

UNIVERSIDAD CATOLICA ANDRES BELLO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

APLICABILIDAD DE LOS ESPECTROS DE RESPUESTA ENERGÉTICOS EN LOS ANÁLISIS DE EXCESO DE PRESIÓN DE POROS

Nombre del Tutor:

Ing. Heriberto Echezuria

Presentadores:

Andrés E. Castillo Z.

C.I. 26.012.824

Pedro M. Sosa R.

C.I. 26.252.258.

Caracas,09 de junio del 2023



UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL ESCUELA

DE INGENIERÍA CIVIL

"APLICABILIDAD DE LOS ESPECTROS DE RESPUESTA ENERGETICOS EN LOS ANALISIS DE PRESIÓN DE POROS"

Este jurado; una vez realizado el examen del presente trabajo ha evaluado sucontenido con el resultado: <u>VEINTE</u> (20) puntos.

JURADOEXAMINADOR

Gunnel torce -

alus Bain

Caffin

Firma:

Firma:

Firma:

Nombre: <u>Bonilla, Guillermo</u> Nombre: <u>Boiero, Alvaro</u> Nombre: <u>Echezuría, Heriberto</u>.

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

Presentado ante la

UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

Como parte de los requisitos para optar al título de

INGENIERO CIVIL

APLICABILIDAD DE LOS ESPECTROS DE RESPUESTA ENERGÉTICOS EN LOS ANÁLISIS DE EXCESO DE PRESIÓN DE POROS

Autores:

Castillo Z. Andrés E.

Sosa R. Pedro M.

Tutor:

Ing. Heriberto Echezuria

RESUMEN

Aunque se ha demostrado que la licuación de suelos ocurre durante la acción del sector fuerte del acelerograma, se demuestra que no existe correlación entre la licuación y la potencia del sismo pues la presión de poros aumenta cuando las aceleraciones generan deformaciones cortantes por encima del umbral de 3,40 10^{-4} %. Entonces, la licuación ocurrirá solamente si las aceleraciones del sector fuerte producen deformaciones cortantes por encima de dicho umbral. De 248 sismos analizados con el perfil de Treasure Island, solamente 49 superaron el 80% de desarrollo de presión de poros, lo cual representa un 20% del total. De esos sólo 3 (6% del total) tenían magnitud entre 5,00 y 5,99; 20 (41% del total) tenían magnitud entre 6,00 y 6,99 y 26 (53% de la muestra) entre la magnitud 7,00 y 7,99. Se detectaron diferencias importantes para las respuestas de sitio y licuación entre los programas DEEPSOIL y Cyclic_1D. Tanto la secuencia de las aceleraciones en los acelerogramas, incluyendo la aceleración máxima, como la generación de las presiones de poros resultan diferentes. Por último los espectros de potencia tampoco correlacionan con la licuación ni anticipan adecuadamente las amplificaciones de las respuestas en superficie con la pseudo función de transferencia [F₂].



AGRDECIMIENTOS

A mi madre por todo el esfuerzo y constancia, buenos valores y formación que me brindo para llevarme a ser la persona que hoy soy, sin ella nada sería posible.

A mi tutor de tesis Ing. Heriberto Echezuria por todo su compromiso, apoyo y dedicación para lograr esta meta.

A mis amigos de clases que los considero mi familia por todos los buenos momentos vividos juntos durante este trayecto universitario y por los que vendrán.

A todos los profesores que más allá de una materia transmiten todas sus experiencias vividas y nos forman con tanta pasión para ser unos buenos profesionales.

Al Ingeniero Isaac Marín por su herramienta de Matlab pieza fundamental para que este trabajo de grado fuese elaborado.

Andrés E. Castillo Z.

Agradezco a mi madre, por todo el esfuerzo que ha hecho por educarme y enseñarme a ser la persona que soy hoy en día. A mis hermanos por haber me apoyado y haberme animado a continuar con mis estudios.

A mi tutor de tesis, el ingeniero Heriberto Echezuria, por habernos ayudado a desarrollar este trabajo de grado, siempre mostrando entusiasmo para desarrollar este tema de la mejor forma posible.

A todos mis amigos los cuales me brindaron apoyo durante estos años de estudio, con los cuales he compartido los mejores momentos de mi vida y seguiré compartiendo.

A los profesores, quiénes nos enseñaron más allá de su catedra, con sus historias y enseñanzas de la vida profesional.

Por último, quiero dar un agradecimiento al ingeniero Isaac Marín, el cual nos compartió su herramienta de MatLab para llevar a cabo este trabajo de grado.

Pedro M. Sosa R.



ÍNDICE

CAPÍTULO I	1
Planteamiento del problema	1
Objetivos	2
Objetivo General.	2
Objetivos Secundarios.	2
Alcances y limitaciones	2
Antecedentes	3
CAPÍTULO II	6
MARCO TEÓRICO	6
2.1. Mediciones Sísmicas	6
2.1.1. Espectro de Respuesta	6
2.1.2. Intensidad de Arias	8
2.1.3. Medición de Sismos	9
2.2. Acelerogramas	10
2.2.1. Sector Fuerte del Acelerograma	11
2.3. Amortiguamiento del Material	12
2.4. Factor de Amplificación o Función de Transferencia	13
2.5. Intensidad de potencia de aceleración	13
2.6. Intensidad y potencia del sector fuerte del acelerograma	14
2.7. Potencia de velocidad del terreno y la Energía	15
2.8. Determinación del sector fuerte	15
2.9. Licuación	16
2.10. Programa Deepsoil para la respuesta dinámica de perfiles y modelos que emplea para el desarrollo de presión de poros	16
2.10.1. Modelo de Dobry y Matasovic para suelos arenosos	17
2.10.2 Modelos de Matasovic y Vuetic para Suelos Arcillosos	20
2.10.3. Parámetros de Degradación de Presión de Poros	22
2.11. Programa Cyclic 1D para la respuesta dinámica de perfiles y modelo para la generación presión de poros	de 23
2.11.1. Modelo de Generación de Presión de Poros de Cyclic 1D	23
CAPÍTULO III	26
MARCO METODOLÓGICO	26

3.1	Pr	evio al análisis en los programas a utilizar	27
3.2	. Pr	ocedimiento del desarrollo de presión de poros	27
3	8.2.1.	Modelo de Presión de Poros	28
3.5	. De	eterminación de la pseudo función de transferencia empírica	29
3.6	. El	aboración de los Espectros de Respuesta Energéticos	29
CAPÍ	TULO	IV	31
ANA	LISIS	Y DISCUSION DE RESULTADOS	31
4.1	. Re	esultados obtenidos para el programa Deepsoil	31
4	.1.1.	Relación de la Potencia del Acelerograma con el Desarrollo de Presión de Poros	31
4	.1.2.	Comparación entre la Potencia de las Aceleraciones y el Desarrollo de Presión de Poro	s 32
4	.1.3.	Análisis de la potencia del acelerograma y la potencia de velocidad	34
4	.1.4.	Gráfico Potencia vs Tiempo Normalizado	34
4.2	. Co	omparación de los resultados obtenidos en los programas Deepsoil y Cyclic 1D	35
4	.2.1.	Comparación de los acelerogramas de Deepsoil y Cyclic 1D	36
4	.2.2.	Comparación de los espectros de respuesta de Deepsoil y Cyclic 1D	37
4 p	.2.3. program	Comparación de la potencia del acelerograma y desarrollo de presión de poros de los nas Deepsoil y Cyclic 1D	38
4	.2.4.	Comparación entre la potencia de aceleración y la potencia de velocidad	40
4 C	2.5. Cyclic	Tiempo durante el cual se desarrolla la presión de poros con los programas Deepsoil y 1D	41
4	.2.6.	Comparación de la potencia del acelerograma normalizado.	41
4.3	. Aı	nálisis entre la Pseudo función de transferencia teórica y empírica	42
4.4	. De	eterminación de los Espectros de Respuesta Energética	43
CAPÍ	TULO	V	45
CON	CLUSI	ONES	45
RECO	OMEN	DACIONES	47
REFE	RENC	CIAS	48
APÉN	DICE	S	51
AP	ÉNDI	CE A - Gráficos procesados de Deepsoil con su acelerograma completo.	51
AP	ÉNDI	CE B - Comparación entre los resultados de Deepsoil y Cyclic 1D.	73
AP	ÉNDIO	CE C - Función de Transferencia	126
AP	ÉNDI	CE D - ESPECTROS DE RESPUESTA ENERGÉTICOS	135
AP	ÉNDI	CE E - EXTRAS	144
E	E.1. Es	sfuerzo Cortante y Ángulo de Fricción	144



E.2. Importación de los Registros a Analizar



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Principios básicos del espectro de respuesta.	6
Figura 2. Espectro de intensidad de Arias. (Ramírez et al.,2018)	9
Figura 3. Correlación de las distintas magnitudes con la magnitud de momento. (Kramer, 1996)	10
Figura 4. Grafica de un acelerograma. (Kramer, 1996)	11
Figura 5. Duración del sector fuerte. (Echezuria, 2018)	11
Figura 6. Representación de un sólido Kelvin-Voigt sometido a corte (Kramer, 1996)	12
Figura 7. Variación de la relación de amortiguación de suelos finos en función del corte y el índice de	
plasticidad indicando el umbral de generación de presión de poros igual a 3 x 10 ⁻⁴ %. (Kramer, 1996).	12
Figura 8. Curvas de Potencia de Velocidad y Potencia de Aceleración.	15
Figura 9. Determinación del parámetro F según Dr y Cu.	19
Figura 10. Comparación de las curvas determinadas por Matasovic y Vuetic (1993, 1992) (Línea negra	ì
sólida) para t, según diferentes valores de P.I y O.C.R y según las correlaciones presentadas (Líneas	
rojas punteada) (Carlton, 2014).	22
Figura 11. Diagrama esquemático de la respuesta con el modelo constitutivo mostrando esfuerzos	
cortantes, confinamiento efectivo y la relación esfuerzo-deformación. Modificada de Parra (1996).	25
Figura 12. Parámetros y características del perfil geotécnico de Treasure Island para Deepsoil.	28
Figura 13. Resultados del análisis de Deepsoil.	29
Figura 14. Correlación entre la potencia del acelerograma y el desarrollo de presión de poros para el pe	erfil
original de Treasure Island en el programa Deepsoil. Para el sismo de Duzce, Turquía magnitud 7,20 y	en en
su dirección X. Indicando el sector fuerte del acelerograma.	32
Figura 15. Correlación entre la potencia promedio de las aceleraciones del acelerograma y el desarrollo	o de
presión de poros para el perfil original de Treasure Island en el programa Deepsoil. Para sismos que	
generan una presión de poros de mayor al 70%.	33
Figura 16. Correlación entre la potencia promedio del cuadrado de las aceleraciones del acelerograma	y el
desarrollo de presión de poros para el perfil original de Treasure Island en el programa Deepsoil. Para	
sismos que generan una presión de poros de menor a 70%.	33
Figura 17. Correlación entre la potencia del acelerograma y la velocidad relativa para el perfil original	de
Treasure Island en el programa Deepsoil. Para el sismo de Umbría Tercer Impacto magnitud 5,60 y en	su
dirección X. Indicando el sector fuerte del acelerograma.	34
Figura 18. Correlación entre las potencias de diversos sismos de distintas magnitudes vs tiempo	
normalizado.	35
Figura 19. Sismo de respuesta en la base del estrato licuable obtenido con el programa Deepsoil.	
Acelerograma Baja California, de magnitud M5,50 y en su dirección X. Indicando la aceleración máxin	ma
del acelerograma y su duración.	36
Figura 20. Sismo de respuesta en la base del estrato licuable obtenido con el programa Cyclic 1D.	
Acelerograma del sismo de Baja California, de magnitud M5,50 y en su dirección X. Indicando la	
aceleración máxima del acelerograma y su duración.	37
Figura 21. Espectro de respuesta para el sismo de Baja California, de magnitud M5,50 y en su direcció	n Y
del el programa Deepsoil. Indicando la aceleración máxima espectral y el periodo en el que alcanza dic	cha
aceleración espectral.	38
Figura 22. Espectro de respuesta para el sismo de Baja California, de magnitud M5,50 y en su direcció	n Y
del el programa Cyclic 1D. Indicando la aceleración máxima espectral y el periodo en el que alcanza	
dicha aceleración espectral.	38

Figura 23. Potencia del acelerograma y desarrollo de presión de poros del sismo de Umbría, primer choque, de magnitud M5,70 en su dirección X, del programa Deepsoil. Indicando el sector fuerte del acelerograma.

39

Figura 24. Potencia del acelerograma y desarrollo de presión de poros del sismo de Umbría, primer	
choque, de magnitud M5,70 en su dirección X, del programa Cyclic 1D. Indicando el sector fuerte del	
acelerograma.	39
Figura 25. Potencia del acelerograma y potencia de velocidad del sismo de Umbría, primer choque, de magnitud M5,70 en su dirección X, del programa Deepsoil. Indicando la duración del sector fuerte.	40
Figura 26. Potencia del acelerograma y potencia de velocidad del sismo de Umbría, primer choque, de magnitud M5.70 en su dirección X. del programa Cyclic 1D. Indicando la duración del sector fuerte.	40
Figura 27. Correlación entre la potencia de las aceleraciones del acelerograma y el desarrollo de presión	n
de poros para el perfil original de Treasure Island en el programa Deepsoil.	41
Figura 28. Potencia del acelerograma normalizada para diferentes sismos del programa Cyclic 1D.	42
Figura 29. Pseudo función de transferencia teórica y empírica para el sismo de Duzce de magnitud M 7 en su dirección Y. Indicando el periodo en el que se obtiene la máxima amplitud para las pseudo	,20
funciones de transferencia teorica (naranja) y empírica (verde).	43
Figura 30. Espectro de respuesta en roca para el sismo de Duzce, de magnitud M 7,20 y en su dirección	1
Y. Utilizando los métodos convencionales y el energético.	43
Figura 31. Espectro de respuesta en el quiebre para el sismo de Duzce, de magnitud M 7,20 y en su	
dirección Y. Utilizando los métodos convencionales y el energético.	44
Figura 32. Comparación entre la pseudo función de transferencia teórica, convencional y energética par	ra
el sismo de Duzce, de magnitud M 7,20 y en su dirección Y.	44
Apéndice A	51
Figura A. 1.Correlación de la Potencia del Acelerograma y el Desarrollo de Presión de Poros para el sismo de Baja California de Magnitud M 5,50 y en su dirección X. Indicando la duración del sector fue del acelerograma.	rte . 51
Figura A. 2. Correlación de la Potencia del Acelerograma y el Desarrollo de Presión de Poros para el sismo de Baja California de Magnitud M 5,50 y en su dirección Y. Indicando la duración del sector fue del acelerograma	rte
Figura A. 3. Correlación entre la Potencia del Acelerograma y el desarrollo de presión de poros para el sismo de Umbría de magnitud M 5.70 y en su dirección X. Indicando la duración del sector fuerte del	
acelerograma.	.52
Figura A. 4. Correlación entre la Potencia del Acelerograma y el desarrollo de presión de poros para el sismo de Umbría de magnitud M 5,70 y en su dirección Y. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.	. 52
Figura A. 5. Correlación entre la potencia del acelerograma y el desarrollo de presión de poros para el	
sismo de Chalfant de magnitud M 6,19 y en su dirección X. Indicando la duración del sector fuerte del	
acelerograma	.53
Figura A. 6. Correlación entre la potencia del acelerograma y el desarrollo de presión de poros para el sismo de Chalfant de magnitud M 6,19 y en su dirección Y. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma	52
actorograma	

Figura A. 8. Correlación entre la potencia del acelerograma y el desarrollo de presión de poros para el sismo de Nueva Zelanda de magnitud M 6,60 y en su dirección Y. Indicando la duración del sector fuerte
del acelerograma
Figura A. 9. Comparación entre la Potencia del Acelerograma y el Desarrollo de Presión de Poros para el sismo de Landers de magnitud M 7,28 y en su dirección X. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma
Figura A. 10. Comparación entre la Potencia del Acelerograma y el Desarrollo de Presión de Poros para el sismo de Landers de magnitud M 7,28 y en su dirección Y. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma
Figura A. 11. Comparación entre la potencia del acelerograma y el desarrollo de la presión de poros para el sismo de Duzce de magnitud M 7,14 y en su dirección X. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma
Figura A. 12. Comparación entre la potencia del acelerograma y el desarrollo de la presión de poros para el sismo de Duzce de magnitud M 7,14 y en su dirección Y. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma
Figura A. 13. Comparación entre la potencia del acelerograma y el desarrollo de la presión de poros para el sismo de Duzce de magnitud M 7,20 y en su dirección X. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma
Figura A. 14. Comparación entre la potencia del acelerograma y el desarrollo de la presión de poros para el sismo de Duzce de magnitud M 7,20 y en su dirección Y. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma
Figura A. 15. Comparación entre la potencia del acelerograma y el desarrollo de la presión de poros para el sismo de Umbria 3rd de magnitud M 5,60 y en su dirección X. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma
Figura A. 16. Comparación entre la potencia del acelerograma y el desarrollo de la presión de poros para el sismo de Umbria 3rd de magnitud M 5,60 y en su dirección Y. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma
Figura A. 17. Comparación entre la potencia del acelerograma y el desarrollo de la presión de poros para el sismo de Big Bear de magnitud M 6,46 y en su dirección X. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma
Figura A. 18. Comparación entre la potencia del acelerograma y el desarrollo de la presión de poros para el sismo de Big Bear de magnitud M 6,46 y en su dirección Y. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma
Figura A. 19. Comparación entre la potencia del acelerograma y el desarrollo de la presión de poros para el sismo de Emilia 2nd de magnitud M 6,00 y en su dirección X. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma
Figura A. 20. Comparación entre la potencia del acelerograma y el desarrollo de la presión de poros para el sismo de Emilia 2nd de magnitud M 6,00 y en su dirección Y. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma
Figura A. 21. Comparación entre la potencia del acelerograma y el desarrollo de la presión de poros para el sismo de Central Italy de magnitud M 5,00 y en su dirección X. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma
Figura A. 22. Comparación entre la potencia del acelerograma y el desarrollo de la presión de poros para el sismo de Central Italy de magnitud M 5,00 y en su dirección Y. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma

