocentro e distâncias da fonte

Os terremotos ocorrem devido ao deslizamento da rocha ao longo de uma falha. O deslizamento pode ocorrer por vários quilômetros quadrados na superfície do plano da falha. O ponto em que o deslizamento se inicia e as primeiras ondas se originam é chamado de foco ou hipocentro. O hipocentro está localizado a uma profundidade abaixo da superfície, denominada profundidade focal ou profundidade hipocentral. O ponto na superfície do solo, acima do hipocentro, é chamado de epicentro. A Figura 3.4 ilustra essas notações geométricas.

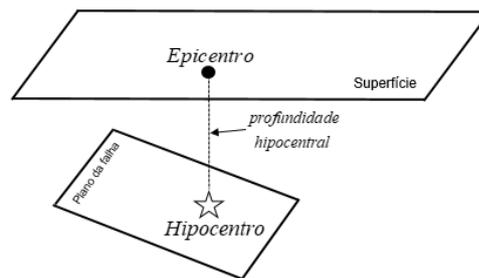


Figura 3.4 – Notação geométrica de um terremoto.

A distância entre o epicentro e a estação ou ponto de interesse denomina-se distância epicentral e a distância entre o hipocentro e a estação ou ponto de interesse denomina-se distância focal ou distância hipocentral, Figura 3.5.

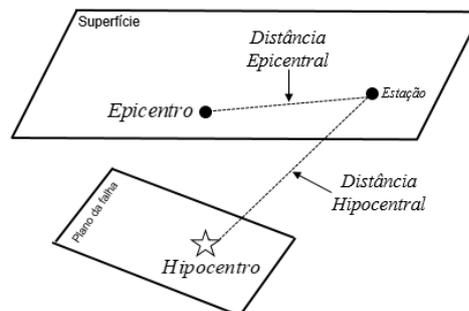


Figura 3.5 – Distâncias da fonte à estação.

3.3.2 Ondas sísmicas

A agitação do solo provocada por um terremoto, geralmente, é consequência de dois tipos de ondas sísmicas: as ondas de corpo e as ondas de superfície.

As ondas de corpo viajam pelo interior da Terra, entre elas estão as ondas longitudinais ou primárias (também denominadas ondas P) e as ondas transversais ou secundárias (também denominadas ondas S). As ondas P movimentam as partículas na mesma direção da propagação da onda, enquanto as ondas S movimentam as partículas na direção perpendicular à propagação da onda. As ilustrações genéricas dos movimentos das partículas das ondas P e S são dadas nas duas primeiras imagens da Figura 3.6. As ondas S são ainda decompostas em ondas SH e SV de acordo com os movimentos das partículas nos planos horizontal e vertical, respectivamente [Sucuoglu e Akkar, 2014].

A velocidade das ondas de corpo depende da densidade e das propriedades elásticas da rocha e do solo por onde se propagam. As velocidades de propagação de ondas P e S, considerando um meio elástico isotrópico, denotadas por V_P e V_S , respectivamente, são expressas por [Elnashai e Di Sarno, 2008]:

$$V_P = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}, \quad (3.20)$$

$$V_S = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}, \quad (3.21)$$

em que ρ é a densidade, ν é o coeficiente de Poisson e E é o módulo de Young. Assumindo $\nu=0,25$, a velocidade das ondas P é aproximadamente $\sqrt{3}V_S$ [Elnashai e Di Sarno, 2008].

As ondas de superfície se propagam pela superfície da Terra e são geradas pelas interferências construtivas das ondas de corpo. Elas são compostas por ondas de Love (L) e ondas de Rayleigh (R). As ondas de Love são geradas pela interferência construtiva das ondas SH e provocam um movimento horizontal das partículas, perpendicularmente à direção de propagação da onda. As ondas de Rayleigh são geradas pela interferência construtiva das ondas P e SV e provocam um movimento elíptico retrógrado (no sentido anti-horário) das partículas [Elnashai e Di Sarno, 2008]. As ilustrações genéricas dos movimentos das partículas das ondas de Rayleigh e das ondas de Love são dadas nas duas últimas imagens da Figura 3.6. Assumindo $\nu=0,25$, a velocidade das ondas de Rayleigh é aproximadamente $0,92V_S$ [Elnashai e Di Sarno, 2008].

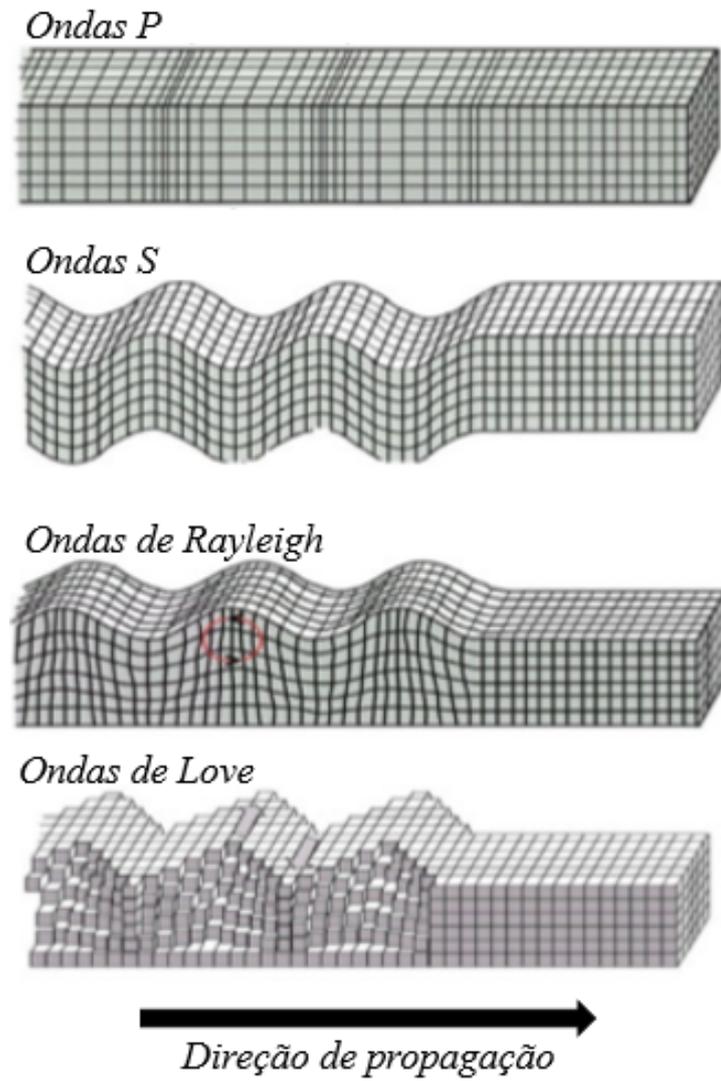


Figura 3.6 – Ondas sísmicas. Adaptado de Sucuoglu e Akkar 2014, pág. 20.

4 SIMULAÇÃO DOS TRÊS COMPONENTES DE ACELEROGRAMAS SÍSMICOS COM CARACTERÍSTICAS PREDETERMINADAS

Este capítulo descreve uma metodologia para a geração simultânea dos três componentes da aceleração do solo com características predeterminadas, isto é, pico de aceleração do solo, duração do movimento forte e conteúdo de frequência. O modelo utiliza um método de otimização evolutiva para determinar os parâmetros apropriados de amplitude e frequência, de um modelo matemático relativamente simples, que permite gerar os três componentes da aceleração sísmica simultaneamente.

A metodologia desenvolvida deu origem à publicação do artigo científico no *Bulletin of the Seismological Society of America*¹:

- Dalla Chiesa D, Miguel L. F. F.. Methodology for simulation of the three components of seismic acceleration. *Bulletin of the Seismological Society of America* 2019; 109 (6): 2427-2436. <https://doi.org/10.1785/0120190042>.

4.1 Equação para a geração dos três componentes da aceleração do solo

Assume-se que a excitação sísmica, em certo ponto da superfície da rocha, é constituída por um trem de ondas sísmicas e que essas ondas produzam acelerações nas três direções ortogonais, com amplitudes diferentes. Com base nessa premissa, o presente trabalho parte da hipótese de que os três componentes da aceleração no ponto considerado resultam da superposição de N_j ondas, na forma:

$$a_q(t) = \sum_{j=1}^{N_j} a_{qj}(t), \quad (4.1)$$

em que $a_q(t)$ é a aceleração do solo na direção q ($q = 1, 2, 3$) e $a_{qj}(t)$ corresponde a aceleração de cada onda j , na direção ortogonal q . Cada onda produz acelerações na forma:

$$a_{qj}(t) = e_q(t) A_{qj} \sin(2\pi f_j t + \varphi_j), \quad (4.2)$$

no qual A_{qj} , f_j and φ_j representam a amplitude, a frequência, em Hz , e o ângulo de fase, em rad/s , respectivamente, de cada um dos três componentes da onda j e $e_q(t)$ é a função que modula a forma de cada onda na direção q .

¹O periódico possui, atualmente, Qualis A1 na área de Geociências.

Os parâmetros A_{qj} e f_j são as variáveis de projeto determinadas pelo algoritmo evolucionário. Assim, o problema se resume em encontrar as amplitudes e as frequências de cada onda j que minimiza a função objetivo.

4.2 Função Modulação

O cálculo da função modulação é dado pela abordagem proposta por Dugundji, 1958. Primeiro, é calculada a função pré-envelope $z_q(t)$ do acelerograma sísmico registrado, $a_q^R(t)$:

$$z_q(t) = a_q^R(t) + ia_{q_{hilbert}}^R(t), \quad (4.3)$$

em que $i = \sqrt{-1}$ e $a_{q_{hilbert}}^R(t)$ é a transformada de Hilbert do acelerograma sísmico registrado, dada por:

$$a_{q_{hilbert}}^R(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{a_q^R(\tau)}{t - \tau} d\tau. \quad (4.4)$$

Usando a função pré-envelope, é possível calcular a função envelope conforme segue:

$$e_q(t) = \sqrt{(a_q^R(t))^2 + (a_{q_{hilbert}}^R(t))^2}. \quad (4.5)$$

4.3 Problema de otimização

O problema de otimização consiste em encontrar os parâmetros A_{kj} e f_j de cada onda j . As variáveis de projeto são determinadas com o objetivo de minimizar a função objetivo dada pela Equação 4.6:

$$f_o = \sum_{q=1}^3 \left(\sum_{r=1}^{N_{dados}} (S_q^R(f_r) - S_q(f_r))^2 + W|Ts_q^R - Ts_q| \right), \quad (4.6)$$

em que $S_q^R(f)$ e $S_q(f)$ são os espectros de potência dos acelerogramas registrados e simulados, na direção q , respectivamente, Ts_q^R e Ts_q são, nesta ordem, a duração do movimento forte dos acelerogramas registrados e simulados, na direção q , W é o fator de ponderação e N_{dados} é o número de dados do espectro de potência.

Nesta etapa, são estipuladas restrições laterais às variáveis de projeto, ou seja: $A_{min} \leq A_{qj} \leq A_{max}$ e $f_{min} \leq f_j \leq f_{max}$, nos quais os parâmetros A_{min} , A_{max} , f_{min} e f_{max} são a amplitude mínima, amplitude máxima, frequência mínima e frequência máxima, respectivamente, de cada onda sísmica. Essas restrições dependem do conteúdo da

frequência e das amplitudes desejadas para o acelerograma a ser simulado.

É importante enfatizar que o método proposto é flexível e diferentes variáveis de projeto e/ou diferentes funções objetivos podem ser adotadas.

Na função objetivo, Equação 4.6, não consta nenhum parâmetro referente ao pico de aceleração do solo, assim para encontrar a concordância entre o pico de aceleração do solo do acelerograma registrado e o acelerograma simulado é realizada a normalização dos acelerogramas simulados. Esse processo é realizado antes da avaliação da função objetivo.

Para determinar os parâmetros de cada onda, é utilizado o algoritmo de otimização evolucionária BSA, conforme explicado na Seção 3.2.3.1.

4.4 Metodologia passo a passo

O procedimento proposto para a simulação simultânea dos três componentes dos acelerogramas sísmicos é ilustrado na Figura 4.1. Algumas observações importantes:

- Os três componentes de acelerogramas sísmicos já estão corrigidos e filtrados. Se o processamento for necessário, é interessante observar os trabalhos de Paolucci et al., 2011 e Boore e Bommer, 2005, por exemplo.
- A duração do movimento forte é determinada usando o método proposto por Trifunac e Brady, 1975, o qual foi explicado na Seção 3.1.2.
- A simulação de acelerogramas sísmicos artificiais pode levar a trajetórias de velocidade que possuem dados irrealistas [Cacciola, 2010]. Para resolver essa situação, foi realizada a correção da linha de base de cada acelerograma sísmico simulado. Existem várias maneiras de realizar essa correção. Neste trabalho, a subtração do acelerograma de seu valor médio foi adotada.
- Os parâmetros de entrada do BSA são: número máximo de iterações, tamanho da população, número total de ondas sísmicas, valores mínimo e máximo de cada variável de projeto, dados do espectro de potência, da duração do movimento forte do solo e da aceleração de pico de cada componente.
- Cada acelerograma sísmico simulado é normalizado por meio do pico de aceleração do respectivo componente registrado.

- O número máximo de iterações foi definido com base na convergência da função objetivo.

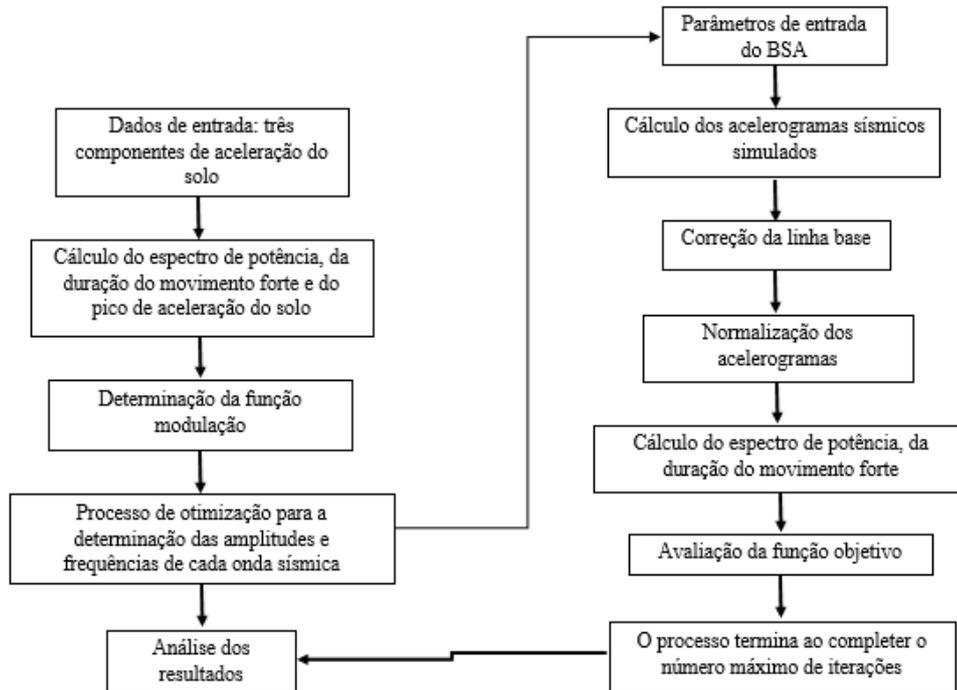


Figura 4.1 – Fluxograma do procedimento proposto para simular os três componentes da aceleração sísmica.

5 SIMULAÇÃO DOS TRÊS COMPONENTES DE ACELEROGRAMAS SÍSMICOS EM LOCAIS PRÓXIMOS A UMA ESTAÇÃO SISMOLÓGICA

Este capítulo descreve uma metodologia para a geração simultânea dos três componentes da aceleração do solo em locais próximos a uma estação sismológica. Cada componente de aceleração do solo é determinado por um somatório de várias ondas sísmicas, cujos parâmetros, isto é, amplitude, frequência, duração, tempo de chegada e direção, são determinados usando um algoritmo de otimização evolutiva.

5.1 Hipóteses adotadas

O modelo desenvolvido para a análise subsequente é baseado nas seguintes premissas:

- As ondas sísmicas se originam no hipocentro. O erro de modelo resultante é desprezível quando as dimensões da área de ruptura são muito menores que a distância hipocentral, D_{hip} . O cálculo da área de ruptura é obtido através de relações empíricas formuladas por Wells e Coppersmith, 1994;
- A influência das ondas de superfície é negligenciada, isto é, a excitação sísmica é assumida como sendo produzida apenas pelas ondas de corpo. Essa simplificação deve ser aplicada sempre que a distância epicentral for menor ou comparável à profundidade focal;
- As refrações e reflexões das ondas sísmicas não são consideradas nos cálculos;
- A velocidade de cada onda sísmica não muda durante a trajetória e, portanto, é estimada pela velocidade média do meio rochoso. Trajetórias são assumidas como linhas retas;
- As ondas sísmicas não se originam na trajetória da fonte até a estação.

5.2 Modelo analítico de cada onda sísmica

Supõe-se que a excitação sísmica se origina no hipocentro e consiste em um trem de ondas sísmicas de corpo. Essas ondas têm amplitudes, frequências, durações, número

de ciclos e tempos de chegada diferentes e geram acelerações em três direções ortogonais, ou seja, $a_1(t)$, $a_2(t)$ e $a_3(t)$.

Cada onda sísmica é modelada por uma função Gaussiana multiplicada por uma função seno, isto é, cada onda sísmica é modelada pela equação que define a parte imaginária da *wavelet* de Morlet. A formulação matemática da *wavelet* de Morlet complexa pode ser consultada em Domingues et al., 2016. Assim a aceleração de cada onda, $a(t)$, é expressa por:

$$a(t) = A \operatorname{sen}(2\pi ft) e^{\frac{-t^2}{2s^2}} \quad t_a \leq t \leq t_a + t_d, \quad (5.1)$$

em que A é a amplitude, f é a frequência, em Hz, t é o tempo, s é o parâmetro que controla a largura da onda, t_a é o tempo de chegada da onda na estação sismológica e t_d é a duração da onda. Observe que $t_d = \frac{n}{f}$, em que n é o número de ciclos. A Figura 5.1 ilustra a aceleração de cada onda, modelada pela Equação 5.1.

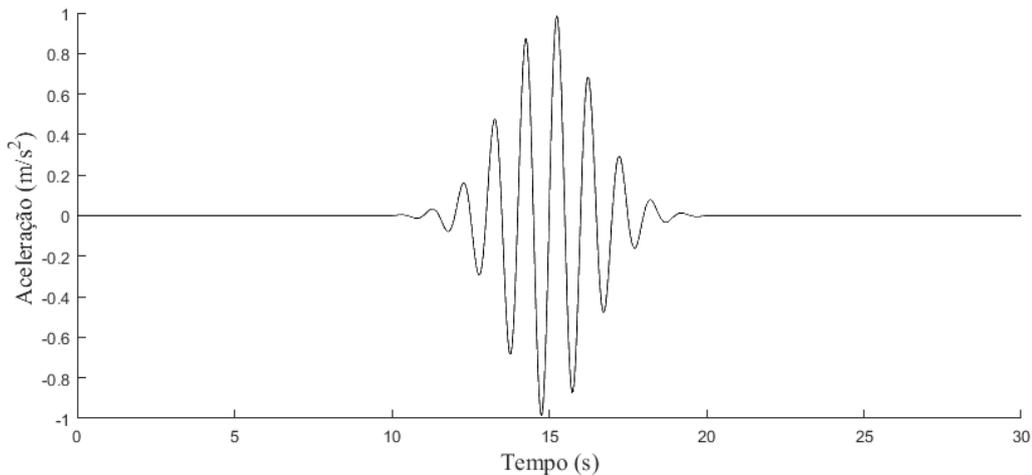


Figura 5.1 – Modelo de onda sísmica.

De acordo com Kitada et al., 1983, Masao et al., 1980, usaram uma equação similar para gerar excitações sísmicas.

A seleção da forma de onda conforme expresso na Equação 5.1 foi objeto de estudo pela autora. Os tipos de formas de ondas analisadas assim como os seus respectivos resultados são ilustrados na Seção 7.4.

Cada onda sísmica, ao atingir um ponto na superfície terrestre, produz acelerações em cada um dos eixos de referência ortogonais, com diferentes amplitudes. Considerando

o modelo proposto na Equação 5.1 e com base na Figura 5.2, as projeções nos eixos coordenados 1 (EW), 2 (NS) e 3 (vertical) são dadas pelas seguintes equações:

$$a_1(t) = A_1 \text{sen}(2\pi ft) e^{\frac{-t^2}{2s^2}} \quad t_a \leq t \leq t_a + t_d, \quad (5.2)$$

$$a_2(t) = A_2 \text{sen}(2\pi ft) e^{\frac{-t^2}{2s^2}} \quad t_a \leq t \leq t_a + t_d, \quad (5.3)$$

$$a_3(t) = A_3 \text{sen}(2\pi ft) e^{\frac{-t^2}{2s^2}} \quad t_a \leq t \leq t_a + t_d. \quad (5.4)$$

em que $A_1 = A \text{sen}\phi \text{sen}\theta$, $A_2 = A \text{sen}\phi \text{cos}\theta$, $A_3 = A \text{cos}\phi$. Os ângulos ϕ e θ indicam a direção principal do movimento. ϕ é medido em relação ao eixo vertical e varia na faixa de 0 a 90° , enquanto θ varia de acordo com a direção sismo-estação (medido em relação ao Norte), az_{S-E} ($az_{S-E} - 90^\circ \leq \theta \leq az_{S-E} + 90^\circ$).

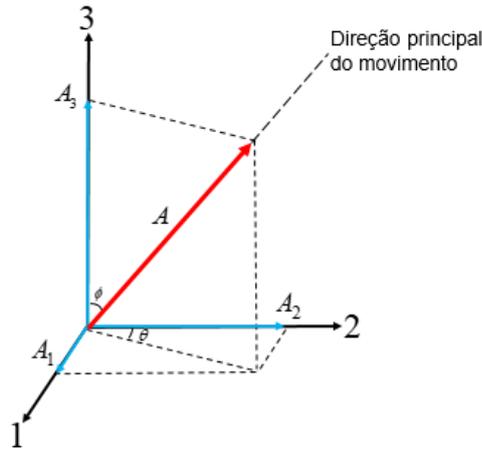


Figura 5.2 – Ilustração da direção de propagação de cada onda sísmica.

A partir das Equações 5.1-5.4, a aceleração de cada componente, ao longo de cada direção ortogonal q , pode ser definida pela superposição de N_j ondas, como segue:

$$a_q(t) = \sum_{j=1}^{N_j} A_{qj} \text{sen}(2\pi f_j t) e^{\frac{-t^2}{2s_j^2}} \quad (5.5)$$

$$A_{1j} = A_j \text{sen}\phi_j \text{sen}\theta_j, \quad A_{2j} = A_j \text{sen}\phi_j \text{cos}\theta_j, \quad A_{3j} = A_j \text{cos}\phi_j.$$

Tendo definido os três componentes da aceleração sísmica, Equação 5.5, o pro-

blema se resume em encontrar os parâmetros apropriados para cada onda que permitam gerar os três componentes em uma determinada estação sismológica. Para determinar os parâmetros de cada onda, é utilizado o algoritmo de otimização evolucionária BSA, conforme explicado na Seção 3.2.3.1.

5.3 Problema de otimização

O problema de otimização consiste em encontrar os parâmetros A_j , f_j , t_{aj} , n_j , ϕ_j e θ_j , de cada onda j , que incide na estação sismológica, onde os três componentes foram registrados. A função objetivo, f_o , corresponde a minimização da diferença ao quadrado entre os três componentes dos acelerogramas simulados, $a_q(t)$, e os três componentes dos acelerogramas registrados, $a_q^R(t)$, cuja formulação matemática é dada por:

$$f_o = \sum_1^3 \left(W_q \sum_{y=1}^{N_{dados}} (a_q^R(t_y) - a_q(t_y))^2 \right), \quad (5.6)$$

em que W_q é um fator de ponderação na direção q .

Todas as variáveis de projeto são geradas aleatoriamente. As variáveis A_j , f_j , n_j , ϕ_j e θ_j são geradas a partir de uma distribuição de probabilidade uniforme e as variáveis t_{aj} são geradas a partir de uma distribuição de probabilidade Gaussiana. A variável n_j pertence ao conjunto dos números naturais.

As seguintes restrições são adotadas para as respectivas variáveis: $\phi_{min} = 0^\circ$, $\phi_{max} = 90^\circ$, $\theta_{min} = az_{S-E} - 90^\circ$, $\theta_{max} = az_{S-E} + 90^\circ$, $A_{min} = 0$ e $A_{max} = 0,1$. O valor de f_{min} corresponde a menor frequência de corte dos acelerogramas registrados e filtrados e f_{max} é a frequência de pico mais alta (relevante) dos três espectros de potência, critério este, adotado para satisfazer os três componentes de aceleração do solo registrados. O valor de n_{min} é zero e o valor de n_{max} deve ser calculado em cada iteração para que a onda inicie e termine dentro do intervalo de tempo dos acelerogramas registrados.

As variáveis de projeto t_{aj} são geradas aleatoriamente a partir de duas distribuições de probabilidade Gaussiana, uma distribuição é para o tempo de chegada das ondas P, com média t_{aP} , e outra distribuição é para o tempo de chegada das ondas S, com média t_{aS} . Ambas as distribuições têm um coeficiente de variação de 5%. Tal variabilidade leva em conta as incertezas relativas às várias velocidades de propagação e o caminho real das ondas. Os tempos médios de chegada das ondas P e S são dados, respectivamente, por:

$$t_{a_P} = D_{hip}/V_P \quad (5.7)$$

$$t_{a_S} = D_{hip}/V_S. \quad (5.8)$$

Nenhum dado específico foi encontrado na literatura sobre a velocidade de propagação das ondas para os locais e eventos considerados; portanto, as velocidades médias das ondas P e S foram estimadas usando o modelo de velocidade IASP91, desenvolvido por Kennett e Engdahl, 1991. Terremotos com profundidade focal superior a 20 km possuem mais de uma velocidade média, portanto as médias ponderadas dessas velocidades foram adotadas para os valores de V_P e V_S .

5.4 Geração dos três componentes de acelerogramas sísmicos em pontos próximos à estação sismológica

Após encontrar ondas sísmicas que concordam bem com os acelerogramas registrados na estação sismológica, os três componentes de aceleração do solo foram gerados em pontos próximos à estação sismológica, ou seja, no ponto B, conforme ilustrado na Figura 5.3.

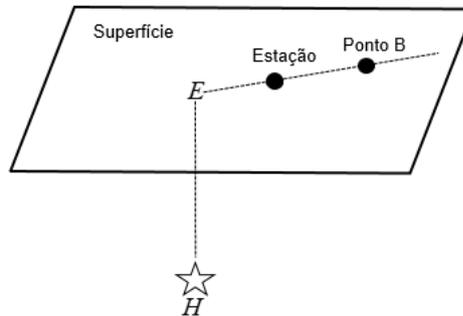


Figura 5.3 – Localização da estação sismológica e do ponto B.

5.4.1 Cálculo da velocidade e do tempo de chegada de cada onda no ponto B

Como a estação e o ponto B não estão na mesma reta que une os dois pontos ao hipocentro, pode-se assumir que a onda que deixa a fonte na direção da estação e a onda orientada na direção de B viajam através de materiais diferentes. Assim, as velocidades médias, ao longo dos respectivos caminhos, devem ser ligeiramente diferentes.

Para estimar essa diferença, supõe-se que a velocidade média de cada onda, no ponto B, V_B , seja uma variável aleatória com distribuição de probabilidade Gaussiana, com um valor médio igual à velocidade média calculada na estação e um coeficiente de variação de 5%.

A partir dessa suposição, o tempo de chegada ao ponto B, t_{a_B} , é dado por:

$$t_{a_B} = D_{hip_B}/V_B \quad (5.9)$$

na qual D_{hip_B} é a distância entre o hipocentro e o ponto B.

5.4.2 Atenuação no ponto B

A atenuação das ondas sísmicas ocorre devido a alguns fatores, como o espalhamento geométrico e a dissipação de energia. A atenuação devida à dissipação de energia é causada pelo amortecimento histerético, atrito interno e comportamento não linear do material da rocha da crosta [Riera et al., 1986].

A atenuação devida à dissipação de energia possui grande variabilidade, o que não está dentro do escopo deste trabalho. Portanto, para explicar esses efeitos, a atenuação geométrica foi aqui multiplicada por um coeficiente empírico C_A . O uso de um coeficiente empírico visa estimar a atenuação adicional causada pela dissipação de energia. Daqui resulta que a amplitude no ponto B, A_B , é dada por:

$$A_B = C_A \cdot A \cdot \frac{D_{hip}}{D_{hip_B}} \quad (5.10)$$

Os valores de C_A foram estimados a partir de resultados numéricos. Para os sismos estudados são 1,15 e 1,05 para pontos localizados antes da estação sismológica, a 3km e 1km, respectivamente, e 0,95 e 0,85 para pontos localizados após a estação sismológica, a 1km e 3km, respectivamente. Esses valores foram estimados baseados nos resultados das simulações realizadas.

5.4.3 Outros parâmetros das ondas sísmicas

No ponto B, assume-se que f_j e n_j permanecem os mesmos. Os ângulos que definem o movimento da onda na superfície (ϕ_j e θ_j) também são variáveis aleatórias com distribuição de probabilidade Gaussiana, com valores médios iguais aos valores encontrados na

estação e coeficientes de variação de 5%.

