

## **TÍTULO**

# **SIMULACIÓN ESTOCÁSTICA DE ESPECTROS SÍSMICOS DE RESPUESTA CINEMÁTICA A PARTIR DE MODELOS SISMOLÓGICOS NO ESTACIONARIOS**

Ignacio Ferrer Ballester

Mayo 2009

## ÍNDICE

<b>Capítulo 1: Objeto y motivación del trabajo .....</b>	<b>9</b>
1. Introducción.....	11
2. La Ingeniería Sismológica.....	17
2.1. Definición de la acción sísmica .....	17
2.2. Espectros de varianza .....	22
2.3. Espectros de respuesta .....	24
2.3.1. Espectro de respuesta cinemática .....	24
2.3.2. Espectros de energía inducida .....	25
2.3.3. Espectros de índices de daño .....	26
3. Estructura y objeto del trabajo.....	27
3.1. Estudios previos y antecedentes .....	27
3.2. Planteamiento de la Tesis .....	29
3.2.1. Modelos sismológicos .....	30
3.2.2. Procesos estocásticos.....	31
3.2.3. Factor de pico .....	32
3.3. Líneas de investigación .....	32
<b>Capítulo 2: Modelos sismológicos .....</b>	<b>35</b>
1. Introducción.....	37
2. Funciones de un modelo de emplazamiento.....	38
2.1. Modelo sismológico de fuente.....	39
2.1.1. Modelo de Brune .....	40
2.1.2. Modelo de Haskell.....	41
2.1.3. Función de corrección regional .....	43
2.2. El factor de escala.....	43
2.2.1. El factor de superficie libre .....	44
2.2.2. El factor de partición direccional .....	47
2.3. Función de reducción.....	47
2.3.1. Función de atenuación anelástica .....	48
2.3.2. Filtro de frecuencias máximas .....	49
2.4. Función de amplificación .....	51
2.4.1. Filtro de impedancia .....	51
2.4.2. Filtro de resonancia .....	52
3. Modelos estacionarios .....	54
3.1. Modelo de Boore (1983).....	55
3.2. Modelo de Joyner y Boore.....	55
3.3. Modelo de Boore (1986).....	56

3.4. Modelo de Faravelli estacionario .....	56
3.5. Modelo de Faccioli .....	57
3.6. Modelo de Atkinson y Silva .....	58
3.7. Otros modelos.....	58
4. Modelos no estacionarios .....	58
4.1. Modelo de Faravelli no estacionario .....	60
4.2. Modelo de Carli y Faravelli.....	62
<b>Capítulo 3. Obtención de la duración del sismo .....</b>	<b>65</b>
1. Introducción.....	67
2. Antecedentes.....	69
3. Tipos de definiciones de duración .....	71
3.1. Duración de umbral .....	71
3.2. Duración de energía.....	72
3.3. Duración equivalente.....	74
3.4. Duración estructural .....	76
3.5. Predicción de la duración .....	77
4. Una nueva definición de duración .....	78
4.1. Introducción.....	78
4.2. Criterio de equivalencia de un proceso estacionario .....	79
4.3. Definición de duración estacionaria equivalente.....	80
<b>Capítulo 4. Obtención de la función de intensidad.....</b>	<b>81</b>
1. Introducción.....	83
2. Significado de función de intensidad .....	84
2.1. La función de intensidad y la desviación típica.....	84
2.2. La función de intensidad y la función envolvente.....	85
3. Tipos de funciones de intensidad .....	86
3.1. Funciones tipo ICD.....	87
3.1.1. Función trilineal.....	87
3.1.2. Función de Jennings y otros .....	87
3.1.3. Función del Eurocódigo 8 .....	88
3.2. Funciones IPD .....	88
3.2.1. Función de Saragoni y Hart.....	88
3.2.2. Función de Shinozuka y Sato .....	89
3.2.3. Función de Tung y otros.....	89
4. Procedimientos de ajuste de la función de intensidad .....	89
4.1. Procedimiento de Carli y Faravelli.....	91
4.2. Procedimiento de Olafsson.....	91
4.3. Procedimiento de Cakmak y otros.....	92

5. Un nuevo método de ajuste de la función de intensidad .....	93
5.1. Planteamiento general del método USP .....	94
5.1.1. Varianza de un proceso estacionario .....	94
5.1.2. Varianza de un proceso evolutivo uniformemente modulado ...	95
5.1.3. Medición del error del ajuste .....	97
5.1.3.1. Error de estacionariedad .....	98
5.1.3.2. Error de energía .....	99
5.2. Implementación del método USP .....	100
5.2.1. Operaciones previas.....	101
5.2.2. Solución de la ecuación de mínimos cuadrados .....	101
5.2.3. Mejora del ajuste .....	103
6. Ensayo numérico .....	104
6.1. Objetivos.....	104
6.2. Descripción del ensayo.....	105
6.2.1. Funciones de intensidad ajustadas.....	105
6.2.2. Registros del ensayo numérico.....	106
6.2.3. Influencia de los parámetros.....	107
6.3. Resultados.....	108
6.3.1. Introducción.....	108
6.3.2. Intervalo de estacionariedad .....	110
6.3.3. Influencia del grado del polinomio.....	113
6.3.4. Influencia de los intervalos de suavizado.....	114
6.3.5. Influencia de la función de intensidad inicial.....	117
6.3.6. Tipos de funciones de intensidad .....	119
6.3.7. Comparación de los índices de error .....	121
6.4. Conclusiones del ensayo.....	123