Figura A. 23. Comparación entre la potencia del acelerograma y la potencia de velocidad para el sismo de Baja California de magnitud M 5,50 y en su dirección X. Indicando la duración del sector fuerte del
acelerograma
Figura A. 24. Comparación entre la potencia del acelerograma y la potencia de velocidad para el sismo de
Umbría de magnitud 5,70 y en dirección Y. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma 62
Figura A. 25. Comparación entre la potencia del acelerograma y la potencia de velocidad para el sismo de
Chalfant de magnitud M 6,19 y en su dirección Y. Indicando la duración del sector fuerte del
acelerograma
Figura A. 26. Comparación entre la potencia del acelerograma y la potencia de velocidad para el sismo de
Nueva Zelanda de magnitud M 6,60 y en su dirección X. Indicando la duración del sector fuerte del
acelerograma
Figura A. 27. Comparación entre la potencia del acelerograma y la potencia de velocidad para el sismo de
Landers de magnitud M 7,28 y en su dirección X. Indicando la duración del sector fuerte del
acelerograma64
Figura A. 28. Comparación entre la potencia del acelerómetro y la potencia de velocidad para el sismo de
Duzce de magnitud M 7,14 y en su dirección X. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.
Figura A. 29. Comparación entre la potencia del acelerograma y la potencia de velocidad para el sismo de
Duzce de magnitud M 7,20 y en su dirección Y. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.
Figura A. 30. Comparación entre la potencia del acelerograma y la potencia de velocidad para el sismo de
Umbría 3rd de magnitud M 5,60 y en su dirección Y. Indicando la duración del sector fuerte del
acelerograma65
Figura A. 31. Gráfica de potencia promedio en función del desarrollo de presión de poros para diferentes
sismos de distintas magnitudes
Figura A. 32. Potencia del acelerograma normalizada para el sismo de Baja California de magnitud M
5,50 y en su dirección X
Figura A. 33. Potencia del acelerograma normalizado, para el sismo de Umbría de magnitud M 5,70 y en
su dirección X
Figura A. 34. Potencia del acelerograma normalizado, para el sismo de Chalfant de magnitud M 6,19 y en
su dirección Y
Figura A. 35. Potencia del acelerograma normalizado, para el sismo de Nueva Zelanda de magnitud M
6,60 y en su dirección X
Figura A. 36. Potencia normalizada, para el sismo de Landers de magnitud M 7,28 y en su dirección X. 68
Figura A. 37. Potencia normalizada, para el sismo de Duzce de magnitud M 7,14 y en su dirección X69
Figura A. 38. Potencia normalizada, para el sismo de Duzce de magnitud M 7,20 y en su dirección y70
Figura A. 39. Potencia normalizada, para el sismo de Umbría 3rd de magnitud M 5,60 y en su dirección y.
Figura A. 40. Potencia normalizada, para el sismo de Big Bear de magnitud M 6,46 y en su dirección X.
Figura A. 41. Potencia normalizada, para el sismo de Emilia 2nd de magnitud M 6,00 y en su dirección Y.
Figure A 42 Potencia normalizada, para el sismo de Central Italy de magnitud M 5.00 y en su dirección
Y γ
1

Apéndice B

Figura B. 1. Sismo de respuesta en la base del estrato licuable obtenido con el programa Deepsoil.
Acelerograma Baja California, de magnitud M5,50 y en su dirección X. Indicando la aceleración máxima
del acelerograma y su duración73
Figura B. 2.Sismo de respuesta en la base del estrato licuable obtenido con el programa Cyclic 1D.
Acelerograma Baja California, de magnitud M5,50 y en su dirección X. Indicando la aceleración máxima
del acelerograma y su duración73
Figura B. 3. Sismo de respuesta en la base del estrato licuable obtenido con el programa Deepsoil.
Acelerograma Umbría, de magnitud M 5,70 y en su dirección X. Indicando la aceleración máxima del
acelerograma y su duración74
Figura B. 4. Sismo de respuesta en la base del estrato licuable obtenido con el programa Cyclic 1D.
Acelerograma Umbría, de magnitud M 5,70 y en su dirección X. Indicando la aceleración máxima del
acelerograma y su duración74
Figura B. 5. Sismo de respuesta en la base del estrato licuable obtenido con el programa Deepsoil.
Acelerograma Chalfant, de magnitud M 6,19 y en dirección Y. Indicando la aceleración máxima del
acelerograma y su duración
Figura B. 6. Sismo de respuesta en la base del estrato licuable obtenido con el programa Cyclic 1D.
Acelerograma Chalfant, de magnitud M 6,19 y en dirección Y. Indicando la aceleración máxima del
acelerograma y su duración
Figura B. 7. Sismo de respuesta en la base del estrato licuable obtenido con el programa Cyclic 1D.
Acelerograma de Nueva Zelanda, de magnitud M 6.60 v en su dirección X. Indicando la aceleración
máxima del acelerograma v su duración
Figura B. 8. Sismo de respuesta en la base del estrato licuable obtenido con el programa Deepsoil.
Acelerograma Nueva Zelanda, de magnitud M 6.60 y en su dirección X. Indicando la aceleración máxima
del acelerograma y su duración
Figura B 9 Sismo de respuesta en la base del estrato licuable obtenido con el programa Deepsoil
Acelerograma de Landers de magnitud M 7.28 y en su dirección X. Indicando la aceleración máxima del
acelerograma y su duración
Figura B 10. Sismo de respuesta en la base del estrato licuable obtenido con el programa Cyclic 1D
Acelerograma de Landers, de magnitud M 7.28 y en su dirección X. Indicando la aceleración máxima del
acelerograma v su duración
Figura B. 11. Sismo de respuesta en la base del estrato licuable obtenido con el programa Deepsoil
Acelerograma da Duzca, da magnitud M 7.14 y an su diracción Y. Indicando la aceleración méxima dal
acelerograma v su duración
Eigure P. 12. Sigme de regnueste en le base del estrete liqueble obtenide con el programe Cyclic 1D
Acelerogreeme de Duzee, de magnitud M 7.14 y en su dirección V. Indicendo la coelerogión méximo del
Accelerograma de Duzce, de magintud M 7,14 y en su dirección A. indicando la acceleración maxima del
$\mathbf{r} = \mathbf{p} + 2\mathbf{r} \mathbf{r} \mathbf{r} \mathbf{r} \mathbf{r} \mathbf{r} \mathbf{r} \mathbf{r} $
Figura B. 13. Sismo de respuesta en la base del estrato licuable obtenido con el programa Deepsoli.
Accelerograma de Duzce, de magnitud M 7,20 y en su dirección Y. Indicando la aceleración maxima del
79 Diagrama y su duración
Figura B. 14. Sismo de respuesta en la base del estrato licuable obtenido con el programa Cyclic ID.
Accierograma de Duzce, de magnitud NI 7,20 y en dirección Y. Indicando la accieración maxima del
aceierograma y su duración

Figura B. 15. Sismo de respuesta en la base del estrato licuable obtenido con el programa Cyclic 1D.
Acelerograma de Umbría 3rd, de magnitud M 5,00 y en su dirección Y. Indicando la aceleración máxima
del acelerograma y su duración
Figura B. 16. Sismo de respuesta en la base del estrato licuable obtenido con el programa Deepsoil.
Acelerograma de Umbría 3rd, de magnitud M 5,00 y en su dirección Y. Indicando la aceleración máxima
del acelerograma y su duración
Figura B. 17. Sismo de respuesta en la base del estrato licuable obtenido con el programa Deepsoil.
Acelerograma de Big Bear, de magnitud M 6,46 y en su dirección X. Indicando la aceleración máxima del
acelerograma y su duración
Figura B. 18. Sismo de respuesta en la base del estrato licuable obtenido con el programa Cyclic 1D.
Acelerograma de Big Bear, de magnitud M 6,46 y en su dirección X. Indicando la aceleración máxima del
acelerograma y su duración
Figura B. 19. Sismo de respuesta en la base del estrato licuable obtenido con el programa Cyclic 1D.
Acelerograma de Emilia 2nd , de magnitud M 6,00 y en su dirección Y. Indicando la aceleración máxima
del acelerograma y su duración82
Figura B. 20. Sismo de respuesta en la base del estrato licuable obtenido con el programa Deepsoil.
Acelerograma de Emilia 2nd, de magnitud M 6,00 y en su dirección Y. Indicando la aceleración máxima
del acelerograma y su duración
Figura B. 21. Sismo de respuesta en la base del estrato licuable obtenido con el programa Deepsoil.
Acelerograma de Central Italy, de magnitud M 5,00 y en su dirección Y. Indicando la aceleración
máxima del acelerograma y su duración
Figura B. 22. Sismo de respuesta en la base del estrato licuable obtenido con el programa Cyclic 1D.
Acelerograma de Central Italy, de magnitud M 5.00 y en su dirección Y. Indicando la aceleración
máxima del acelerograma v su duración
Figura B 23 Potencia del acelerograma y desarrollo de presión de poros del sismo de Baja California de
magnitud M 5.50 en su dirección X. del programa Deepsoil. Indicando la duración del sector fuerte del
acelerograma
Figura B 24 Potencia del acelerograma y desarrollo de presión de poros del sismo de Baja California de
magnitud M 5 50 en su dirección X del programa Cyclic 1D Indicando la duración del sector fuerte del
acelerograma
Figura B 25 Potencia del acelerograma y desarrollo de presión de poros del sismo de Umbría, de
magnitud M 5 70 en su dirección X del programa Deensoil Indicando la duración del sector fuerte del
acelerograma
Figura R. 26. Potonzia del acolorograma y desarrollo de prosión de poros del sismo de Umbría, de
magnitud M 5 70 an su dirección V del programa Cyclic 1D. Indicando la duración del soctor fuerte del
nagina w 5,70 en su dirección X, del programa Cyclic TD. Indicando la duración del sector fuerte del
Eigure D. 27. Detensis del conferenzamento de sussión de norse del sigme de Chalfont, de
rigura B. 27. Potencia del acelerograma y desarrono de presión de poros del sismo de Chamani, de
magnitud M 6,19 en su dirección Y, del programa Deepson. Indicando la duración del sector fuerte del
accelerograma
Figura B. 28. Potencia del acelerograma y desarrollo de presión de poros del sismo de Chalfant, de
magnitud NI 6,19 en su dirección Y, del programa Cyclic ID. Indicando la duración del sector fuerte del
aceierograma
Figura B. 29. Potencia del acelerograma y desarrollo de presión de poros del sismo de Nueva Zelanda, de
magnitud M 6,60 en su dirección Y. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma

Figura B. 30. Potencia del acelerograma y desarrollo de presión de poros del sismo de Nueva Zelanda, de magnitud M 6,60 en su dirección X, del programa Cyclic 1D. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma
Figura B. 31. Potencia del acelerograma y desarrollo de presión de poros del sismo de Landers, de
magnitud M 7,28 en su dirección X, del programa Deepsoil. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma
Figura B. 32. Potencia del acelerograma y desarrollo de presión de poros del sismo de Landers, de
magnitud M 7,28 en su dirección X, del programa Cyclic 1D. Indicando la duración del sector fuerte del
acelerograma
Figura B. 33. Potencia del acelerograma y desarrollo de presión de poros del sismo de Duzce, de
magnitud M 7,14 en su dirección X, del programa Deepsoil. Indicando la duración del sector fuerte del
acelerograma
Figura B. 34. Potencia del acelerograma y desarrollo de presión de poros del sismo de Duzce, de
magnitud M 7,14 en su dirección X, del programa Cyclic 1D. Indicando la duración del sector fuerte del
acelerograma
Figura B. 35. Potencia del acelerograma y desarrollo de presión de poros del sismo de Duzce, de
magnitud M 7,20 en su dirección X, del programa Deepsoil. Indicando la duración del sector fuerte del
acelerograma
Figura B. 36. Potencia del acelerograma y desarrollo de presión de poros del sismo de Duzce, de
magnitud M 7,20 en su dirección X, del programa Cyclic 1D. Indicando la duración del sector fuerte del
90
Figura B. 37. Potencia del acelerograma y desarrollo de presión de poros del sismo de Umbría 3rd, de
magnitud M 5,60 en su dirección y, del programa Deepsoil. Indicando la duración del sector fuerte del
acelerograma
Figura B. 38. Potencia del acelerograma y desarrollo de presion de poros del sismo de Umbria 3rd, de
magnitud M 5,60 en su dirección 1, del programa Cyche ID. Indicando la duración del sector fuerte del
Eigure P. 20. Detensis del scalarograme y deservalle de presión de poros del sigme de Pig Poer, de
magnitud M 6.46 en su dirección X del programa Deepsoil Indicando la duración del sector fuerte del
acelerograma
Figura B 40 Potencia del acelerograma y desarrollo de presión de poros del sismo de Big Bear, de
magnitud M 6 46 en su dirección X del programa Cyclic 1D Indicando la duración del sector fuerte del
acelerograma
Figura B. 41. Potencia del acelerograma y desarrollo de presión de poros del sismo de Emilia 2nd, de
magnitud M 6,00 en su dirección Y, del programa Deepsoil. Indicando la duración del sector fuerte del
acelerograma
Figura B. 42. Potencia del acelerograma y desarrollo de presión de poros del sismo de Emilia 2nd, de
magnitud M 6,00 en su dirección Y, del programa Cyclic 1D. Indicando la duración del sector fuerte del
acelerograma
Figura B. 43. Potencia del acelerograma y desarrollo de presión de poros del sismo de Central Italy, de
magnitud M 5,00 en su dirección Y, del programa Deepsoil. Indicando la duración del sector fuerte del
acelerograma94
Figura B. 44. Potencia del acelerograma y desarrollo de presión de poros del sismo de Central Italy, de
magnitud M 5,00 en su dirección Y, del programa Cyclic 1D. Indicando la duración del sector fuerte del
acelerograma

Figura B. 45. Potencia del acelerograma y potencia de velocidad del sismo de Baja California, de magnitud M 5,50 en su dirección X, del programa Deepsoil. Indicando la duración del sector fuerte del Figura B. 46. Potencia del acelerograma y potencia de velocidad del sismo de Baja California, de magnitud M 5,50 en su dirección X, del programa Cyclic 1D. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma......95 Figura B. 47. Potencia del acelerograma y potencia de velocidad del sismo de Umbría, de magnitud M 5,70 en su dirección X, del programa Deepsoil. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma. Figura B. 48. Potencia del acelerograma y potencia de velocidad del sismo de Umbría, de magnitud M 5,70 en su dirección X, del programa Cyclic 1D. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma. Figura B. 49. Potencia del acelerograma y potencia de velocidad del sismo de Chalfant, de magnitud M 6,19 en su dirección Y, del programa Deepsoil. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma. Figura B. 50. Potencia del acelerograma y potencia de velocidad del sismo de Chalfant, de magnitud M 6,19 en su dirección Y, del programa Cyclic 1D. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma. Figura B. 51. Potencia del acelerograma y potencia de velocidad del sismo de Nueva Zelanda, de magnitud M 6,60 en su dirección X, del programa Deepsoil. Indicando la duración del sector fuerte del Figura B. 52. Potencia del acelerograma y potencia de velocidad del sismo de Nueva Zelanda, de magnitud M 6,60 en su dirección X, del programa Cyclic 1D. Indicando la duración del sector fuerte del Figura B. 53. Potencia del acelerograma y potencia de velocidad del sismo de Landers, de magnitud M 7.28 en su dirección X, del programa Deepsoil. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma. Figura B. 54. Potencia del acelerograma y potencia de velocidad del sismo de Landers, de magnitud M 7,28 en su dirección X, del programa Cyclic 1D. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma. Figura B. 55. Potencia del acelerograma y potencia de velocidad del sismo de Duzce, de magnitud M 7,14 en su dirección X, del programa Deepsoil. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma. ... 100 Figura B. 56. Potencia del acelerograma y potencia de velocidad del sismo de Duzce, de magnitud M 7,14 en su dirección X, del programa Cyclic 1D. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma. . 100 Figura B. 57. Potencia del acelerograma y potencia de velocidad del sismo de Duzce, de magnitud M 7,14 en su dirección X, del programa Deepsoil. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma. ... 101 Figura B. 58. Potencia del acelerograma y potencia de velocidad del sismo de Duzce, de magnitud M 7,20 en su dirección Y, del programa Deepsoil. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma. ... 101 Figura B. 59. Potencia del acelerograma y potencia de velocidad del sismo de Duzce, de magnitud M 7,20 en su dirección Y, del programa Cyclic 1D. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma. 102 Figura B. 60. Potencia del acelerograma y potencia de velocidad del sismo de Umbría 3rd, de magnitud M 5,60 en su dirección Y, del programa Deepsoil. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma. Figura B. 61. Potencia del acelerograma y potencia de velocidad del sismo de Umbría 3rd, de magnitud M 5,60 en su dirección Y, del programa Cyclic 1D. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.