6 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DOS TRÊS COMPONENTES DE ACELEROGRAMAS SÍSMICOS COM CARACTERÍSTICAS PREDETERMINADAS

As próximas simulações visam gerar simultaneamente os três componentes da aceleração sísmica que contêm algumas características dos acelerogramas registrados, como: pico de aceleração do solo, duração do movimento forte e conteúdo de frequência.

Os acelerogramas registrados foram obtidos no banco de dados: Engineering Strong-Motion, disponível em <https://esm.mi.ingv.it>.

Para ilustrar e avaliar a metodologia proposta são apresentados e discutidos exemplos específicos dos terremotos que ocorreram em 18 de janeiro de 2017 e 20 de fevereiro de 2017 na Itália Central. O terremoto que ocorreu em 18 de janeiro de 2017, às 15:16:13 (evento EMSC-20170118-0000154) foi registrado na estação de Amatrice (código AMT). O terremoto que ocorreu em 20 de fevereiro de 2017, às 03:13:30 (evento EMSC-20170220-0000016) foi registrado na estação de Montereale (código MTR). Os resultados estão resumidos nas duas próximas subseções.

A Tabela 1 mostra os parâmetros utilizados em cada simulação. Os parâmetros N e $maxit$ são os parâmetros do BSA. O parâmetro $maxit$ indica o número máximo de iterações. Os valores de N_j foram estimados com base no número de picos do espectro de potência de cada componente de aceleração do solo. O valor de f_{min} corresponde a menor frequência de corte dos acelerogramas registrados e filtrados e f_{max} é a frequência de pico (relevante) mais alta dos três espectros de potência dos acelerogramas registrados. Os resultados estão resumidos nas duas próximas seções.

Tabela 6.1 – Parâmetros utilizados em cada simulação.

Parâmetro/Estação	AMT	MTR
N_j	190,00	187,00
A_{min} (m/s^2)	0,00	0,00
A_{max} (m/s^2)	0,20	0,20
f_{min} (Hz)	0,10	0,08
f_{max} (Hz)	30,00	30,00
N	30,00	30,00
$maxit$	100.000,00	100.000,00

6.1 Estação AMT

As Figuras 6.1 e 6.2 apresentam os resultados referentes às simulações realizadas com respeito ao terremoto registrado na estação AMT. A Figura 6.1 ilustra os acelerogramas registrados e os acelerogramas simulados e a Figura 6.2 mostra a comparação entre os espectros de potência dos componentes registrados e simulados.

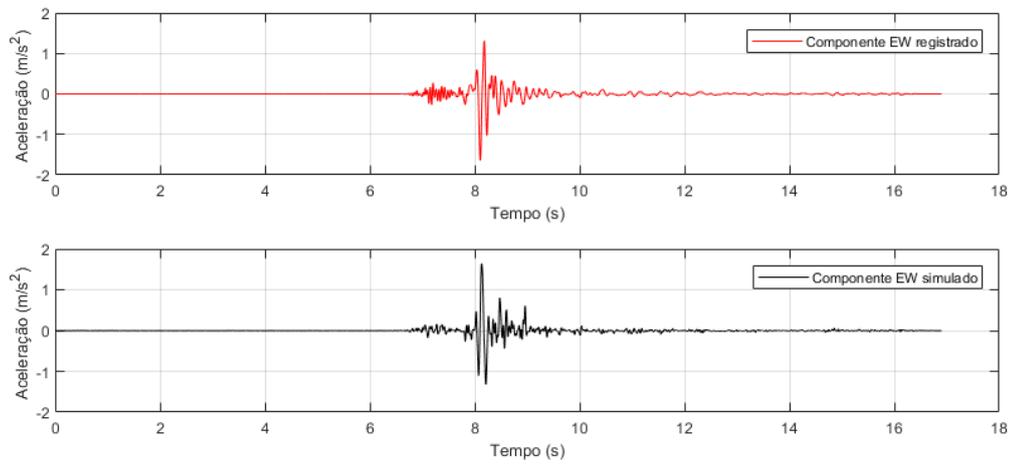
As Figuras 6.3(a), 6.3(c) e 6.3(e) ilustram os escalogramas dos componentes registrados, enquanto as Figuras 6.3(b), 6.3(d) e 6.3(f) ilustram os escalogramas dos componentes simulados. Os escalogramas ilustram como a densidade espectral de energia varia no tempo.

A Tabela 6.2 mostra os resultados do pico de aceleração do solo e da duração do movimento forte de cada componente dos acelerogramas registrados e dos acelerogramas simulados.

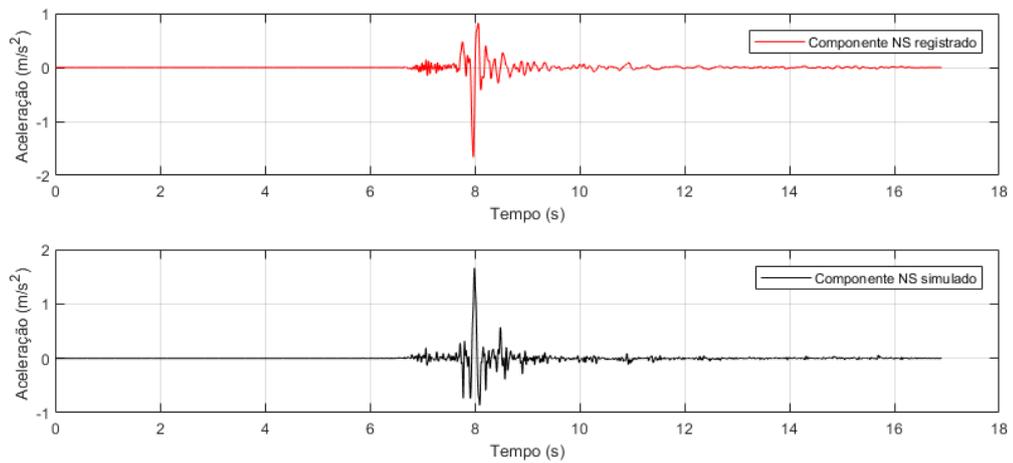
Tabela 6.2 – Resultados para a estação AMT.

Parâmetro/Componente	Registrado			Simulado		
	NS	EW	Vertical	NS	EW	Vertical
Pico de aceleração (m/s^2)	1,66	1,64	0,78	1,66	1,64	0,78
Duração do movimento forte (s)	0,75	0,86	1,63	0,75	0,86	1,63

(a)



(b)



(c)

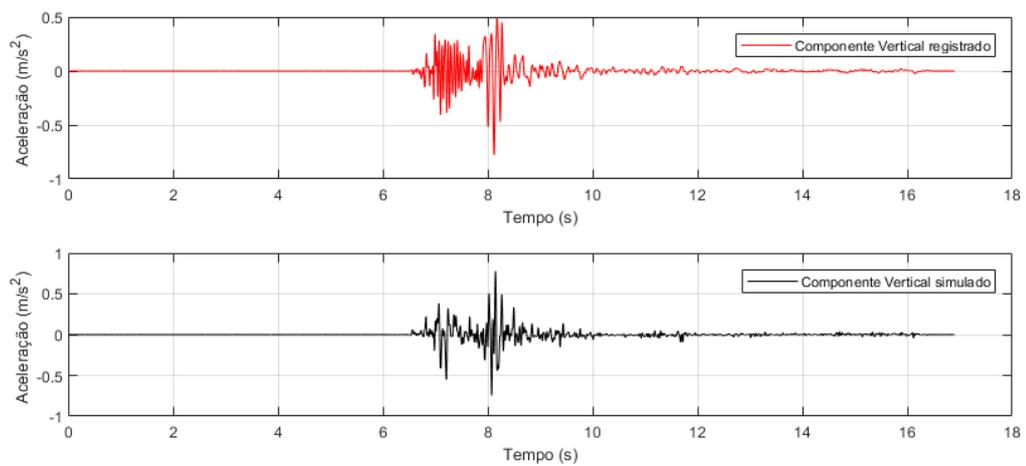
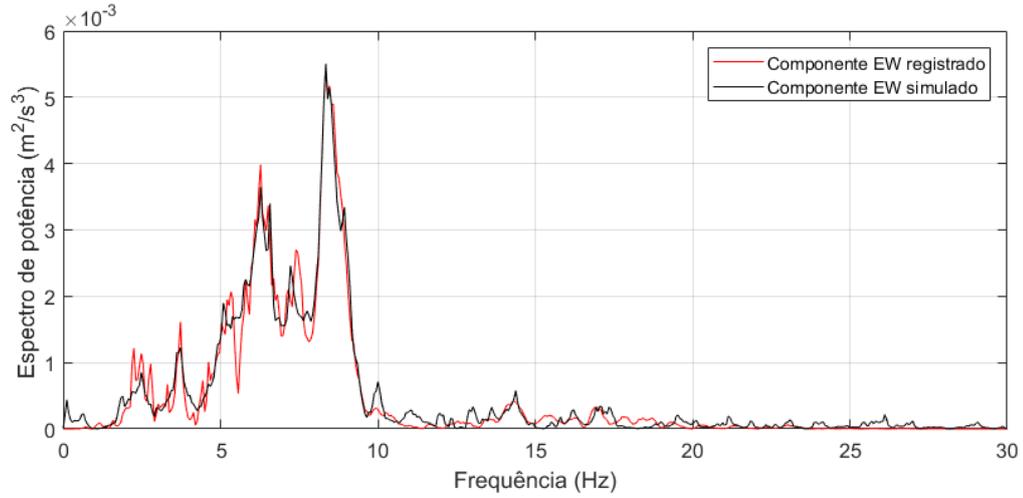
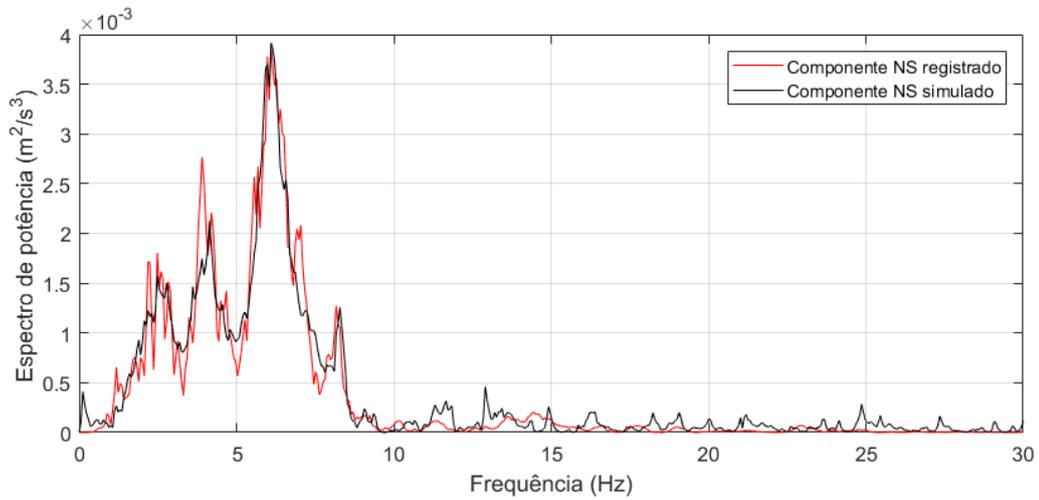


Figura 6.1 – Três componentes dos acelerogramas registrados e simulados na estação AMT. (a) Componente EW. (b) Componente NS. (c) Componente vertical.

(a)



(b)



(c)

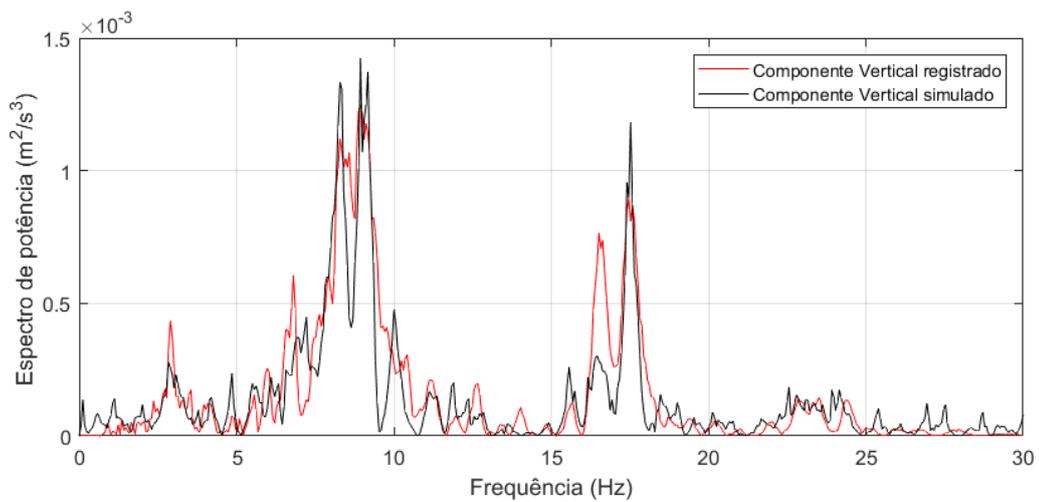


Figura 6.2 – Espectro de potência dos três componentes dos acelerogramas registrados e simulados na estação AMT. (a) Componente EW. (b) Componente NS. (c) Componente vertical.

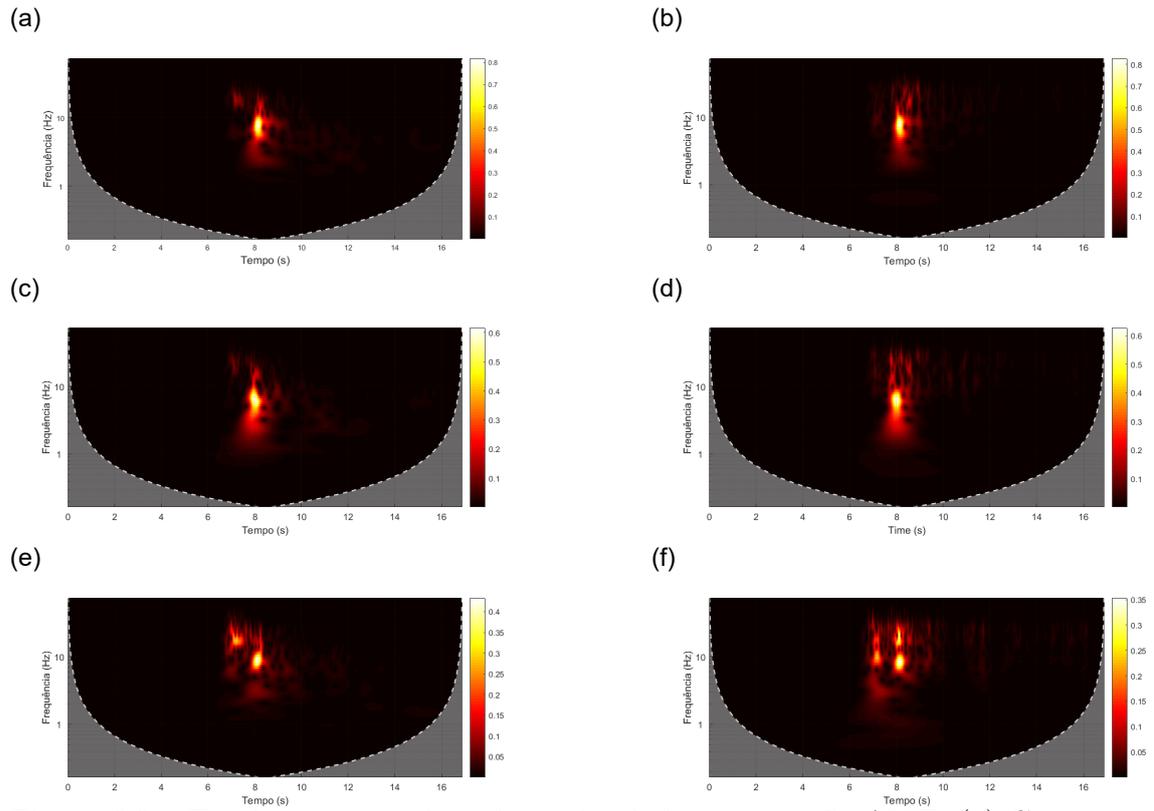


Figura 6.3 – Escalogramas registrados e simulados na estação AMT. (a) Componente EW registrado. (b) Componente EW simulado. (c) Componente NS registrado. (d) Componente NS simulado. (e) Componente vertical registrado. (f) Componente vertical simulado.

6.2 Estação MTR

As Figuras 6.4 e 6.5 apresentam os resultados referentes às simulações realizadas com respeito ao terremoto registrado na estação MTR. A Figura 6.4 ilustra os acelerogramas registrados e os acelerogramas simulados e a Figura 6.5 mostra a comparação entre os espectros de potência dos componentes registrados e simulados.

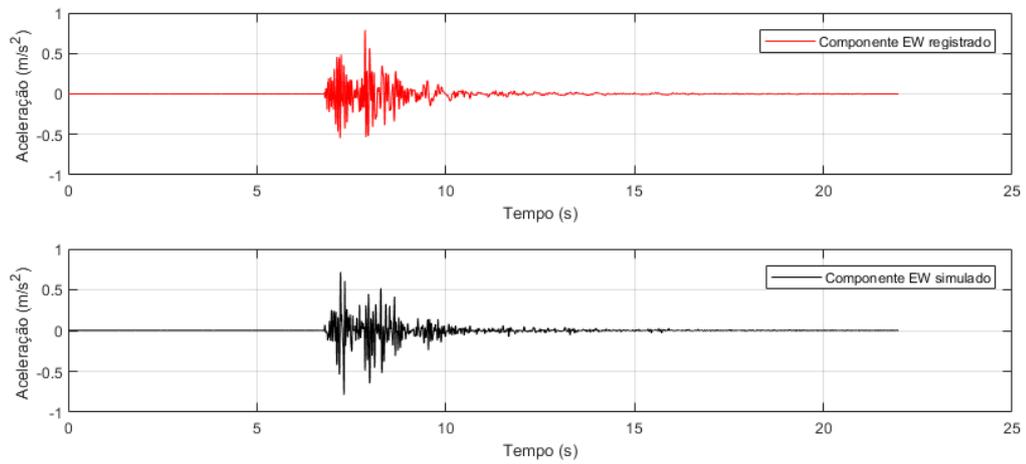
As Figuras 6.6(a), 6.6(c) e 6.6(e) ilustram os escalogramas dos componentes registrados, enquanto as Figuras 6.6(b), 6.6(d) e 6.6(f) ilustram os escalogramas dos componentes simulados.

A Tabela 6.3 mostra os resultados do pico de aceleração do solo e da duração do movimento forte de cada componente dos acelerogramas registrados e dos acelerogramas simulados.

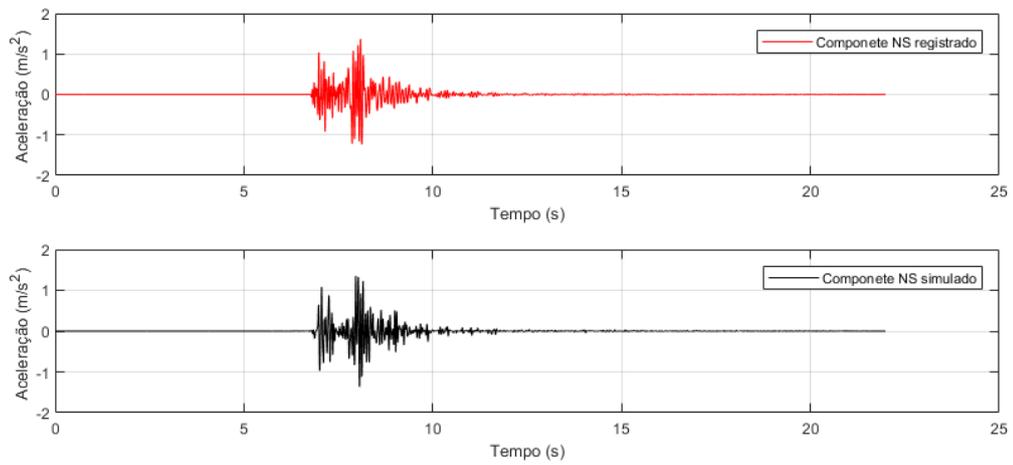
Tabela 6.3 – Resultados para a estação MTR.

Parâmetro/Componente	Registrado			Simulado		
	NS	EW	Vertical	NS	EW	Vertical
Pico de aceleração (m/s^2)	1,37	0,79	0,97	1,37	0,79	0,97
Duração do movimento forte (s)	1,99	2,32	1,54	1,99	2,32	1,54

(a)



(b)



(c)

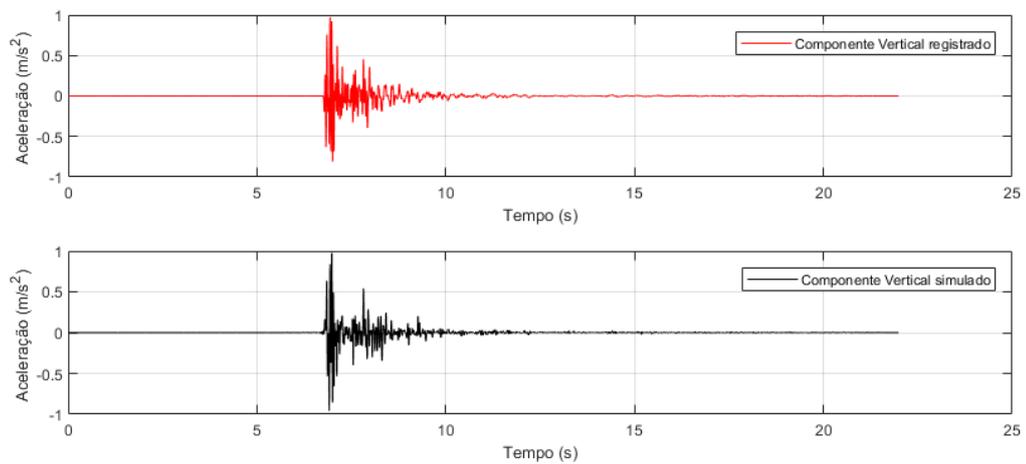
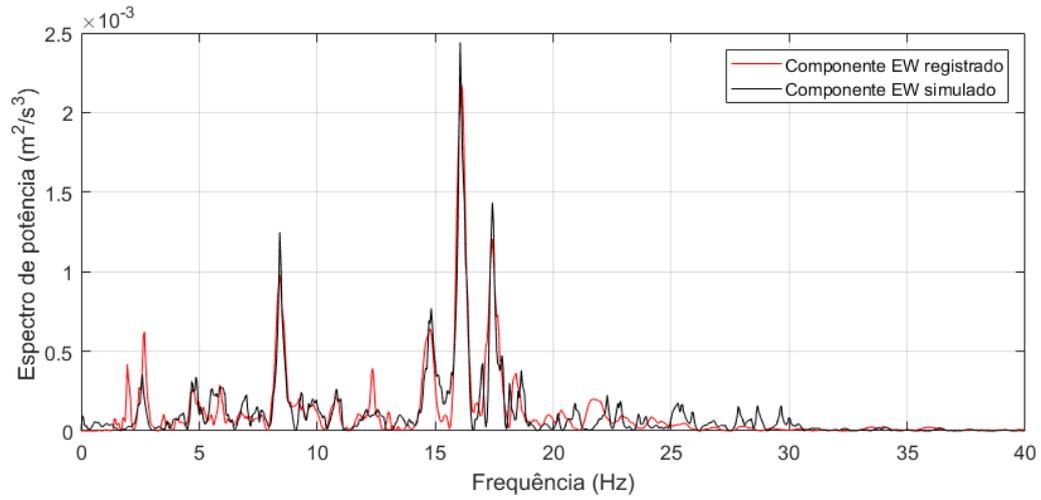
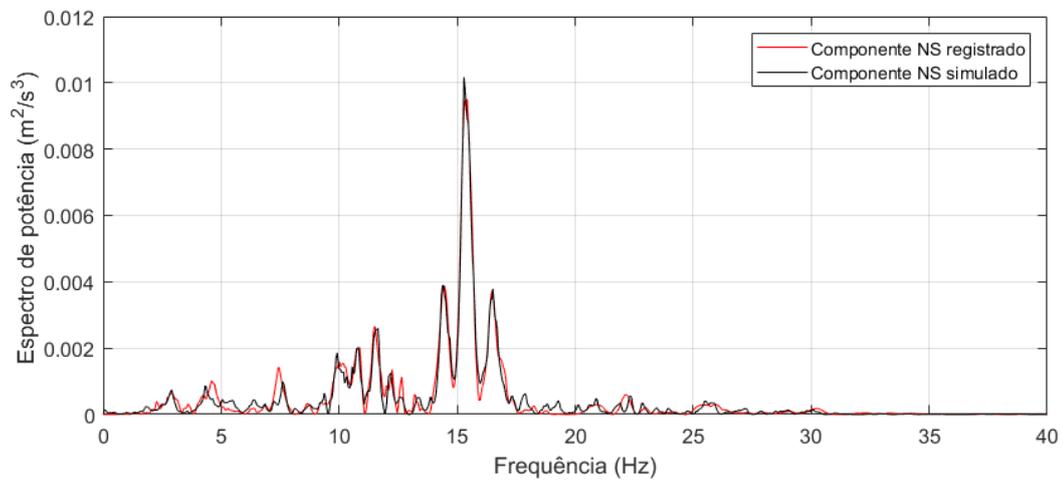


Figura 6.4 – Três componentes dos acelerogramas registrados e simulados na estação MTR. (a) Componente EW. (b) Componente NS. (c) Componente vertical.

(a)



(b)



(c)

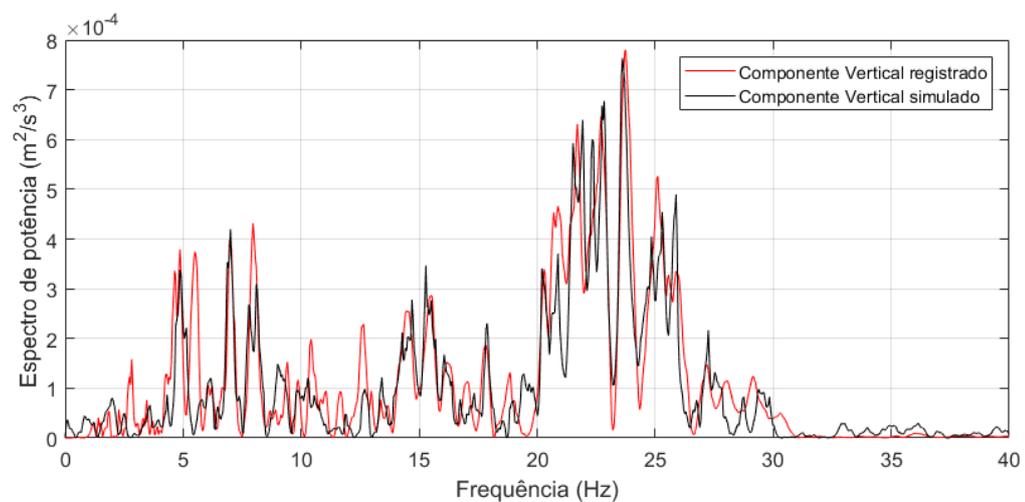


Figura 6.5 – Espectro de potência dos três componentes dos acelerogramas registrados e simulados na estação MTR. (a) Componente EW. (b) Componente NS. (c) Componente vertical.

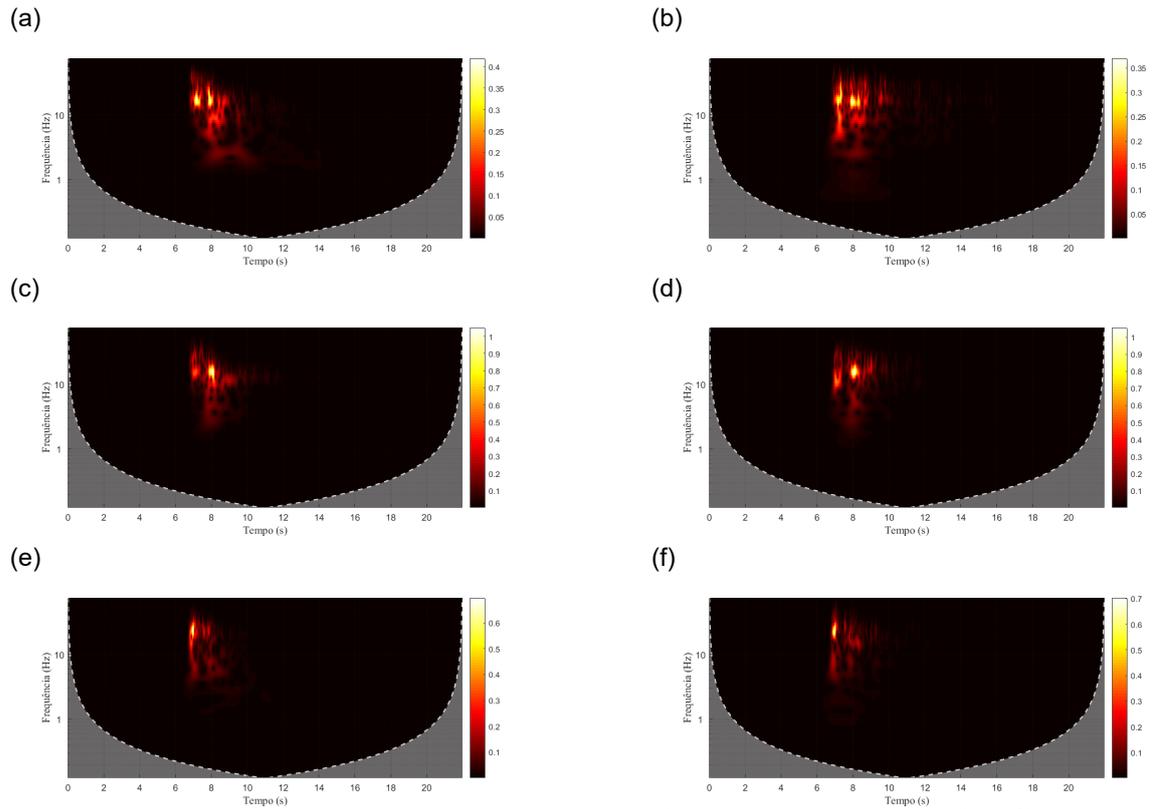


Figura 6.6 – Escalogramas registrados e simulados na estação MTR. (a) Componente EW registrado. (b) Componente EW simulado. (c) Componente NS registrado. (d) Componente NS simulado. (e) Componente vertical registrado. (f) Componente vertical simulado.