**Capítulo 5. Obtención de un espectro de respuesta estocástico .....125**

1. Introducción.....	127
2. Ecuación del movimiento de un oscilador simple .....	128
2.1. Ecuación en el dominio del tiempo .....	128
2.2. Ecuación en el dominio de la frecuencia.....	130
3. Espectro de respuesta determinista.....	132
4. Espectro de respuesta estocástico .....	134
4.1. Respuesta estocástica de un oscilador simple.....	135
4.2. Características espectrales del proceso respuesta.....	137
4.2.1. Respuesta de un oscilador simple a un proceso evolutivo .....	137
4.2.2. Respuesta de un oscilador simple a un proceso uniformemente modulado .....	139
4.2.3. Respuesta estacionaria de un oscilador simple.....	140

4.3. Determinación del espectro de respuesta estocástico .....	143
4.3.1. Planteamiento de la ecuación .....	143
4.3.2. Resolución de la ecuación. Cálculo del factor de pico .....	146
4.3.2.1. Caso estacionario .....	146
4.3.2.2. Caso no estacionario .....	147
4.4. Eficiencia numérica .....	148
5. Método simplificado del oscilador equivalente.....	149
5.1. El oscilador equivalente estacionario .....	149
5.2. Oscilador equivalente no estacionario.....	156
5.3. Proceso estacionario equivalente.....	157
5.3.1. Hipótesis de Poisson.....	159
5.3.2. Hipótesis de Vanmarcke.....	160
6. Implementación del método .....	162
6.1. Especificación de datos sísmicos.....	162
6.2. Definición del oscilador simple.....	164
6.3. Cálculo de las características espectrales .....	164
6.4. Formulación de la ecuación de probabilidad acumulada.....	165
6.5. Resolución de la ecuación de probabilidad acumulada.....	165
6.6. Cálculo del espectro de respuesta.....	165
<b>Capítulo 6. Aplicación numérica.....</b>	<b>167</b>
1. Introducción.....	169
2. Planteamiento de la aplicación numérica .....	170
2.1. Sismo patrón .....	170
2.2. Análisis paramétrico .....	171
2.3. Comparación con espectros de diseño y empíricos .....	172
3. Influencia de los parámetros del sismo .....	174
3.1. Influencia de la magnitud .....	174
3.2. Influencia de la función de impedancia.....	176
3.3. Influencia de la función de resonancia .....	177
3.4. Influencia de la atenuación anelástica y de la frecuencia máxima....	179
3.5. Influencia de la función de intensidad y la duración estacionaria equivalente.....	180
4. Influencia de los parámetros estructurales .....	183
4.1. Influencia del amortiguamiento.....	183
4.2. Influencia de la probabilidad de no excedencia.....	184
5. Espectro de respuesta de desplazamientos .....	186
<b>Chapter 7. Conclusions and results .....</b>	<b>189</b>
1. Conclusions and results .....	191

2. New research aims.....	192
<b>Apéndice A. Fundamentos de sismología .....</b>	<b>195</b>
1. Introducción.....	197
2. Definición geométrica del foco .....	197
3. Parámetros cinemáticos y dinámicos: desplazamiento, tensión, energía y momento sísmico.....	199
3.1. Desplazamiento y tensión.....	199
3.2. Energía y momento sísmico .....	201
3.3. La función temporal de fuente $F(t)$ .....	203
4. Ondas sísmicas .....	205
4.1 Ondas de volumen .....	205
4.2. La reflexión de las ondas de volumen .....	209
4.2.1. La reflexión de las ondas P.....	210
4.2.2. La reflexión de las ondas S.....	211
4.2.3. La reflexión de la componente $d_2$ de las ondas S. ....	213
4.3. Ondas superficiales.....	213
5. Medida de los terremotos .....	214
5.1. Escalas de Intensidad.....	215
5.2. Magnitud.....	216
<b>Apéndice B. Modelos sismológicos de fuente .....</b>	<b>219</b>
1. Introducción.....	221
2. Modelos cinemáticos .....	225
2.1. Modelos cinemáticos deterministas.....	225
2.1.1. Modelo de Haskell (1964) .....	225
2.1.2. Modelo de Savage .....	226
2.2. Modelos cinemáticos probabilistas.....	227
2.2.1. Modelo de Haskell (1966) .....	227
3. Modelos dinámicos.....	228
3.1. Modelos dinámicos deterministas .....	228
3.1.1 Modelo de Brune .....	229
3.1.2. Modelo estático .....	230
3.1.3. Modelo dinámico.....	231
3.1.4. Modelos tensión efectiva no homogénea .....	232
3.1.4.1. Modelo de Barenblatt.....	232
3.1.4.2. Modelo de asperezas.....	233
3.1.4.3. Modelo de barreras .....	233
3.2. Modelos dinámicos probabilistas .....	233
4. Relaciones entre los distintos parámetros de falla.....	234