Figura B. 62. Potencia del acelerograma y potencia de velocidad del sismo de Big Bear, de magnitud M 6,46 en su dirección X, del programa Deepsoil. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.
103 Figura B. 63. Potencia del acelerograma y potencia de velocidad del sismo de Big Bear, de magnitud M 6,46 en su dirección X, del programa Cyclic 1D. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma. 104
Figura B. 64. Potencia del acelerograma y potencia de velocidad del sismo de Emilia 2nd, de magnitud M 6,00 en su dirección Y, del programa Deepsoil. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.
Figura B. 65. Potencia del acelerograma y potencia de velocidad del sismo de Emilia 2nd, de magnitud M 6,00 en su dirección Y, del programa Cyclic 1D. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.
Figura B. 66. Potencia del acelerograma y potencia de velocidad del sismo de Central Italy, de magnitud M 5,00 en su dirección Y, del programa Deepsoil. Indicando la duración del sector fuerte del
Figura B. 67. Potencia del acelerograma y potencia de velocidad del sismo de Central Italy, de magnitud M 5,00 en su dirección Y, del programa Deepsoil. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma
Figura B. 68. Potencia normalizada, para el sismo de Baja California de magnitud M 5,50, de Cyclic 1D y en su dirección X
Figura B. 69. Potencia normalizada, para el sismo de Umbría de magnitud M 5,70, de Cyclic 1D y en su dirección X
Figura B. 70. Potencia normalizada, para el sismo de Chalfant de magnitud M 6,19, de Cyclic 1D y en su dirección Y
Figura B. 71. Potencia normalizada, para el sismo de Nueva Zelanda de magnitud M 6,60, de Cyclic 1D y en su dirección X
Figura B. 72. Potencia normalizada, para el sismo de Landers de magnitud M 7,28, de Cyclic 1D y en su dirección X
Figura B. 73. Potencia normalizada, para el sismo de Duzce de magnitud M 7,14, de Cyclic 1D y en su dirección X
Figura B. 74. Potencia normalizada, para el sismo de Duzce de magnitud M 7,20, de Deepsoil y en su dirección Y
Figura B. 75. Potencia normalizada, para el sismo de Duzce de magnitud M 7,20, de Cyclic 1D y en su dirección Y
Figura B. 76. Potencia normalizada, para el sismo de Umbría 3rd de magnitud M 5,60, de Deepsoil y en su dirección Y
Figura B. 77. Potencia normalizada, para el sismo de Umbría 3rd de magnitud M 5,60, de Cyclic 1D y en su dirección Y
Figura B. 78. Potencia normalizada, para el sismo de Big Bear de magnitud M 6,46, de Deepsoil y en su dirección X
Figura B. 79. Potencia normalizada, para el sismo de Big Bear de magnitud M 6,46, de Cyclic 1D y en su dirección X
Figura B. 80. Potencia normalizada, para el sismo de Emilia 2nd de magnitud M 6,00 , de Deepsoil y en su dirección Y
Figura B. 81. Potencia normalizada, para el sismo de Emilia 2nd de magnitud M 6,00 , de Cyclic 1D y en su dirección Y

Figura B. 82. Potencia normalizada, para el sismo de Central Italy de magnitud M 5,00, de Deepsoil y en su dirección Y
Figura B. 83. Potencia normalizada, para el sismo de Central Italy de magnitud M 5,00, de Cyclic 1D y en su dirección Y
Figura B. 84. Espectro de Respuesta en el quiebre Baja California de magnitud M 5,50, de Cyclic 1D y en su dirección X. Indicando la aceleración máxima espectral y el periodo en el que alcanza dicha
aceleración espectral
Figura B. 86. Espectro de Respuesta en el quiebre Umbria de magnitud M 5,70, de Cyclic 1D en su dirección X. Indicando la aceleración máxima espectral y el periodo en el que alcanza dicha aceleración espectral
Figura B. 87. Espectro de Respuesta en el quiebre Umbria de magnitud M 5,70, de Cyclic 1D en su dirección Y. Indicando la aceleración máxima espectral y el periodo en el que alcanza dicha aceleración espectral
Figura B. 88. Espectro de Respuesta en el quiebre Chalfant de magnitud M 6,19, de Cyclic 1D en su dirección X. Indicando la aceleración máxima espectral y el periodo en el que alcanza dicha aceleración espectral
Figura B. 89. Espectro de Respuesta en el quiebre Chalfant de magnitud M 6,19 , de Cyclic 1D en su dirección Y. Indicando la aceleración máxima espectral y el periodo en el que alcanza dicha aceleración espectral
Figura B. 90. Espectro de Respuesta en el quiebre New Zeland de magnitud M 6,60, de Cyclic 1D en su dirección X. Indicando la aceleración máxima espectral y el periodo en el que alcanza dicha aceleración espectral
Figura B. 91. Espectro de Respuesta en el quiebre New Zeland de magnitud M 6,60, de Cyclic 1D en su dirección Y. Indicando la aceleración máxima espectral y el periodo en el que alcanza dicha aceleración espectral
Figura B. 92. Espectro de Respuesta en el quiebre Landers de magnitud M 7,28, de Cyclic 1D en su dirección X. Indicando la aceleración máxima espectral y el periodo en el que alcanza dicha aceleración espectral
Figura B. 93. Espectro de Respuesta en el quiebre Landers de magnitud M 7,28, de Cyclic 1D en su dirección Y. Indicando la aceleración máxima espectral y el periodo en el que alcanza dicha aceleración espectral
Figura B. 94. Espectro de Respuesta en el quiebre 1612 Duzce de magnitud M 7,14, de Cyclic 1D en su dirección X. Indicando la aceleración máxima espectral y el periodo en el que alcanza dicha aceleración espectral
Figura B. 95. Espectro de Respuesta en el quiebre 1612 Duzce de magnitud M 7,14, de Cyclic 1D en su dirección Y. Indicando la aceleración máxima espectral y el periodo en el que alcanza dicha aceleración espectral
Figura B. 96. Espectro de Respuesta en el quiebre 8101 Duzce de magnitud M 7,20, de Cyclic 1D en su dirección X. Indicando la aceleración máxima espectral y el periodo en el que alcanza dicha aceleración espectral
Figura B. 97. Espectro de Respuesta en el quiebre 8101 Duzce de magnitud M 7,20, de Cyclic 1D en su dirección Y. Indicando la aceleración máxima espectral y el periodo en el que alcanza dicha aceleración espectral

Figura B. 98. Espectro de Respuesta en el quiebre Umbria 3rd de magnitud M 5,60, de Cyclic 1D en su dirección X. Indicando la aceleración máxima espectral y el periodo en el que alcanza dicha aceleración espectral
Figura B. 99. Espectro de Respuesta en el quiebre Umbria 3rd de magnitud M 5,60, de Cyclic 1D en su dirección Y. Indicando la aceleración máxima espectral y el periodo en el que alcanza dicha aceleración espectral.
Figura B. 100. Espectro de Respuesta en el quiebre Big Bear de magnitud M 6,46, de Cyclic 1D en su dirección X. Indicando la aceleración máxima espectral y el periodo en el que alcanza dicha aceleración espectral
Figura B. 101. Espectro de Respuesta en el quiebre Big Bear de magnitud M 6,46, de Cyclic 1D en su dirección Y. Indicando la aceleración máxima espectral y el periodo en el que alcanza dicha aceleración espectral
Figura B. 102. Espectro de Respuesta en el quiebre Emilia 2nd de magnitud M 6,00, de Cyclic 1D en su dirección X. Indicando la aceleración máxima espectral y el periodo en el que alcanza dicha aceleración espectral
Figura B. 103. Espectro de Respuesta en el quiebre Emilia 2nd de magnitud M 6,00, de Cyclic 1D en su dirección Y. Indicando la aceleración máxima espectral y el periodo en el que alcanza dicha aceleración espectral
Figura B. 104. Espectro de Respuesta en el quiebre Central Italy de magnitud M 5,00, de Cyclic 1D en su dirección X. Indicando la aceleración máxima espectral y el periodo en el que alcanza dicha aceleración espectral
Figura B. 105. Espectro de Respuesta en el quiebre Central Itraly de magnitud M 5,00, de Cyclic 1D en su dirección Y. Indicando la aceleración máxima espectral y el periodo en el que alcanza dicha aceleración espectral

Apéndice C

126

Figura C. 1. Espectro de respuesta en roca para el sismo de Baja California, de magnitud M 5,50 y en su dirección X
Figura C. 2. Espectro de respuesta en el quiebre para el sismo de Baja California, de magnitud M 5,50 y en su dirección X
Figura C. 3. Comparación entre la función de transferencia teórica y empírica para el sismo de Baja California, de magnitud M 5 50 y en su dirección X
Figura C. 4. Espectro de respuesta en roca para el sismo de Umbría, de magnitud M 5,70 y en su dirección
X
dirección X
Figura C. 6. Comparación entre la función de transferencia teórica y empírica para el sismo de Umbría, de magnitud M 5,70 y en su dirección X. Indicando el periodo en el que se obtiene la máxima amplitud para
las pseudo funciones de transferencia teorica (naranja) y empírica (verde)
dirección Y
Figura C. 8.Espectro de respuesta en el quiebre para el sismo de Chalfant, de magnitud M 6,19 y en su dirección Y

Figura C. 9. Comparación entre la función de transferencia teórica y empírica para el sismo de Chalfant,
de magnitud M 0,19 y en su dirección 1. indicando el periodo en el que se obtiene la maxima amplitud
Figure C. 10 Execute de mansferencia teorica (naranja) y empirica (verde)
Figura C. 10.Espectro de respuesta en roca para el sismo de Nueva Zelanda, de magnitud M 6,60 y en su
direction X
Figura C. 11.Espectro de respuesta en el quiebre para el sismo de Nueva Zelanda, de magnitud M 6,60 y
en su dirección X
Figura C. 12. Comparación entre la función de transferencia teórica y empírica para el sismo de Nueva
Zelanda, de magnitud M 6,60 y en su dirección X. Indicando el periodo en el que se obtiene la máxima
amplitud para las pseudo funciones de transferencia teorica (naranja) y empírica (verde)
Figura C. 13. Espectro de respuesta en roca para el sismo de Landers, de magnitud M 7,28 y en su
dirección X
Figura C. 14. Espectro de respuesta en el quiebre para el sismo de Landers, de magnitud M 7,28 y en su
dirección X
Figura C. 15. Comparación entre la función de transferencia teórica y empírica para el sismo de Landers,
de magnitud M 7,28 y en su dirección X. Indicando el periodo en el que se obtiene la máxima amplitud
para las pseudo funciones de transferencia teorica (naranja) y empírica (verde)
Figura C. 16. Espectro de respuesta en roca para el sismo de Duzce, de magnitud M 7,14 y en su dirección
X
Figura C. 17. Espectro de respuesta en el quiebre para el sismo de Duzce, de magnitud M 7.14 y en su
dirección X
Figura C. 18. Comparación entre la función de transferencia teórica y empírica para el sismo de Duzce, de
magnitud M 7.14 v en su dirección X. Indicando el periodo en el que se obtiene la máxima amplitud para
las pseudo funciones de transferencia teorica (narania) y empírica (verde)
Figura C 19 Espectro de respuesta en roca para el sismo de Duzce, de magnitud M 7 20 y en su dirección
Y
Figura C. 20. Espectro de respuesta en el quiebre para el sismo de Duzce, de magnitud M 7.20 y en su
dirección Y
Figura C 21 Comparación entre la función de transferencia teórica y empírica para el sismo de Duzce, de
magnitud M 7 20 y en su dirección V. Indicando el periodo en el que se obtiene la máxima amplitud para
las pseudo funciones de transferencia teorica (narania) y empírica (verde)
Figura C 22 Espectro de respuesta en roca para el sismo de Umbría, de magnitud M 5.60 y en su
dirección V
$ = \frac{1}{1} = \frac$
rigura C. 25. Espectro de respuesta en el quiebre para el sismo de Uniona, de magintud M 5,60 y en su
Figura C. 24. Comparación entre la función de transferencia teorica y empirica para el sismo de Umbria,
de magnitud M 5,60 y en su dirección Y. Indicando el período en el que se obtiene la maxima amplitud
para las pseudo funciones de transferencia teorica (naranja) y empirica (verde)
Figura C. 25. Espectro de respuesta en roca para el sismo de BigBear, de magnitud M 6,46 y en su
dirección X
Figura C. 26. Espectro de respuesta en el quiebre para el sismo de BigBear, de magnitud M 6,46 y en su
dirección X
Figura C. 27. Comparación entre la función de transferencia teórica y empírica para el sismo de BigBear,
de magnitud M 6,46 y en su dirección Y. Indicando el periodo en el que se obtiene la máxima amplitud
para las pseudo funciones de transferencia teorica (naranja) y empírica (verde)

Figura C. 28. Espectro de respuesta en roca para el sismo de Emilia, de magnitud M 6,00 y en su dirección Y
Figura C. 29. Espectro de respuesta en el quiebre para el sismo de Emilia, de magnitud M 6,00 y en su dirección Y.
Figura C. 30. Comparación entre la función de transferencia teórica y empírica para el sismo de Emilia, de magnitud M 6,00 y en su dirección Y. Indicando el periodo en el que se obtiene la máxima amplitud para las pseudo funciones de transferencia teorica (parania) y empírica (verde)
Figura C. 31. Espectro de respuesta en roca para el sismo del Centro de Italia, de magnitud M 5,00 y en su dirección Y
Figura C. 32. Espectro de respuesta en el quiebre para el sismo del Centro de Italia, de magnitud M 5,00 y en su dirección Y
Figura C. 33. Comparación entre la función de transferencia teórica y empírica para el sismo del Centro de Italia, de magnitud M 5,00 y en su dirección Y. Indicando el periodo en el que se obtiene la máxima amplitud para las pseudo funciones de transferencia teorica (naranja) y empírica (verde)
Figura D. 1. Espectro de respuesta en roca para el sismo de Baja California, de magnitud M 5,50 y en su dirección X. Utilizando los métodos convencionales y el energético
Figura D. 3. Comparación entre la pseudo función de transferencia teórica, convencional y energética para el sismo de Baja California, de magnitud M 5,50 y en su dirección X
Figura D. 5. Espectro de respuesta en el quiebre para el sismo de Umbría, de magnitud M 5,70 y en su dirección X. Utilizando el método convencional y el energético
Figura D. 6. Comparación entre la pseudo función de transferencia teórica, convencional y energética para el sismo de Umbría, de magnitud M 5,70 y en su dirección X
Figura D. 7. Espectro de respuesta en roca para el sismo de Chalfant, de magnitud M 6,19 y en su dirección Y. Utilizando los métodos convencionales y el energético
dirección Y. Utilizando los métodos convencionales y el energético
sismo de Chalfant, de magnitud M 6,19 y en su dirección Y
dirección X. Utilizando los métodos convencionales y el energético
en su dirección X. Utilizando los métodos convencionales y el energético
para el sismo de Nueva Zelanda, de magnitud M 6,60 y en su dirección X
dirección X. Utilizando los metodos convencionales y el energetico
Figura D. 15. Comparación entre la pseudo función de transferencia teórica, convencional y energética para el sismo de Landers, de magnitud M 7,28 y en su dirección X

Figura D. 16. Espectro de respuesta en roca para el sismo de Duzce, de magnitud M 7,14 y en su
dirección X. Utilizando los métodos convencionales y el energético138
Figura D. 17. Espectro de respuesta en el quiebre para el sismo de Duzce, de magnitud M 7,14 y en su
dirección X. Utilizando los métodos convencionales y el energético139
Figura D. 18. Comparación entre la pseudo función de transferencia teórica, convencional y energética
para el sismo de Duzce, de magnitud M 7,14 y en su dirección X
Figura D. 19. Espectro de respuesta en roca para el sismo de Duzce, de magnitud M 7,20 y en su
dirección Y. Utilizando los métodos convencionales y el energético139
Figura D. 20. Espectro de respuesta en el quiebre para el sismo de Duzce, de magnitud M 7,20 y en su
dirección Y. Utilizando los métodos convencionales y el energético139
Figura D. 21. Comparación entre la pseudo función de transferencia teórica, convencional y energética
para el sismo de Duzce, de magnitud M 7,20 y en su dirección Y140
Figura D. 22. Espectro de respuesta en roca para el sismo de Umbría, de magnitud M 5,60 y en su
dirección Y. Utilizando los métodos convencionales y el energético140
Figura D. 23. Espectro de respuesta en el quiebre para el sismo de Umbría, de magnitud M 5,60 y en su
dirección Y. Utilizando los métodos convencionales y el energético140
Figura D. 24. Comparación entre la pseudo función de transferencia teórica, convencional y energética
para el sismo de Umbría, de magnitud M 5,60 y en su dirección Y
Figura D. 25. Espectro de respuesta en roca para el sismo de BigBear, de magnitud M 6,46 y en su
dirección X. Utilizando los métodos convencionales y el energético141
Figura D. 26. Espectro de respuesta en el quiebre para el sismo de BigBear, de magnitud M 6,46 y en su
dirección X. Utilizando los métodos convencionales y el energético141
Figura D. 27. Comparación entre la pseudo función de transferencia teórica, convencional y energética
para el sismo de BigBear, de magnitud M 6,46 y en su dirección X141
Figura D. 28. Espectro de respuesta en roca para el sismo de Emilia, de magnitud M 6,00 y en su
dirección Y. Utilizando los métodos convencionales y el energético141
Figura D. 29. Espectro de respuesta en el quiebre para el sismo de Emilia, de magnitud M 6,00 y en su
dirección Y. Utilizando los métodos convencionales y el energético142
Figura D. 30. Comparación entre la pseudo función de transferencia teórica, convencional y energética
para el sismo de Emilia, de magnitud M 6,00 y en su dirección Y142
Figura D. 31. Espectro de respuesta en roca para el sismo del Centro de Italia, de magnitud M 5,00 y en
su dirección Y. Utilizando los métodos convencionales y el energético
Figura D. 32. Espectro de respuesta en el quiebre para el sismo del Centro de Italia, de magnitud M 5,00 y
en su dirección Y. Utilizando los métodos convencionales y el energético
Figura D. 33. Comparación entre la pseudo función de transferencia teórica, convencional y energética
para el sismo de Emilia, de magnitud M 5,00 y en su dirección Y
Apéndice E 145
Figura E. 1. Formato para insertar el acelerograma en roca en el programa Cyclic 1D

CAPÍTULO I

Planteamiento del problema

A la hora de hacer la elaboración de una obra civil es necesario garantizar la seguridad a las personas que van a habitar o pasar sobre el terreno y así protegerlos, particularmente de las acciones sísmicas y sus consecuencias. Uno de los fenómenos causados por los sismos es la licuación, la cual ha sido tradicionalmente evaluada como un proceso de Bernoulli, el cual ocurre o no ocurre. Adicionalmente, esta evaluación se hace con la aceleración máxima o pico del terreno, PGA, sin considerar adecuadamente la energía del sismo y las modificaciones que le puede inferir las condiciones del sitio (Echezuria, 2018)

En este TG se hace la consideración de utilizar la energía como método para generar espectros de respuesta y con estos evaluar el potencial de licuación del terreno. De la misma manera, en este TG se explorará la existencia de una correlación entre la energía del sismo con el espectro de respuesta elástica cambiando las ordenadas del mismo por la potencia del acelerograma en lugar de la máxima amplitud de la respuesta del sistema de un grado de libertad. Sobre este aspecto, Verdugo, (2018) ha encontrado que los potenciales daños a estructuras pueden correlacionarse de forma eficiente con la intensidad de Arias cuando se utiliza esa variable como las ordenadas del espectro de respuesta elástica.

Por otra parte, considerando que se ha encontrado que el proceso de incremento de la presión de poros ocurre solamente durante la acción del sector fuerte del acelerograma, es decir, asociado con la potencia del mismo, es necesario explorar si el cambio de la definición del espectro de respuesta utilizando la potencia del sismo permite de una manera más eficiente, evaluar el potencial de ocurrencia de licuación (Echezuria, 2022; Bueno y Contreras, 2021)

Objetivos

Objetivo General.

Evaluar la aplicabilidad en el análisis de licuación de los métodos propuestos por Echezuria (2022) y Verdugo (2018)

Objetivos Secundarios.

Establecer una correlación entre la potencia promedio del sismo obtenida del sector fuerte del acelerograma y la generación de presión de poros.

Comparar las respuestas de presión de poros obtenidas de los programas DEEPSOIL y Cyclic 1D y sus potenciales correlaciones con los espectros de respuesta en potencia indicados en el objetivo anterior.

Explorar si el seudo factor de amplificación local [F₂] de Echezuria permite anticipar adecuadamente el cambio de la energía de los distintos periodos del nuevo espectro de respuesta en potencia antes mencionado.

Alcances y limitaciones

Este trabajo será del tipo teórico experimental

Se utilizan los programas DEEPSOIL y Cyclic 1D para estimar el desarrollo de presiones de poros en las arenas.

Se utilizó el programa MATLAB para la obtención de los espectros de respuesta de los acelerogramas de los sismos obtenidos de los análisis dinámicos de los perfiles utilizados para el estudio.

Se utilizó la base de datos de H. Echezuria, la cual incluye sismos con magnitudes de momento entre 5 y 7,99.

Antecedentes

Verdugo, R. (2018). "Clasificación y efecto de sitios en áreas de terremotos grandes" Se determinaron los espectros de Intensidad de Arias, los cuales se compararon con las normas de diferentes países como Chile, Japón, Europa y los Estados Unidos, demostrando que los daños de las edificaciones son causados por las propiedades y condiciones locales de los depósitos.