6.3 Análise dos resultados

Os resultados, para os terremotos selecionados, mostraram que o método adotado permite gerar acelerogramas sísmicos artificiais que contenham os parâmetros predeterminados dos acelerogramas registrados.

As curvas dos acelerogramas sísmicos simulados, apesar de não possuírem as mesmas características visuais das curvas dos acelerogramas registrados, no que diz respeito aos parâmetros de pico de aceleração do solo e duração do movimento forte apresentaram resultados idênticos aos parâmetros predeterminados em cada simulação, assim como, mostraram uma boa concordância com os espectros de potência dos acelerogramas registrados, preservando assim os seus conteúdos de frequências.

É importante ressaltar que o objetivo não é obter exatamente os componentes dos terremotos selecionados, mas sim obter um acelerograma sísmico artificial que contenha características relevantes (escolhidas) semelhantes aos acelerogramas registrados. Assim, pode-se dizer que o modelo adotado consegue atender bem aos objetivos propostos, podendo ser utilizado como ferramenta para gerar acelerogramas sísmicos artificiais com as características requeridas.

7 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DOS TRÊS COMPONENTES DE ACELEROGRAMAS SÍSMICOS EM PONTOS PRÓXIMOS À ESTAÇÃO SISMOLÓGICA

As próximas simulações visam gerar simultaneamente os três componentes da aceleração sísmica em locais próximos a uma estação sismológica.

Os acelerogramas registrados foram obtidos no banco de dados: Engineering Strong-Motion, disponível em <https://esm.mi.ingv.it>.

Para ilustrar e avaliar a metodologia proposta são apresentados e discutidos exemplos específicos dos terremotos que ocorreram em 29 de dezembro de 2013 e 16 de janeiro de 1981 na Itália. O terremoto que ocorreu em 29 de dezembro de 2013, às 17:08:43, (evento IT-2013-0019) foi registrado na estação Piedimonte Matese (código PDM). O terremoto que ocorreu em 16 de janeiro de 1981, às 00:37:45 (evento IT-1981-0001) foi registrado na estação Cairano 4 station (código CR4). Os terremotos foram escolhidos nessa análise com base nas duas primeiras premissas do modelo.

A Tabela 7.1 mostra os parâmetros utilizados em cada simulação e os resultados estão resumidos nas duas próximas seções. O número máximo de iterações foi definido com base na convergência da função objetivo.

Tabela 7.1 – Parâmetros utilizados em cada simulação.

Parâmetro/estação	PDM	CR4
N_j	100,00	100,00
A_{min} (m/s^2)	0,00	0,00
A_{max} (m/s^2)	0,10	0,10
f_{min} (Hz)	0,03	0,30
f_{max} (Hz)	15,00	15,00
N	30,00	30,00
$maxit$	200.000,00	200.000,00

7.1 Estação PDM

As Figuras 7.1 e 7.2 apresentam os resultados referentes às simulações realizadas com respeito ao terremoto registrado na estação PDM. A Figura 7.1 ilustra os acelerogramas registrados e os acelerogramas simulados e a Figura 7.2 mostra os espectros de resposta de pseudo-aceleração dos componentes registrados e simulados. As barras verti-

cais (azuis), na Figura 7.1, indicam a duração do movimento forte, calculado pelo método proposto por Trifunac e Brady, 1975.

As Figuras 7.3 à 7.6 apresentam os resultados referentes às simulações realizadas no ponto B, respectivamente, a 3km e 1km antes e a 1km e 3km depois da estação sismológica e a Figura 7.7 mostra os espectros de resposta de pseudo-aceleração obtidos a partir dos acelerogramas simulados no ponto B e na estação PDM.

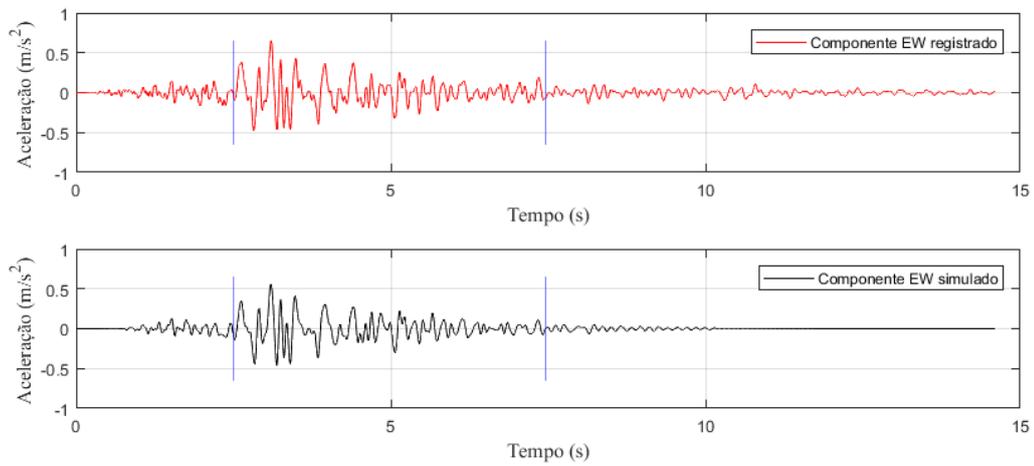
A Tabela 7.2 mostra os seguintes resultados para a estação PDM: erro quadrático médio entre os espectros de pseudo-aceleração dos acelerogramas registrados e simulados, E_{m_e} , para o período de 0 a 2,5s, erro relativo entre os picos dos espectros de pseudo-aceleração, E_{r_e} , erro quadrático médio entre os acelerogramas registrados e simulados, E_{m_a} , erro relativo entre os picos dos acelerogramas registrados e simulados, E_{r_a} e o valor final da velocidade dos acelerogramas simulados, V_f .

O Apêndice A lista os parâmetros das ondas sísmicas para a estação PDM.

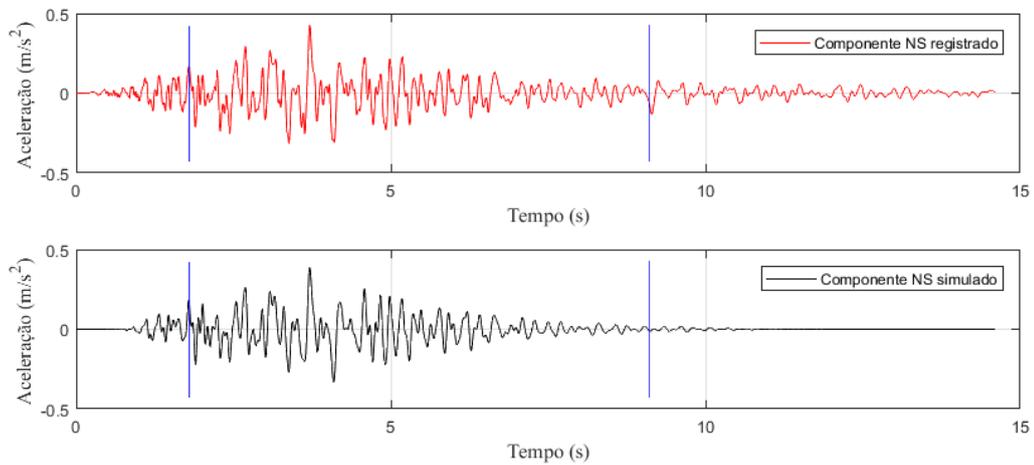
Tabela 7.2 – Resultados para a estação PDM.

Componente	E_{m_e}	E_{r_e}	E_{m_a}	E_{r_a}	V_f
EW	0,0037	0,0671	0,0014	0,1475	0,00
NS	0,0019	0,0277	0,0009	0,0955	0,00
Vertical	0,0009	0,0135	0,0006	0,0315	0,00
Média	0,0022	0,0361	0,0010	0,0915	0,00

(a)



(b)



(c)

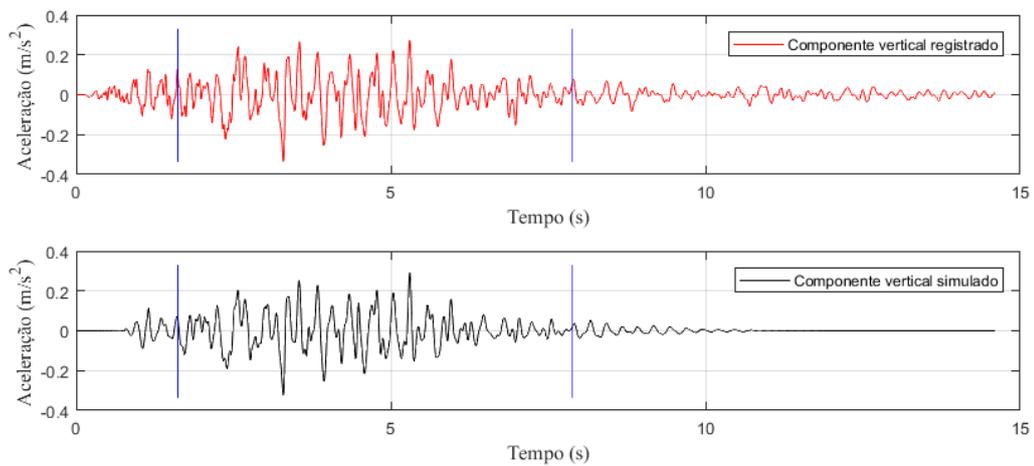


Figura 7.1 – Três componentes dos acelerogramas registrados e simulados na estação PDM. (a) Componente Leste-Oeste. (b) Componente NS. (c) Componente vertical.

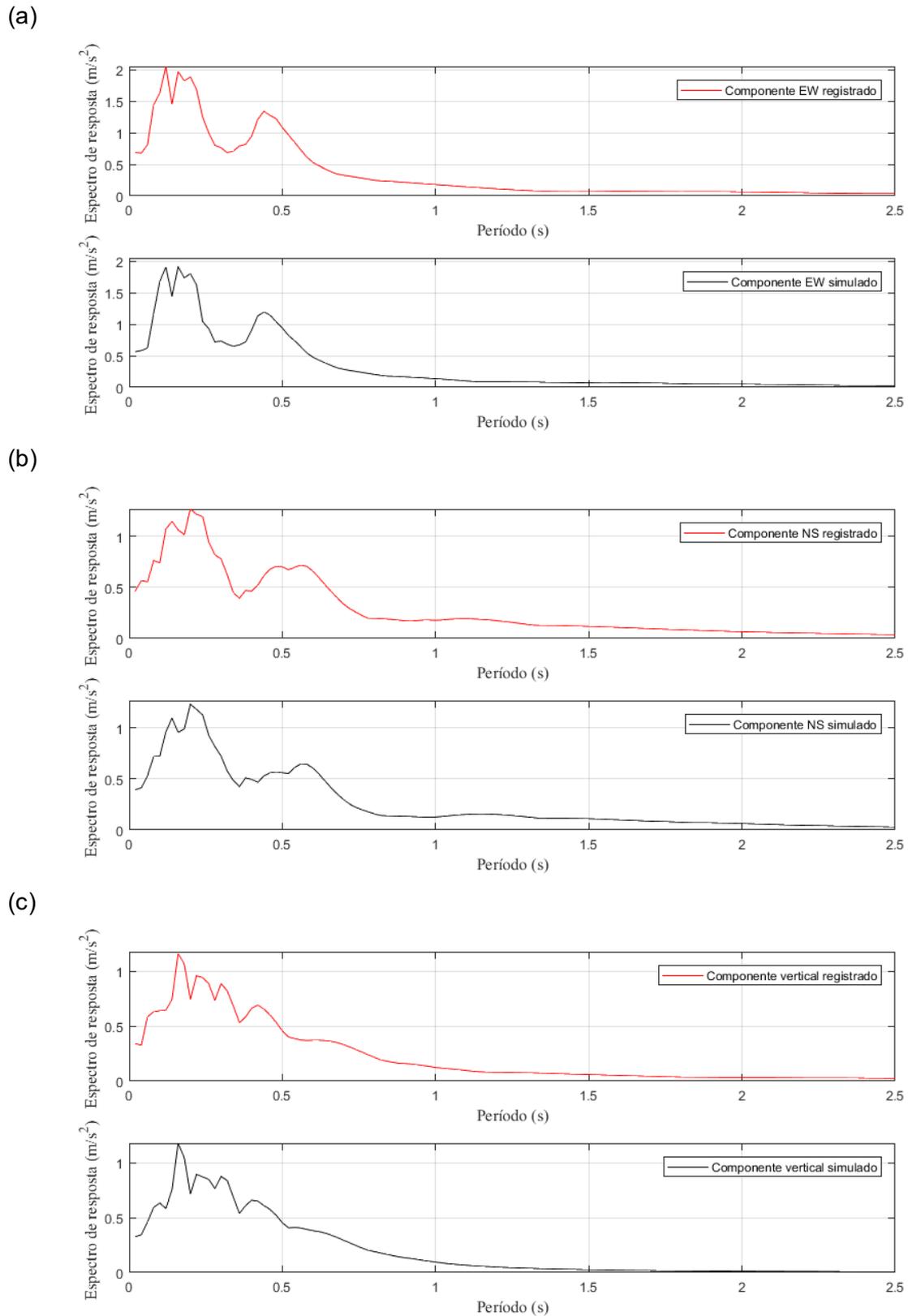
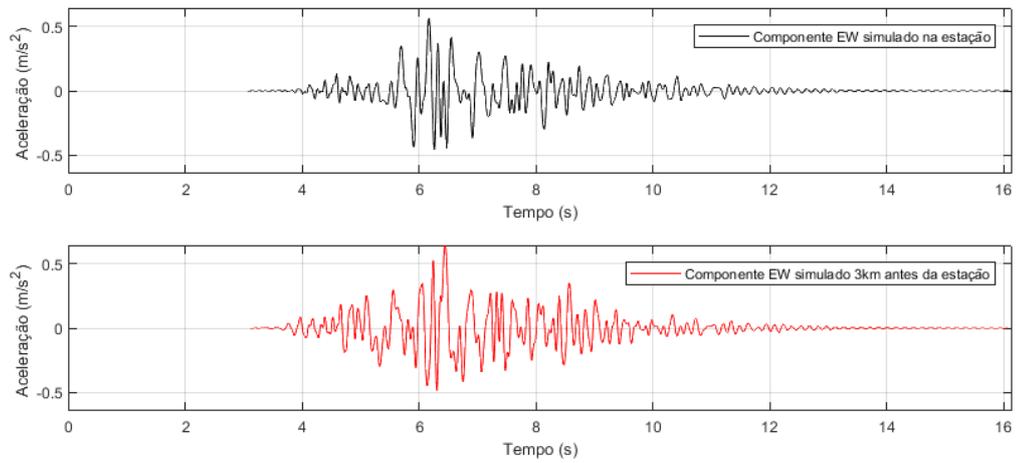
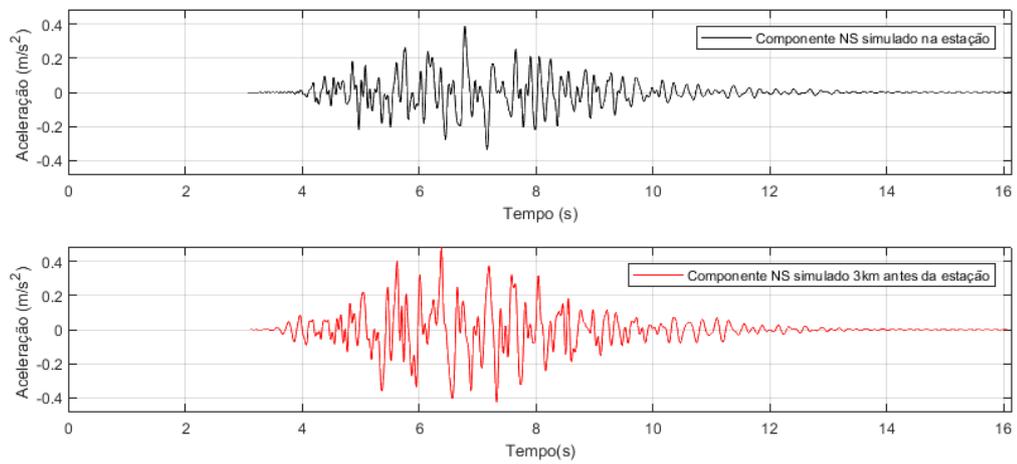


Figura 7.2 – Espectro de resposta de pseudo-aceleração dos três componentes dos acelerogramas registrados e simulados na estação PDM. (a) Componente EW. (b) Componente NS. (c) Componente vertical.

(a)



(b)



(c)

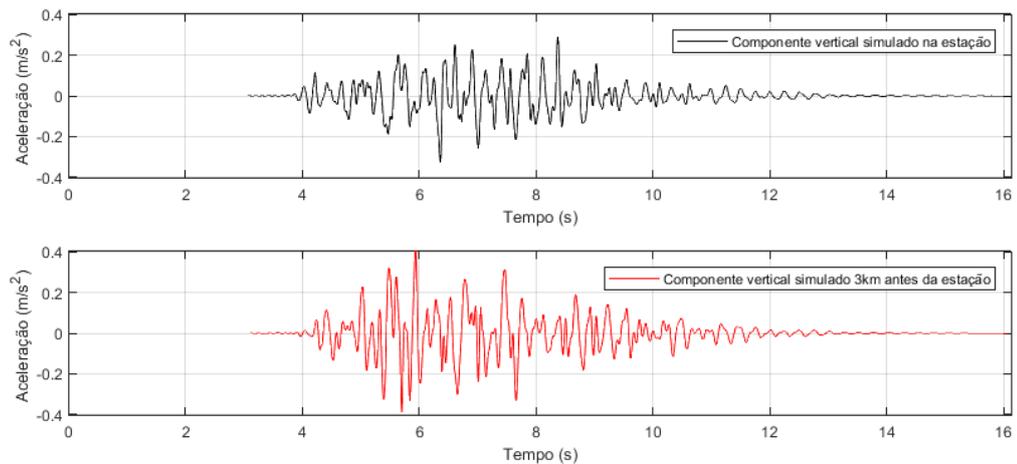
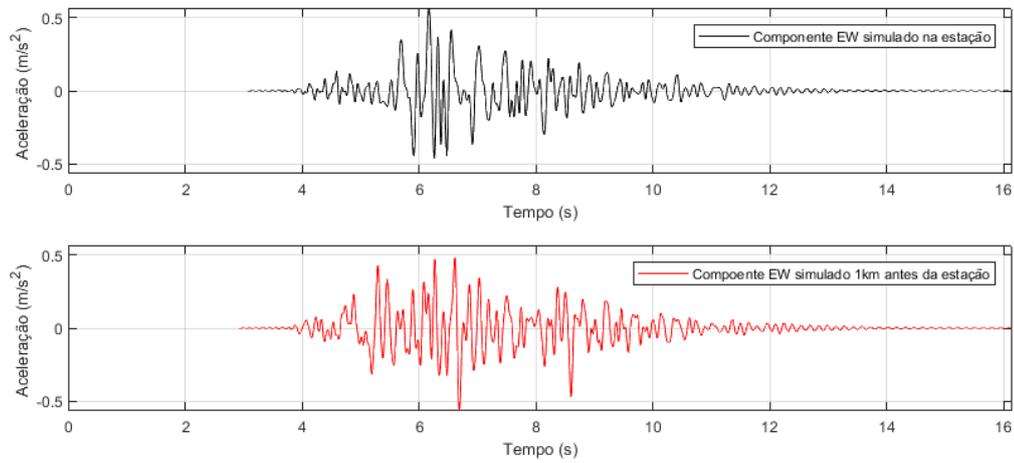


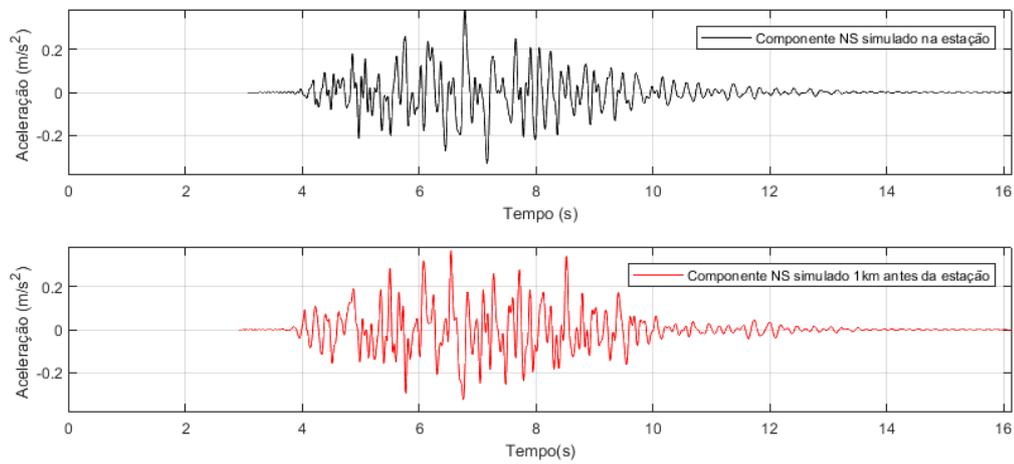
Figura 7.3 – Três componentes dos acelerogramas simulados 3km antes da estação PDM.

(a) Componente EW. (b) Componente NS. (c) Componente vertical.

(a)



(b)



(c)

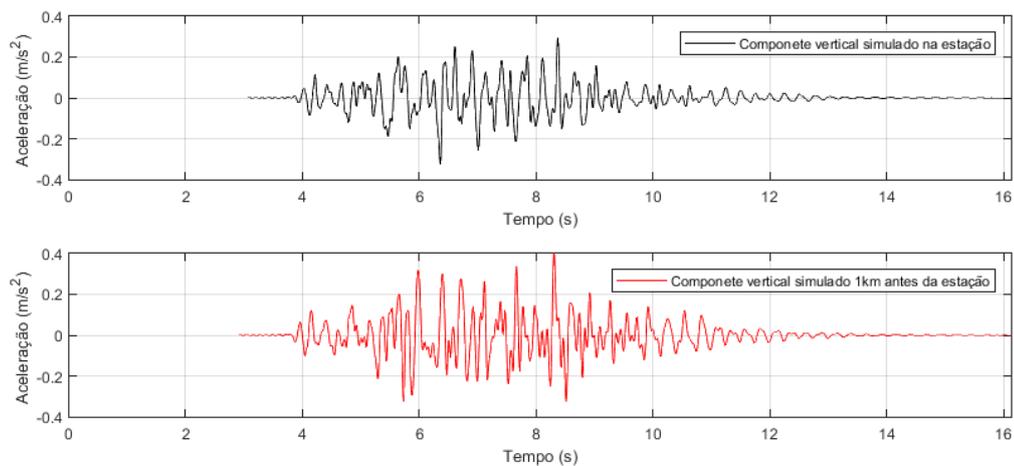
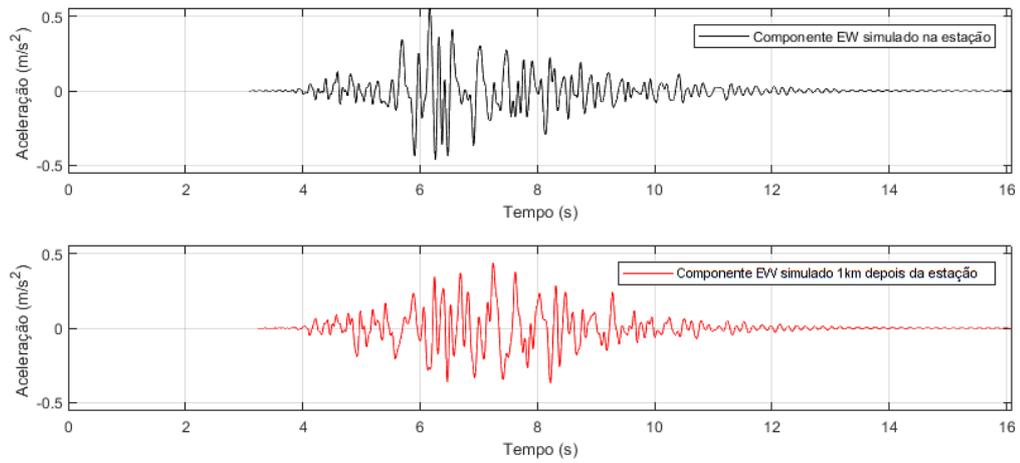


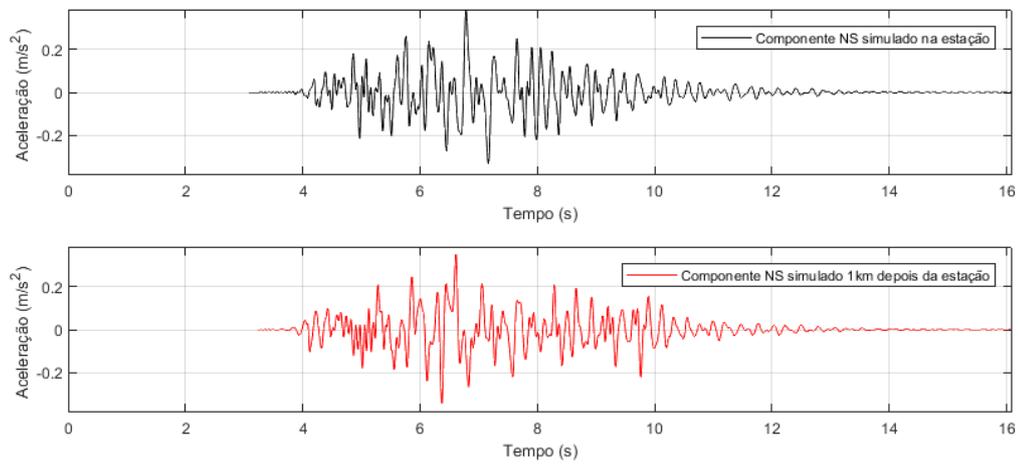
Figura 7.4 – Três componentes dos acelerogramas simulados 1km antes da estação PDM.

(a) Componente EW. (b) Componente NS. (c) Componente vertical.

(a)



(b)



(c)

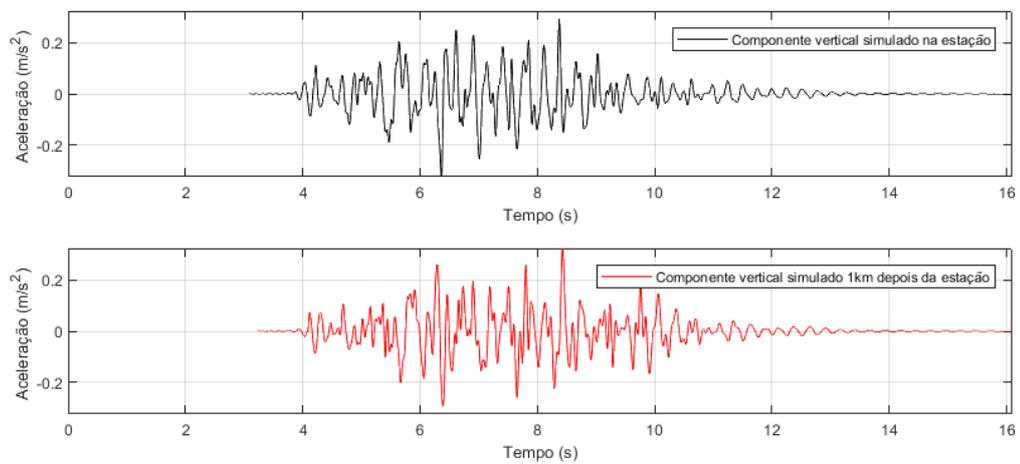
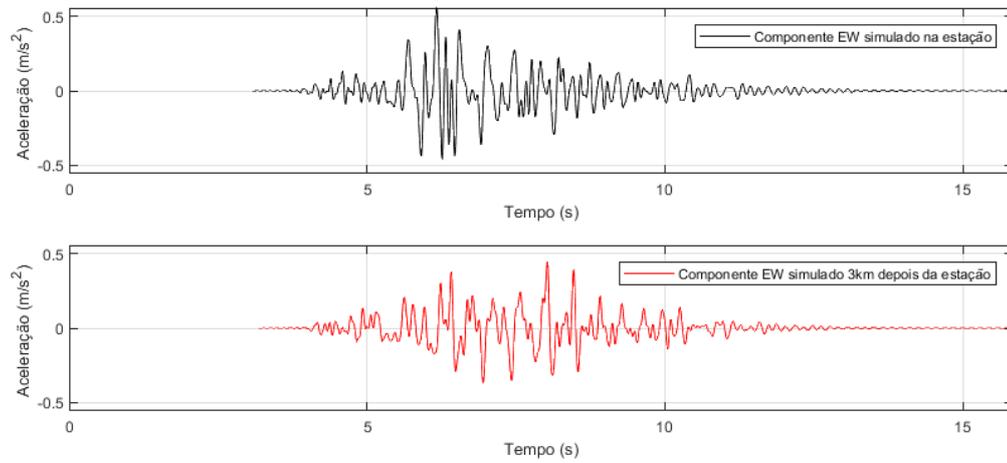
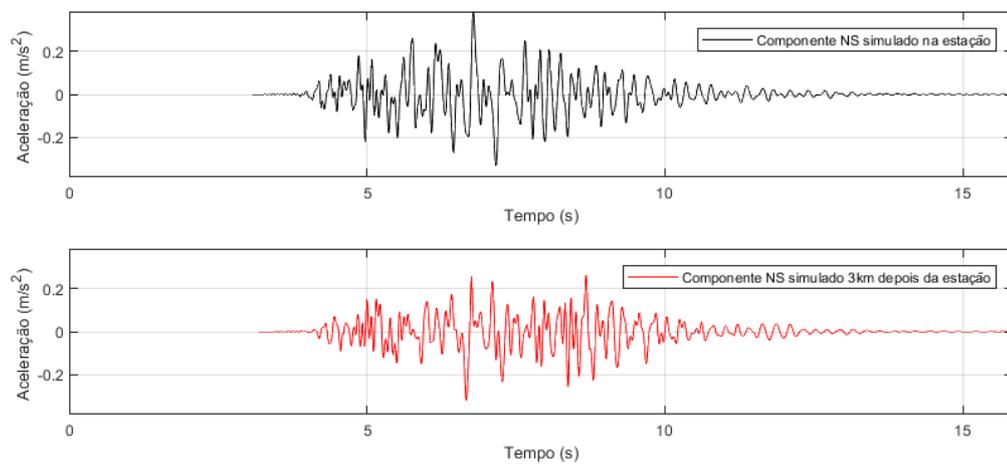


Figura 7.5 – Três componentes dos acelerogramas simulados 1km depois da estação PDM. (a) Componente EW. (b) Componente NS. (c) Componente vertical.