5. Deducción del espectro de amplitudes .....	235
5.1. Introducción.....	235
5.2. Modelo de fuente puntual.....	239
5.3. Modelo de Haskell determinístico.....	240
5.4. Modelo de Haskell probabilístico.....	242
5.5. Modelo de barreras .....	246
5.6. Modelo de Brune .....	250
<b>Apéndice C. Procesos Estocásticos.....</b>	<b>255</b>
1. Introducción.....	257
2. Características estadísticas de un proceso estocástico evolutivo .....	257
2.1. Operador esperanza matemática.....	258
2.2. Media, varianza y desviación típica .....	259
2.3. Función de autocovarianza y de autocorrelación .....	259
2.4. Función de covarianza y de correlación cruzada.....	260
3. Proceso estocástico no estacionario.....	260
4. Función de intensidad.....	262
5. Relación del espectro de varianza con el espectro de amplitudes .....	263
6. Características estadísticas del proceso envolvente .....	265
7. Características estadísticas del proceso evolutivo .....	268
8. Determinación del máximo de un proceso estocástico.....	271
8.1. Introducción.....	271
8.2. Frecuencia media de pasos ascendentes .....	273
8.2.1. Frecuencia media del proceso envolvente .....	273
8.2.2. Frecuencia media del proceso respuesta.....	275
8.3. Cálculo de la tasa de decaimiento $r(t)$ .....	275
8.3.1. Hipótesis de Poisson.....	276
8.3.2. Hipótesis de Vanmarcke.....	276
8.4. Factor de pico .....	278
8.4.1. Procesos estacionarios .....	280
8.4.1.1. Hipótesis de Poisson .....	280
8.4.1.2. Hipótesis de Vanmarcke .....	280
8.4.2. Procesos no estacionarios .....	281
<b>Apéndice D. Espectros de respuesta normativos .....</b>	<b>283</b>
1. Introducción.....	285
2. Norma de construcción sismorresistente: puentes. NCSP07.....	285
2.1. Caracterización del terreno.....	286
2.2. Aceleración de cálculo .....	286
2.3. Espectro de aceleraciones.....	287

2.4. Espectro de desplazamientos .....	288
3. Eurocódigo 8 .....	288
<b>Apéndice E. Ajuste de funciones de intensidad .....</b>	<b>291</b>
1. Introducción.....	293
2. Ensayo numérico .....	295
2.1. Kern County (California, EUA) del 21 de julio de 1952.....	295
2.2. Lima (Perú) del 31 de mayo de 1970 .....	301
2.3. Friuli (Italia) del 6 de mayo de 1976 .....	307
2.4. Campano Lucano (Italia) del 23 de octubre de 1980.....	313
2.5. Valparaiso (Chile) del 3 de marzo de 1985 .....	319
2.6. Michoacan (Méjico) del 19 de septiembre de 1985 .....	325
2.7. Spitak (Armenia) del 7 de diciembre de 1988.....	331
2.8. Loma Prieta (California, EUA) del 18 de octubre de 1989.....	337
2.9. Manjil (Irán) del 20 de junio de 1990.....	343
2.10. Cape Mendocino (California, EUA) del 25 de abril de 1992.....	349
2.11. Northridge (California, EUA) del 17 de enero de 1994 .....	355
2.12. Kobe (Japón) del 16 de enero de 1995 .....	361
2.13. Umbria-Marche (Italia) del 26 de septiembre de 1997.....	367
2.14. Izmit (Turquía) del 17 de agosto de 1999.....	373
2.15. Duzce (Turquía) del 12 de noviembre de 1999 .....	379
2.16. Sur de Islandia (Islandia) del 17 de junio de 2000 .....	385
2.17. Changureh-Avaj (Irán) del 22 de junio de 2002.....	391
2.18. Bignol (Turquía) del 1 de mayo de 2003.....	397
2.19. Bam (Irán) del 26 de diciembre de 2003 .....	403
2.20. Sumatra (Indonesia) del 12 de septiembre de 2007.....	409
<b>Apéndice F. Bibliografía .....</b>	<b>415</b>
<b>Apéndice G. Artículos publicados.....</b>	<b>431</b>