Echezuria, H. (2018). "Duración del sector fuerte del terremoto: Unificación de criterios para definirla y nuevo método para calcular la" Universidad Católica Andrés Bello. Caracas, Venezuela. Se estudiaron y compararon diferentes métodos para estimar los valore de la duración (T_{sm}) y la Intensidad (I_{sm}) fuerte del sismo utilizando lo definido por Bolt, Trifuac-Brady, Vanmarcke-Lai y Mccann-Shah y comprobando que, aunque al usarse cada definición se obtuvieron valores distintos de duración y error medio cuadrático resultan distintos se obtuvieron intensidades del sector muy cercanas

Echezuria, H. (2022). "Influencia de las características dinámicas de perfiles geotécnicos en los espectros de respuesta" Universidad Católica Andrés Bello, Caracas, Venezuela. Se demuestra que el uso del promedio de las ondas de corte a 30 m de profundidad no es recomendable para el estudio

de los sismos y se propone que se usen los primeros 100 metros, debido a que las capas de los perfiles geotécnicos por debajo de los 30 metros pueden tener un impacto significativo en la respuesta de las edificaciones ante un sismo.

Echezuria, H. (2022). "Correlaciones de la presión de poros con potencia e intensidades del sismo" Universidad Católica Andrés Bello. Se determina la duración del sector fuerte con el método de Echezuria H. (2022), para determinar la intensidad del sector fuerte del acelerograma y la intensidad de Arias, sabiendo que una es múltiplo de la otra y observar cual es el causante del desarrollo de presión de poros y licuación. Se concluye en que el sector fuerte es el causante de que se desarrolle la presión de poros y por ende la potencia es la causante y no la intensidad.

Bueno, Y. y Contreras, M. (2021). "Trabajo de grado para Ingeniería Civil. "Cambios en la respuesta dinámica de un perfil geotécnico con estrato débil" Universidad Católica Andrés Bello, Caracas, Venezuela. Se evaluaron varias condiciones de un perfil geotécnico, variando el espesor o ubicación de una capa débil, ante la respuesta de un sismo, demostrando que estas hacen que la respuesta varíe de forma significativa dependiendo de donde esté ubicado el estrato débil por debajo de los 30 metros, también verificando que no es necesario el uso de la velocidad de onda promedio a los 30 metros de profundidad (Vs₃₀) controla la respuesta de la superficie del terreno.

Kramer (1996). "Geotechnical Earthquake Engineering" Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, USA. Se establece la base teórica sobre las mediciones sísmicas, el espectro de Fourier, las diferentes escalas de medición de los sismos, como se miden, los efectos que tiene el suelo sobre un depósito y como se muestran los acelerogramas.



Hashash, Y. M. y otros (2020). DEEPSOIL Manual V7 Nonlinear and Equivalent Linear Seismic Site Response of One-Dimensional Soil Columns (7). DEEPSOIL, Universidad de Illinois, Illinois, EE.UU. Se utilizará este manual para el uso del programa DEEPSOIL desarrollado por el mismo autor para determinar el estrato donde se desarrolla la presión de poros, seguido de una simulación de licuación.

Yang, Z. (2013) Cyclic 1D. Universidad de California, California, EE.UU. Este es otro programa con el cual se evaluará, con acelerogramas, la respuesta dinámica del depósito ante un sismo y se determinará el estrato licuable, donde se desarrolla la presión de poros.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Mediciones Sísmicas

2.1.1. Espectro de Respuesta

El espectro de respuesta utiliza las máximas ordenadas de las respuestas de osciladores de un (1) grado de libertad, con una rigidez y amortiguamiento definidos, ante la acción de un acelerograma. El mismo correlaciona dichas máximas amplitudes de respuesta con los periodos de los sistemas de un grado de libertad empleados para el análisis, tal como se muestra en la Figura 1.



Figura 1. Principios básicos del espectro de respuesta.

2.1.1.1. Clasificación de los Espectros de Respuestas Elásticos

Echezuria (2018) preseleccionó cinco formas espectrales para categorizar los sismos de acuerdo con la energía atendiendo a los mecanismos en la fuente y las leyes de atenuación, las cuales fueron utilizadas en trabajos anteriores por Anato (2020) y Bueno y Contreras, (2021) para realizar estudios de respuesta dinámica de perfiles geotécnicos. Más recientemente, Echezuría (2023) añadió una forma espectral adicional a las anteriores las siguientes las cuales se describen a continuación:

Espectros Tipo 1: Tienen magnitud de momento (Mw) entre 5,00 y 6,50, con desplazamientos entre 0,04 m a 0,69 m. También las aceleraciones espectrales máximas están entre 1,17 g a 2,30 g, comprendidas entre 0,08 s a 0,33 s, luego estas van disminuyendo hasta los 0,7 s donde tiene reducciones pequeñas.

Espectros Tipo 2:Tienen magnitud de momento (Mw) entre 5,70 y 7,60, con desplazamientos entre 0,08 m a 3.83 m. También las aceleraciones espectrales máximas están entre 1,078 g a 2.842 g comprendidas entre 0,08 s a 0,34 s, luego estas van disminuyendo hasta los 1,7 s donde tiene reducciones pequeñas.

Espectros Tipo 3: Tienen magnitud de momento (Mw) entre 5,20 y 7,00, con desplazamientos entre 0,04 m a 1,36 m. También las aceleraciones espectrales máximas están entre 0,66 g a 0,94 g comprendidas entre 0,05 s a 0,55 s, luego estas van disminuyendo hasta los 1.25 s donde tiene reducciones pequeñas.

Espectros Tipo 4: Tienen magnitud de momento (Mw) entre 5,00 y 7,50, con desplazamientos entre 0,03 m a 3,00 m. También las aceleraciones espectrales máximas están entre 0,14 g a 0,63 g comprendidas entre 0,05 s a 0,56 s, luego estas van disminuyendo hasta los 0,75 s donde tiene reducciones pequeñas.

Espectros Tipo 5: Tienen magnitud de momento (Mw) entre 6,00 y 7,90, con desplazamientos entre 0,133 m a 5,07 m. También las aceleraciones espectrales máximas están entre 0,96 g a 1,60 g comprendidas entre 0,21 s a 0,93 s, luego estas van disminuyendo hasta los 3.25 s donde tiene reducciones pequeñas.

Espectros Tipo 6: Tienen magnitud de momento (Mw) entre 6,00 y 7,90, con desplazamientos entre 0,08 m a 4,40 m. También las aceleraciones espectrales máximas están entre 1,97 g a 3,20 g comprendidas entre 0,07 s a 0,41 s, luego estas van disminuyendo hasta los 3.25 s donde tiene reducciones pequeñas.

2.1.2. Intensidad de Arias

Según Cesped, Boroschek y Ruiz, 2019 se define la intensidad de Arias como la energía total liberada por un oscilador de un (1) grado de libertad durante el sismo. Dicha intensidad se puede expresar utilizando el Teorema de Parsival, en función del promedio de las aceleraciones del sismo en toda su duración, definida por el término Ad2 y la duración total del movimiento sísmico Td, de acuerdo con la siguiente ecuación.

$$Ia = C * Ad^2 * Td \tag{2.1.2.1}$$

Esta intensidad se puede expresar ya sea en las unidades m/s o m²/s³, esto se debe a que la Constante C viene dada por $\pi/2g$ (s²/m)

En el trabajo llamado "Site effect and site classification in areas with large earthquakes" elaborado por Verdugo, R. y otros, se propone utilizar la intensidad de Arias en el espectro de respuesta en lugar de usar la aceleración máxima de la respuesta de un oscilador de un grado de libertad, como se usa normalmente, en la práctica para diseño. De esa manera se cuenta con toda la energía



disipada por dicho oscilador, por lo cual, de acuerdo con ese autor, resulta más representativo de la capacidad del sismo para generar daños en las edificaciones. Como se puede observar en la Figura 2, de los acelerogramas se determinan las intensidades de Arias y con estas intensidades se elaborarán, utilizando osciladores de un grado de libertad, los espectros de respuesta.



Figura 2. Espectro de intensidad de Arias. (Ramírez et al., 2018)

2.1.3. Medición de Sismos

Existen diferentes métodos para medir tanto la intensidad como la magnitud de los sismos. Algunas escalas de las escalas de intensidades dependen de los efectos, es decir, el daño causado a las estructuras o como se sintió, lo que genera incertidumbre en dicha medición por lo cualitativo de las mismas. Una mejor manera de medir la intensidad es con parámetros propios del sismo como la aceleración máxima del terreno, la intensidad de potencia, la intensidad de Arias, entre otras.

Otra medida importante relacionada con los sismos es la magnitud, la cual mide la energía del sismo en la fuente. Entre esas están la Magnitud de Momento, que es la más ampliamente utilizada en estudios recientes, además de la de Richter, que fue la primera medida empleada y las magnitudes de ondas de cuerpo. La Magnitud de Momento, es proporcional a la energía total que



se liberó en la fuente ya que la determina como el trabajo de una pareja de fuerzas que causan el movimiento de los lados de la falla. (Kramer, 1996) Cabe destacar que al comparar la Magnitud de Momento con las otras escalas en un gráfico de magnitudes, se demuestra que para escalas con mayores magnitudes de momento, las otras magnitudes llegan a sus límites, esto puede causar una saturación como se muestra en la Figura 3.



Figura 3. Correlación de las distintas magnitudes con la magnitud de momento. (Kramer, 1996)

2.2. Acelerogramas

Los acelerogramas son registros de las aceleraciones experimentadas por el terreno durante la acción del sismo. El aparato que registra estos movimientos se llama acelerómetro el cual puede ser digital y graba la aceleración a cada 0,1 segundos, o menos. Esto es importante ya que con estos obtenemos la intensidad de los sismos. Se ve en la Figura 4 un registro de aceleraciones típico.



2.2.1. Sector Fuerte del Acelerograma

Se considera el Sector Fuerte como la porción de un acelerograma donde se obtuvieron las mayores amplitudes de las aceleraciones o las velocidades de un sismo. Este sector es muy importante debido a que esta es la parte del sismo que ocasiona mayores daños. En la Figura 5. Se muestra un registro de un acelerograma, donde se indica la duración del sector fuerte (Tsm) como se describió anteriormente.



Figura 5. Duración del sector fuerte. (Echezuria, 2018)



2.3. Amortiguamiento del Material

Debido a que la onda sísmica se transmite por las rocas o los suelos, los cuales son unos medios viscosos, la misma sufre una reducción de amplitud debido a que parte de la energía que genera el sismo se transforma en energía calórica. Para la propagación de ondas visco-elásticas estas se representan como la disipación de energía elástica y es modelado como un sólido Kelvin-Voigt, como se muestra en la Figura 6, en lo cual forman parte la viscosidad y elasticidad del material. (Kramer, 1996)

Dependiendo del nivel de deformación cortante inducida por el sismo, el amortiguamiento aumenta tal como se ilustra en la Figura 7 que incluye la plasticidad del suelo afectado por las ondas sísmicas.



Figura 6. Representación de un sólido Kelvin-Voigt sometido a corte (Kramer, 1996)



Figura 7. Variación de la relación de amortiguación de suelos finos en función del corte y el índice de plasticidad indicando el umbral de generación de presión de poros igual a 3 x 10^{-4} %. (Kramer, 1996).

2.4. Factor de Amplificación o Función de Transferencia

El factor de amplificación o función de frecuencia se puede definir como la relación entre la amplitud de una onda en la superficie del terreno y la misma en la roca. Hay distintas fórmulas las cuales dependen del tipo de suelo, si es amortiguado o no, y de roca, si es rígida o no. (Kramer, 1996)

En este trabajo se utilizará la expresión tomando en cuenta que la roca es rígida y está sobre un suelo amortiguado resultando.

$$F_2(\omega) \approx \frac{1}{\sqrt{\cos^2 kH + (\xi kH)^2}} = \frac{1}{\sqrt{\cos^2(\omega H/V_s) + [\xi(\omega H/V_s)]^2}}$$
 (2.4.1)

En la cual H es la profundidad del depósito, ξ es el amortiguamiento, ω es la frecuencia circular de la onda y V_s.es la velocidad de la onda de corte.

Como se observa la fórmula está en función de la frecuencia, pero también se pueden hacer estimados utilizando los periodos, definida por Echezuria (2022) como pseudo función de transferencia la cual resulta útil para determinar cuáles periodos del espectro de respuesta del sismo tendrán las mayores amplificaciones.

2.5. Intensidad de potencia de aceleración

La intensidad de potencia también puede ser asociada con la energía del sismo y tiene la siguiente expresión (Kramer 1996, Echezuria, 2015, Echezuria, 2017):

$$I_0 = \int_0^{Td} a_t^2 dt \qquad (2.5.1)$$

Donde: Io, es la intensidad de la potencia de las aceleraciones, a_t es la aceleración y T_d es el tiempo total del acelerograma.

La expresión de la intensidad de Potencia puede modificarse (Echezuría, 1983) para expresarla en función de la potencia promedio de las aceleraciones, tal como se indica a continuación.

$$Io = RMSGA^2 * Td \quad (2.5.2)$$

Donde: RMSGA: Error medio cuadrático de las aceleraciones, cuyo cuadrado es la potencia promedio de todas las aceleraciones del movimiento y Td: Duración total del acelerograma.

2.6. Intensidad y potencia del sector fuerte del acelerograma

Echezuria (2015) utiliza el teorema de Parsival con la intensidad de potencia para definir la intensidad del sector fuerte del acelerograma tal como se indica a continuación.

$$Ism = arms^2 * Tsm(2.6.1)$$

Donde Ism es la intensidad del sector fuerte, a_{rms} es el error medio cuadrático de la aceleración, el cual es igual a la raíz cuadrada de la potencia del sector fuerte del acelerograma, y Tsm es la duración del sector fuerte del acelerograma. Nótese que esta expresión es similar a la obtenida para la Intensidad de Arias (2.5.1) excluyendo la constante $C = \pi/2g$, de esta manera que las unidades de la *Ism* están en cm^2/s^3 y al ser multiplicados por la constante se transforma en cm/s que coinciden con las unidades de Intensidad de Arias. Eso quiere decir que la intensidad de Arias es múltiplo de la intensidad del sector fuerte del acelerograma.
2.7. Potencia de velocidad del terreno y la Energía

Tomando en cuenta que diversos autores (Cabañas y otros 1997; Vargas y otros,2022, Echezuria 2023) relacionan los daños generales en edificaciones con la velocidad del terreno, debido a esto debemos establecer si los registros de las velocidades se comportan similares a las aceleraciones; definiendo la potencia de velocidades como la media del cuadrado de las velocidades para una duración específica, siendo similar a la potencia de aceleración:

$$V_{pot} = \Sigma(\frac{v_t^2}{n}) \quad (2.7.1)$$

Al comparar ambas funciones de potencia de aceleraciones y velocidades como se puede observar en la Figura 8, se observa que se desarrolla el mismo patrón de desarrollo en el tiempo, encontrando los mayores valores de potencia dentro del sector fuerte como era de esperarse.



Figura 8. Curvas de Potencia de Velocidad y Potencia de Aceleración.

2.8. Determinación del sector fuerte

Echezuría (2017) desarrollo una metodología para definir la duración del sector fuerte del acelerograma considerando las amplitudes de las aceleraciones del sismo. La metodología se basa

en la forma que el error medio cuadrático (potencia) varia a medida que trascurre el acelerograma. La potencia se determina con el error medio cuadrático (a_{srm}^2) del acelerograma como se indica en la siguiente formula.

$$a_{srm}^2 = \sum \frac{a_j^2}{j} para j = 1 a n (2.8.1)$$

2.9. Licuación

Al ocurrir un sismo se generan cambios en la resistencia del suelo debido a la acumulación de la presión de poros, acto seguido al comenzar a ocurrir la disipación de estas presiones el suelo arrastra partes de si con ella hacia la superficie y se generan efectos en los que el suelo tiende a ocupar espacios en los que había agua o aire, haciendo que se genere asentamiento o un colapso por cambios de volumen (Pereira et al., 2017)

Como se obtuvo en el trabajo de Bueno y Contreras, 2022. Se sabe que el sector fuerte del acelerograma es el responsable de la generación de la presión de poros y ocurre la licuación. También se concluye en ese trabajo que, es importante cómo están colocadas en el perfil las capas y el valor de su espesor ya que esto puede causar un aumento o reducción de la potencia y que se puede utilizar la Intensidad de Arias como una variable para determinar la presión de poros desarrollada en el sector fuerte, pero destacando que es realmente el sector fuerte el causante de dicho proceso (Bueno et al., 2021).

2.10. Programa Deepsoil para la respuesta dinámica de perfiles y modelos que emplea para el desarrollo de presión de poros

El programa Deepsoil se utiliza para calcular la propagación vertical de un tren de ondas de corte en un perfil geotécnico para determinar los aceleradores en cualquier parte de dicho perfil. El mismo incluye varios modelos para generación la presión de poros, tanto para arenas como para arcillas. Entre esos están el de Dobry y Matasovic para las arenas y el de Matasovic y Vuetic para suelos arcillosos.

2.10.1. Modelo de Dobry y Matasovic para suelos arenosos

Este modelo desarrollado en 1992 se fundamenta en diversos parámetros para determinar una curva aproximada para usar el análisis. Haciendo uso de una ecuación que se desarrolló utilizando un modelo de presión de poros basado en ensayos de corte cíclicos controlados sin drenar, ensayos cíclicos triaxiales y ensayos de corte simples cíclicos. De eso derivó la siguiente expresión:

$$\int_{0}^{u} \frac{du}{\overline{E}_{r}(u)} = n_{c} g(\tau_{cy})$$
(2.10.1.1)

Donde la ecuación $Nc \times g(\gamma_{cy})$ representa una acumulación ficticia de corte volumétrico, que es acumulado cada Nc ciclos, dado que la muestra no altera su volumen durante el ciclo, lo cual sería el caso de una condición sin drenar.

La expresión $\int_0^u \frac{du}{E_r(u)}$ es tambien representada como una acumulación ficticia de corte volumétrico, en donde la acumulación ocurre durante descargas estáticas de volúmenes constantes, generando esto una disminución del esfuerzo efectivo normal en porciones u (presión de poros residual acumulada); Ya que esta parte de la expresión está en función de u, esta se puede desarrollar de la siguiente manera:

$$f(u^*) = n_c g({}^{x}_{cy}),$$
(2.10.1.2)

Siendo u* el exceso residual de presión de poros normalizado por el esfuerzo vertical inicial de consolidación.