(a)



(b)



(c)

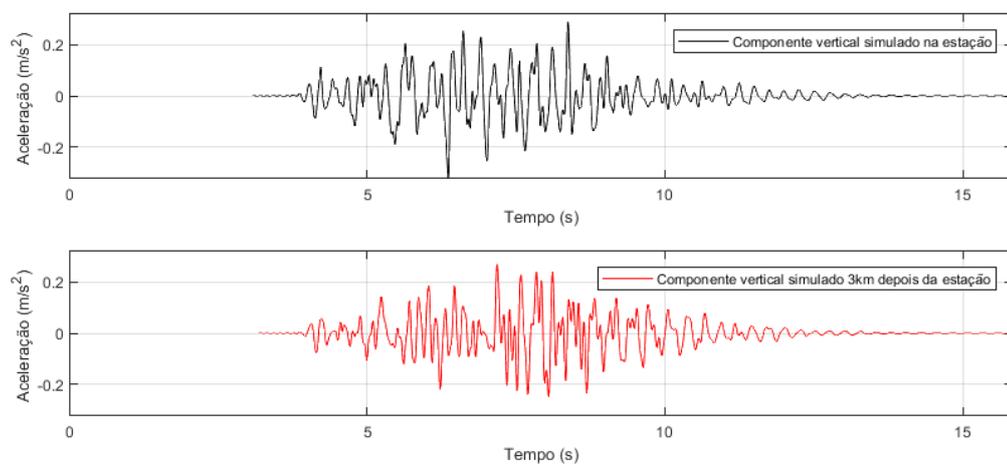
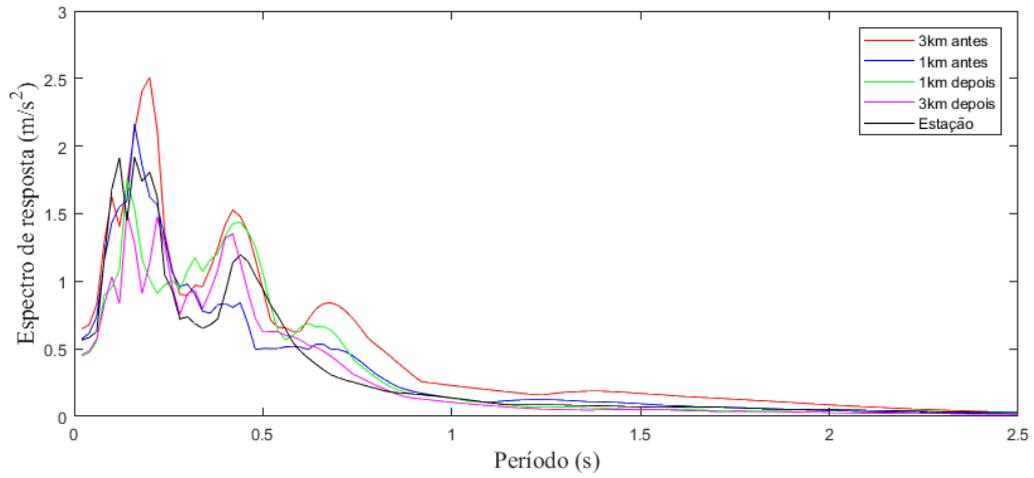
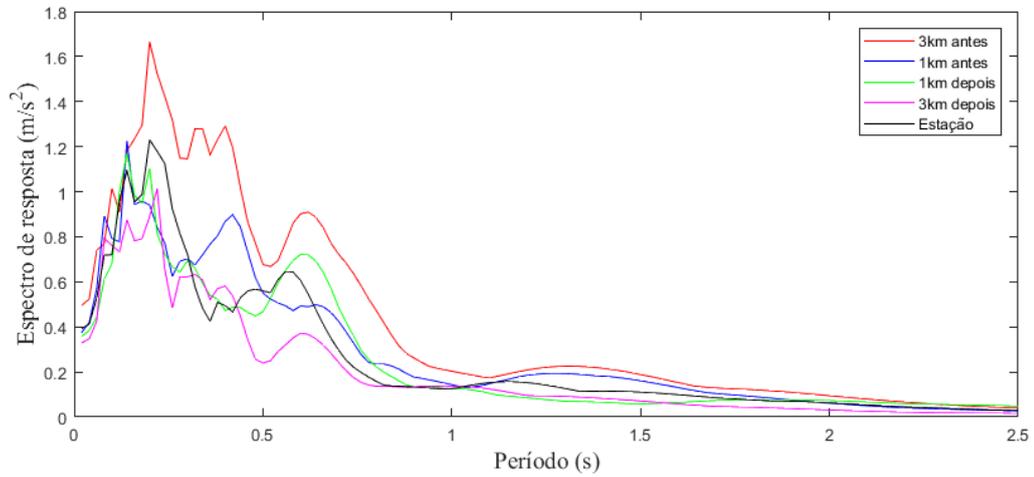


Figura 7.6 – Três componentes dos acelerogramas simulados 3km depois da estação PDM. (a) Componente EW. (b) Componente NS. (c) Componente vertical.

(a)



(b)



(c)

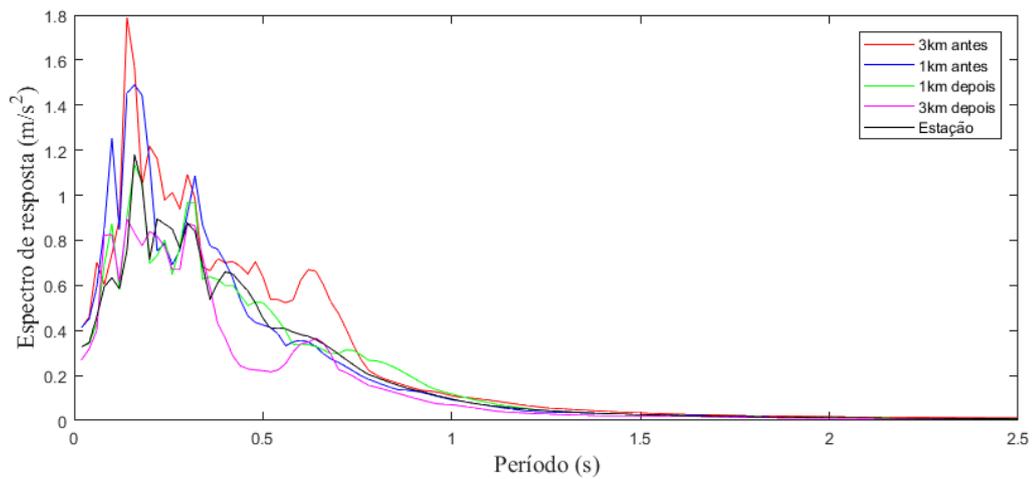


Figura 7.7 – Espectros de resposta de pseudo-aceleração dos três componentes dos acelerogramas simulados. (a) Componente EW. (b) Componente NS. (c) Componente vertical.

7.2 Estação CR4

As Figuras 7.8 e 7.9 apresentam os resultados referentes às simulações realizadas com respeito ao terremoto registrado na estação CR4. A Figura 7.8 ilustra os acelerogramas registrados e os acelerogramas simulados e a Figura 7.9 mostra os espectros de resposta de pseudo-aceleração dos componentes registrados e simulados. As barras verticais (azuis), na Figura 7.8, indicam a duração do movimento forte, calculado pelo método proposto por Trifunac e Brady, 1975.

As Figuras 7.10 à 7.13 apresentam os resultados referentes às simulações realizadas no ponto B, respectivamente, a 3km e 1km antes e a 1km e 3km depois da estação sísmológica e a Figura 7.14 mostra os espectros de resposta de pseudo-aceleração obtidos a partir dos acelerogramas simulados no ponto B e na estação CR4.

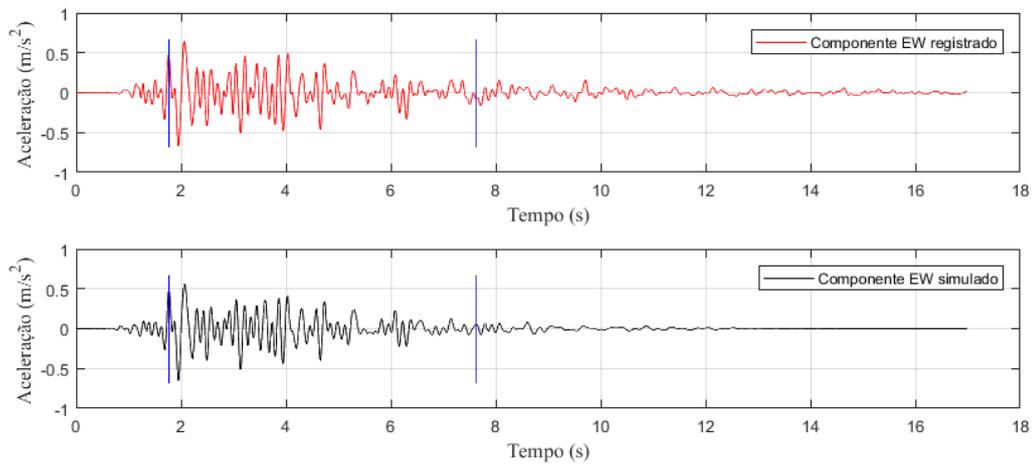
A Tabela 7.3 mostra os seguintes resultados para a estação CR4: erro quadrático médio entre os espectros de pseudo-aceleração dos acelerogramas registrados e simulados, E_{m_e} , para o período de 0 a 2,5s, erro relativo entre os picos dos espectros de pseudo-aceleração, E_{r_e} , erro quadrático médio entre os acelerogramas registrados e simulados, E_{m_a} , erro relativo entre os picos dos acelerogramas registrados e simulados, E_{r_a} e o valor final da velocidade dos acelerogramas simulados, V_f .

O Apêndice A lista os parâmetros das ondas sísmicas para a estação CR4.

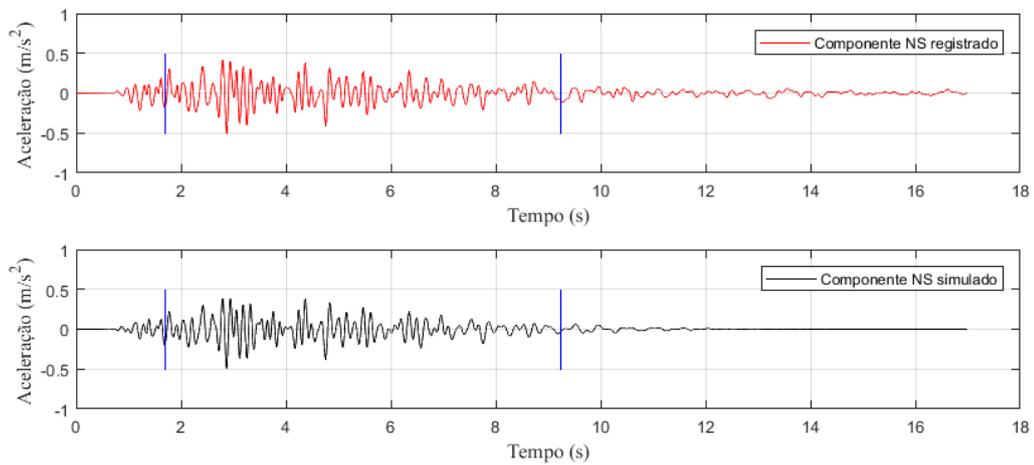
Tabela 7.3 – Resultados para a estação CR4.

Componente	E_{m_e}	E_{r_e}	E_{m_a}	E_{r_a}	V_f
EW	0,0115	0,0666	0,0016	0,0278	0,00
NS	0,0046	0,0208	0,0011	0,0194	0,00
Vertical	0,0012	0,0176	0,0004	0,0017	0,00
Média	0,0058	0,0350	0,0010	0,0163	0,00

(a)



(b)



(c)

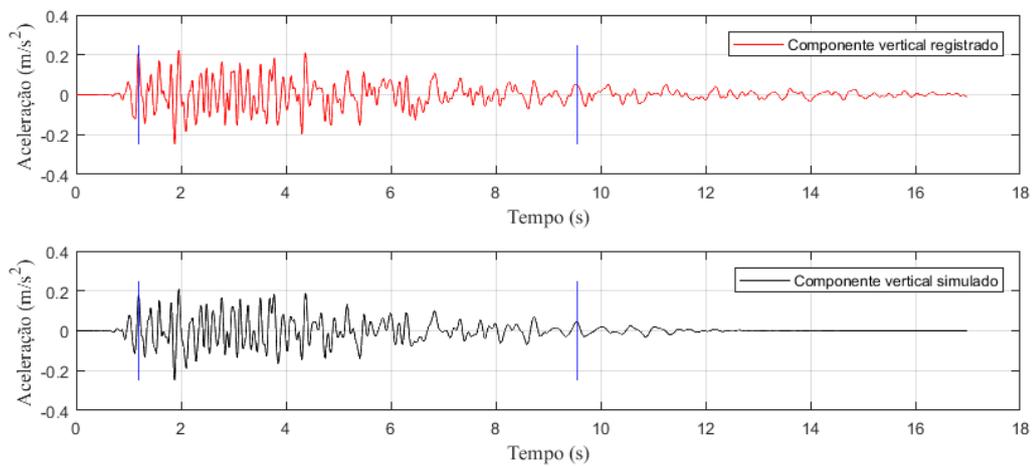


Figura 7.8 – Três componentes dos acelerogramas registrados e simulados na estação CR4. (a) Componente EW. (b) Componente NS. (c) Componente vertical.

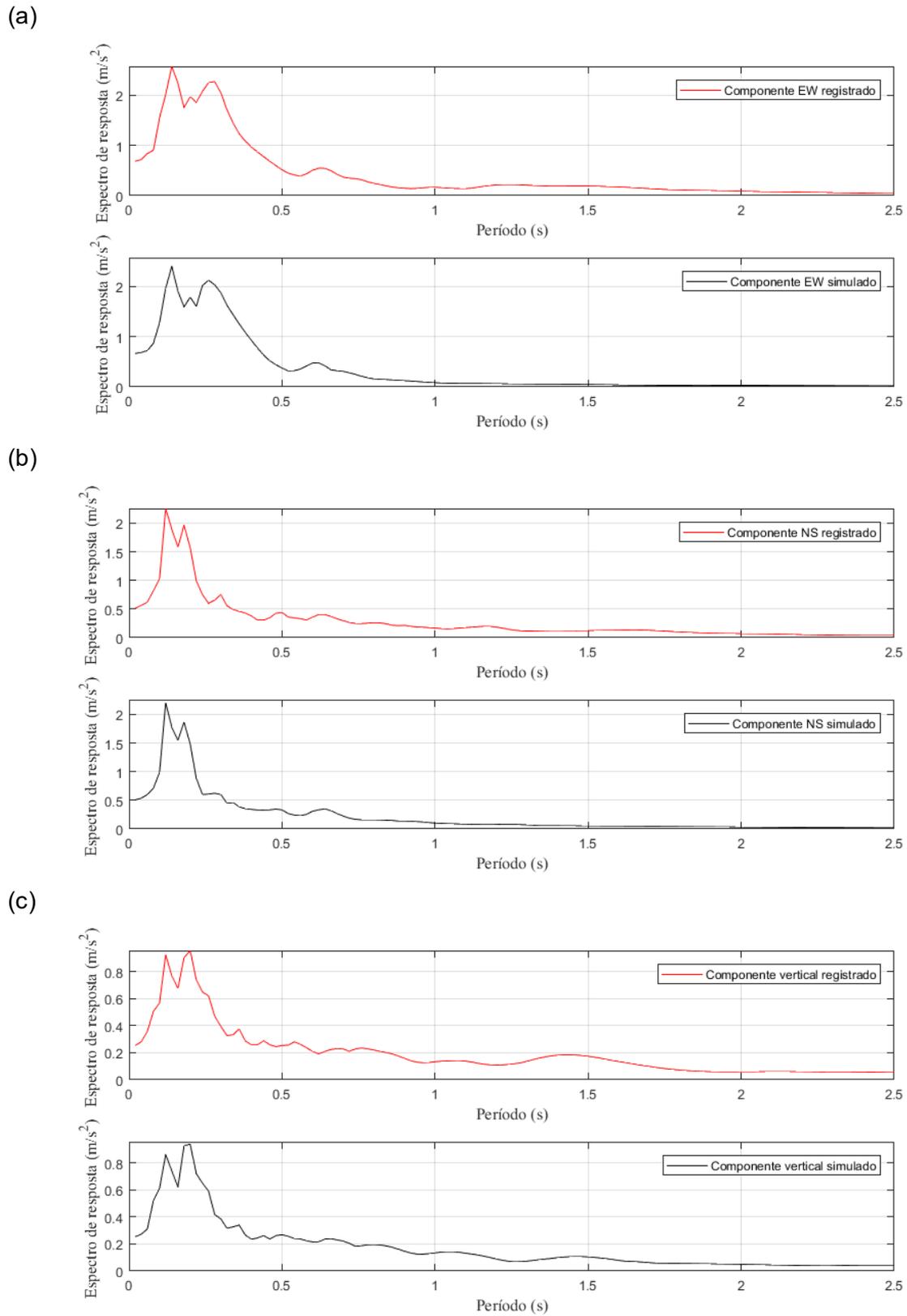
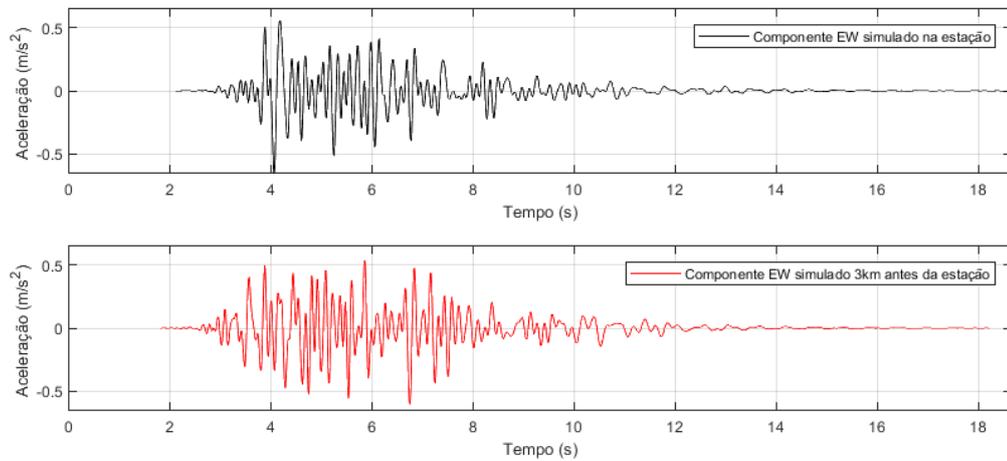
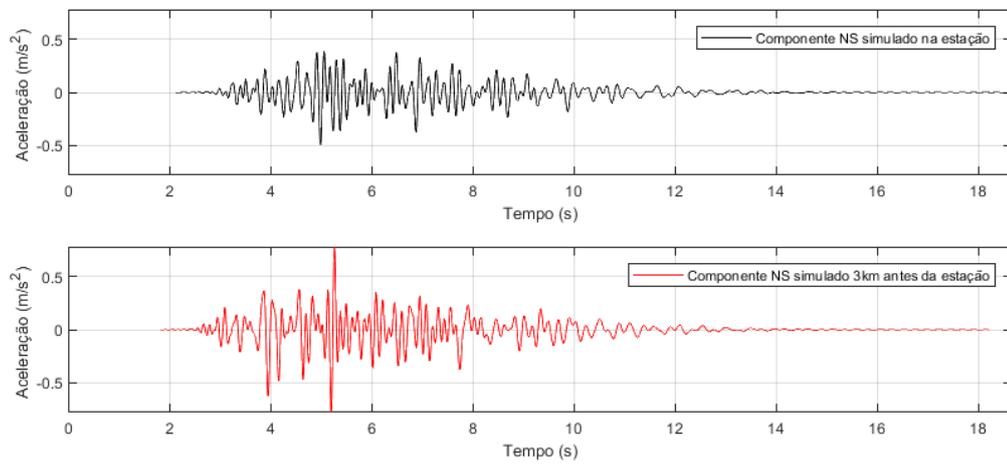


Figura 7.9 – Espectro de resposta de pseudo-aceleração dos três componentes dos acelerogramas registrados e simulados na estação CR4. (a) Componente EW. (b) Componente NS. (c) Componente vertical.

(a)



(b)



(c)

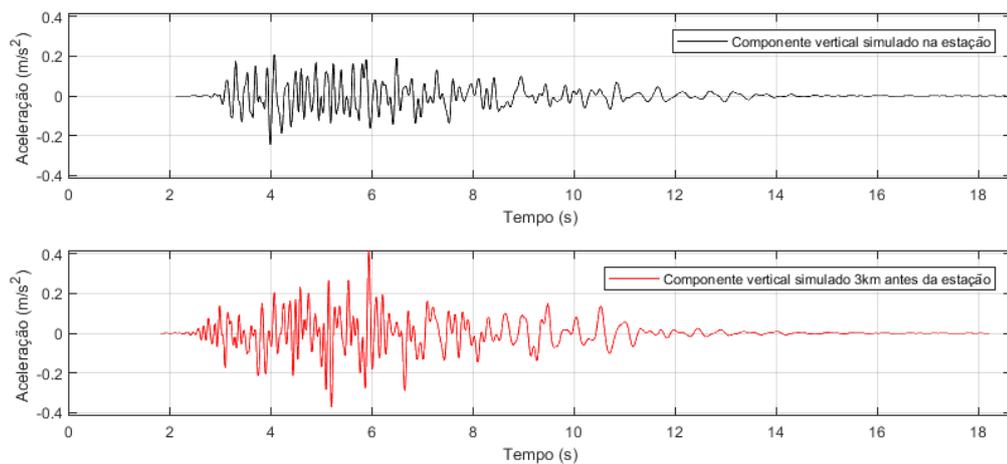
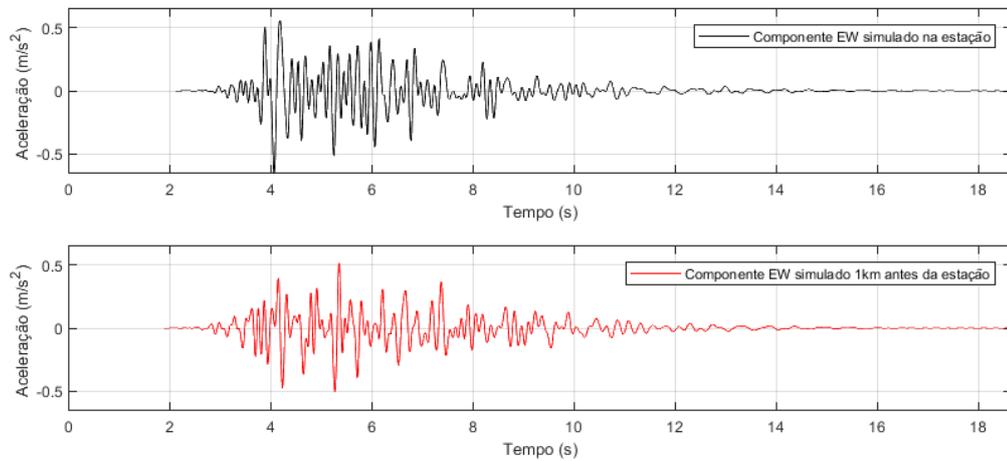
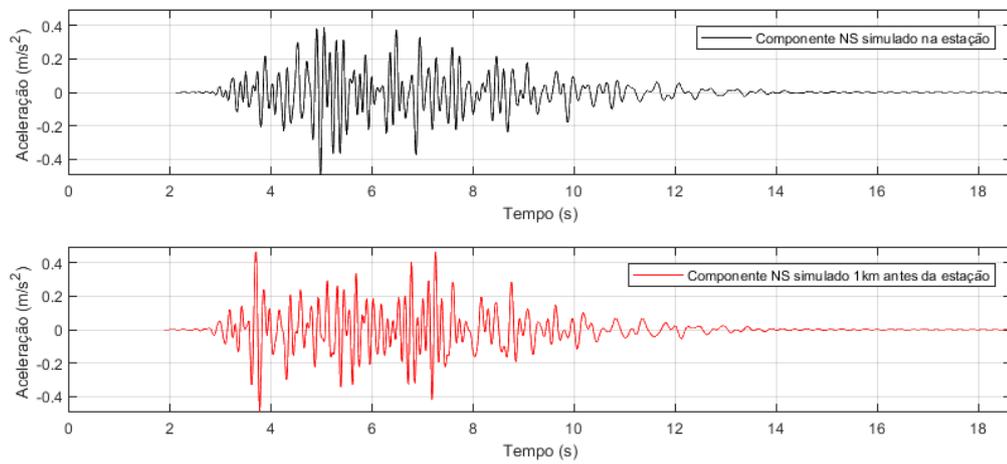


Figura 7.10 – Três componentes dos acelerogramas simulados 3km antes da estação CR4. (a) Componente EW. (b) Componente NS. (c) Componente vertical.

(a)



(b)



(c)

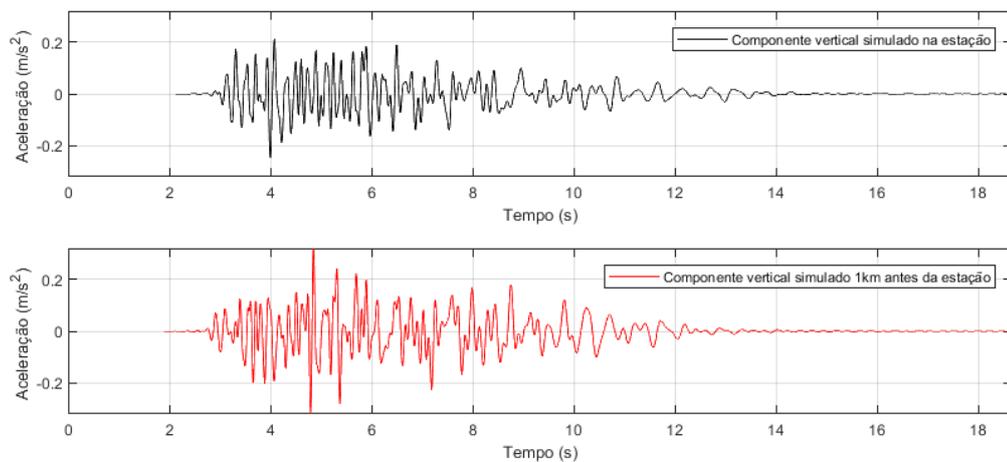
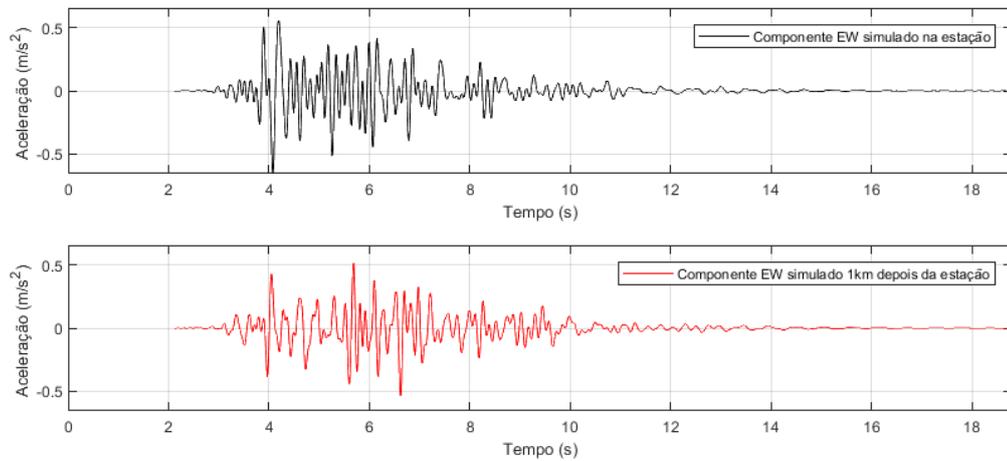
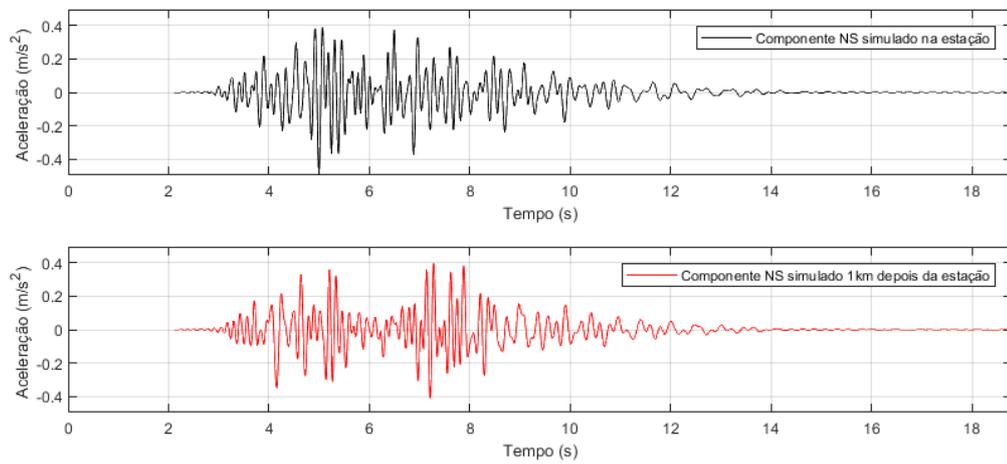


Figura 7.11 – Três componentes dos acelerogramas simulados 1km antes da estação CR4. (a) Componente EW. (b) Componente NS. (c) Componente vertical.

(a)



(b)



(c)

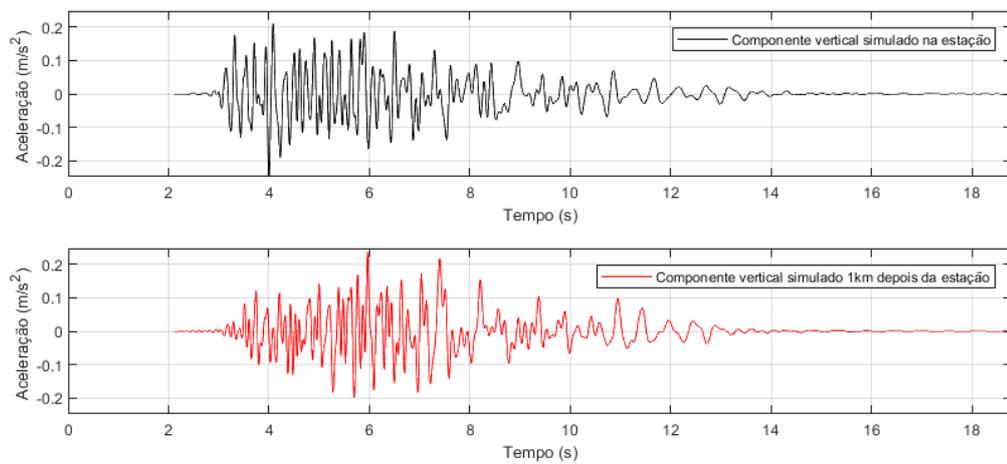
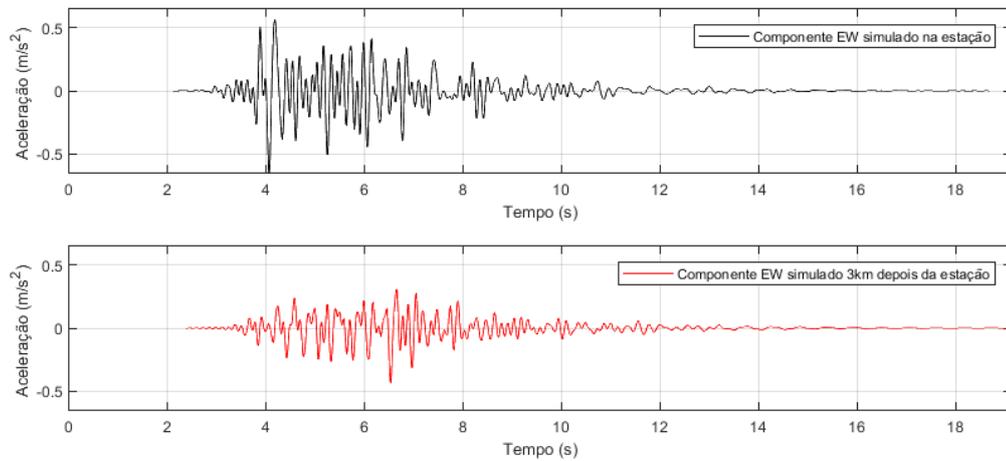
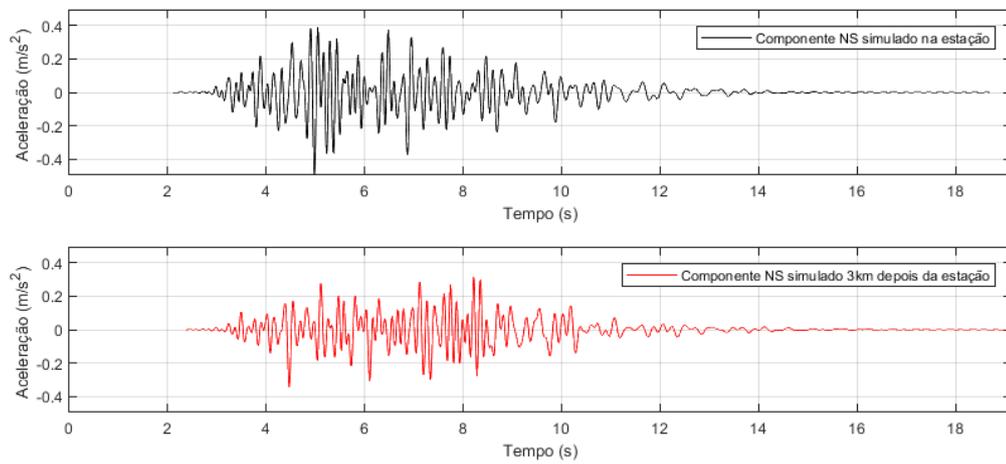


Figura 7.12 – Três componentes dos acelerogramas simulados 1km depois da estação CR4. (a) Componente EW. (b) Componente NS. (c) Componente vertical.

(a)



(b)



(c)

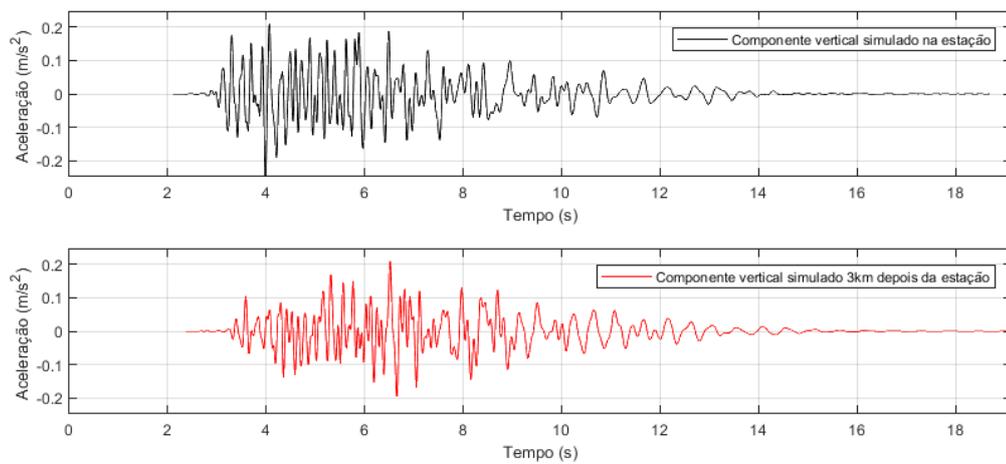
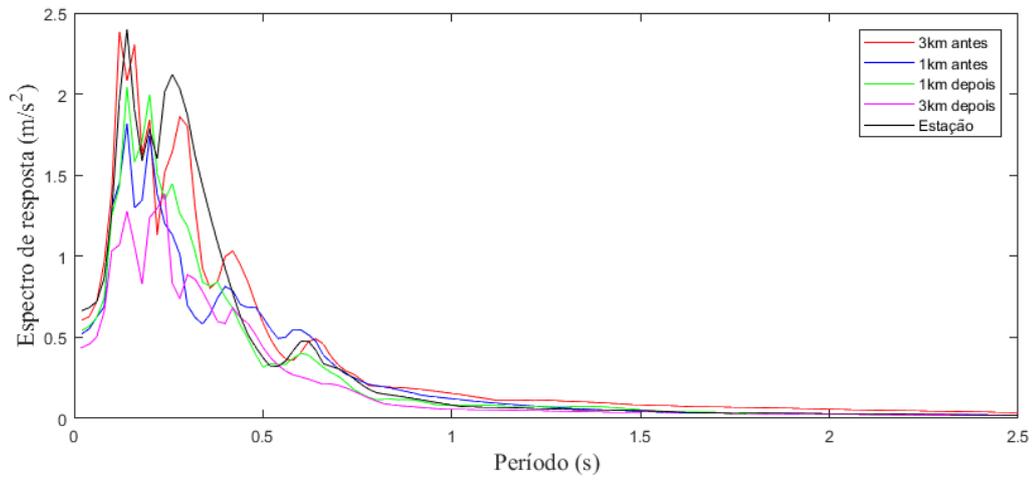
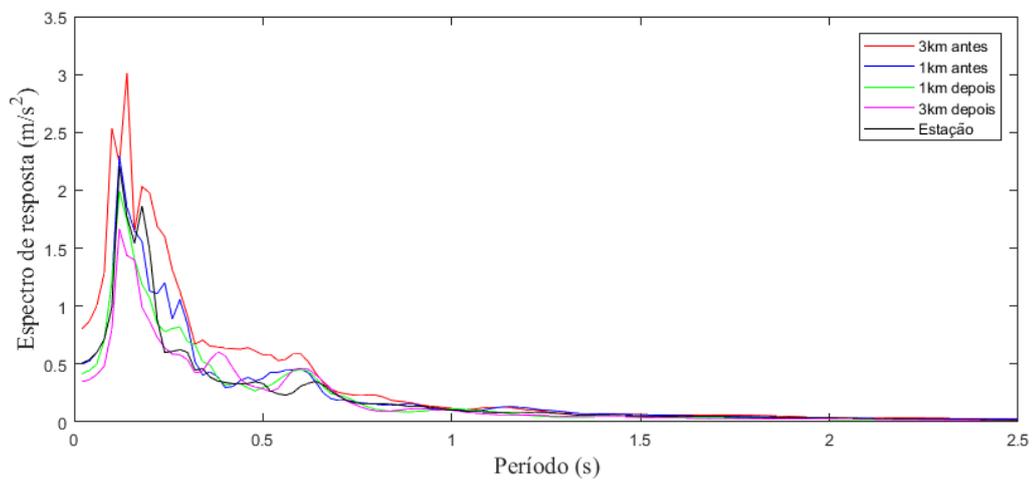


Figura 7.13 – Três componentes dos acelerogramas simulados 3km depois da estação CR4. (a) Componente EW. (b) Componente NS. (c) Componente vertical.

(a)



(b)



(c)

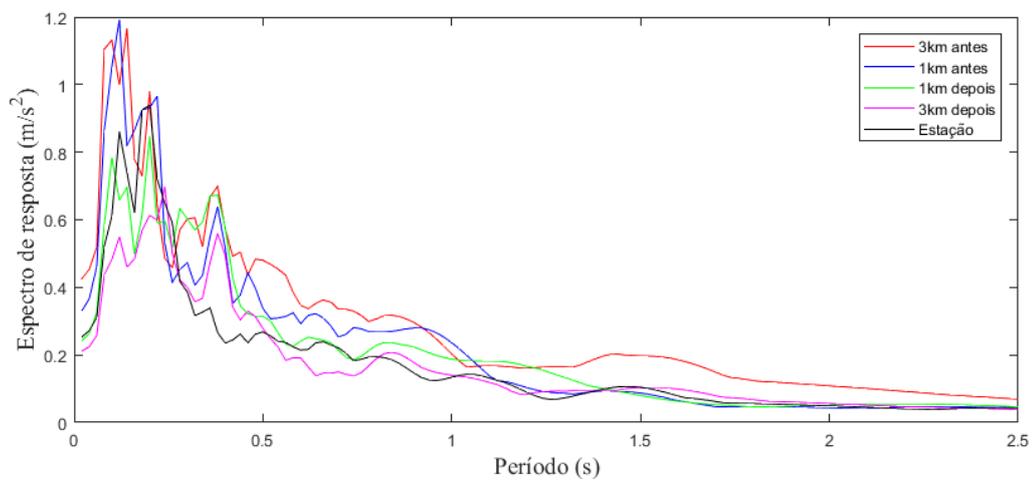


Figura 7.14 – Espectros de resposta de pseudo-aceleração dos três componentes dos acelerogramas simulados. (a) Componente EW. (b) Componente NS. (c) Componente vertical.

7.3 Análise dos resultados

Comparações visuais entre os acelerogramas registrados e simulados e espectros de pseudo-aceleração revelam uma boa concordância em todos os casos, ou seja, os acelerogramas registrados são modelados adequadamente pelo procedimento proposto (especialmente no que diz respeito à parte de movimento forte do solo) e pelas premissas do modelo, para a forma de onda utilizada.

Os erros observados são pequenos e nenhuma tendência específica foi detectada nos eventos examinados. Por exemplo, no caso da Estação PDM, o erro quadrático médio para os valores espectrais na faixa entre 0 e 2,5s (média dos três componentes) é 0,0022 e para o evento registrado na estação CR4, esse valor foi 0,0058. Já o erro quadrático médio entre os acelerogramas (média dos três componentes) é 0,0010 para os componentes das duas estações.

As diferenças entre os valores de pico dos espectros simulados e registrados e dos valores de picos dos acelerogramas registrados e simulados foram um pouco maiores, mas ainda assim inferiores a 10%.

As pequenas diferenças entre acelerogramas registrados e simulados nas estações sismológicas podem ser atribuídas às simplificações do modelo, nas quais propriedades relevantes do processo de ruptura, como dimensões da área de ruptura, a velocidade de ruptura e outros, são muito raramente conhecidos. Recursos adicionais do procedimento, como a consideração de ondas de superfície ou trajetórias curvas das ondas corporais, que foram negligenciadas no presente trabalho, tornariam o procedimento de otimização mais difícil e também propenso a instabilidades.

Ainda, deve ser observado que a função utilizada para a modelagem dos acelerogramas sísmicos têm integrais nulas, conseqüentemente a soma de qualquer número de termos também terá uma área nula. A condição de velocidade final zero, que deve ser satisfeita por qualquer registro de aceleração sísmica, é automaticamente satisfeita pelo modelo adotado.

Em relação aos acelerogramas simulados em locais próximos às duas estações, embora nenhum registro estivesse disponível para comparação, pode-se dizer que os resultados estão bem condizentes com os acelerogramas registrados na respectivas estações, com um conteúdo de frequência ao longo do tempo realista e espectros de resposta de pseudo-aceleração dentro da faixa de valores esperados. Em alguns períodos apresentados

nos gráficos dos espectros de respostas de pseudo-aceleração, o valor da aceleração foi menor antes da estação e em outras vezes maior após a estação, fato este que pode estar relacionado à aleatoriedade apresentada nas variáveis de projeto e a não consideração da heterogeneidade do material da rocha e/ou premissas do modelo.

Embora a base de dados seja certamente insuficiente para estabelecer uma avaliação robusta, conclui-se que o modelo proposto foi muito satisfatório e permitiu reproduzir muito bem os acelerogramas assim como seus respectivos espectros de pseudo-aceleração, apresentando diferenças dentro de valores aceitáveis. Desta forma, a metodologia proposta pode ser utilizada para gerar os três componentes de acelerogramas sísmicos próximos às estações sismológicas.

7.4 Resultados que embasam a escolha da função para a modelagem de cada onda sísmica

O modelo analítico apresentado na Seção 5.2 foi selecionado com base no estudo de três formas de ondas propostas na literatura: a parte real da *wavelet* de Morlet, a parte imaginária da *wavelet* de Morlet e a função proposta por Bruna e Riera, 1988, sendo assim, para modelar os componentes de aceleração ao longo das direções ortogonais q ($q = 1, 2, 3$), são consideradas, inicialmente, as seguintes formas de onda:

- Parte imaginária da *wavelet* de Morlet:

$$a_q(t) = \sum_{j=1}^{N_j} A_{qj} \text{sen}(2\pi f_j t) e^{\frac{-t^2}{2s_j^2}} u(t - t_{a_j}) u(t_{b_j} - t), \quad (7.1)$$

- Parte real da *wavelet* de Morlet:

$$a_q(t) = \sum_{j=1}^{N_j} A_{qj} \text{cos}(2\pi f_j t) e^{\frac{-t^2}{2s_j^2}} u(t - t_{a_j}) u(t_{b_j} - t), \quad (7.2)$$

- Função proposta por Bruna e Riera, 1988:

$$a_q(t) = \sum_{j=1}^{N_j} A_{qj} \text{sen}(2\pi f_j t) \text{sen}\left(\frac{\pi t}{t_{d_j}}\right) u(t - t_{a_j}) u(t_{b_j} - t). \quad (7.3)$$

Nas Equações 7.1-7.3 $u(t)$ é a função de Heaviside e $t_{b_j} = t_{a_j} + t_{d_j}$. A Figura 7.15 ilustra os históricos de aceleração-tempo modelados pelas Equações 7.1-7.3.

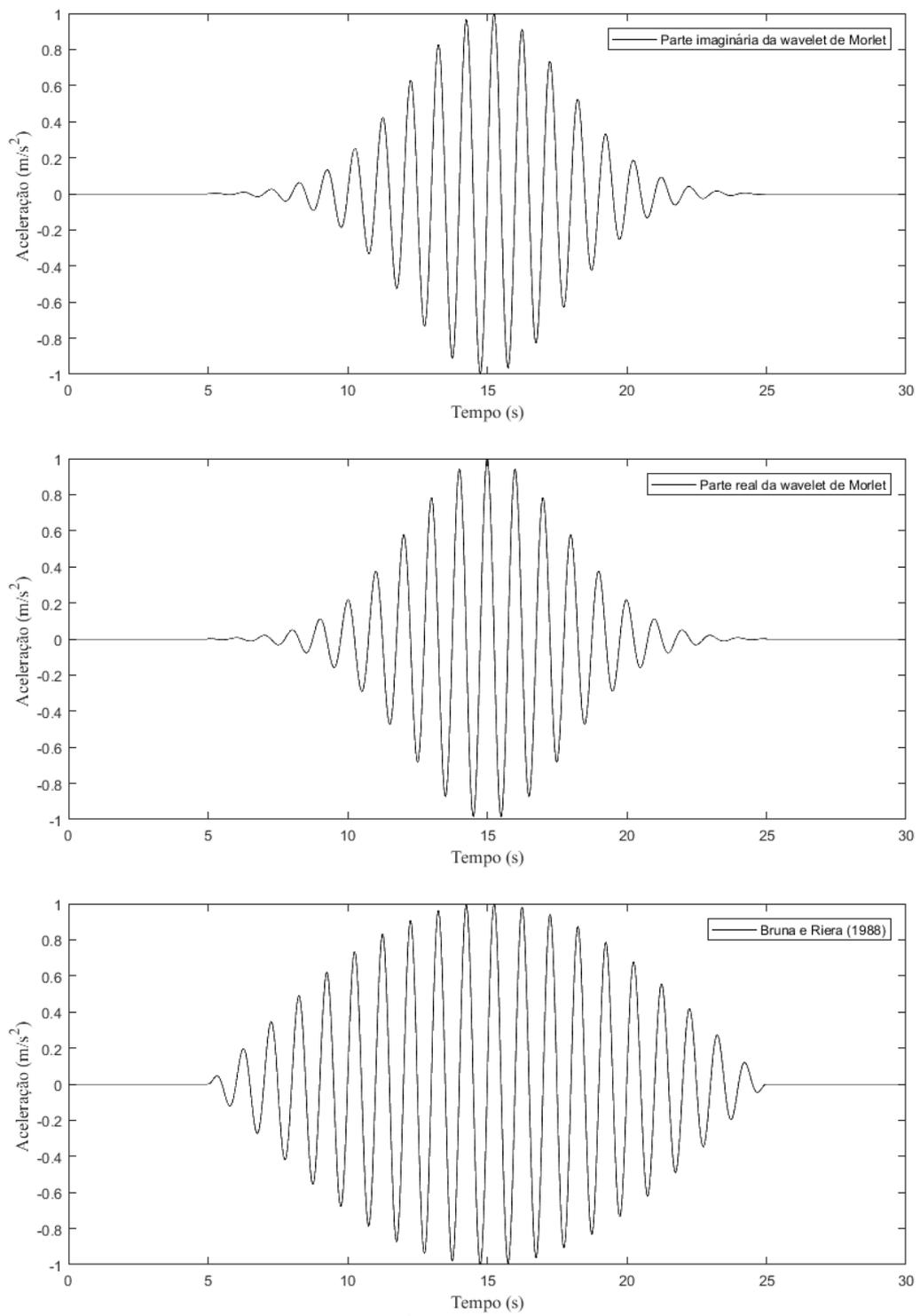


Figura 7.15 – Ilustração das funções dadas pelas Equações 7.1 à 7.3.

Para ilustrar e avaliar as três funções, são apresentados e discutidos exemplos específicos dos terremotos registrados nas estações PDM e CR4. Os parâmetros adotados são dados na Tabela 7.1.

7.4.1 Estação PDM

As Figuras 7.16 à 7.21 apresentam os resultados referentes às simulações realizadas com respeito ao terremoto registrado na estação PDM. As Figuras 7.16 à 7.18 ilustram os acelerogramas registrados e os acelerogramas simulados e as Figuras 7.19 à 7.21 mostram os espectros de resposta de pseudo-aceleração dos componentes registrados e simulados. As barras verticais (azuis) nas Figuras 7.16 à 7.18 indicam a duração do movimento forte, calculado pelo método proposto por Trifunac e Brady, 1975.

As Tabelas 7.4-7.8 mostram os resultados na estação PDM. A Tabela 7.4 apresenta o erro quadrático médio entre os espectros de pseudo-aceleração, para o período de 0 a 2,5s. A Tabela 7.5 apresenta o erro relativo entre os picos dos espectros de pseudo-aceleração. A Tabela 7.6 apresenta o erro quadrático médio entre os acelerogramas. A Tabela 7.7 apresenta o erro relativo entre os picos de aceleração. A Tabela 7.8 exibe a velocidade final dos acelerogramas simulados.

Tabela 7.4 – Erro quadrático médio entre os espectros de pseudo-aceleração (diferença entre os espectros registrados e simulados) na estação PDM, para o período de 0 a 2,5s.

Componente	Morlet (parte imaginária)	Morlet (parte real)	Bruna e Riera, 1988
EW	0,0037	0,0042	0,0058
NS	0,0019	0,0035	0,0044
Vertical	0,0009	0,0015	0,0034
Média	0,0022	0,0031	0,0045

Tabela 7.5 – Erro relativo entre os picos dos espectros de pseudo-aceleração (diferença entre picos registrados e simulados) na estação PDM.

Componente	Morlet (parte imaginária)	Morlet (parte real)	Bruna e Riera, 1988
EW	0,0671	0,0670	0,0675
NS	0,0277	0,0177	0,0125
Vertical	0,0135	0,0107	0,0059
Média	0,0361	0,0318	0,0286

Tabela 7.6 – Erro quadrático médio entre os acelerogramas registrados e simulados na estação PDM.

Componente	Morlet (parte imaginária)	Morlet (parte real)	Bruna e Riera, 1988
EW	0,0014	0,0014	0,0016
NS	0,0009	0,0010	0,0010
Vertical	0,0006	0,0006	0,0006
Média	0,0010	0,0010	0,0011

Tabela 7.7 – Erro relativo entre os picos de aceleração do solo (diferença entre picos registrados e simulados), na estação PDM.

Componente	Morlet (parte imaginária)	Morlet (parte real)	Bruna e Riera, 1988
EW	0,1475	0,1009	0,0913
NS	0,0955	0,1154	0,1171
Vertical	0,0315	0,1256	0,0106
Média	0,0915	0,1140	0,0730

Tabela 7.8 – Velocidade final dos acelerogramas simulados na estação PDM (m/s).

Componente	Morlet (parte imaginária)	Morlet (parte real)	Bruna e Riera, 1988
EW	0,00	0,00	0,00
NS	0,00	0,01	0,00
Vertical	0,00	0,01	0,00
Média	0,00	0,01	0,00

7.4.2 Estação CR4

As Figuras 7.22 à 7.27 apresentam os resultados referentes às simulações realizadas com respeito ao terremoto registrado na estação CR4. As Figuras 7.22 à 7.24 ilustram os acelerogramas registrados e os acelerogramas simulados e as Figuras 7.25 à 7.27 mostram os espectros de resposta de pseudo-aceleração dos componentes registrados e simulados. As barras verticais (azuis) nas Figuras 7.22 à 7.24 indicam a duração do movimento forte, calculado pelo método proposto por Trifunac e Brady, 1975.

As Tabelas 7.9-7.13 mostram os resultados na estação CR4. A Tabela 7.9 apresenta o erro quadrático médio entre os espectros de pseudo-aceleração, para o período de 0 a 2,5s. A Tabela 7.10 apresenta o erro relativo entre os picos dos espectros de pseudo-aceleração. A Tabela 7.11 apresenta o erro quadrático médio entre os acelerogramas. A Tabela 7.12 apresenta o erro relativo entre os picos de aceleração. A Tabela 7.13 exibe a velocidade final dos acelerogramas simulados.

Tabela 7.9 – Erro quadrático médio entre os espectros de pseudo-aceleração (diferença entre os espectros registrados e simulados) na estação CR4, para o período de 0 a 2,5s.

Componente	Morlet (parte imaginária)	Morlet (parte real)	Bruna e Riera, 1988
EW	0,0115	0,0131	0,0163
NS	0,0046	0,0019	0,0031
Vertical	0,0012	0,0005	0,0006
Média	0,0058	0,0052	0,0067

Tabela 7.10 – Erro relativo entre os picos dos espectros de pseudo-aceleração (diferença entre picos registrados e simulados) na estação CR4.

Componente	Morlet (parte imaginária)	Morlet (parte real)	Bruna e Riera, 1988
EW	0,0666	0,1272	0,0012
NS	0,0208	0,0217	0,0423
Vertical	0,0176	0,0213	0,0346
Média	0,0350	0,0567	0,0260

Tabela 7.11 – Erro quadrático médio entre os acelerogramas registrados e simulados na estação CR4.

Componente	Morlet (parte imaginária)	Morlet (parte real)	Bruna e Riera, 1988
EW	0,0016	0,0015	0,0017
NS	0,0011	0,0012	0,0010
Vertical	0,0004	0,0003	0,0004
Média	0,0010	0,0010	0,0010

Tabela 7.12 – Erro relativo entre os picos de aceleração do solo (diferença entre picos registrados e simulados), na estação CR4.

Componente	Morlet (parte imaginária)	Morlet (parte real)	Bruna e Riera, 1988
EW	0,0278	0,1295	0,1451
NS	0,0194	0,0682	0,0215
Vertical	0,0017	0,0772	0,0703
Média	0,0163	0,0916	0,0790

Tabela 7.13 – Velocidade final dos acelerogramas simulados na estação CR4 (m/s).