Los modelos en la actualidad generalmente utilizan la siguiente función que viene siendo la inversa de la ecuación 2.10.1.2 con unos parámetros de ajuste que le son agregados.

$$u^{*} = \frac{p n_{c} g(x_{cy})}{1 + n_{c} g(x_{cy})}.$$
(2.10.1.3)

La constante p y la función $g(\gamma_{cy})$ pueden ser determinadas mediante el ensayo cíclico no drenado, donde a su vez la función $g(\gamma_{cy})$ se puede desglosar como:

$$g(\gamma_{cy}) = F * (\gamma_{cy} - \gamma_{tp})^s$$
 (2.10.1.4)

Dando como resultado al sustituir la ecuación 2.10.1.4 en la 2.10.1.3, la siguiente expresión:

$$u_{N} = \frac{p * f * N_{c} * F * (\gamma_{c} - \gamma_{tvp})^{s}}{1 + f * N_{c} * F * (\gamma_{c} - \gamma_{tvp})^{s}}$$
(2.10.1.5)

El término γ_{tvp} es el esfuerzo cortante por debajo del cual la inversión de esfuerzos no genera exceso de presión de poros, o el umbral de esfuerzos.

La **f** de la ecuación 2.10.1.5, se determina la dimensión en la cual se aplican las fuerzas, para un valor de f = 1 se decir que la fuerza se aplica en una (1) dimensión, para un valor de f = 2 para dos (2) dimensiones.

Los términos **s** y **p** son parámetros que ajustan la curva y se pueden obtener con los ensayos de laboratorio nombrados anteriormente. Por ensayos de Dobry (1986) y Matasovic (1993), se pueden considerar los parámetros **s** y **p** como valores iguales a **1** demostrados mediante ensayos de corte cíclico.

El término \mathbf{F} es otro parámetro de ajuste de la curva el cual, depende del coeficiente de uniformidad del suelo y a su vez depende de la densidad relativa del mismo. Esta relación se determinó mediante calibraciones con bases de datos de ensayos de corte cíclico resultando en la Figura 9. (Mei et al., 2015)



Figura 9. Determinación del parámetro F según Dr y Cu.

Cabe destacar que el parámetro u_N es definido como la relación del exceso de presión de poros normalizado dada por la ecuación 2.10.1.6 y que N_c es el número equivalente de ciclos calculado para la tensión reversada más reciente. Para tensiones cíclicas no uniformes este término es calculado utilizando la u_N del paso anterior y se incrementa un cincuenta por ciento (50%) en el paso que se esté calculando y para tensiones cíclicas uniformes el número de ciclos equivalentes es el mismo de ciclos de carga.

$$ru = u' / \sigma v' \tag{2.10.1.6}$$

2.10.2 Modelos de Matasovic y Vuetic para Suelos Arcillosos

Matasovic y Vuetic (1995) determinaron el desarrollo de presión de poros en suelos arcillosos. A diferencia del método de presión de poros para arenas, este es más complejo debido a que se puede obtener resultados de presiones de poros positivas como negativas dependiendo de la consolidación.

Debido a estas presiones negativas se pueden obtener efectos en las capas de arena adyacentes generando un aumento de su presión de poros. Caso contrario cuando se tienen presiones de poros positivas en arenas este genera un efecto de aumento de la presión de poros en las capas de arenas adyacentes.

Ambos confirmaron que el valor y_{tv} es mayor en suelos cohesivos que en suelos no cohesivos. También demostraron que este valor tiende a aumentar a medida que el Índice de Plasticidad aumenta. Toman como valor 1 las constantes p,v y f, para todos los suelos cohesivos y limos de baja plasticidad.

Utilizando la siguiente ecuación estos autores describen el desarrollo de la presión de poros en arcillas:

$$u_N = AN_c^{-3s(\gamma_c - \gamma_{tvp})^r} + BN_c^{-2s(\gamma_c - \gamma_{tvp})^r} + CN_c^{-s(\gamma_c - \gamma_{tvp})^r} + D$$
(2.10.2.1)

Donde los parámetros **A**, **B**, **C**, **D s** y **r** se pueden obtener de forma empírica de acuerdo a los estudios de Carlton (2014) donde se necesita la relación de sobre consolidación (O.C.R) y el índice de plasticidad (P.I). En las expresiones 2.10.2.2 a 2.10.2.7 se muestran como calcular los parámetros antes descritos. De la Figura 10 se puede determinar el parámetro **t** dado el esfuerzo cortante cíclico, el índice de plasticidad del suelo en estudio y la relación de sobre consolidación.

$$s = 1.6374 \ x \ PI^{-0.802} \ x \ OCR^{-0.417}$$
(2.10.2.2)

$$r = 0.7911 x PI^{-0.113} x OCR^{-0.147}$$
(2.10.2.3)

$$A = \begin{cases} 7.6451 \text{ for } OCR < 1.1\\ 15.641 \text{ x } OCR^{-0.242} \text{ for } OCR \ge 1.1 \end{cases}$$
(2.10.2.4)

$$B = \begin{cases} -14.714 \text{ for } OCR < 1.1\\ -33.691 \text{ x } OCR^{-0.33} \text{ for } OCR \ge 1.1 \end{cases}$$
(2.10.2.5)

$$C = \begin{cases} 6.38 \text{ for } OCR < 1.1\\ 21.45 \text{ x } OCR^{-0.468} \text{ for } OCR \ge 1.1 \end{cases}$$
(2.10.2.6)

$$D = \begin{cases} 0.6922 \text{ for } OCR < 1.1\\ -3.4708 \text{ x } OCR^{-0.857} \text{ for } OCR \ge 1.1 \end{cases}$$
(2.10.2.7)





Figura 10. Comparación de las curvas determinadas por Matasovic y Vuetic (1993, 1992) (Línea negra sólida) para t, según diferentes valores de P.I y O.C.R y según las correlaciones presentadas (Líneas rojas punteada) (Carlton, 2014).

2.10.3. Parámetros de Degradación de Presión de Poros

El parámetro de degradación **v**, fue determinado por Matasovic (1993) en el cual se representa la degradación del esfuerzo cortante y rigidez cortante para el modelo MKZ determinados por la siguiente fórmula.

$$\delta_G = \sqrt{1 - u^*}$$

 $\delta_\tau = 1 - (u^*)^v$ (2.10.3.1)

Donde δG es la degradación del módulo cortante y δt es la degradación del esfuerzo cortante, **u*** es el exceso de presión de poros normalizado por el esfuerzo de sobrecarga.

Estas fórmulas, son aplicadas en todos los modelos de presión de poros exceptuando el modelo de Matasovic y Vuetic para arcillas (1995) el cual es definido por la siguiente ecuación, donde **N** es el número de ciclos equivalentes:



$$\delta_G = \delta_\tau = N^{-1} \tag{2.10.3.2}$$

2.11. Programa Cyclic 1D para la respuesta dinámica de perfiles y modelo para la generación de presión de poros

El programa Cyclic 1D también permite estimar la respuesta de un perfil geotécnico por el cual se propagan ondas de corte. Para ello, se basa en el análisis de elementos finitos para una respuesta de un modelo de un grado de libertad, operando en función del tiempo, lo que permite análisis lineales equivalentes (elástico) y no lineal (plástico) (Elgamal et al., 2015)

2.11.1. Modelo de Generación de Presión de Poros de Cyclic 1D

Este modelo de presión de poros está fundamentado en un concepto de movilidad cíclica, basado en concepto de licuación inicial, el cual nos permite aplicar esto solo en terrenos nivelados o de pendientes reducidas. Este concepto es definido como el momento en el que el esfuerzo confinante vertical es igual a la presión de poros. A su vez este considera los modelos de dilatación (contracción y expansión) durante la carga cortante cíclica.

El modelo está desarrollado bajo una base de múltiples superficies plásticas y hace énfasis en controlar la magnitud de cada ciclo permanente de desplazamiento cortante acumulado en arenas medias a densas. (Yang, Z., Elgamal, A., & Lu, J. 2015)

Este modelo, al igual que otros, permite simular condiciones normales de diferentes estratos con materiales licuables. Cabe destacar que el modelo está basado en el concepto de plasticidad con múltiples superficies de cedencia. Dicho modelo asume que los materiales son lineales e isótropos y que la no linealidad se debe a la plasticidad.

Los parámetros más importantes de este modelo son los de cambio de volumen y de resistencia. Los de cambio de volumen incluyen lo que viene siendo la contracción y expansión del volumen, los cuales vienen dados por los valores C1 y C2 en el caso de la contracción, que indican la velocidad con la que el suelo genera presión de poros, y en el caso de la dilatación Ψ_d el cual controla el comportamiento de los granos en cuanto a la expansión del material y este a su vez depende de d1 y d2 que ajustan la trayectoria de los esfuerzos durante la expansión.

Referente a los parámetros de resistencia influyen en distintos valores como el ángulo de fricción, el ángulo de cambio o transformación de fase, el módulo de corte y la relación de Poisson. Todos estos parámetros son obtenidos mediante ensayos triaxiales monotónicos TxT.

Existen también otros parámetros de control para representar el comportamiento cíclico del cual dependen las siguientes funciones que son incluidos en el modelo, como son la regla del flujo plástico, la función de endurecimiento y la función de cedencia.

El modelo incluye en su base de datos 15 elementos predeterminados de suelos cohesivos y no cohesivos, con diferentes parámetros, que son descritos a cabalidad en su respectivo manual. Además, este posee materiales que pueden ser definidos por el usuario para así poder determinar la respuesta dinámica en distintos tipos de suelos.

El programa también contiene una cantidad de ajustes en segmentos de las curvas que da como respuesta las cuales se elabora mediante la "backbone curve". Cuyo método define la frecuencia natural como una función de la amplitud del sistema de respuesta cuando no tienen presentes fuerzas ni amortiguamiento alguno. Este también nos brinda una descripción del sistema dinámico el cual nos permite la caracterización y cuantificación de las no linealidades, marcando las interacciones que puedan ocurrir dentro del sistema. Lo cual permite el intercambio de energía

modal dada la no linealidad la cual no se puede analizar mediante métodos lineales convencionales. (Londoño et al., 2015)

A diferencia del modelo DEEPSOIL el Cyclic 1-D posee un proceso de calibración en el cual utiliza los parámetros C1 y C2 (para arenas) y A y B (para arcillas) que indican cuán rápido el suelo genera presión de poros. Los mismos parámetros pueden ser calibrados mediante ensayos monotónicos y cíclicos donde se tenga la trayectoria de esfuerzos partiendo desde el confinamiento inicial hasta alcanzar el ángulo de transformación o línea de transformación de fase como se puede apreciar en la Figura 11.



Figura 11. Diagrama esquemático de la respuesta con el modelo constitutivo mostrando esfuerzos cortantes, confinamiento efectivo y la relación esfuerzo-deformación. Modificada de Parra (1996).



CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

El objetivo de este trabajo fue evaluar las respuestas dinámicas de perfiles geotécnicos, incluyendo el desarrollo de las presiones de poros utilizando los programas DEEPSOIL (Hashash, 2017) y Cyclic 1D (Yang, 2013) para evaluar sus diferencias. Adicionalmente, se probó lo sugerido por Verdugo (2017) para lo cual se modificarán los espectros de respuesta elástica utilizando las potencias del sector fuerte del acelerograma de respuestas de los sistemas de un grado de libertad, como una medida de su energía, en lugar de la máxima aceleración de dichas respuestas como es costumbre.

Para cumplir con lo antes citado se utilizaron las respuestas del perfil de sitio Treasure Island, con una variedad de sismos seleccionados, considerando la presión de poros con ambos programas. El tipo de análisis será no lineal acoplado con la generación de presión de poros.

Se seleccionaron sismos a partir de la base de datos del profesor H. Echezuria la cual cuenta con 206 registros de sismos, con magnitudes de momento entre 5,00 y 7,99 Mw con diferentes distancias epicentrales. Dicha base de datos ha sido preparada a partir de los sismos contenidos en bases de datos internacionales como puede ser la "Pacific Earthquake Engineering Research Center" y la "Engineering Strong Motion Database". Adicionalmente, se amplió dicha base de datos seleccionando otros sismos más recientes que se adapten a los requerimientos de este TG. Las respuestas dinámicas de los sistemas de un grado de libertad (SDFS) necesarios para generar el espectro de respuesta elástico de cada sismo se obtuvieron con el programa "Elastic and Inelastic Seismic Response Spectra" de MatLab (Marín, 2022) en el cual se ingresan los datos de los acelerogramas y se obtienen las respuestas dinámicas de los sistemas de un grado de los sistemas de un grado de libertad con distintos períodos fundamentales. Con esta respuesta se procedió a calcular las intensidades

de Arias y de la potencia del sector fuerte de las respuestas de cada SDFS correspondiente a cada período. El sector fuerte de las respuestas se calculó mediante el método de Echezuria (2020), de esta manera se podrán hacer las comparaciones entre todos los espectros.

3.1 Previo al análisis en los programas a utilizar

Los registros de acelerogramas en roca para la ampliación de la base de datos antes mencionada, se obtuvieron de dos (2) sitios distintos, una proviene de la *"Pacific Earthquake Engineering Research Center"* por sus siglas en inglés (P.E.E.R.) "Ground Motion Database", en la base de datos llamada "NGA-West2" y la *"European Strong Motion Database"* (E.S.M.), estas páginas contienen variedad de registros de escalas desde una magnitud de 5,00 hasta 7.99, con diferentes acelerogramas, intensidades, desplazamientos y velocidades las cuales se usarán en los programas Deepsoil y Cylcic1D.

Para determinar cómo afecta el desarrollo de presión de poros en el perfil geotécnico de Treasure Island en el estrato líquido y la base de este, llamado estrato de quiebre. Se analizarán los registros de la base de datos obtenida del P.E.E.R. y la E.S.M.

3.2. Procedimiento del desarrollo de presión de poros

Se determino el desarrollo de presión de poros en el perfil geotécnico de Treasure Island utilizando los programas Deepsoil y Cyclic 1D. Algo importante del programa Deepsoil, es que contiene entre ellos el perfil geotécnico de Treasure Island, ya establecido con todos sus parámetros, es decir, el espesor de cada capa, su peso específico, velocidad de onda de corte, el esfuerzo vertical efectivo, modelos de desarrollo de presión de poros, entre otros. Se analizo la respuesta dinámica del perfil en la base del estrato licuable, conocido como el quiebre. (Ruiz,2019). A continuación, se describirá el cómo.

3.2.1. Modelo de Presión de Poros

Como se indicó en la referencia se utilizará el trabajo de Ruiz, G. nombrado "Análisis de la Intensidad del Sector Fuerte del Acelerograma Considerando el Desarrollo de la Presión de Poros en un Perfil Geotécnico" donde se establecieron los modelos de presión de poros según Dobry & Matasovic (1992) y Matasovic & Vuetic (1995) y también se utilizaron estos parámetros para este trabajo de grado. Mostrados en la Figura 12.

Prof (m)	Tipo de Suelo	Descripcion	Modelo Dobry y Matasovic	Modelo Matasovic y Vuetic
0	Arena Fina	Relleno Artificial/ material profundo y de transicion	v = 1/ f = 2/ p = 0,95/ F = 2,5	
		SP-SM/ G.S.=2,74/ FC=6,1%/ PI= 0%	s = 1,6/ Yvt = 0,015%	
5		Relleno Artificial/material profundo y de transicion	v = 1/f = 2/p = 1.005/F = 3	
10	Arena Fina Gris	SM/W=19 9%/VB=0 69/G S =2 81-2 74/ EC=15%/PI= 29%	s = 1 8/ Yvt = 0.025%	
15			2,0, 0,020,0	
20		Arcilla Limosa Gris Oscura/ C/ W=48 8% - 50 2%/ VR=1 39-1 34		Ytvp = 0,1%/ s = 0,075/ r = 0,495
25	Lodo de Baia Joven	DS=97% - 100%/ GS=2 76/ EC=1 3%/ PI=27% - 10%/ II = 42%		A = 7,6451, B = 14,7174/C = 6,38/D = 0,6922
30		53-5778 10078 G3-2,707 10-1,3787 11-2778 15787 E2 4278		OCR = 1,0/ Arcilla Marina
35	Arena Fina a Media	San Antonio/ 33,5 - 39,6 / SP, CL/ W = 21,8% - 8,37%	v = 1/f = 1/p = 1/F = 0,493	
40		VR=0,76% - 1,02%/ DS= 76% - 98%/ LL=37/ PI=23%	s = 1,761/ Yvt = 0,06%	
45				
50				
55		Arcilla Vordo-Cric/CL/CL-CH/LL= 24%/ RL= 10%/W = 20.7% - 7.22%		Ytvp = 0,1%/ s = 0,075/ r = 0,495
60	Arcilla de Baia Vieja	Arcting verdersdris/ cL/ CL/CL/ LL= 34/6/ FT= 15/6/ W = 20,7/6 = 7,35/6		A = 7,6451, B = 14,7174/ C = 6,38/ D = 0,6922
65		VK = 0,55 · 0,557 05 = 5776 · 55767 FC = 22,676		OCR = 1,0/ Arcilla Marina
70				
75				
		Alexander Constituente I/ Consume	v = 1/f = 2/p = 1/F = 0,493	
80	Arena	Alameda Continental/ Gravosa	s = 1,761/ Yvr = 0,02%	
85	Arcilla	Alameda Continental		Ytvp = 0,1%/ s = 0,075/ r = 0,495
				A = 7,6451, B = 14,7174/C = 6,38/D = 0,6922
90				OCR = 1,0/ Arcilla Marina
95	Arenas de Arenisca	Franciscana		
100	y Lulita de Roca	i i diisistalla		

Figura 12. Parámetros y características del perfil geotécnico de Treasure Island para Deepsoil.

3.3.2. Extracción del Análisis del Programa Deepsoil

Para el trabajo se necesitaron unos gráficos en específico, que se indican a continuación y se muestran en la Figura 13.

Diagramas de tiempo histórico: Aceleración en función del tiempo, velocidad en función del tiempo y desplazamiento en función del tiempo.

Diagrama Tensión-Deformación: Esfuerzo cortante en función de la deformación cortante.

Diagramas espectrales: Espectro de respuesta con un amortiguamiento del cinco (5) por ciento.

Diagrama del perfil: Desarrollo de Presión de Poros (Max P.W.P.)





Figura 13. Resultados del análisis de Deepsoil.

Todos estos datos pueden ser exportados a Excel, para los análisis necesarios.

3.5. Determinación de la pseudo función de transferencia empírica

Para determinar la función de transferencia, se dividió el espectro de respuesta en el quiebre entre el espectro de respuesta en la roca. Para la función de transferencia teórica, se tomó la ecuación 2.4.1 en el dominio de los periodos.

3.6. Elaboración de los Espectros de Respuesta Energéticos

Tomando los acelerogramas en roca de los sismos de la base de datos de Echezuria, estos se introdujeron en el programa MatLab-Newmark(Isaac Marín), con este se obtuvieron los acelerogramas de respuesta para cada periodo seleccionado siendo estos períodos entre 0 y 3 segundos con intervalos de 0,25 segundos. Luego se procedió a calcular los sectores fuertes de cada acelerograma de respuesta elástica de un oscilador de un grado de libertad y sus potencias para así determinar el espectro de respuesta energético.