Componente	Morlet (parte imaginária)	Morlet (parte real)	Bruna e Riera, 1988
EW	0,00	0,00	0,00
NS	0,00	0,00	0,00
Vertical	0,00	0,00	0,00
Média	0,00	0,00	0,00

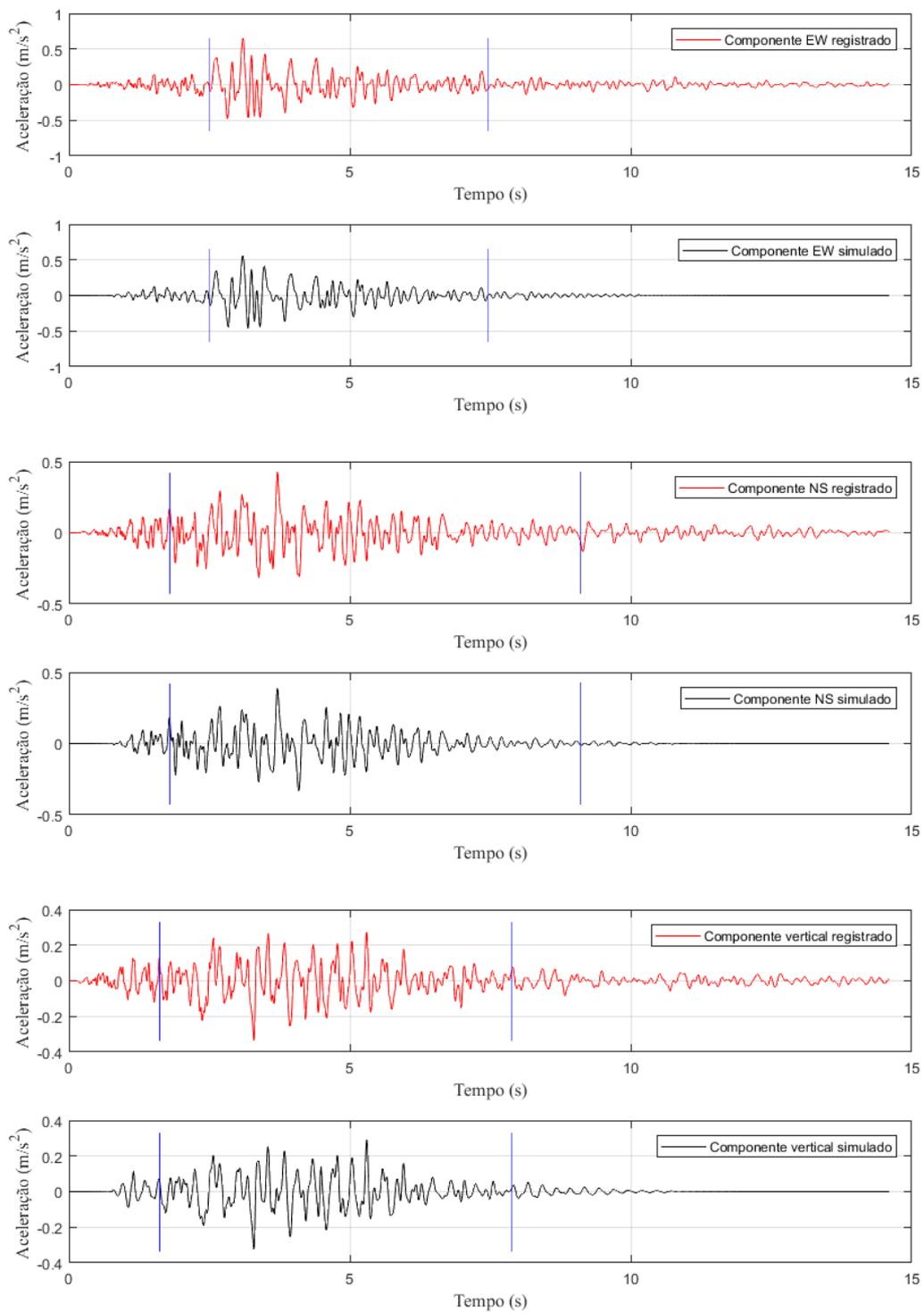


Figura 7.16 – Três componentes dos acelerogramas registrados e simulados na estação PDM utilizando a parte imaginária da *wavelet* de Morlet.

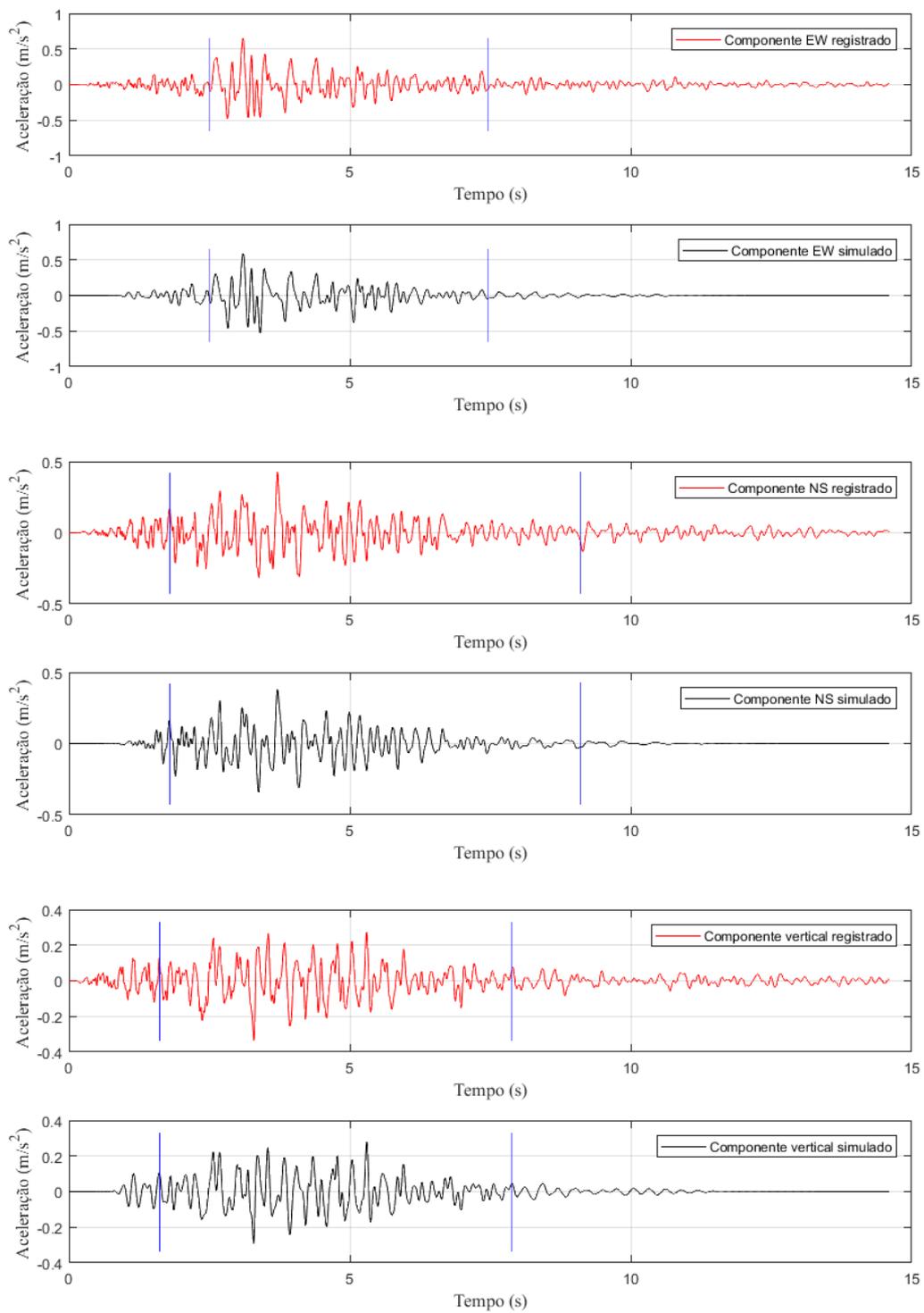


Figura 7.17 – Três componentes dos acelerogramas registrados e simulados na estação PDM utilizando a parte real da *wavelet* de Morlet.

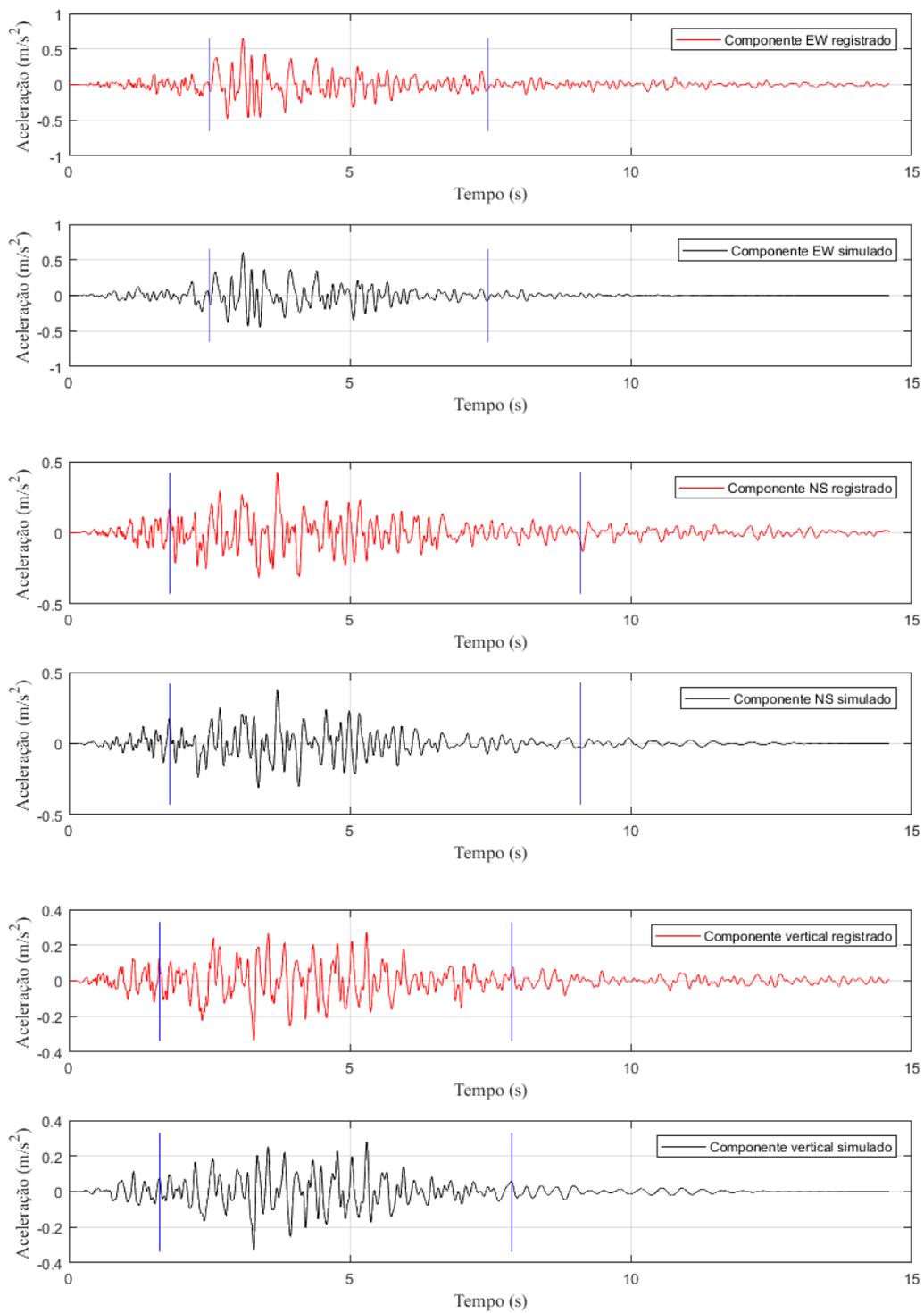


Figura 7.18 – Três componentes dos acelerogramas registrados e simulados na estação PDM utilizando a função de Bruna e Riera, 1988.

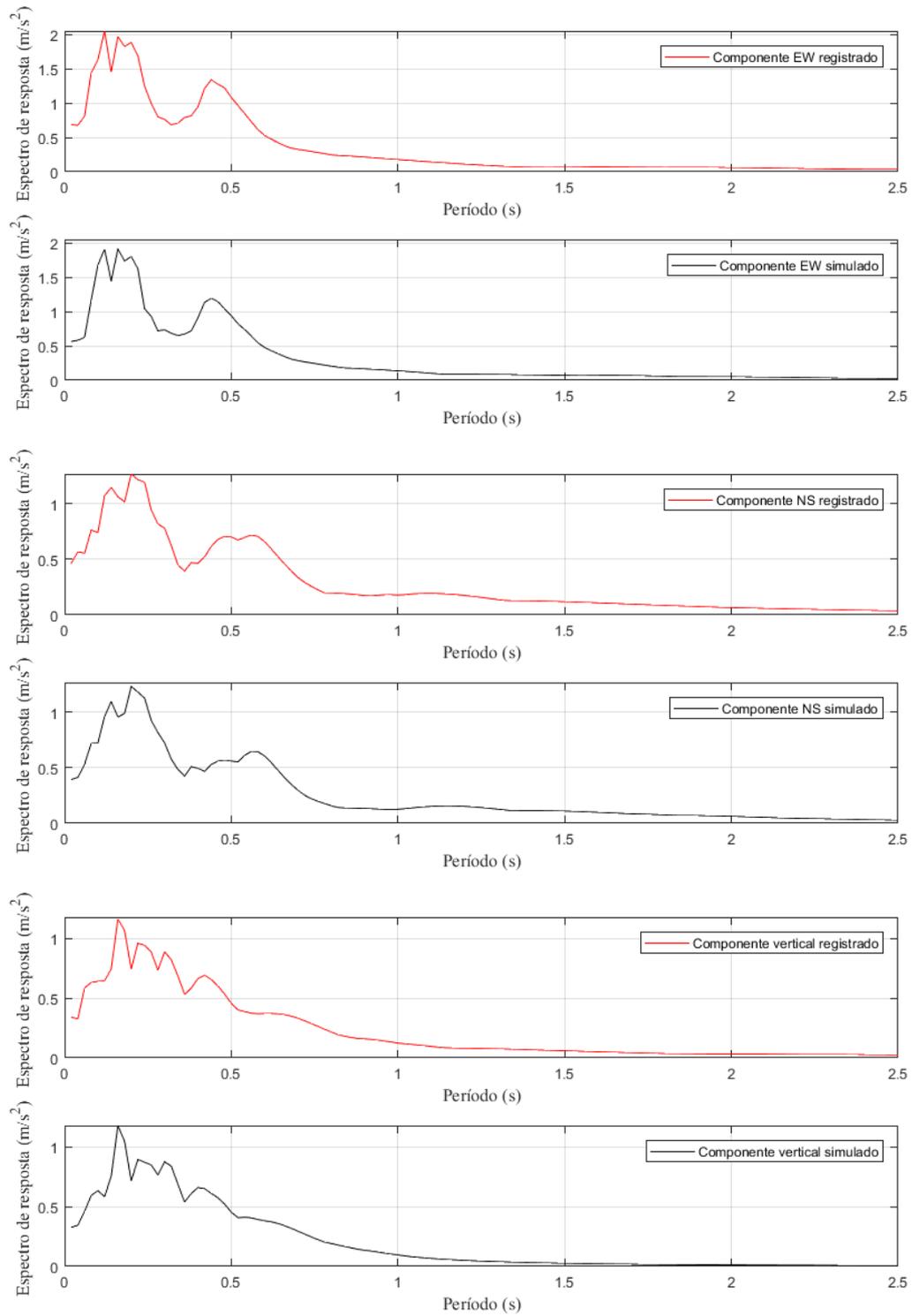


Figura 7.19 – Espectro de resposta de pseudo-aceleração dos três componentes dos acelerogramas registrados e simulados na estação PDM utilizando a parte imaginária da *wavelet* de Morlet.

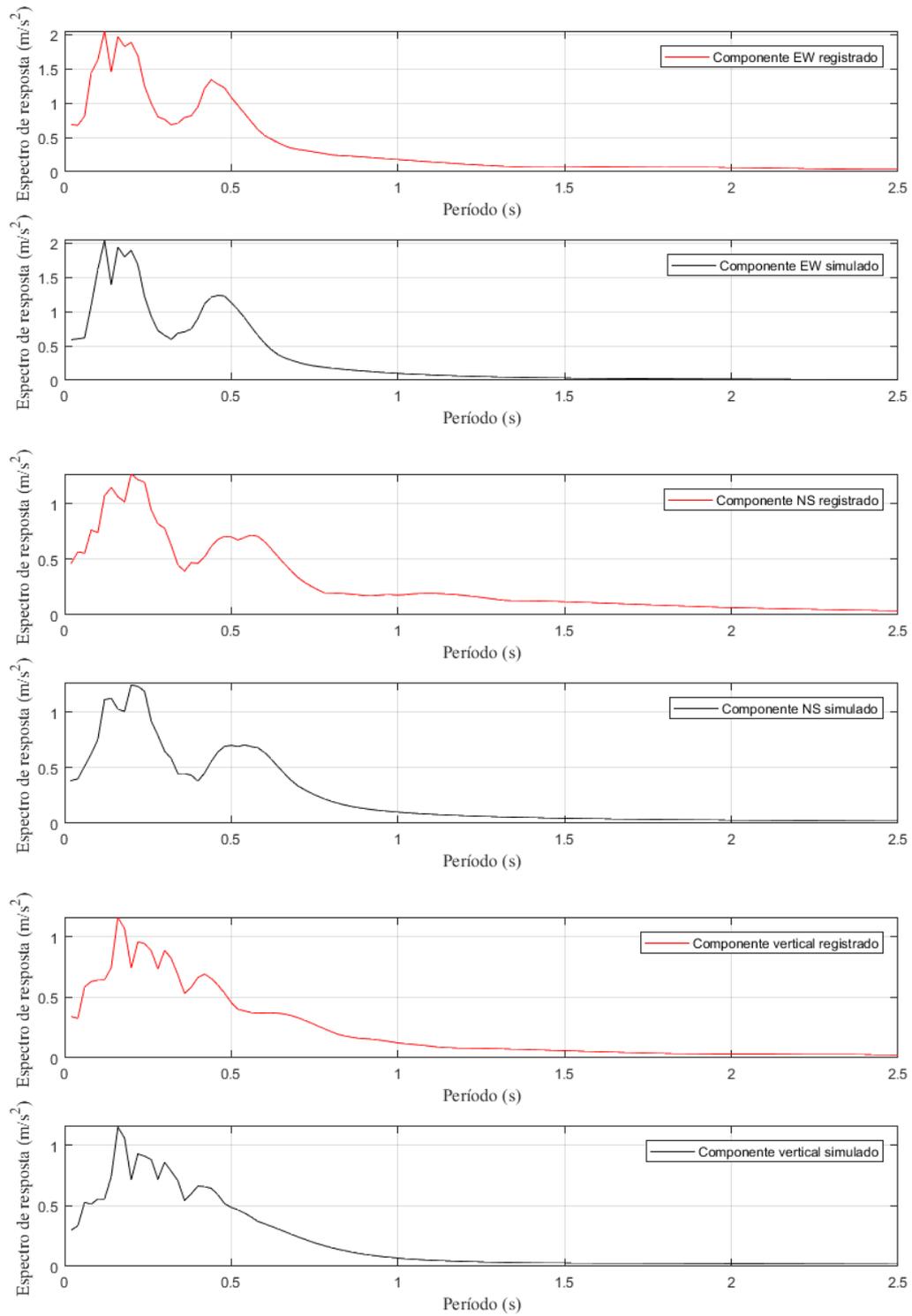


Figura 7.20 – Espectro de resposta de pseudo-aceleração dos três componentes dos acelerogramas registrados e simulados na estação PDM utilizando a parte real da *wavelet* de Morlet.

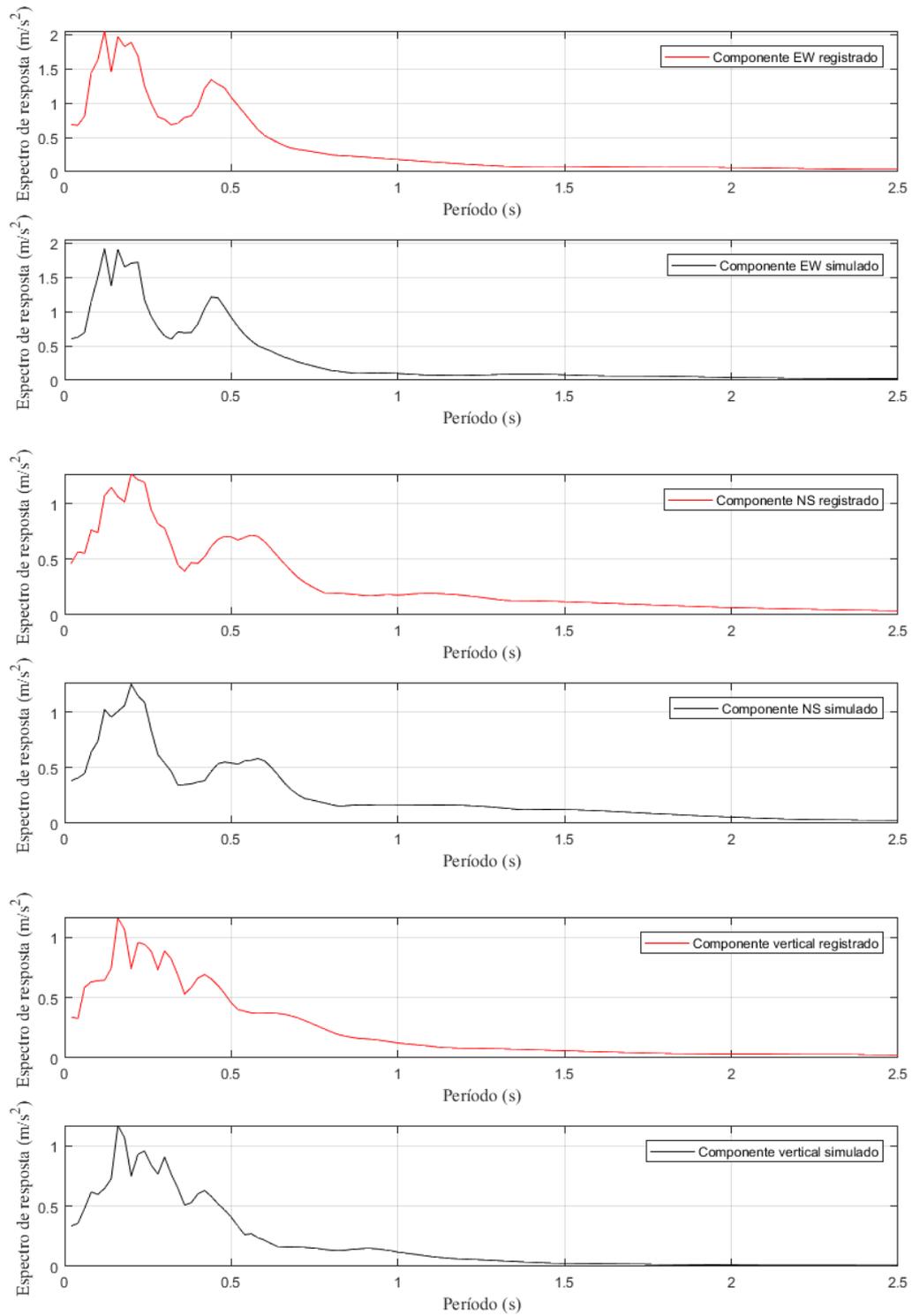


Figura 7.21 – Espectro de resposta de pseudo-aceleração dos três componentes dos acelerogramas registrados e simulados na estação PDM utilizando a função de Bruna e Riera, 1988.

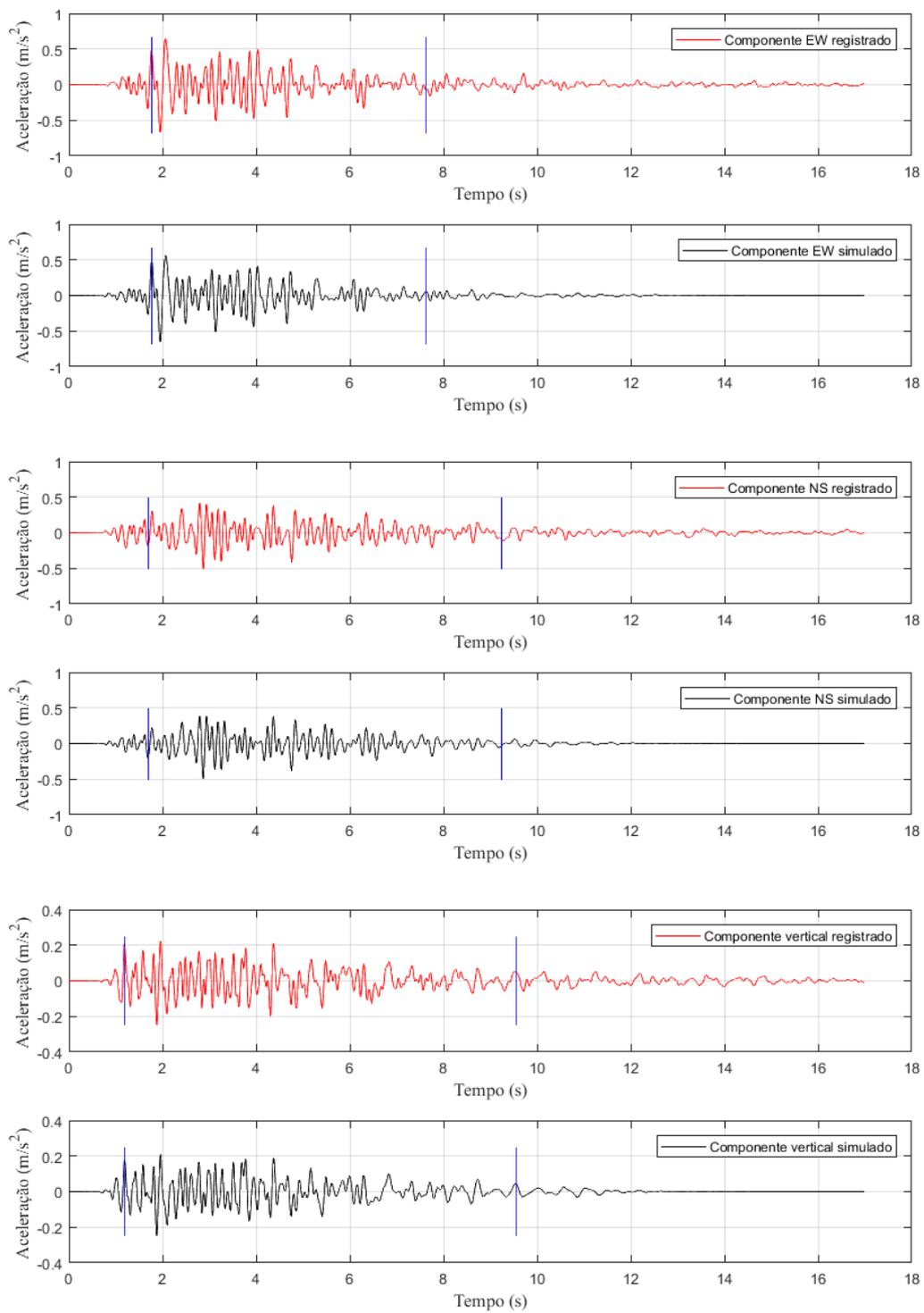


Figura 7.22 – Três componentes dos acelerogramas registrados e simulados na estação CR4 utilizando a parte imaginária da *wavelet* de Morlet.

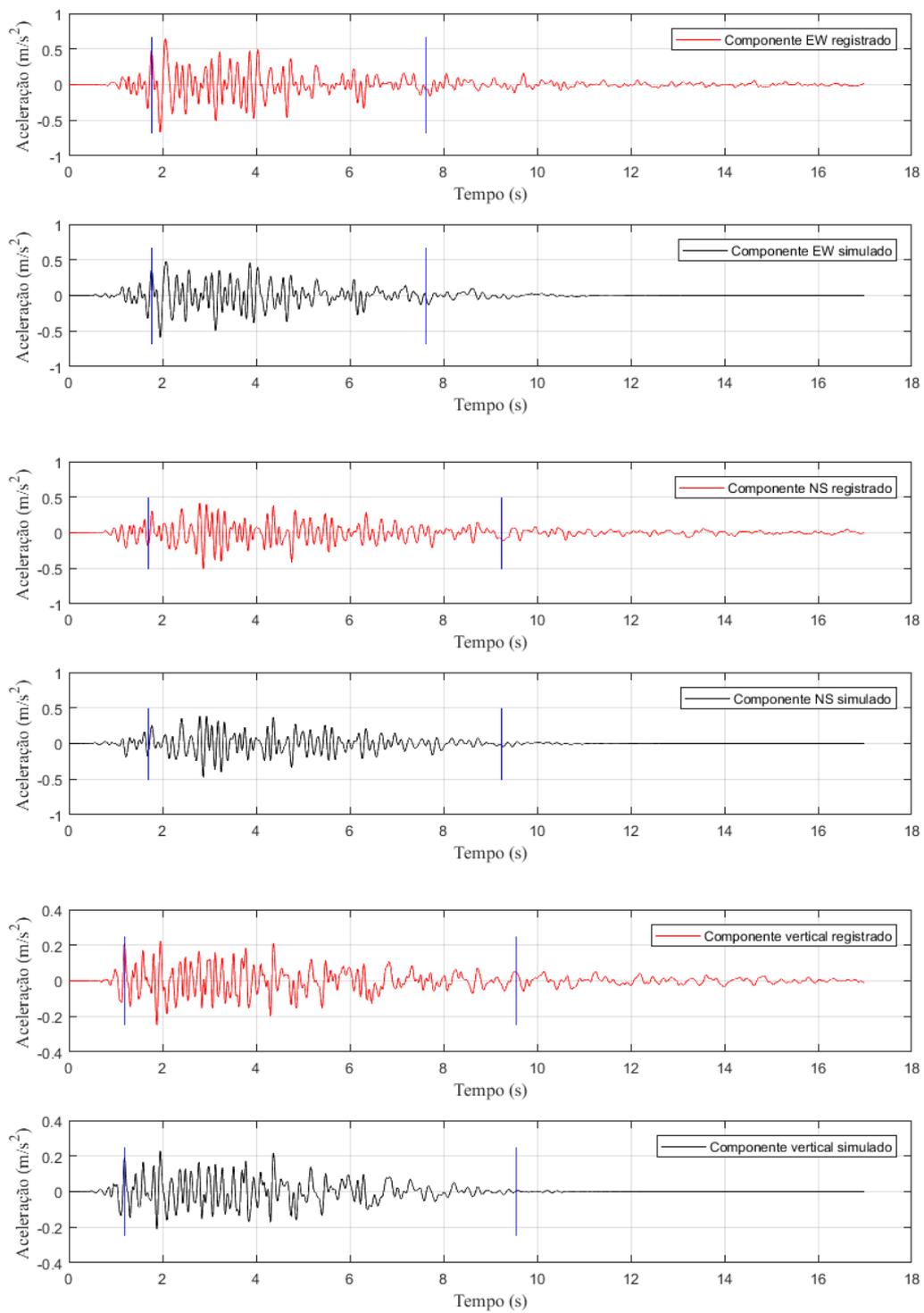


Figura 7.23 – Três componentes dos acelerogramas registrados e simulados na estação CR4 utilizando a parte real da *wavelet* de Morlet.