Tomando en cuenta los espectros de respuesta energéticos en la roca y en el quiebre se determinó la pseudo función de transferencia empírica energética y se comparó con la pseudo función de transferencia teórica.

CAPÍTULO IV

ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS

Una vez realizados los cálculos, siguiendo la metodología explicada en el capítulo anterior, se interpretó y comparo los resultados obtenidos, dentro de los alcances y limitaciones de este trabajo, determinados por los programas Deepsoil y Cyclic 1D. Es oportuno destacar que, el objetivo de este trabajo es evaluar la aplicabilidad de la potencia de la aceleración del sector fuerte del acelerograma para la evaluación de la licuación de estratos de suelos granulares, y para eso se tienen que cumplir los objetivos secundarios explicados en el primer capítulo.

4.1. Resultados obtenidos para el programa Deepsoil

4.1.1. Relación de la Potencia del Acelerograma con el Desarrollo de Presión de Poros

Como primer análisis se estudió el desarrollo de la presión de poros con el sector fuerte de los 248 sismos, de los cuales solamente 49 superaron el 80% de desarrollo de presión de poros. En este trabajo especial de grado esto se considera como licuable. Eso representa un 20% del total. Estos se subdividen de la siguiente forma por magnitud: entre 5,00 y 5,99 solo 3 causaron licuación y equivalen a un 6%, para magnitud 6,00 a 6,99 son 20 sismos que equivalen a un 41% y para la magnitud 7,00 a 7,99 se obtienen 26 que equivale a un 53% de la muestra. Como se observa en la Figura 14, correspondiente al sismo de Duzce, Turquía de magnitud M 7,20, se observa que el desarrollo de la presión de poros se inicia con el sector fuerte. Los gráficos para el resto de los sismos estudiados se incluyen en el Apéndice A. El resto de los sismos contenidos en dicho apéndice muestran el mismo patrón de comportamiento. Debido a esto se puede confirmar que la generación de presión de poros está relacionada con el sector fuerte del acelerograma lo cual concuerda con los estudios de Ruiz (2019), Anato (2020) y Bueno y Contreras (2021).





Figura 14. Correlación entre la potencia del acelerograma y el desarrollo de presión de poros para el perfil original de Treasure Island en el programa Deepsoil. Para el sismo de Duzce, Turquía magnitud 7,20 y en su dirección X. Indicando el sector fuerte del acelerograma.

4.1.2. Comparación entre la Potencia de las Aceleraciones y el Desarrollo de Presión de Poros

La Figura 15 y la Figura 16 muestra la correlación entre la potencia de las aceleraciones y el desarrollo de presión de poros para distintos sismos. Como se observa en ambas figuras el inicio de la generación de la presión de poros no corresponde a un valor único de la potencia. La potencia mínima para la cual el suelo empieza a generar presión de poros, depende del valor de las aceleraciones que causen que la deformación del suelo supere el umbral de 3,40 * 10^{-4} % lo cual es diferente para cada sismo. En consecuencia, no existe un valor único de la potencia para el inicio del desarrollo de la presión de poros.

Es de hacer notar que los sismos que tienen aceleraciones amplias durante el sector fuerte alcanzan la presión de poros rápidamente después del inicio del mismo. En contraste, los sismos que no tienen amplias aceleraciones en el sector fuerte generan presión de poros aun después de



sobrepasar el sector fuerte pero que no llegan a un porcentaje mayor al 50%, véase nuevamente la

Figura 16.



Figura 15. Correlación entre la potencia promedio de las aceleraciones del acelerograma y el desarrollo de presión de poros para el perfil original de Treasure Island en el programa Deepsoil. Para sismos que generan una presión de poros de mayor al 70%.



Figura 16. Correlación entre la potencia promedio del cuadrado de las aceleraciones del acelerograma y el desarrollo de presión de poros para el perfil original de Treasure Island en el programa Deepsoil. Para sismos que generan una presión de poros de menor a 70%.

4.1.3. Análisis de la potencia del acelerograma y la potencia de velocidad

Al realizar un análisis similar al descrito en el párrafo anterior, pero utilizando la potencia velocidad del sismo se observa en la Figura 17 que la potencia de velocidad también está relacionada con el desarrollo de presión de poros. Los gráficos para el resto de los sismos se incluyen en el Apéndice A. Se puede confirmar que para la mayoría de los sismos si se comprueba que ambas tienen un comportamiento similar con la duración en segundos del sector fuerte del acelerograma, a excepción de los sismos de Chalfant de magnitud M 6,19 y D 6,44 km y el sismo de Duzce de magnitud M 7,20 y D 5,40 km. Es de hacer notar que estos sismos presentan más de un grupo de aceleraciones altas a lo largo de su duración, lo cual distorsiona el desarrollo de la potencia de velocidad la cual necesita ser estudiado a mayor profundidad.



Figura 17. Correlación entre la potencia del acelerograma y la velocidad relativa para el perfil original de Treasure Island en el programa Deepsoil. Para el sismo de Umbría Tercer Impacto magnitud 5,60 y en su dirección X. Indicando el sector fuerte del acelerograma.

4.1.4. Gráfico Potencia vs Tiempo Normalizado

Al desarrollar un gráfico comparativo de distintos sismos con diversas magnitudes, a un tiempo normalizado por la potencia máxima, se puede observar la diferencia entre las amplitudes de sus potencias, tal como se indica en la Figura 18. Se aprecia que cada sismo tiene el inicio y el fin del



sector fuerte diferente. Se puede concluir que el desarrollo de potencia de cada sismo varía según sus acelerogramas, esto coincide con el punto 4.1.3 que trata de la comparación de la potencia del acelerograma en función del desarrollo de presión de poros.



Figura 18. Correlación entre las potencias de diversos sismos de distintas magnitudes vs tiempo normalizado.

4.2. Comparación de los resultados obtenidos en los programas Deepsoil y Cyclic 1D Como se comentó en capítulos anteriores, se utilizó el programa Cyclic 1D para así poder generar una matriz de resultados y elaborar comparación entre ambos programas de respuesta dinámica de perfiles y así tener claro qué programa se ajusta mejor dependiendo del estudio para el que se vaya a utilizar.

Primeramente, hay que destacar que el programa Cyclic 1D tiene una limitación, ya que, solamente puede leer acelerogramas de hasta 40 segundos, por lo que hay que modificar los acelerogramas largos eliminando el ruido al inicio y al final de los acelerogramas con más de 40 segundos, sin embargo, el programa Deepsoil no presenta ninguna limitación con las longitudes de los acelerogramas.

4.2.1. Comparación de los acelerogramas de Deepsoil y Cyclic 1D

Se puede hacer una primera comparación con los acelerogramas que ambos programas determinaron para la base del estrato licuable (quiebre), como se puede ver entre la Figura 19 y la Figura 20, como primera diferencia está en la que el acelerograma en la base del estrato licuable obtenido con el programa Cyclic 1D duplicó la duración de entrada en la roca, aunque se puede observar que las aceleraciones no son muy grandes a partir de los 11 segundos, al igual que la aceleración pico está invertida, es decir en el programa Deepsoil la aceleración pico está cercana a los -0,60 g, mientras que en Cyclic 1D la aceleración pico está cercana a los 0,60 g. Los gráficos para el resto de los sismos estudiados se incluyen en el Apéndice B. Para el resto de los sismos se tiene comportamientos similares.



Figura 19. Sismo de respuesta en la base del estrato licuable obtenido con el programa Deepsoil. Acelerograma Baja California, de magnitud M5,50 y en su dirección X. Indicando la aceleración máxima del acelerograma y su duración.





Figura 20. Sismo de respuesta en la base del estrato licuable obtenido con el programa Cyclic 1D. Acelerograma del sismo de Baja California, de magnitud M5,50 y en su dirección X. Indicando la aceleración máxima del acelerograma y su duración.

4.2.2. Comparación de los espectros de respuesta de Deepsoil y Cyclic 1D

Al observar los espectros de respuesta desarrollados por ambos programas en la Figura 21 y la Figura 22 se puede ver que son bastante similares. El espectro en la base del estrato licuable (quiebre) obtenido con el programa Cyclic 1D alcanza una aceleración espectral máxima de 1,60 g entre los 0,4 y 0,8 segundos mientras que para el caso del sismo obtenido con Deepsoil se alcanza una aceleración máxima de 1,20 g a un periodo de 1,20 segundos. Los gráficos para el resto de los sismos estudiados se incluyen en el Apéndice B. Para el resto de los sismos se tiene comportamientos similares.





Figura 21. Espectro de respuesta para el sismo de Baja California, de magnitud M5,50 y en su dirección Y del el programa Deepsoil. Indicando la aceleración máxima espectral y el periodo en el que alcanza dicha aceleración espectral.



Figura 22. Espectro de respuesta para el sismo de Baja California, de magnitud M5,50 y en su dirección Y del el programa Cyclic 1D. Indicando la aceleración máxima espectral y el periodo en el que alcanza dicha aceleración espectral.

4.2.3. Comparación de la potencia del acelerograma y desarrollo de presión de poros de los programas Deepsoil y Cyclic 1D

Al observar la Figura 23 y la Figura 24 se puede apreciar que tanto la potencia del acelerograma

de Cyclic 1D, como la de Deepsoil tienen una forma similar, solo que para la de Cyclic 1D se llega

a un porcentaje menor, además se puede determinar en ambos programas, lo descrito en el punto 4.1.1, donde se comprobó que la generación de presión de poros está relacionada con el sector fuerte del acelerograma, ya que se puede hacer notar que en ese rango hay un aumento considerable en la presión de poros. Los gráficos para el resto de los sismos estudiados se incluyen en el Apéndice B.



Figura 23. Potencia del acelerograma y desarrollo de presión de poros del sismo de Umbría, primer choque, de magnitud M5,70 en su dirección X, del programa Deepsoil. Indicando el sector fuerte del acelerograma.



Figura 24. Potencia del acelerograma y desarrollo de presión de poros del sismo de Umbría, primer choque, de magnitud M5,70 en su dirección X, del programa Cyclic 1D. Indicando el sector fuerte del acelerograma.

4.2.4. Comparación entre la potencia de aceleración y la potencia de velocidad

Al comparar ambas potencias tanto en Deepsoil como Cyclic 1D, mostrados en la Figura 25 y la Figura 26 se puede observar que para el Cyclic 1D, dentro del sector fuerte, hay mayor aumento de potencia. Luego se mantiene por un tiempo y luego empieza a descender de la misma forma que decrece la potencia del acelerograma, a diferencia de como se muestra en la Figura 25 que sigue una forma similar a la potencia del acelerograma. Los gráficos para el resto de los sismos estudiados se incluyen en el Apéndice B. Para el resto de los sismos se tiene comportamientos similares.



Figura 25. Potencia del acelerograma y potencia de velocidad del sismo de Umbría, primer choque, de magnitud M5,70 en su dirección X, del programa Deepsoil. Indicando la duración del sector fuerte.



Figura 26. Potencia del acelerograma y potencia de velocidad del sismo de Umbría, primer choque, de magnitud M5,70 en su dirección X, del programa Cyclic 1D. Indicando la duración del sector fuerte.

4.2.5. Tiempo durante el cual se desarrolla la presión de poros con los programas Deepsoil y Cyclic 1D

Aquí se puede comparar entre la Figura 15, la Figura 16 y la Figura 27 de los programas Deepsoil y Cyclic 1D, respectivamente, que aunque ambos determinan la presión de poros de distinta forma se puede apreciar que ambos tienen un rango en el que se empieza a generar presión de poros. También se aprecia la generación de presión de poros de los 12 sismos utilizados de este punto es totalmente distinta en ambos programas, como observa que para el programa Deepsoil se genera una presión de poros hasta el 95%, mientras que para Cyclic 1D se generó hasta el 30%.



Figura 27. Correlación entre la potencia de las aceleraciones del acelerograma y el desarrollo de presión de poros para el perfil original de Treasure Island en el programa Deepsoil.

4.2.6. Comparación de la potencia del acelerograma normalizado.

En Figura 28 se aprecia el incremento de potencia de aceleraciones obtenidas para los 12 sismos con el programa Cyclic 1D, al igual que su decrecimiento sostenido lo cual coincide con lo mostrado en la Figura 18, para Deepsoil. No obstante, se observa que la Figura 28y la Figura 18 poseen una forma similar, por ejemplo, en el caso de la potencia del acelerograma normalizada de



Baja California en su dirección Y (línea naranja) se puede ver que tiene una parte donde empieza a incrementar la potencia y luego desciende de manera sostenida.



Figura 28. Potencia del acelerograma normalizada para diferentes sismos del programa Cyclic 1D.

4.3. Análisis entre la Pseudo función de transferencia teórica y empírica

Al comparar las curvas de la función de transferencia teórica (color naranja) y la empírica (color verde), mostrada en la Figura 29 se puede apreciar que la curva teórica obtiene el máximo factor de amplificación a un periodo mayor al que se obtuvo de manera empírica. Esto se puede deber a que tiene una variación en la velocidad de onda de corte o en la altura real del depósito, lo que genera un factor de amplificación máximo a un periodo mayor o menor al obtenido con el método empírico. Los gráficos para el resto de los sismos estudiados se incluyen en el Apéndice C. Para el resto de los sismos se tiene comportamientos similares.





Figura 29. Pseudo función de transferencia teórica y empírica para el sismo de Duzce de magnitud M 7,20 en su dirección Y. Indicando el periodo en el que se obtiene la máxima amplitud para las pseudo funciones de transferencia teorica (naranja) y empírica (verde).

4.4. Determinación de los Espectros de Respuesta Energética

Al comparar los espectros de respuesta energéticos y convencionales tanto en la roca como en el quiebre, como se aprecia en la Figura 30 y la Figura 31, respectivamente, se pudo determinar que estos siguen una forma similar para ambos casos, por ejemplo, en la Figura 30, el espectro de respuesta convencional y el empírico empiezan a una magnitud similar y estos luego inician sus incrementos a medida que el periodo aumenta hasta los 0,75 s donde ambas empiezan a descender de la misma forma.



Figura 30. Espectro de respuesta en roca para el sismo de Duzce, de magnitud M 7,20 y en su dirección Y. Utilizando los métodos convencionales y el energético.





Figura 31. Espectro de respuesta en el quiebre para el sismo de Duzce, de magnitud M 7,20 y en su dirección Y. Utilizando los métodos convencionales y el energético.

Por último, al observar la Figura 32 se aprecia que se están comparando las pseudo funciones de transferencia determinadas con los espectros de respuesta convencionales y energéticos. Se puede resaltar que para el caso de la función de transferencia energética se acerca más, en cuanto a la magnitud, a la máxima amplitud de la teórica y al período del terreno. Los gráficos para el resto de los sismos estudiados se incluyen en el Apéndice D. Para el resto de los sismos se tienen que evaluar de manera individual debido a que las pseudo función de potencia depende de múltiples factores. Como lo son la profundidad del depósito, velocidad de onda de corte y el amortiguamiento, que a su vez este depende del acelerograma de entrada en la roca. Esto genera que no se puedan englobar en una sola función, sino que se evalúan de la forma explicada anteriormente.



Figura 32. Comparación entre la pseudo función de transferencia teórica, convencional y energética para el sismo de Duzce, de magnitud M 7,20 y en su dirección Y.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

La generación de presión de poros depende de que las aceleraciones excedan la deformación cortante umbral del suelo, es decir, $\gamma_s > 3,40 * 10^{-4}$ % lo cual es diferente para el sector fuerte de cada sismo. En consecuencia, no existe un valor único de la potencia para el inicio del desarrollo de la presión de poros.

En principio de los 248 sismos analizados se determinó lo siguiente: Solamente 49 superaron el 80% de desarrollo de presión de poros, lo cual denominamos como licuado en este trabajo y representa un 20% del total. Estos se subdividen de la siguiente forma por magnitud: entre 5,00 y 5,99 solo 3 causaron licuación y equivalen a un 6%, para magnitud 6,00 a 6,99 son 20 sismos que equivalen a un 41% y para la magnitud 7,00 a 7,99 se obtienen 26 que equivale a un 53% de la muestra.

Es de hacer notar que los sismos que tienen aceleraciones amplias durante el sector fuerte alcanzan la presión de poros rápidamente después del inicio del mismo. En contraste, los sismos que no tienen amplias aceleraciones en el sector fuerte generan presión de poros aun después de sobrepasar el sector fuerte pero que no llegan a un porcentaje mayor al 50%.

En general ambos programas de respuestas dinámicas funcionan de manera bastante amplia, pero cabe destacar que el programa Deepsoil además de ser más completo en su funcionamiento ya que este puede leer sismos de cualquier duración a diferencia del Cyclic 1D que solo permite leer sismos de hasta 40 segundos. Como primer punto están los acelerogramas en el quiebre del perfil geotécnico, el programa Cyclic 1D da magnitudes totalmente distintas a lo que se obtuvo en el programa Deepsoil, además de que este último extendió la duración del sismo. No obstante, con respecto a los espectros de respuesta, se pudo observar que existe similitud en cuanto a las aceleraciones, a pesar de que ocurrieron a periodos distintos.

Al evaluar la relación que hay entre el pseudofactor de amplificación Fw2 con los espectros de respuesta energéticos obtenemos que este no predice la transmisión de energía a través del perfil geotécnico debido a que este factor es afectado por las propiedades geotécnicas del terreno

Al evaluar la aplicabilidad que hay en los métodos de espectros de respuesta energéticos para los análisis de licuación, planteados en este trabajo, no pueden ser aplicables debido a que, no se puede englobar la energía de los sismos en una función única, sino que es necesario evaluar el amortiguamiento promedio inducido por el sismo en los suelos del perfil geotécnico y la secuencia de las amplitudes de las aceleraciones en el sector fuerte.



RECOMENDACIONES

Se recomienda el uso del programa Deepsoil como primera opción ante cualquier investigación , esto se debe a que su interfaz es más amigable al usuario y permite elaborar múltiples estudios de diferentes sismos a la vez, también este posee perfiles de terreno que se encuentran en línea ya listos con todas sus propiedades, siendo esto de mucha utilidad, además, el desarrollo de presión de poros es dado directamente en porcentajes y no como lo presenta el programa Cyclic 1D que lo presenta en kPa.

También se recomienda estudiar los sismos que presentan más de un grupo de aceleraciones altas a lo largo de su duración, lo cual distorsiona el desarrollo de la potencia de velocidad.