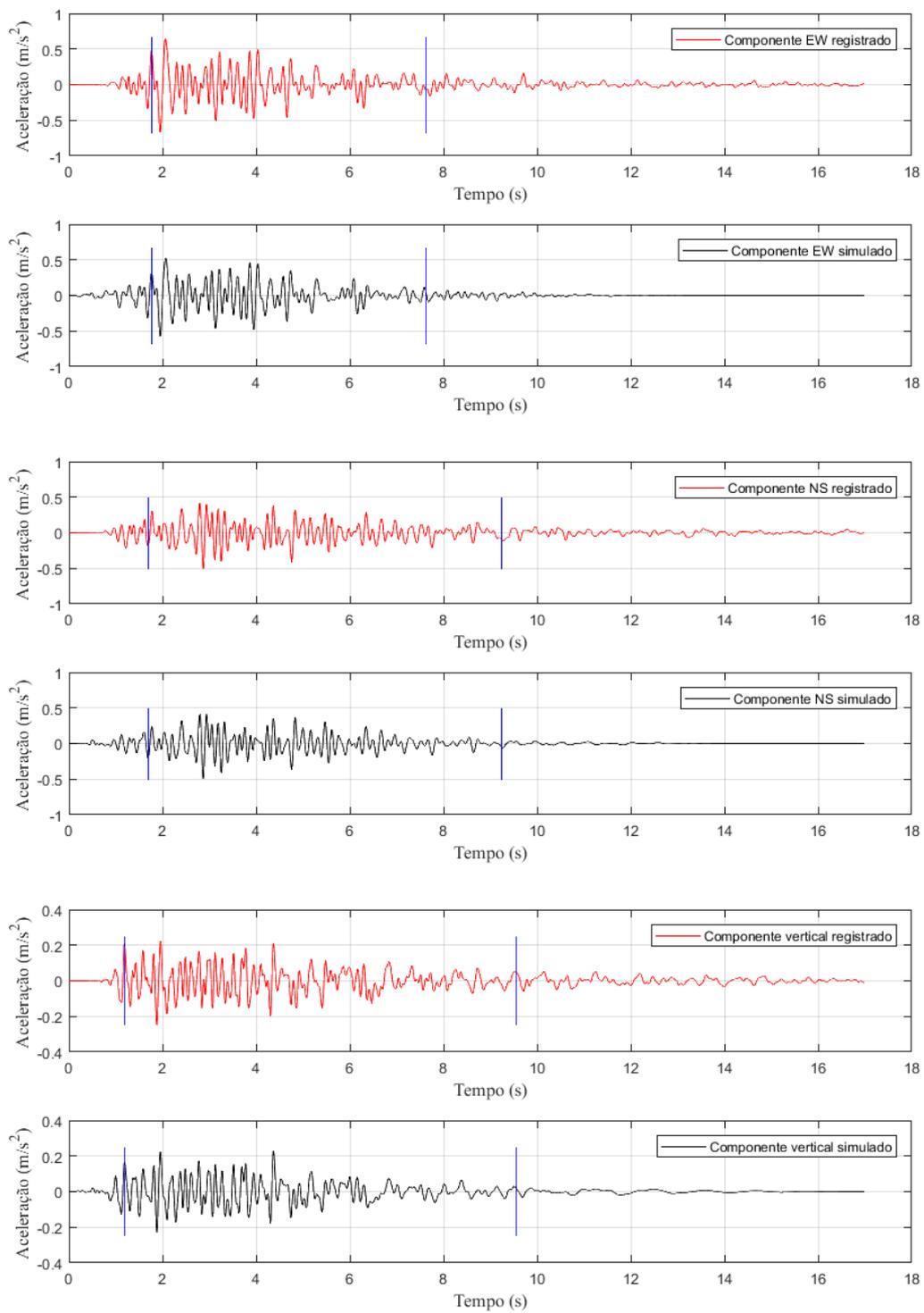


Figura 7.24 – Três componentes dos acelerogramas registrados e simulados na estação CR4 utilizando a função de Bruna e Riera, 1988.

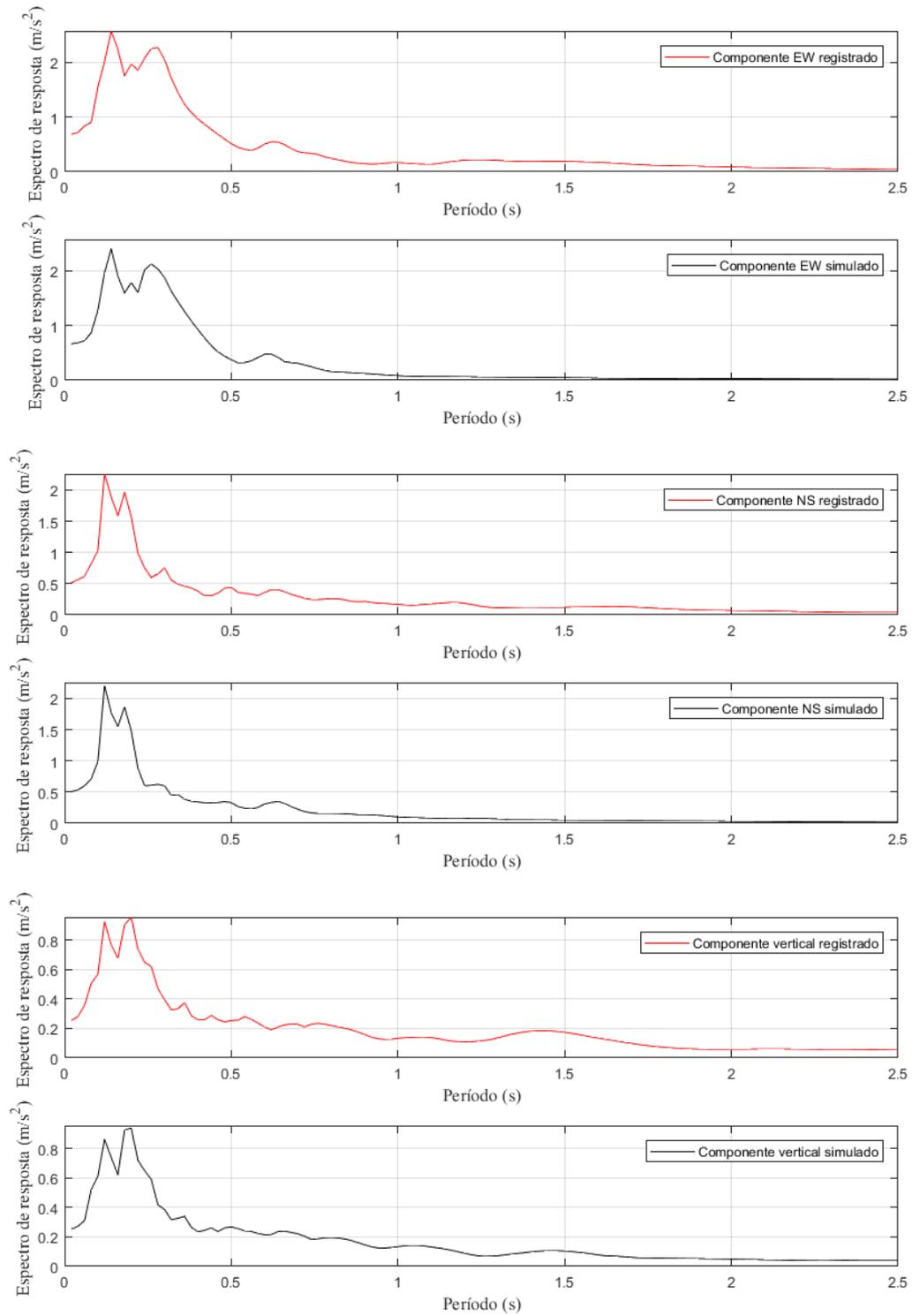


Figura 7.25 – Espectro de resposta de pseudo-aceleração dos três componentes dos acelerogramas registrados e simulados na estação CR4 utilizando a parte imaginária da *wavelet* de Morlet.

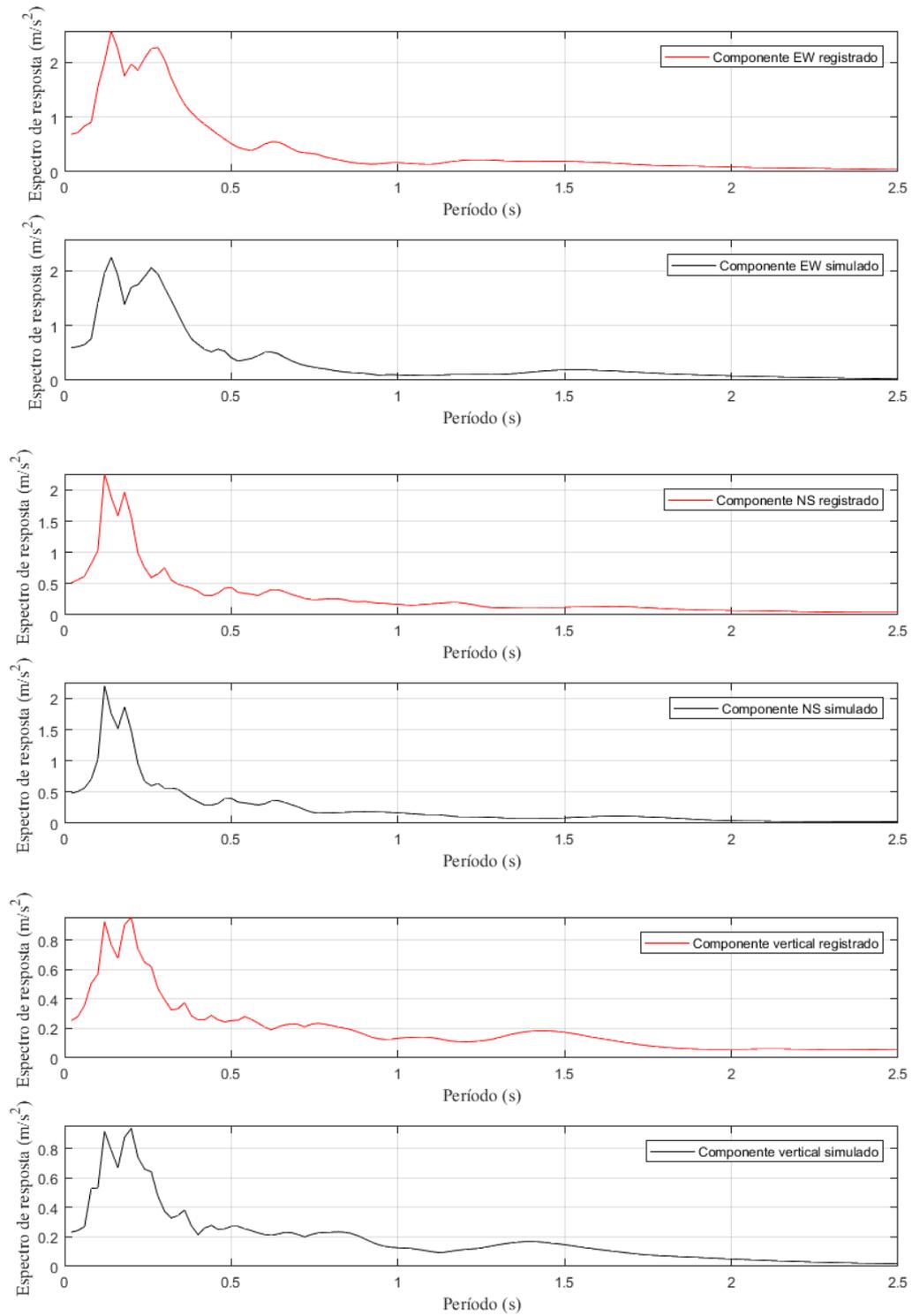


Figura 7.26 – Espectro de resposta de pseudo-aceleração dos três componentes dos acelerogramas registrados e simulados na estação CR4 utilizando a parte real da *wavelet* de Morlet.

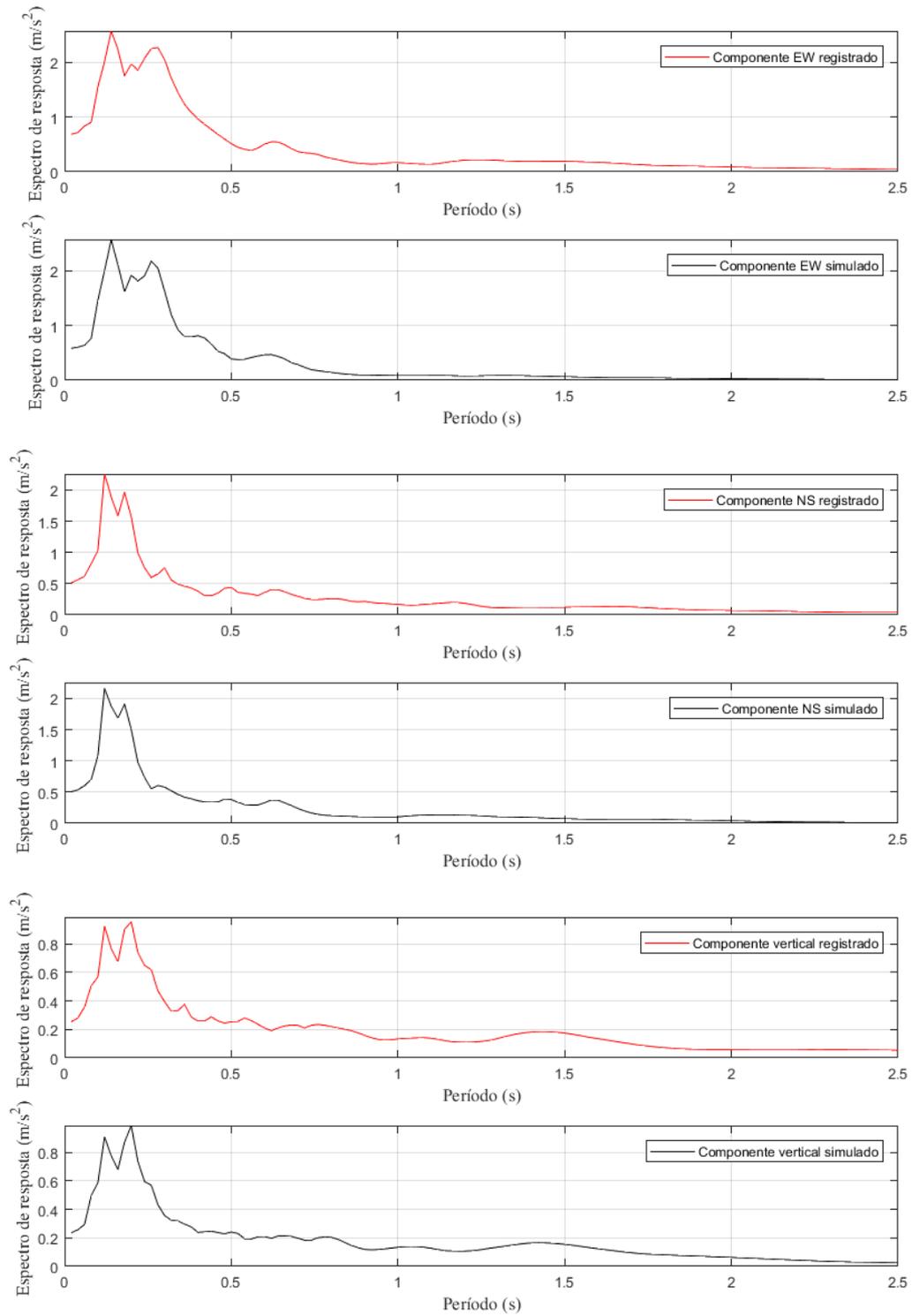


Figura 7.27 – Espectro de resposta de pseudo-aceleração dos três componentes dos acelerogramas registrados e simulados na estação CR4 utilizando a função de Bruna e Riera, 1988.

7.4.3 Análise dos resultados

Comparações visuais entre os acelerogramas registrados e simulados e seus respectivos espectros de pseudo-aceleração revelam uma concordância muito estreita em todos os casos, ou seja, ambos são modelados corretamente pelo procedimento proposto e pelas premissas do modelo, para as três funções de onda aqui examinadas.

Os erros observados são pequenos e nenhuma tendência específica foi detectada nos eventos examinados. Por exemplo, no caso da Estação PDM, o erro quadrático médio para os valores espectrais na faixa entre 0 e 2,5s (média dos três componentes) são 0,0022, 0,0031 e 0,0045 para as partes imaginárias e reais das *wavelets* de Morlet e a função de Bruna e Riera, 1988, respectivamente. Para o evento registrado na estação CR4, esses valores foram 0,0058, 0,0052 e 0,0067, respectivamente.

O erro quadrático médio entre os acelerogramas (média dos três componentes) são, para o evento registrado na estação PDM, 0,0010, 0,0010 e 0,0011 para as partes imaginárias e reais das *wavelets* de Morlet e a função de Bruna e Riera, 1988, respectivamente. Para o evento registrado na estação CR4, esses valores foram 0,0010, 0,0010 e 0,0010, respectivamente.

As diferenças entre os valores de pico dos espectros simulados e registrados foram um pouco maiores, mas os menores valores não estão associados ao mesmo tipo de forma de onda.

Embora a base de dados seja certamente insuficiente para estabelecer uma avaliação robusta, conclui-se que o erro quadrático médio entre os espectros para as três funções de forma de onda examinadas é da ordem de 0,46% (média), enquanto o erro quadrático médio dos entre os acelerogramas para as três funções de forma de onda examinadas é da ordem de 0,1% (média), e os erros nos valores de pico variam em torno de 5,67% (média).

Finalmente, deve ser observado que a parte imaginária das *wavelets* de Morlet e a função de Bruna e Riera, 1988 têm integrais zero, conseqüentemente a soma de qualquer número de termos também terá uma área nula. A condição de velocidade final zero, que deve ser satisfeita por qualquer registro de aceleração sísmica, é automaticamente satisfeita pela parte imaginária das *wavelets* de Morlet e pela função de Bruna e Riera, 1988, mas não pela parte real das *wavelets* de Morlet (Veja as Tabelas I.6 e I.11). O erro obtido com parte real das *wavelets* de Morlet, apesar de ser pequeno, pode ser relevante na simulação de eventos de curta duração, por exemplo de 2 ou 3 segundos.

8 CONCLUSÕES

Conforme foi exposto, o estudo da modelagem sísmica é algo relevante. Muitas mortes e destruições podem ser evitadas através da aplicação efetiva de princípios da engenharia. Neste caso, a modelagem da excitação sísmica se torna o ponto central.

Neste contexto, o presente trabalho propôs duas metodologias para a simulação de acelerogramas sísmicos. Sabe-se que muitas metodologias para a simulação de acelerogramas sísmicos foram desenvolvidas; no entanto, a grande maioria foi direcionada para a geração de apenas um dos componentes de aceleração do solo ou para simular os três componentes independentemente. Assim, a principal contribuição desta pesquisa é o desenvolvimento de metodologias para a geração simultânea dos três componentes da aceleração sísmica.

As metodologias propostas são baseada no uso de um algoritmo evolucionário. Especificamente, assume-se que os três componentes dos acelerogramas sísmicos são modelados por equações simples, e o Backtracking Search Optimization Algorithm (BSA) atua para encontrar os parâmetros dessas equações que minimizem a função objetivo escolhida. A primeira metodologia foi desenvolvida com o objetivo de gerar simultaneamente três componentes da aceleração do solo que concordem com o pico de aceleração, a duração do movimento forte e conteúdo de frequência dos três componentes registrados em uma estação sismológica. A segunda metodologia foi desenvolvida com o objetivo de gerar simultaneamente os três componentes da aceleração do solo em locais próximos a uma estação sismológica.

Como pôde ser observado as duas metodologias têm em comum a fato de utilizarem o BSA para a geração simultânea dos três componentes da aceleração do solo. Assim, a principal diferença entre elas, além do fato de utilizarem funções distintas, é o fato de que a segunda metodologia utiliza alguns parâmetros da fonte para a geração dos três componentes da aceleração do solo, enquanto a primeira necessita apenas do registro dos três componentes da aceleração do solo.

Para avaliar o desempenho dos dois procedimentos numéricos, os resultados de quatro simulações foram ilustrados. As simulações para o terremoto de 18 de janeiro de 2017 (estação AMT) e 20 de fevereiro de 2017 (estação MTR), ocorridos na Itália Central, foram escolhidos para avaliar a primeira metodologia e os terremotos de 29 de dezembro

de 2013 (estação PDM) e 16 de janeiro de 1981 (estação CR4), ocorridos na Itália, foram escolhidos para avaliar a segunda metodologia.

Os resultados para as estações AMT e MTR mostraram que o método proposto para a simulação dos três componentes de acelerogramas sísmicos com características predeterminadas resulta em acelerogramas simulados que atendem bem aos objetivos pretendidos. Todos os acelerogramas gerados possuem as características escolhidas dos acelerogramas registrados, a saber, o pico de aceleração, a duração do movimento forte do solo e o conteúdo de frequência, portanto este método permite encontrar um conjunto de acelerogramas que possuem as características relevantes desejadas.

Os resultados para as estações PDM e CR4 mostraram que o método adotado para a simulação dos três componentes de acelerogramas sísmicos em pontos próximos à estação sísmica, além de permitir a reprodução de acelerogramas registrados (especialmente no que diz respeito à parte de movimento forte do solo) e de seus respectivos espectros de resposta de pseudo-aceleração, permite gerar acelerogramas próximos às estações sismológicas. Embora nenhum registro estivesse disponível para verificar os acelerogramas simulados em locais próximos, as diferenças com os movimentos registrados na estação sismológica são bem condizentes e caem dentro da faixa de valores esperados.

Por fim, deve-se mencionar que ambas as metodologias propostas são flexíveis, isto é, parâmetros diferentes, funções objetivos diferentes e funções envelopes diferentes, podem ser adotados para a geração simultânea dos três componentes dos acelerogramas sísmicos. Todos os resultados sugerem que os modelos propostos podem ser utilizados em aplicações práticas.

8.1 Proposta para a continuidade do trabalho

Com o objetivo de dar continuidade à pesquisa desenvolvida até a presente data propõe-se:

- Elaborar um modelo numérico para a geração simultânea dos três componentes da aceleração sísmica, utilizando a teoria de redes neurais;
- Inserir na metodologia para a simulação dos três componentes de acelerogramas sísmicos em pontos próximos à estação sísmica as ondas de superfície, as ondas coda e considerar reflexões e refrações das ondas de corpo;
- Estender a metodologia para a simulação dos três componentes de acelerogramas sísmicos em pontos próximos à estação sísmica, para gerar acelerogramas sísmicos artificiais em pontos mais afastados da estação sismológica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. **NBR 15.421: Projeto de Estruturas Resistentes a Sismos-Procedimento**, 2006.

Amin, M. e Ang, A. H. S. Non-stationary stochastic model of earthquake motion, **Journal of Engineering Mechanics (ASCE)**, vol. 94, p. 559–583, 1968.

Amiri, G. G., Bagheri, A., e Razaghi, S. A. S. Generation of Multiple Earthquake Accelerograms Compatible with Spectrum Via the Wavelet Packet Transform and Stochastic Neural Networks, **Journal of Earthquake Engineering**, vol. 13, p. 899–915, 2009.

Amiri, G. G., Shahjouei, A., Saadat, S., e Ajallooeian, M. Hybrid Evolutionary-Neural Network Approach in Generation of Artificial Accelerograms Using Principal Component Analysis and Wavelet-Packet Transform, **Journal of Earthquake Engineering**, vol. 15, p. 50–76, 2011.

Amiri, M. F., Eyvari, S. A. S., Hasanpoor, H., e Amiri, M. S. Generation of synthetic earthquake records by artificial intelligence techniques, **International Journal of Optimization in Civil Engineering**, vol. 8, p. 15–82, 2018.

Back, T. **Evolutionary Algorithms in Theory and Practice**. Oxford University Press, Inc., 1996.

Bolt, B. A. **Duration of Strong Motion**. In Proceedings of the Fourth World Conference on Earthquake Engineering, Santiago, Chile, 1969.

Boore, D. M. e Bommer, J. J. Processing of strong-motion accelerograms: needs, options and consequences, **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, vol. 25, p. 93–115, 2005.

Bruna, R. A. e Riera, J. D. Towards the simultaneous generation of the three components of the seismic acceleration on rock surface, **Nuclear Engineering and Design**, vol. 110, p. 153–163, 1988.

Bycroft, G. N. White noise representation of earthquakes, **Journal of the Engineering Mechanics Division**, vol. 86, p. 1–16, 1960.

Cacciola, P. A stochastic approach for generating spectrum compatible fully non-stationary earthquake, **Computers and Structures**, vol. 88, p. 889–901, 2010.

Cacciola, P. e Deodatis, G. A method for generating fully non-stationary and spectrum-compatible ground motion vector processes, **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, vol. 31, p. 351–360, 2011.

Chopra, A. K. **Dynamics of structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering**. Pentice Hall, 2012.

Civicioglu, P. Backtracking Search Optimization Algorithm for numerical optimization problems, **Applied Mathematics and Computation**, vol. 219, p. 8121–8144, 2013.

Civicioglu, P. **Backtracking Search Optimization Algorithm for numerical optimization problems**. <http://www.pinarcivicioglu.com/bsa.html>, 2018.

Clough, R. e Penzien, J. **Dynamics of Structures**. McGraw-Hill, Inc., 1993.

Conca, J. **After Five Years, What Is The Cost Of Fukushima?** <https://www.forbes.com/sites/jamesconca/2016/03/10/after-five-years-what-is-the-cost-of-fukushima/#525cc84622ed>, 2016.

Conte, J. P. e Peng, B. F. Fully nonstationary analytical earthquake ground-motion model, **Journal of Engineering Mechanics**, vol. 123, p. 15–24, 1997.

Dalla Chiesa, D. e Miguel, L. F. F. Methodology for simulation of the three components of seismic acceleration, **Bulletin of the Seismological Society of America**, vol. 109, p. 2427–2436, 2019.

Deodatis, G. e Shinozuka, M. Auto-regressive model for nonstationary stochastic processes, **Journal of Engineering Mechanics**, vol. 114, p. 1995–2012, 1989.

Domingues, M. O., Mendes, O., Kaibara, M. K., e Menconi, V. E. and Bernardes, E. Explorando a transformada wavelet contínua, **Revista Brasileira de Ensino de Física**, vol. 38, 2016.

Douglas, J. e Aochi, H. A survey of techniques for predicting earthquake ground motions for engineering purposes, **Surveys in Geophysics**, vol. 29, p. 187–220, 2008.

Dugundji, J. Envelopes and pre-envelopes of real waveforms, **IRE Transactions on Information Theory**, vol. 4, p. 53–57, 1958.

Elnashai, A. S. e Di Sarno, L. **Fundamentals of earthquake engineering**. John Wiley & Sons, Lta., 2008.

Elnashai, A. S. e Sarno, L. D. **Fundamentals of earthquake engineering**. John Wiley & Sons, Ltd, 2008.

Fan, F.-G. e Ahmadi, G. Nonstationary Kanai-Tajimi models for El Centro 1940 and Mexico City 1985 earthquakes, **Probabilistic Engineering Mechanics**, vol. 5, p. 171–181, 1990.

Fogel, D. B. **An Introduction to Evolutionary Computation and Some Applications**. Evolutionary Algorithms in Engineering and Computer Science: Recent Advances in Genetic Algorithms, Evolution Strategies, Evolutionary Programming, Genetic Programming and Industrial Applications. John Wiley & Sons Ltd, 1999.

Grotzinger, J. e Jordan, T. **Para entender a Terra**. Bookman, 2013.

Hongjing, L., Guangjun, S., e Yongliang, R. **A note on the stationary model of earthquake induced ground motion with a Hu spectrum**. In Proceedings of 14nd World Conference in Earthquake Engineering, Beijing, China, 2008.

Housner, G. W. **Spectrum Intensities of Strong Motion Earthquakes**. In of the Symposium on Earthquake and Blast Effects on Structures, Earthquake Engineering Research Institute, Los Angeles, EUA, 1952.

Housner, G. W. e Jennings, P. C. Generation of artificial earthquakes, **Journal of the Engineering Mechanics Division**, vol. 90, p. 113–150, 1964.

Hu, Y. X. e Zhou, X. Y. Seismic response of elastic system under stationary and stationarized ground motion, **Research Reports on Earthquake Engineering**, vol. 1, p. 85–95, 1962.