REFERENCIAS

Bueno, Y., Contreras, M., & Echezuria, H. (2021, Junio). *CAMBIOS EN LA RESPUESTA DINÁMICA DE UN PERFIL GEOTÉCNICO CON ESTRATO DÉBIL*. Saber UCAB. https://saber.ucab.edu.ve/xmlui/handle/123456789/20120

Carlton, B. D., & Bonner, J. (2014, Spring). *An Improved Description of the Seismic Response of Sites with High Plasticity Soils, Organic Clays, and Deep Soft Soil Deposits*. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/264534807_An_Improved_Description_of_the_Seismi c_Response_of_Sites_with_High_Plasticity_Soils_Organic_Clays_and_Deep_Soft_Soil_Deposit s

Echezuría, H. (2015). *Comparing Ground Motion Intensity, Root Mean Square of Acceleration and Time Duration from Four Definitions of Strong Motion*. The Open Civil Engineering Journal. https://opencivilengineeringjournal.com/VOLUME/9/PAGE/260/PDF/

Echezuria, H. (2021, Marzo). *ROBUSTEZ DE LOS MODELOS DE PRESIÓN DE POROS PARA ESTRATOS LICUABLES EN PROGRAMAS DE RESPUESTA DINÁMICA ACOPLADA DE PERFILES GEOTÉCNICOS. BOLETÍN DE LA ACADEMIA NACIONAL DE LA INGENIERÍA Y EL HÁBITAT ISSN.* (Issue 55). Academia Nacional de la Ingeniería y el Hábitat.

Echezuria, H. (2022, Marzo 25). Correlaciones de la presión de poros con potencia e intensidaddelsismo.RevistasenlíneaUCAB.https://revistasenlinea.saber.ucab.edu.ve/index.php/tekhne/article/view/5210/4791

Echezuria, H. (2022, Abril 5). *Influencia de las características dinámicas de perfiles geotécnicos en los espectros de respuesta*. Revistas en línea UCAB. https://revistasenlinea.saber.ucab.edu.ve/index.php/tekhne/article/view/5211/4869

Echezuria, H. (En espera de aprobación). La energía del Sismo y los Daños a las Obras.

Elgamal, A., Yang, Z., & Lu, J. (2015, Mayo). *Cyclic 1D User's Manual*. SoilQuake.net. http://soilquake.net/cyclic1d/Cyclic1D_UserManual.pdf

Hashash, Y. M. (2020, Noviembre 26). *DEEPSOIL Manual V7 Nonlinear and Equivalent Linear Seismic Site Response of One-Dimensional Soil Columns (7)*. DEEPSOIL. http://deepsoil.cee.illinois.edu/

Kramer, S. L. (1996). Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice Hall.

Londoño, J. M., Neild, S. A., & Cooper, J. E. (2015). *Identification of backbone curves of nonlinear systems from resonance decay responses*. El Sevier. http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2015.03.015i

Matasovic, N., & Vucetic, M. (1995, Enero). (PDF) Generalized Cyclic-Degradation-Pore-PressureGenerationModelforClays.ResearchGate.https://www.researchgate.net/publication/248878556_Generalized_Cyclic-Degradation-Pore-Pressure_Generation_Model_for_Clays

Mei, X., Olson, S. M., & Hashash, Y. M. (2015, Noviembre 1). Empirical Curve-Fitting Parameters for a Porewater Pressure Generation Model for Use in 1-D Effective Stress-Based Site Response. ISSMGE. https://www.issmge.org/uploads/publications/59/60/472.00_Mei.pdf Pereira, A. P., Villalobos, F., & Villalobos, S. (2017, Agosto 25). PREDICCIÓN DEL EXCESO DE PRESIÓN DE POROS EN EL ESTUDIO DE LA LICUACIÓN DE LA ARENA BIO BÍO CONSIDERANDO LA INFLUENCIA DE LA. Repositorio UCSC. http://repositoriodigital.ucsc.cl/bitstream/handle/25022009/1403/Pradenas%20Pereira%2C%20A lvaro.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Ramirez, J., Cheng, L., Barrero, A. R., Dashti, S., Ghofrani, A., Taiebat, M., & Arduino, P. (2018, October 26). *Site Response in a Layered Liquefiable Deposit: Evaluation of Different Numerical Tools and Methodologies with Centrifuge Experimental Results*. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/326975738_Site_Response_in_a_Layered_Liquefiable _Deposit_Evaluation_of_Different_Numerical_Tools_and_Methodologies_with_Centrifuge_Ex perimental_Results

Ruiz, G. A. (2019, Octubre 15). ANÁLISIS DE LA INTENSIDAD DEL SECTOR FUERTE DELACELEROGRAMA CONSIDERANDO EL DESARROLLO DE LA PRESIÓN DE POROS EN UNPERFILGEOTÉCNICO.SaberUCAB.https://saber.ucab.edu.ve/xmlui/handle/123456789/19682?show=full

Ruiz, G. A. (2020, Enero 20). ANÁLISIS DE LA INTENSIDAD DEL SECTOR FUERTE DEL ACELEROGRAMA PARA ESTABLECER EL POTENCIAL DE LICUACIÓN. Universidad Católica Andrés Bello Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Civil. http://biblioteca2.ucab.edu.ve/anexos/biblioteca/marc/texto/AAU1976.pdf

Sismología e Ingeniería Sísmica (Practicas). (2019, May 7). Repositorio Institucional de la Universidad de Alicante.

49



https://www.google.com/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved =0CAQQw7AJahcKEwigjbKX5o36AhUAAAAAHQAAAAAQAg&url=https%3A%2F%2Frua. ua.es%2Fdspace%2Fbitstream%2F10045%2F19945%2F5%2Fpractica5.pdf&psig=AOvVaw1A GyxLrCqn55q7Byjb3gXE&ust=1663006

Verdugo, R. J., Ochoa-Conejo, F., González, J., & Valladares, G. (2018, Febrero 2). Site effect andsiteclassificationinareaswithlargeearthquakes.Elsevier.https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.02.002

Vucetic, M. (1986, Febrero). Pore pressure buildup and liquefaction at level sand sites duringearthquakes.ResearchGate.

https://www.researchgate.net/publication/36314278_Pore_pressure_buildup_and_liquefaction_at _level_sand_sites_during_earthquakes


APÉNDICES



APÉNDICE A - Gráficos procesados de Deepsoil con su acelerograma completo.

Figura A. 1.Correlación de la Potencia del Acelerograma y el Desarrollo de Presión de Poros para el sismo de Baja California de Magnitud M 5,50 y en su dirección X. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.



Figura A. 2.Correlación de la Potencia del Acelerograma y el Desarrollo de Presión de Poros para el sismo de Baja California de Magnitud M 5,50 y en su dirección Y. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.





Figura A. 3. Correlación entre la Potencia del Acelerograma y el desarrollo de presión de poros para el sismo de Umbría de magnitud M 5,70 y en su dirección X. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.



Figura A. 4. Correlación entre la Potencia del Acelerograma y el desarrollo de presión de poros para el sismo de Umbría de magnitud M 5,70 y en su dirección Y. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.





Figura A. 5. Correlación entre la potencia del acelerograma y el desarrollo de presión de poros para el sismo de Chalfant de magnitud M 6,19 y en su dirección X. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.



Figura A. 6. Correlación entre la potencia del acelerograma y el desarrollo de presión de poros para el sismo de Chalfant de magnitud M 6,19 y en su dirección Y. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.





Figura A. 7. Correlación entre la potencia del acelerograma y el desarrollo de presión de poros para el sismo de Nueva Zelanda de magnitud M 6,60 y en su dirección X. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.



Figura A. 8. Correlación entre la potencia del acelerograma y el desarrollo de presión de poros para el sismo de Nueva Zelanda de magnitud M 6,60 y en su dirección Y. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.





Figura A. 9. Comparación entre la Potencia del Acelerograma y el Desarrollo de Presión de Poros para el sismo de Landers de magnitud M 7,28 y en su dirección X. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.



Figura A. 10. Comparación entre la Potencia del Acelerograma y el Desarrollo de Presión de Poros para el sismo de Landers de magnitud M 7,28 y en su dirección Y. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.





Figura A. 11. Comparación entre la potencia del acelerograma y el desarrollo de la presión de poros para el sismo de Duzce de magnitud M 7,14 y en su dirección X. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.



Figura A. 12. Comparación entre la potencia del acelerograma y el desarrollo de la presión de poros para el sismo de Duzce de magnitud M 7,14 y en su dirección Y. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.





Figura A. 13. Comparación entre la potencia del acelerograma y el desarrollo de la presión de poros para el sismo de Duzce de magnitud M 7,20 y en su dirección X. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.



Figura A. 14. Comparación entre la potencia del acelerograma y el desarrollo de la presión de poros para el sismo de Duzce de magnitud M 7,20 y en su dirección Y. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.





Figura A. 15. Comparación entre la potencia del acelerograma y el desarrollo de la presión de poros para el sismo de Umbria 3rd de magnitud M 5,60 y en su dirección X. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.



Figura A. 16. Comparación entre la potencia del acelerograma y el desarrollo de la presión de poros para el sismo de Umbria 3rd de magnitud M 5,60 y en su dirección Y. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.





Figura A. 17. Comparación entre la potencia del acelerograma y el desarrollo de la presión de poros para el sismo de Big Bear de magnitud M 6,46 y en su dirección X. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.



Figura A. 18. Comparación entre la potencia del acelerograma y el desarrollo de la presión de poros para el sismo de Big Bear de magnitud M 6,46 y en su dirección Y. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.





Figura A. 19. Comparación entre la potencia del acelerograma y el desarrollo de la presión de poros para el sismo de Emilia 2nd de magnitud M 6,00 y en su dirección X. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.



Figura A. 20. Comparación entre la potencia del acelerograma y el desarrollo de la presión de poros para el sismo de Emilia 2nd de magnitud M 6,00 y en su dirección Y. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.





Figura A. 21. Comparación entre la potencia del acelerograma y el desarrollo de la presión de poros para el sismo de Central Italy de magnitud M 5,00 y en su dirección X. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.



Figura A. 22. Comparación entre la potencia del acelerograma y el desarrollo de la presión de poros para el sismo de Central Italy de magnitud M 5,00 y en su dirección Y. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.





Figura A. 23. Comparación entre la potencia del acelerograma y la potencia de velocidad para el sismo de Baja California de magnitud M 5,50 y en su dirección X. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.



Figura A. 24. Comparación entre la potencia del acelerograma y la potencia de velocidad para el sismo de Umbría de magnitud 5,70 y en dirección Y. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.





Figura A. 25. Comparación entre la potencia del acelerograma y la potencia de velocidad para el sismo de Chalfant de magnitud M 6,19 y en su dirección Y. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.



Figura A. 26. Comparación entre la potencia del acelerograma y la potencia de velocidad para el sismo de Nueva Zelanda de magnitud M 6,60 y en su dirección X. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.





Figura A. 27. Comparación entre la potencia del acelerograma y la potencia de velocidad para el sismo de Landers de magnitud M 7,28 y en su dirección X. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.



Figura A. 28. Comparación entre la potencia del acelerómetro y la potencia de velocidad para el sismo de Duzce de magnitud M 7,14 y en su dirección X. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.





Figura A. 29. Comparación entre la potencia del acelerograma y la potencia de velocidad para el sismo de Duzce de magnitud M 7,20 y en su dirección Y. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.



Figura A. 30. Comparación entre la potencia del acelerograma y la potencia de velocidad para el sismo de Umbría 3rd de magnitud M 5,60 y en su dirección Y. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.





Figura A. 31. Gráfica de potencia promedio en función del desarrollo de presión de poros para diferentes sismos de distintas magnitudes.



Figura A. 32. Potencia del acelerograma normalizada para el sismo de Baja California de magnitud M 5,50 y en su dirección X.





Figura A. 33. Potencia del acelerograma normalizado, para el sismo de Umbría de magnitud M 5,70 y en su dirección X.



Figura A. 34. Potencia del acelerograma normalizado, para el sismo de Chalfant de magnitud M 6,19 y en su dirección Y.





Figura A. 35. Potencia del acelerograma normalizado, para el sismo de Nueva Zelanda de magnitud M 6,60 y en su dirección X.



Figura A. 36. Potencia normalizada, para el sismo de Landers de magnitud M 7,28 y en su dirección X.





Figura A. 37. Potencia normalizada, para el sismo de Duzce de magnitud M 7,14 y en su dirección X.





Figura A. 38. Potencia normalizada, para el sismo de Duzce de magnitud M 7,20 y en su dirección y.



Figura A. 39. Potencia normalizada, para el sismo de Umbría 3rd de magnitud M 5,60 y en su dirección y.





Figura A. 40. Potencia normalizada, para el sismo de Big Bear de magnitud M 6,46 y en su dirección X.



Figura A. 41. Potencia normalizada, para el sismo de Emilia 2nd de magnitud M 6,00 y en su dirección Y.





Figura A. 42. Potencia normalizada, para el sismo de Central Italy de magnitud M 5,00 y en su dirección Y.



APÉNDICE B - Comparación entre los resultados de Deepsoil y Cyclic 1D.

Figura B. 1. Sismo de respuesta en la base del estrato licuable obtenido con el programa Deepsoil. Acelerograma Baja California, de magnitud M5,50 y en su dirección X. Indicando la aceleración máxima del acelerograma y su duración.



Figura B. 2.Sismo de respuesta en la base del estrato licuable obtenido con el programa Cyclic 1D. Acelerograma Baja California, de magnitud M5,50 y en su dirección X. Indicando la aceleración máxima del acelerograma y su duración.





Figura B. 3. Sismo de respuesta en la base del estrato licuable obtenido con el programa Deepsoil. Acelerograma Umbría, de magnitud M 5,70 y en su dirección X. Indicando la aceleración máxima del acelerograma y su duración.



Figura B. 4. Sismo de respuesta en la base del estrato licuable obtenido con el programa Cyclic 1D. Acelerograma Umbría, de magnitud M 5,70 y en su dirección X. Indicando la aceleración máxima del acelerograma y su duración.





Figura B. 5. Sismo de respuesta en la base del estrato licuable obtenido con el programa Deepsoil. Acelerograma Chalfant, de magnitud M 6,19 y en dirección Y. Indicando la aceleración máxima del acelerograma y su duración.



Figura B. 6. Sismo de respuesta en la base del estrato licuable obtenido con el programa Cyclic 1D. Acelerograma Chalfant, de magnitud M 6,19 y en dirección Y. Indicando la aceleración máxima del acelerograma y su duración.





Figura B. 7. Sismo de respuesta en la base del estrato licuable obtenido con el programa Cyclic 1D. Acelerograma de Nueva Zelanda, de magnitud M 6,60 y en su dirección X. Indicando la aceleración máxima del acelerograma y su duración.



Figura B. 8. Sismo de respuesta en la base del estrato licuable obtenido con el programa Deepsoil. Acelerograma Nueva Zelanda, de magnitud M 6,60 y en su dirección X. Indicando la aceleración máxima del acelerograma y su duración.





Figura B. 9. Sismo de respuesta en la base del estrato licuable obtenido con el programa Deepsoil. Acelerograma de Landers, de magnitud M 7,28 y en su dirección X. Indicando la aceleración máxima del acelerograma y su duración.



Figura B. 10. Sismo de respuesta en la base del estrato licuable obtenido con el programa Cyclic 1D. Acelerograma de Landers, de magnitud M 7,28 y en su dirección X. Indicando la aceleración máxima del acelerograma y su duración.





Figura B. 11. Sismo de respuesta en la base del estrato licuable obtenido con el programa Deepsoil. Acelerograma de Duzce, de magnitud M 7,14 y en su dirección X. Indicando la aceleración máxima del acelerograma y su duración.



Figura B. 12. Sismo de respuesta en la base del estrato licuable obtenido con el programa Cyclic 1D. Acelerograma de Duzce, de magnitud M 7,14 y en su dirección X. Indicando la aceleración máxima del acelerograma y su duración.





Figura B. 13. Sismo de respuesta en la base del estrato licuable obtenido con el programa Deepsoil. Acelerograma de Duzce, de magnitud M 7,20 y en su dirección Y. Indicando la aceleración máxima del acelerograma y su duración.



Figura B. 14. Sismo de respuesta en la base del estrato licuable obtenido con el programa Cyclic 1D. Acelerograma de Duzce, de magnitud M 7,20 y en dirección Y. Indicando la aceleración máxima del acelerograma y su duración.





Figura B. 15. Sismo de respuesta en la base del estrato licuable obtenido con el programa Cyclic 1D. Acelerograma de Umbría 3rd, de magnitud M 5,00 y en su dirección Y. Indicando la aceleración máxima del acelerograma y su duración.



Figura B. 16. Sismo de respuesta en la base del estrato licuable obtenido con el programa Deepsoil. Acelerograma de Umbría 3rd, de magnitud M 5,00 y en su dirección Y. Indicando la aceleración máxima del acelerograma y su duración.





Figura B. 17. Sismo de respuesta en la base del estrato licuable obtenido con el programa Deepsoil. Acelerograma de Big Bear, de magnitud M 6,46 y en su dirección X. Indicando la aceleración máxima del acelerograma y su duración.



Figura B. 18. Sismo de respuesta en la base del estrato licuable obtenido con el programa Cyclic 1D. Acelerograma de Big Bear, de magnitud M 6,46 y en su dirección X. Indicando la aceleración máxima del acelerograma y su duración.





Figura B. 19. Sismo de respuesta en la base del estrato licuable obtenido con el programa Cyclic 1D. Acelerograma de Emilia 2nd, de magnitud M 6,00 y en su dirección Y. Indicando la aceleración máxima del acelerograma y su duración.



Figura B. 20. Sismo de respuesta en la base del estrato licuable obtenido con el programa Deepsoil. Acelerograma de Emilia 2nd, de magnitud M 6,00 y en su dirección Y. Indicando la aceleración máxima del acelerograma y su duración.





Figura B. 21. Sismo de respuesta en la base del estrato licuable obtenido con el programa Deepsoil. Acelerograma de Central Italy, de magnitud M 5,00 y en su dirección Y. Indicando la aceleración máxima del acelerograma y su duración.



Figura B. 22. Sismo de respuesta en la base del estrato licuable obtenido con el programa Cyclic 1D. Acelerograma de Central Italy, de magnitud M 5,00 y en su dirección Y. Indicando la aceleración máxima del acelerograma y su duración.





Figura B. 23. Potencia del acelerograma y desarrollo de presión de poros del sismo de Baja California, de magnitud M 5,50 en su dirección X, del programa Deepsoil. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.



Figura B. 24. Potencia del acelerograma y desarrollo de presión de poros del sismo de Baja California, de magnitud M 5,50 en su dirección X, del programa Cyclic 1D. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.





Figura B. 25. Potencia del acelerograma y desarrollo de presión de poros del sismo de Umbría, de magnitud M 5,70 en su dirección X, del programa Deepsoil. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.



Figura B. 26. Potencia del acelerograma y desarrollo de presión de poros del sismo de Umbría, de magnitud M 5,70 en su dirección X, del programa Cyclic 1D. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.





Figura B. 27. Potencia del acelerograma y desarrollo de presión de poros del sismo de Chalfant, de magnitud M 6,19 en su dirección Y, del programa Deepsoil. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.



Figura B. 28. Potencia del acelerograma y desarrollo de presión de poros del sismo de Chalfant, de magnitud M 6,19 en su dirección Y, del programa Cyclic 1D. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.