Huang, D. e Wang, G. Energy-compatible and spectrum-compatible (ECSC) ground motion simulation using wavelet packets, **Earthquake Engineering and Structural Dynamics**, vol. 46, p. 1855–1873, 2017.

Husid, L. R. Analisis de terremotos. Analisis general, **Revista del IDIEM**, vol. 8, p. 21–42, 1969.

Iyengar, R. N. e Yengar, K. T. S. A non-stationary random process model for earthquake acceleration, **Bulletin of the Seismological Society of America**, vol. 59, p. 1163–1188, 1969.

Kanai, K. An Empirical Formula for the Spectrum of Strong Earthquake Motions., **Bulletin Earthquake Research Institute**, (39), p. 85–95, 1961.

Kennett, B. L. N. e Engdahl, E. R. Travel times for global earthquake location and phase association, **Geophysical Journal International**, vol. 105, p. 429–465, 1991.

Kitada, Y., Masao, T., Ohsaki, Y., Kanda, J., ; Iwasaki, R., e Sakata, K. **Simulated Earthquake Ground Motions by Gauss Wave Superimposition Method**. In K - Seismic Response Analysis of Nuclear Power Plant Systems K1 - Wave Propagation and Ground Motions SMiRT 7, Chicago, EUA, 1983.

Kramer, S. L. **Geotechnical Earthquake Engineering**. Prentice-Hall, Inc., 1996.

Lee, S. C. e Han, S. W. Neural-network-based models for generating artificial earthquakes and response spectra, **Computers and Structures**, vol. 80, p. 1627–1638, 2002.

Lin, Y. K. e Yong, Y. Evolutionary Kanai-Tajimi earthquake models, **Journal of Engineering Mechanics (ASCE)**, vol. 113, p. 1119–1137, 1987.

Masao, T., Ohsaki, Y., Ohkawa, I., e Iwasaki, R. **Simulated Earthquake Ground Motion by Gauss Waves**. In Proceedings of 1980 Annual Meeting of Architectural Institute of Japan, Structural division, p. 481–482, 1980.

McCann, W. M. e Shah, H. C. “Determining strong-motion duration of earthquakes, **Bulletin of the Seismological Society of America**, vol. 69(4), p. 1253–1265, 1979.

Michalewicz, Z., Deb, K., Schimidt, M., e Stidsen, T. **Evolutionary Algorithms for Engineering Applications**. Evolutionary Algorithms in Engineering and Computer Science: Recent Advances in Genetic Algorithms, Evolution Strategies, Evolutionary Programming, Genetic Programming and Industrial Applications. John Wiley & Sons Ltd, 1999.

Mohraz, B. e Sadek, F. **Earthquake Ground Motion and Response Spectra**. The Seismic Design Handbook. Springer, 2001.

ONUBR. **Seis meses após terremoto, ONU aponta situação do Haiti**. <https://nacoesunidas.org/relatorio-da-onu-aponta-situacao-do-haiti-apos-seis-meses-de-esforcos-de-reconstrucao/>, 2010.

Paolucci, R., Pacor, F., Puglia, R., Ameri, G., Cauzzi, C., e Massa, M. Record processing in ITACA, the new Italian strong-motion database., **Earthquake Data in Engineering Seismology**, p. 99–113, 2011.

Polhemus, N. W. e Cakmak, A. S. Simulation of earthquake ground motion using Autoregresslve Moving Average (ARMA) Model, **Earthquake Engineering and Structural Dynamics**, vol. 9, p. 343–354, 1981.

Rajasekaran, S., Latha, V., e Lee, S. C. Generation of artificial earthquake motion records using wavelets and principal component analysis, **Journal of Earthquake Engineering**, vol. 10, p. 665–691, 2006.

Rao, S. S. **Engineering Optimization Theory and Practice**. John Wiley & Sons, Inc., 2009.

Riera, J. D., Nanni, L. F., e Scherer, R. J. On the definition of the intensity of seismic excitation in nuclear power plant design, **Nuclear Engineering and Design**, vol. 92, p. 207–215, 1986.

Rofooei, F. R., Morabake, A., e Ahmadi, G. Generation of artificial earthquake records with Kanai-Tajimi models, **Engineering Structural**, vol. 23, p. 827–837, 2001.

Rosenblueth, E. e Bustamante, J. Duration of structural response to earthquakes, **Journal of the Engineering Mechanics Division**, vol. 88, p. 75–106, 1962.

Ruiz, P. e Penzien, J. Probabilistic study of the behavior of structures during earthquakes, **Report No. EERC 69-03, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA**, 1969.

Sabetta, F. e Pugliese, A. Estimation of response spectra and simulation of nonstationary earthquake ground motions, **Bulletin of the Seismological Society of America**, vol. 86, p. 337–352, 1996.

Scherer, R. J., Riera, J. D., e Schueller, G. I. Estimation of the time-dependent frequency content of earthquake accelerations, **Nuclear Engineering and Design**, vol. 71, p. 301–310, 1982.

Sharbati, R., Ramazi, H. R., Khoshnoudian, F., Amindavar, H. R., e H., R. Stochastic Model for Simulation of Ground-Motion Sequences Using Kernel-Based Smoothed Wavelet Transform and Gaussian Mixture Distribution, **Journal of Earthquake Engineering**, p. 01–31, 2019.

Shinozuka, M. e Sato, Y. Simulation of non-stationary random process, **Journal of Engineering Mechanics (ASCE)**, vol. 93, p. 11–40, 1967.

Sucuoglu, H. e Akkar, S. **Basic earthquake engineering: from seismology to analysis and design**. Springer International, 2014.

Suárez, L. E. e Montejó, L. Generation of artificial earthquakes via the wavelet transform, **International Journal Solids Structures**, vol. 42, p. 5905–5919, 2005.

Tajimi, H. **A Statistical Method of Determining the Maximum Response of a Building Structure During an Earthquake**. In Proceedings of 2th World Conference in Earthquake Engineering, vol. 1, p. 781–797, Tóquio, Japão, 1960.

Tobace, E. **Terremoto no Japão**. <https://noticias.uol.com.br/bbc/2011/03/13/caminho-para-sendai-e-dificil-e-requer-paciencia-diz-reporter-da-bbc-brasil.jhtm>, 2011.

Trifunac, M. D. e Brady, A. G. A Study of the duration of strong earthquake ground motion, **Bulletin of the Seismological Society of America**, vol. 65, p. 581–626, 1975.

Trovato, S., D’Amorea, E., Yuec, Q., e Spanos, P. D. An approach for synthesizing tri-component ground motions compatible with hazard-consistent target spectrum - Italian aseismic code application, **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, vol. 93, p. 121–134, 2017.

USGS. **United States Geological Survey**. <http://earthquake.usgs.gov>, 2017.

Vlachos, C., Deodatis, G., e Papakonstantinou, K. G. **A Fully Parametric Non-Stationary Spectral-Based Stochastic Ground Motion Model**. In 12th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering, ICASP12, p. 12–15, Vancouver, Canadá, 2015.

Wells, D. L. e Coppersmith, K. J. New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement, **Bulletin of the Seismological Society of America**, vol. 84, p. 974–1002, 1994.

Yamamoto, Y. e Baker, J. W. Stochastic Model for Earthquake Ground Motion Using Wavelet Packets, **Bulletin of the Seismological Society of America**, vol. 103, p. 3044–3056, 2013.

APÊNDICE A – Parâmetros das ondas

j	t_{a_j}	A_j	f_j	φ_j	θ_j	t_{d_j}	V_f
1,0000	3,0720	0,0345	9,0064	59,1759	267,8966	3,3310	-0,0000
2,0000	3,2362	0,0353	14,4784	86,0205	233,7053	2,9009	-0,0000
3,0000	3,2942	0,0562	6,2279	12,1036	310,9155	9,4735	0,0000
4,0000	3,3138	0,0297	14,6773	35,1163	182,6611	4,7693	0,0000
5,0000	3,4941	0,0828	6,7852	86,9029	295,4349	8,2532	-0,0000
6,0000	3,5413	0,0944	2,3165	79,6436	286,7616	8,2019	0,0000
7,0000	3,5530	0,0294	1,3282	39,7548	312,5589	6,0232	-0,0000
8,0000	3,5683	0,1000	2,4673	87,2277	246,3032	5,2689	0,0000
9,0000	3,5802	0,0811	6,2987	86,2540	280,9453	5,5567	0,0000
10,0000	3,6163	0,0589	12,7066	89,9867	176,1991	3,3054	0,0000
11,0000	3,6185	0,0821	1,5503	12,4636	311,5492	3,8703	0,0000
12,0000	3,6298	0,1000	6,3481	15,7962	308,5732	5,5134	-0,0000
13,0000	3,6309	0,0874	2,5356	10,7178	311,2294	4,7325	-0,0000
14,0000	3,6359	0,0410	3,3348	54,7148	133,3334	9,2958	-0,0000
15,0000	3,6404	0,0788	6,8850	82,6344	258,5267	2,7596	0,0000
16,0000	3,6457	0,0811	5,1389	85,5222	203,4872	1,5567	0,0000
17,0000	3,6522	0,1000	4,1067	49,4708	266,9066	8,2792	-0,0000
18,0000	3,7015	0,0513	1,7335	16,5069	133,2133	6,9224	-0,0000
19,0000	3,7016	0,1000	5,3518	27,6475	242,2896	0,9343	0,0000
20,0000	3,7299	0,0947	3,1235	37,8545	248,8632	8,0038	-0,0000
21,0000	3,7411	0,0554	0,8408	89,9784	221,6730	2,3787	-0,0000
22,0000	3,7418	0,0525	3,1046	46,9061	243,8613	10,9514	-0,0000
23,0000	3,7516	0,0570	3,3322	38,4718	303,8430	3,0010	-0,0000
24,0000	3,7979	0,0752	3,5477	89,9917	222,0924	5,6375	0,0000
25,0000	3,8022	0,0999	2,4275	89,1121	223,1915	6,5911	-0,0000
26,0000	3,8098	0,1000	1,5347	84,9073	228,4352	3,9097	-0,0000
27,0000	3,8248	0,0452	9,5845	31,4027	133,0368	7,6165	-0,0000
28,0000	3,8670	0,0353	5,6478	29,8884	193,7751	9,2071	0,0000
29,0000	3,8788	0,0494	13,1581	73,1035	186,8438	2,8880	-0,0000
30,0000	3,8971	0,0530	2,9192	67,5536	164,2307	5,4810	0,0000
31,0000	3,9186	0,0569	5,2628	87,0143	288,8454	4,5603	0,0000
32,0000	3,9356	0,0553	5,1593	65,2569	212,5111	9,1098	-0,0000
33,0000	3,9488	0,0997	4,5509	42,9991	311,0249	1,7579	-0,0000
34,0000	3,9531	0,0965	4,6223	89,8323	225,8819	2,3798	-0,0000
35,0000	3,9535	0,0387	10,6588	61,0957	132,7707	1,4073	-0,0000
36,0000	3,9663	0,0475	7,2187	61,6837	196,7011	3,3247	0,0000
37,0000	3,9974	0,0678	2,0383	75,6264	133,8099	4,9059	0,0000
38,0000	4,0087	0,1000	5,1627	88,4156	219,2288	4,4551	-0,0000
39,0000	4,0206	0,0890	5,6011	89,8074	134,1399	2,4995	-0,0000
40,0000	4,1399	0,1000	4,6405	55,9571	248,3397	4,5253	0,0000
41,0000	4,1420	0,0874	2,3831	70,4159	140,9413	7,9730	0,0000
42,0000	4,1509	0,1000	6,7765	31,0978	310,1855	3,0990	0,0000
43,0000	4,1553	0,1000	8,5167	59,6943	179,8727	0,1174	-0,0000
44,0000	4,1602	0,0559	8,9521	79,5008	237,4984	3,6863	0,0000
45,0000	4,1624	0,1000	4,3751	89,8667	261,4654	5,0285	-0,0000
46,0000	4,1836	0,0999	1,7579	89,9537	234,0101	2,2754	-0,0000
47,0000	4,1840	0,0687	11,1234	43,4126	132,8436	7,4617	0,0000
48,0000	4,2082	0,0999	5,4394	37,5948	246,5043	5,1476	0,0000
49,0000	4,2316	0,0999	6,7057	77,0757	312,1257	4,7721	-0,0000
50,0000	4,2606	0,0617	7,3087	81,7577	255,6656	7,3885	-0,0000

Figura A.1 – Parâmetros das ondas para a estação PDM.

j	t_{a_j}	A_j	f_j	φ_j	θ_j	t_{a_j}	V_f
51,0000	5,3013	0,1000	5,2605	22,6153	311,7186	0,3802	-0,0000
52,0000	5,3525	0,1000	8,0122	89,9896	141,2303	1,8721	0,0000
53,0000	5,3877	0,0587	6,0348	89,1847	257,7673	6,4625	-0,0000
54,0000	5,4008	0,0999	11,0528	89,9788	250,8930	1,7190	0,0000
55,0000	5,4103	0,1000	1,1039	89,3217	204,1879	1,8118	0,0000
56,0000	5,5434	0,1000	7,8592	40,1680	312,5910	0,3817	0,0000
57,0000	5,5481	0,1000	8,8183	88,2277	281,4009	2,0412	0,0000
58,0000	5,5542	0,1000	5,6237	46,5736	287,1306	2,6673	-0,0000
59,0000	5,5978	0,0329	13,4874	74,6399	245,3796	6,4505	-0,0000
60,0000	5,6197	0,0992	14,1989	55,5453	201,7174	0,3521	-0,0000
61,0000	5,7271	0,0282	8,0211	49,7480	257,7023	8,7270	0,0000
62,0000	5,7483	0,0963	9,6532	89,9253	174,3940	0,6216	0,0000
63,0000	5,8381	0,0994	2,2739	43,3624	133,2518	2,1988	0,0000
64,0000	5,8795	0,0337	4,6616	89,9992	160,4831	8,5808	0,0000
65,0000	5,9128	0,0312	6,7404	89,9891	297,5259	10,2367	0,0000
66,0000	5,9177	0,1000	6,8596	89,9783	268,5968	0,5831	0,0000
67,0000	5,9242	0,0351	11,3759	42,8864	199,7476	5,3622	0,0000
68,0000	5,9299	0,0634	11,1138	42,1604	201,4539	3,1492	0,0000
69,0000	5,9474	0,1000	7,1838	76,9160	273,3773	0,5568	0,0000
70,0000	6,0067	0,0960	4,6099	89,9994	194,7043	3,0370	0,0000
71,0000	6,0189	0,0837	10,1128	52,3087	133,6027	1,1866	-0,0000
72,0000	6,0285	0,0332	3,8907	35,6713	180,5613	9,7669	0,0000
73,0000	6,0570	0,0285	9,5724	22,9856	132,6901	6,3725	-0,0000
74,0000	6,0754	0,0537	9,3518	89,9658	144,8733	3,2079	0,0000
75,0000	6,0924	0,0352	10,2381	75,1209	132,7242	6,2512	-0,0000
76,0000	6,1522	0,0493	11,1744	72,1251	159,4905	3,0427	-0,0000
77,0000	6,1745	0,0538	10,7467	44,0151	141,9982	1,5819	0,0000
78,0000	6,2121	0,1000	2,5058	80,2544	233,6649	1,1972	0,0000
79,0000	6,2348	0,1000	3,4008	54,2296	143,7505	1,7643	-0,0000
80,0000	6,2415	0,0657	10,7122	88,7582	203,6094	1,6803	0,0000
81,0000	6,2520	0,0810	6,5535	79,1493	301,4784	2,8992	0,0000
82,0000	6,2748	0,1000	12,9963	45,4452	132,6430	0,2308	-0,0000
83,0000	6,2773	0,0804	7,5122	39,1190	195,3077	4,1266	-0,0000
84,0000	6,2891	0,0587	12,4962	71,8290	231,5751	2,3207	-0,0000
85,0000	6,3183	0,0903	6,3815	73,9910	239,5817	3,9176	0,0000
86,0000	6,3284	0,1000	4,6726	75,6908	235,7788	1,4981	0,0000
87,0000	6,3376	0,0999	0,8298	89,4903	220,7350	1,2051	-0,0000
88,0000	6,3416	0,0459	4,3896	89,9179	209,5515	6,8343	-0,0000
89,0000	6,3573	0,0368	9,4815	54,0307	155,3307	4,8515	0,0000
90,0000	6,3968	0,0990	4,6738	87,9257	196,9690	3,4233	0,0000
91,0000	6,4709	0,0999	3,9067	89,9590	211,2911	0,7679	0,0000
92,0000	6,5022	0,0656	3,5595	9,8757	312,5031	5,3378	0,0000
93,0000	6,5891	0,0997	12,3849	1,4570	312,6046	0,3230	0,0000
94,0000	6,6072	0,0281	14,1899	42,7575	154,7296	1,2685	0,0000
95,0000	6,7443	0,0946	9,4584	66,7123	298,7603	2,3260	0,0000
96,0000	6,8041	0,0300	11,8497	64,7426	198,4879	4,0507	-0,0000
97,0000	6,9221	0,0351	13,6254	73,9823	170,8328	2,4220	0,0000
98,0000	7,0389	0,0560	4,1433	51,5013	156,6096	5,5512	-0,0000
99,0000	7,0764	0,0376	13,4463	53,0569	219,2216	3,7185	0,0000
100,0000	7,4169	0,0998	12,2496	20,9535	312,5407	0,2449	-0,0000

Figura A.2 – Parâmetros das ondas para a estação PDM.

j	t_{a_j}	A_j	f_j	φ_j	θ_j	t_{d_j}	V_f
1,0000	2,1233	0,0319	0,6931	24,1716	254,0084	7,2137	0,0000
2,0000	2,2040	0,0915	8,3733	79,0069	369,3446	9,4348	0,0000
3,0000	2,2145	0,0555	5,3338	89,9710	354,8905	7,4994	0,0000
4,0000	2,2349	0,0985	6,8814	79,1903	394,5957	5,2315	-0,0000
5,0000	2,2412	0,1000	4,2847	78,1464	216,6452	3,5009	-0,0000
6,0000	2,2415	0,0886	8,7146	56,2098	261,7311	4,0163	0,0000
7,0000	2,2430	0,0999	7,6526	89,9952	386,0068	3,0055	0,0000
8,0000	2,2652	0,1000	7,5420	67,3937	272,4661	4,1103	0,0000
9,0000	2,2808	0,1000	3,2733	89,9730	258,3615	3,9715	-0,0000
10,0000	2,2892	0,0303	4,0500	57,3377	266,7112	14,0740	-0,0000
11,0000	2,2954	0,0415	2,5943	18,9714	327,4175	13,8764	0,0000
12,0000	2,3119	0,0886	5,0029	55,1009	259,2090	6,9959	0,0000
13,0000	2,3222	0,0256	4,2792	68,4619	224,8231	16,3582	-0,0000
14,0000	2,3248	0,0999	3,9690	83,3597	268,1957	8,8183	-0,0000
15,0000	2,3308	0,1000	2,4683	81,2145	279,0662	4,0513	0,0000
16,0000	2,3495	0,0451	2,5151	89,9336	247,0605	8,7473	0,0000
17,0000	2,3503	0,0497	8,3697	49,5897	214,8993	5,7350	0,0000
18,0000	2,3586	0,0942	4,8698	10,2221	239,1413	3,4909	-0,0000
19,0000	2,3650	0,0476	1,4824	48,7579	274,1507	5,3968	0,0000
20,0000	2,3722	0,1000	7,5372	64,5316	214,6299	4,9090	0,0000
21,0000	2,4049	0,0278	2,1552	36,6053	223,1482	12,0637	-0,0000
22,0000	2,4110	0,0938	4,0454	84,5153	272,3597	3,7079	0,0000
23,0000	2,4404	0,0341	8,9500	42,1846	394,3506	6,9274	-0,0000
24,0000	2,4461	0,0999	6,4213	85,2860	235,4841	3,2703	0,0000
25,0000	2,4484	0,0373	9,7859	62,2850	296,4940	4,1897	-0,0000
26,0000	2,4672	0,1000	5,6103	89,4308	375,2344	4,4561	-0,0000
27,0000	2,4726	0,0222	6,7811	39,7324	224,3160	10,0279	-0,0000
28,0000	2,4733	0,0496	5,5261	8,4166	214,6278	3,0763	0,0000
29,0000	2,4758	0,1000	5,0721	45,7050	367,7098	3,9431	-0,0000
30,0000	2,4804	0,0426	10,4202	58,4289	313,3697	4,6064	-0,0000
31,0000	2,4882	0,0212	9,6014	47,3836	214,7624	5,2076	0,0000
32,0000	2,5122	0,0591	5,8534	68,7265	341,7463	11,7880	0,0000
33,0000	2,5252	0,1000	3,8092	73,6406	304,5456	3,4128	0,0000
34,0000	2,5321	0,0342	1,1989	23,3163	363,0518	9,1750	0,0000
35,0000	2,5787	0,0373	10,2042	54,4894	238,8720	7,2519	0,0000
36,0000	2,5941	0,0691	1,6002	88,3211	316,8611	11,2487	0,0000
37,0000	2,7240	0,0400	12,4094	25,2457	216,4803	4,6739	-0,0000
38,0000	2,7382	0,0380	0,4926	17,5628	272,7895	4,0600	0,0000
39,0000	2,7596	0,0581	9,6158	45,5010	392,4569	1,2479	-0,0000
40,0000	2,7700	0,1000	3,3112	89,9387	248,4979	3,0200	-0,0000
41,0000	2,7722	0,1000	6,5791	77,1736	289,3825	3,9519	0,0000
42,0000	2,7893	0,0431	12,8067	30,0276	214,8287	1,6398	0,0000
43,0000	2,8255	0,1000	5,5543	29,9750	214,6234	0,9002	-0,0000
44,0000	3,5239	0,1000	5,6434	61,8370	310,6400	1,0632	-0,0000
45,0000	3,5790	0,0998	7,5586	77,1406	243,5212	3,8367	-0,0000
46,0000	3,6022	0,0628	1,1608	89,9248	342,7211	1,7229	-0,0000
47,0000	3,6263	0,1000	3,8239	57,2484	258,8934	0,7845	-0,0000
48,0000	3,6486	0,0634	8,2703	68,1858	346,8840	5,9248	-0,0000
49,0000	3,6921	0,0372	0,8824	23,2607	216,5919	7,9332	0,0000
50,0000	3,7311	0,0663	7,0059	82,1455	264,8202	4,5676	-0,0000

Figura A.3 – Parâmetros das ondas para a estação CR4.

j	t_{a_j}	A_j	f_j	φ_j	θ_j	t_{d_j}	V_j
51,0000	3,7326	0,1000	6,1469	59,6598	309,7713	0,6507	0,0000
52,0000	3,7938	0,0618	2,6674	30,1897	298,8959	8,2476	-0,0000
53,0000	3,8504	0,1000	6,6760	77,2356	360,7862	0,8987	-0,0000
54,0000	3,8678	0,0895	7,1134	67,3580	291,3494	4,9203	0,0000
55,0000	3,8802	0,0958	2,6000	69,7272	246,5637	4,6154	0,0000
56,0000	3,9045	0,1000	6,8071	89,9649	278,2481	3,9664	0,0000
57,0000	3,9055	0,0753	3,4182	89,8435	350,8065	9,6541	0,0000
58,0000	3,9113	0,0289	3,7105	42,0200	323,6454	11,0496	0,0000
59,0000	3,9333	0,0484	7,0630	66,1411	270,1154	8,3533	0,0000
60,0000	3,9880	0,0995	6,1981	29,3338	214,9200	0,1613	0,0000
61,0000	4,0039	0,1000	5,1360	88,2459	358,4635	1,3629	0,0000
62,0000	4,0253	0,0887	8,6920	74,0566	369,0836	5,7524	-0,0000
63,0000	4,0395	0,1000	5,5644	89,6938	261,7081	2,6957	-0,0000
64,0000	4,0552	0,1000	6,2390	89,7567	274,4231	0,4808	0,0000
65,0000	4,0612	0,0998	4,4202	54,8467	320,8864	2,0361	0,0000
66,0000	4,0638	0,0484	1,7982	51,2454	217,8594	7,2295	-0,0000
67,0000	4,0756	0,1000	7,8898	78,0514	251,5132	1,7745	-0,0000
68,0000	4,0802	0,0892	8,1669	86,5635	388,2600	6,9794	0,0000
69,0000	4,0811	0,0316	10,4331	30,8517	394,5849	2,4921	0,0000
70,0000	4,0827	0,1000	7,0930	89,6020	352,5083	2,6787	0,0000
71,0000	4,1133	0,0999	9,1603	84,5669	214,8048	1,5283	-0,0000
72,0000	4,1241	0,0766	10,2759	39,4614	277,4316	3,5033	-0,0000
73,0000	4,1511	0,0359	4,8887	79,3341	329,9282	11,6596	0,0000
74,0000	4,1532	0,0998	7,6985	79,3014	323,5248	3,2474	0,0000
75,0000	4,1852	0,0390	6,9107	81,7977	324,4304	7,6693	-0,0000
76,0000	4,2055	0,0922	2,2880	86,1627	217,9863	2,1853	0,0000
77,0000	4,2064	0,1000	4,6020	86,7399	288,2146	4,1287	-0,0000
78,0000	4,2281	0,0525	3,7283	82,3917	333,0398	6,4372	0,0000
79,0000	4,2300	0,0947	6,5075	89,9797	230,2854	7,0688	-0,0000
80,0000	4,2809	0,1000	2,3024	83,9299	220,6305	1,7374	-0,0000
81,0000	4,2826	0,0881	6,6368	81,5836	325,6173	7,3830	0,0000
82,0000	4,2898	0,0532	11,1354	23,1937	393,8818	0,8082	0,0000
83,0000	4,2900	0,0239	2,0293	4,1618	393,9629	11,8268	-0,0000
84,0000	4,2931	0,1000	5,5094	89,9928	284,2741	5,6268	0,0000
85,0000	4,2941	0,0532	7,5970	67,9678	264,4800	8,4244	-0,0000
86,0000	4,3042	0,1000	6,7250	52,2450	276,7913	1,4870	-0,0000
87,0000	4,3237	0,0436	5,4588	79,4251	338,6947	9,3426	0,0000
88,0000	4,3619	0,0485	6,3724	51,5192	392,5920	5,8063	0,0000
89,0000	4,3707	0,1000	9,1796	80,6736	389,5103	2,9413	-0,0000
90,0000	4,3916	0,1000	5,8832	89,9786	294,2649	1,6997	-0,0000
91,0000	4,3942	0,1000	5,2383	89,9800	227,7958	0,3818	-0,0000
92,0000	4,4122	0,0897	7,7067	63,1108	286,7392	4,6712	0,0000
93,0000	4,4161	0,0999	6,1789	84,3000	342,5017	5,6644	0,0000
94,0000	4,4705	0,0925	8,3832	68,6489	339,6585	0,8350	-0,0000
95,0000	4,4802	0,0266	1,7960	63,8233	281,6144	13,9197	0,0000
96,0000	4,6025	0,0367	1,9622	61,2386	370,6522	12,7408	-0,0000
97,0000	4,6079	0,0590	3,3559	32,6291	394,2234	4,1718	0,0000
98,0000	4,6873	0,0800	4,5907	39,6744	276,2511	1,7427	0,0000
99,0000	4,7095	0,0954	8,4228	81,1290	235,1036	1,5434	-0,0000
100,0000	4,7129	0,0999	4,5535	61,8227	290,6226	3,0745	-0,0000

Figura A.4 – Parâmetros das ondas para a estação CR4.

APÊNDICE B – Publicações

A seguir são listadas as principais publicações que esta pesquisa originou:

- **Artigos completos publicados em periódicos:**

Chiesa, D. D.; Miguel, L. F. F.. Geração de uma excitação sísmica através do espectro de Kanai-Tajimi. *Revista Brasileira de Computação Aplicada*, v. 9, p. 31-41, 2017.

Chiesa, D. D.; Miguel, L. F. F.. Determinação da probabilidade de falha em um edifício submetido a uma excitação sísmica. *Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia*, v.5, p. 22-29, 2019.

Chiesa, D. D.; Miguel, L. F. F.. Methodology for Simulation of the Three Components of Seismic Acceleration. *Bulletin of the Seismological Society of America*, v.109, p. 2427-2436, 2019.

- **Capítulos de livros publicados:**

Chiesa, D. D.; Miguel, L. F. F.. Geração de um acelerograma sísmico artificial a partir de uma função densidade espectral de potência compatível com um espectro de resposta de projeto. In: João Dallamuta (org.). *Estudos transdisciplinares nas engenharias 2*. 1 ed. Ponta Grossa: Atena Editora, 2019, p. 20-24.

- **Trabalhos completos publicados em anais de congressos:**

Chiesa, D. D.; Miguel, L. F. F.. Determinação da probabilidade de falha em um edifício submetido a uma excitação sísmica. In: 8º MCSul/VIII SEMENGO, 2018, Rio Grande. 8º MCSul/VIII SEMENGO, 2018.

Chiesa, D. D.; Miguel, L. F. F.. Geração de uma Excitação Sísmica Através do Espectro de Kanai-Tajimi. In: VII Conferência Sul em Modelagem Computacional

- VII MCSul, 2016, Rio Grande. Anais do VII MCSul, 2016. p. 458-465.

- **Resumos expandidos publicados em anais de congressos:**

Chiesa, D. D.; Miguel, L. F. F.. Geração de um acelerograma sísmico artificial a partir de uma função densidade espectral de potência compatível com um espectro de resposta de projeto. In: XIX Encontro de Pós-Graduação da Universidade Federal de Pelotas., 2017, Pelotas.