Figura B. 29. Potencia del acelerograma y desarrollo de presión de poros del sismo de Nueva Zelanda, de magnitud M 6,60 en su dirección Y. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.



Figura B. 30. Potencia del acelerograma y desarrollo de presión de poros del sismo de Nueva Zelanda, de magnitud M 6,60 en su dirección X, del programa Cyclic 1D. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.





Figura B. 31. Potencia del acelerograma y desarrollo de presión de poros del sismo de Landers, de magnitud M 7,28 en su dirección X, del programa Deepsoil. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.



Figura B. 32. Potencia del acelerograma y desarrollo de presión de poros del sismo de Landers, de magnitud M 7,28 en su dirección X, del programa Cyclic 1D. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.





Figura B. 33. Potencia del acelerograma y desarrollo de presión de poros del sismo de Duzce, de magnitud M 7,14 en su dirección X, del programa Deepsoil. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.



Figura B. 34. Potencia del acelerograma y desarrollo de presión de poros del sismo de Duzce, de magnitud M 7,14 en su dirección X, del programa Cyclic 1D. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.





Figura B. 35. Potencia del acelerograma y desarrollo de presión de poros del sismo de Duzce, de magnitud M 7,20 en su dirección X, del programa Deepsoil. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.



Figura B. 36. Potencia del acelerograma y desarrollo de presión de poros del sismo de Duzce, de magnitud M 7,20 en su dirección X, del programa Cyclic 1D. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.





Figura B. 37. Potencia del acelerograma y desarrollo de presión de poros del sismo de Umbría 3rd, de magnitud M 5,60 en su dirección y, del programa Deepsoil. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.



Figura B. 38. Potencia del acelerograma y desarrollo de presión de poros del sismo de Umbría 3rd, de magnitud M 5,60 en su dirección Y, del programa Cyclic 1D. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.





Figura B. 39. Potencia del acelerograma y desarrollo de presión de poros del sismo de Big Bear, de magnitud M 6,46 en su dirección X, del programa Deepsoil. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.



Figura B. 40. Potencia del acelerograma y desarrollo de presión de poros del sismo de Big Bear, de magnitud M 6,46 en su dirección X, del programa Cyclic 1D. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.





Figura B. 41. Potencia del acelerograma y desarrollo de presión de poros del sismo de Emilia 2nd, de magnitud M 6,00 en su dirección Y, del programa Deepsoil. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.



Figura B. 42. Potencia del acelerograma y desarrollo de presión de poros del sismo de Emilia 2nd, de magnitud M 6,00 en su dirección Y, del programa Cyclic 1D. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.





Figura B. 43. Potencia del acelerograma y desarrollo de presión de poros del sismo de Central Italy, de magnitud M 5,00 en su dirección Y, del programa Deepsoil. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.



Figura B. 44. Potencia del acelerograma y desarrollo de presión de poros del sismo de Central Italy, de magnitud M 5,00 en su dirección Y, del programa Cyclic 1D. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.





Figura B. 45. Potencia del acelerograma y potencia de velocidad del sismo de Baja California, de magnitud M 5,50 en su dirección X, del programa Deepsoil. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.



Figura B. 46. Potencia del acelerograma y potencia de velocidad del sismo de Baja California, de magnitud M 5,50 en su dirección X, del programa Cyclic 1D. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.





Figura B. 47. Potencia del acelerograma y potencia de velocidad del sismo de Umbría, de magnitud M 5,70 en su dirección X, del programa Deepsoil. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.



Figura B. 48. Potencia del acelerograma y potencia de velocidad del sismo de Umbría, de magnitud M 5,70 en su dirección X, del programa Cyclic 1D. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.





Figura B. 49. Potencia del acelerograma y potencia de velocidad del sismo de Chalfant, de magnitud M 6,19 en su dirección Y, del programa Deepsoil. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.



Figura B. 50. Potencia del acelerograma y potencia de velocidad del sismo de Chalfant, de magnitud M 6,19 en su dirección Y, del programa Cyclic 1D. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.





Figura B. 51. Potencia del acelerograma y potencia de velocidad del sismo de Nueva Zelanda, de magnitud M 6,60 en su dirección X, del programa Deepsoil. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.



Figura B. 52. Potencia del acelerograma y potencia de velocidad del sismo de Nueva Zelanda, de magnitud M 6,60 en su dirección X, del programa Cyclic 1D. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.





Figura B. 53. Potencia del acelerograma y potencia de velocidad del sismo de Landers, de magnitud M 7,28 en su dirección X, del programa Deepsoil. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.



Figura B. 54. Potencia del acelerograma y potencia de velocidad del sismo de Landers, de magnitud M 7,28 en su dirección X, del programa Cyclic 1D. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.





Figura B. 55. Potencia del acelerograma y potencia de velocidad del sismo de Duzce, de magnitud M 7,14 en su dirección X, del programa Deepsoil. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.



Figura B. 56. Potencia del acelerograma y potencia de velocidad del sismo de Duzce, de magnitud M 7,14 en su dirección X, del programa Cyclic 1D. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.





Figura B. 57. Potencia del acelerograma y potencia de velocidad del sismo de Duzce, de magnitud M 7,14 en su dirección X, del programa Deepsoil. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.



Figura B. 58. Potencia del acelerograma y potencia de velocidad del sismo de Duzce, de magnitud M 7,20 en su dirección Y, del programa Deepsoil. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.





Figura B. 59. Potencia del acelerograma y potencia de velocidad del sismo de Duzce, de magnitud M 7,20 en su dirección Y, del programa Cyclic 1D. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.



Figura B. 60. Potencia del acelerograma y potencia de velocidad del sismo de Umbría 3rd, de magnitud M 5,60 en su dirección Y, del programa Deepsoil. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.





Figura B. 61. Potencia del acelerograma y potencia de velocidad del sismo de Umbría 3rd, de magnitud M 5,60 en su dirección Y, del programa Cyclic 1D. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.



Figura B. 62. Potencia del acelerograma y potencia de velocidad del sismo de Big Bear, de magnitud M 6,46 en su dirección X, del programa Deepsoil. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.





Figura B. 63. Potencia del acelerograma y potencia de velocidad del sismo de Big Bear, de magnitud M 6,46 en su dirección X, del programa Cyclic 1D. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.



Figura B. 64. Potencia del acelerograma y potencia de velocidad del sismo de Emilia 2nd, de magnitud M 6,00 en su dirección Y, del programa Deepsoil. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.





Figura B. 65. Potencia del acelerograma y potencia de velocidad del sismo de Emilia 2nd, de magnitud M 6,00 en su dirección Y, del programa Cyclic 1D. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.



Figura B. 66. Potencia del acelerograma y potencia de velocidad del sismo de Central Italy, de magnitud M 5,00 en su dirección Y, del programa Deepsoil. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.





Figura B. 67. Potencia del acelerograma y potencia de velocidad del sismo de Central Italy, de magnitud M 5,00 en su dirección Y, del programa Deepsoil. Indicando la duración del sector fuerte del acelerograma.



Figura B. 68. Potencia normalizada, para el sismo de Baja California de magnitud M 5,50, de Cyclic 1D y en su dirección X.





Figura B. 69. Potencia normalizada, para el sismo de Umbría de magnitud M 5,70, de Cyclic 1D y en su dirección X.



Figura B. 70. Potencia normalizada, para el sismo de Chalfant de magnitud M 6,19, de Cyclic 1D y en su dirección Y.





Figura B. 71. Potencia normalizada, para el sismo de Nueva Zelanda de magnitud M 6,60, de Cyclic 1D y en su dirección X.



Figura B. 72. Potencia normalizada, para el sismo de Landers de magnitud M 7,28, de Cyclic 1D y en su dirección X.





Figura B. 73. Potencia normalizada, para el sismo de Duzce de magnitud M 7,14, de Cyclic 1D y en su dirección X.



Figura B. 74. Potencia normalizada, para el sismo de Duzce de magnitud M 7,20, de Deepsoil y en su dirección Y.





Figura B. 75. Potencia normalizada, para el sismo de Duzce de magnitud M 7,20, de Cyclic 1D y en su dirección Y.



Figura B. 76. Potencia normalizada, para el sismo de Umbría 3rd de magnitud M 5,60, de Deepsoil y en su dirección Y.





Figura B. 77. Potencia normalizada, para el sismo de Umbría 3rd de magnitud M 5,60, de Cyclic 1D y en su dirección Y.



Figura B. 78. Potencia normalizada, para el sismo de Big Bear de magnitud M 6,46, de Deepsoil y en su dirección X.





Figura B. 79. Potencia normalizada, para el sismo de Big Bear de magnitud M 6,46, de Cyclic 1D y en su dirección X.



Figura B. 80. Potencia normalizada, para el sismo de Emilia 2nd de magnitud M 6,00, de Deepsoil y en su dirección Y.





Figura B. 81. Potencia normalizada, para el sismo de Emilia 2nd de magnitud M 6,00, de Cyclic 1D y en su dirección Y.



Figura B. 82. Potencia normalizada, para el sismo de Central Italy de magnitud M 5,00, de Deepsoil y en su dirección Y.





Figura B. 83. Potencia normalizada, para el sismo de Central Italy de magnitud M 5,00, de Cyclic 1D y en su dirección Y.



Figura B. 84. Espectro de Respuesta en el quiebre Baja California de magnitud M 5,50, de Cyclic 1D y en su dirección X. Indicando la aceleración máxima espectral y el periodo en el que alcanza dicha aceleración espectral.





Figura B. 85. Espectro de Respuesta en el quiebre Baja California de magnitud M 5,50, de Cyclic 1D y en su dirección Y. Indicando la aceleración máxima espectral y el periodo en el que alcanza dicha aceleración espectral.



Figura B. 86. Espectro de Respuesta en el quiebre Umbria de magnitud M 5,70, de Cyclic 1D en su dirección X. Indicando la aceleración máxima espectral y el periodo en el que alcanza dicha aceleración espectral.





Figura B. 87. Espectro de Respuesta en el quiebre Umbria de magnitud M 5,70, de Cyclic 1D en su dirección Y. Indicando la aceleración máxima espectral y el periodo en el que alcanza dicha aceleración espectral.



Figura B. 88. Espectro de Respuesta en el quiebre Chalfant de magnitud M 6,19, de Cyclic 1D en su dirección X. Indicando la aceleración máxima espectral y el periodo en el que alcanza dicha aceleración espectral.





Figura B. 89. Espectro de Respuesta en el quiebre Chalfant de magnitud M 6,19, de Cyclic 1D en su dirección Y. Indicando la aceleración máxima espectral y el periodo en el que alcanza dicha aceleración espectral.



Figura B. 90. Espectro de Respuesta en el quiebre New Zeland de magnitud M 6,60, de Cyclic 1D en su dirección X. Indicando la aceleración máxima espectral y el periodo en el que alcanza dicha aceleración espectral.



Figura B. 91. Espectro de Respuesta en el quiebre New Zeland de magnitud M 6,60, de Cyclic 1D en su dirección Y. Indicando la aceleración máxima espectral y el periodo en el que alcanza dicha aceleración espectral.



Figura B. 92. Espectro de Respuesta en el quiebre Landers de magnitud M 7,28, de Cyclic 1D en su dirección X. Indicando la aceleración máxima espectral y el periodo en el que alcanza dicha aceleración espectral.





Figura B. 93. Espectro de Respuesta en el quiebre Landers de magnitud M 7,28, de Cyclic 1D en su dirección Y. Indicando la aceleración máxima espectral y el periodo en el que alcanza dicha aceleración espectral.



Figura B. 94. Espectro de Respuesta en el quiebre 1612 Duzce de magnitud M 7,14, de Cyclic 1D en su dirección X. Indicando la aceleración máxima espectral y el periodo en el que alcanza dicha aceleración espectral.





Figura B. 95. Espectro de Respuesta en el quiebre 1612 Duzce de magnitud M 7,14, de Cyclic 1D en su dirección Y. Indicando la aceleración máxima espectral y el periodo en el que alcanza dicha aceleración espectral.



Figura B. 96. Espectro de Respuesta en el quiebre 8101 Duzce de magnitud M 7,20, de Cyclic 1D en su dirección X. Indicando la aceleración máxima espectral y el periodo en el que alcanza dicha aceleración espectral.





Figura B. 97. Espectro de Respuesta en el quiebre 8101 Duzce de magnitud M 7,20, de Cyclic 1D en su dirección Y. Indicando la aceleración máxima espectral y el periodo en el que alcanza dicha aceleración espectral.



Figura B. 98. Espectro de Respuesta en el quiebre Umbria 3rd de magnitud M 5,60, de Cyclic 1D en su dirección X. Indicando la aceleración máxima espectral y el periodo en el que alcanza dicha aceleración espectral.





Figura B. 99. Espectro de Respuesta en el quiebre Umbria 3rd de magnitud M 5,60, de Cyclic 1D en su dirección Y. Indicando la aceleración máxima espectral y el periodo en el que alcanza dicha aceleración espectral.



Figura B. 100. Espectro de Respuesta en el quiebre Big Bear de magnitud M 6,46, de Cyclic 1D en su dirección X. Indicando la aceleración máxima espectral y el periodo en el que alcanza dicha aceleración espectral.




Figura B. 101. Espectro de Respuesta en el quiebre Big Bear de magnitud M 6,46, de Cyclic 1D en su dirección Y. Indicando la aceleración máxima espectral y el periodo en el que alcanza dicha aceleración espectral.



Figura B. 102. Espectro de Respuesta en el quiebre Emilia 2nd de magnitud M 6,00, de Cyclic 1D en su dirección X. Indicando la aceleración máxima espectral y el periodo en el que alcanza dicha aceleración espectral.





Figura B. 103. Espectro de Respuesta en el quiebre Emilia 2nd de magnitud M 6,00, de Cyclic 1D en su dirección Y. Indicando la aceleración máxima espectral y el periodo en el que alcanza dicha aceleración espectral.



Figura B. 104. Espectro de Respuesta en el quiebre Central Italy de magnitud M 5,00, de Cyclic 1D en su dirección X. Indicando la aceleración máxima espectral y el periodo en el que alcanza dicha aceleración espectral.





Figura B. 105. Espectro de Respuesta en el quiebre Central Itraly de magnitud M 5,00, de Cyclic 1D en su dirección Y. Indicando la aceleración máxima espectral y el periodo en el que alcanza dicha aceleración espectral.





APÉNDICE C - Función de Transferencia

Figura C. 1. Espectro de respuesta en roca para el sismo de Baja California, de magnitud M 5,50 y en su dirección X.



Figura C. 2. Espectro de respuesta en el quiebre para el sismo de Baja California, de magnitud M 5,50 y en su dirección X.



Figura C. 3. Comparación entre la función de transferencia teórica y empírica para el sismo de Baja California, de magnitud M 5,50 y en su dirección X.





Figura C. 4. Espectro de respuesta en roca para el sismo de Umbría, de magnitud M 5,70 y en su dirección X.



Figura C. 5. Espectro de respuesta en el quiebre para el sismo de Umbría, de magnitud M 5,70 y en su dirección X.



Figura C. 6. Comparación entre la función de transferencia teórica y empírica para el sismo de Umbría, de magnitud M 5,70 y en su dirección X. Indicando el periodo en el que se obtiene la máxima amplitud para las pseudo funciones de transferencia teorica (naranja) y empírica (verde).





Figura C. 7. Espectro de respuesta en roca para el sismo de Chalfant, de magnitud M 6, 19 y en su dirección Y.



Figura C. 8. Espectro de respuesta en el quiebre para el sismo de Chalfant, de magnitud M 6, 19 y en su dirección Y.



Figura C. 9. Comparación entre la función de transferencia teórica y empírica para el sismo de Chalfant, de magnitud M 6,19 y en su dirección Y. Indicando el periodo en el que se obtiene la máxima amplitud para las pseudo funciones de transferencia teorica (naranja) y empírica (verde).



Figura C. 10.Espectro de respuesta en roca para el sismo de Nueva Zelanda, de magnitud M 6,60 y en su dirección X.





Figura C. 11.Espectro de respuesta en el quiebre para el sismo de Nueva Zelanda, de magnitud M 6,60 y en su dirección X.



Figura C. 12. Comparación entre la función de transferencia teórica y empírica para el sismo de Nueva Zelanda, de magnitud M 6,60 y en su dirección X. Indicando el periodo en el que se obtiene la máxima amplitud para las pseudo funciones de transferencia teorica (naranja) y empírica (verde).



Figura C. 13. Espectro de respuesta en roca para el sismo de Landers, de magnitud M 7,28 y en su dirección X.



Figura C. 14. Espectro de respuesta en el quiebre para el sismo de Landers, de magnitud M 7,28 y en su dirección X.





Figura C. 15. Comparación entre la función de transferencia teórica y empírica para el sismo de Landers, de magnitud M 7,28 y en su dirección X. Indicando el periodo en el que se obtiene la máxima amplitud para las pseudo funciones de transferencia teorica (naranja) y empírica (verde).



Figura C. 16. Espectro de respuesta en roca para el sismo de Duzce, de magnitud M 7,14 y en su dirección X.



Figura C. 17. Espectro de respuesta en el quiebre para el sismo de Duzce, de magnitud M 7,14 y en su dirección X.



Figura C. 18. Comparación entre la función de transferencia teórica y empírica para el sismo de Duzce, de magnitud M 7,14 y en su dirección X. Indicando el periodo en el que se obtiene la máxima amplitud para las pseudo funciones de transferencia teorica (naranja) y empírica (verde).





Figura C. 19. Espectro de respuesta en roca para el sismo de Duzce, de magnitud M 7,20 y en su dirección Y.



Figura C. 20. Espectro de respuesta en el quiebre para el sismo de Duzce, de magnitud M 7,20 y en su dirección Y.



Figura C. 21. Comparación entre la función de transferencia teórica y empírica para el sismo de Duzce, de magnitud M 7,20 y en su dirección Y. Indicando el periodo en el que se obtiene la máxima amplitud para las pseudo funciones de transferencia teorica (naranja) y empírica (verde).



Figura C. 22. Espectro de respuesta en roca para el sismo de Umbría, de magnitud M 5,60 y en su dirección Y.





Figura C. 23. Espectro de respuesta en el quiebre para el sismo de Umbría, de magnitud M 5,60 y en su dirección Y.



Figura C. 24. Comparación entre la función de transferencia teórica y empírica para el sismo de Umbría, de magnitud M 5,60 y en su dirección Y. Indicando el periodo en el que se obtiene la máxima amplitud para las pseudo funciones de transferencia teorica (naranja) y empírica (verde).



Figura C. 25. Espectro de respuesta en roca para el sismo de BigBear, de magnitud M 6,46 y en su dirección X.





Figura C. 26. Espectro de respuesta en el quiebre para el sismo de BigBear, de magnitud M 6,46 y en su dirección X.



Figura C. 27. Comparación entre la función de transferencia teórica y empírica para el sismo de BigBear, de magnitud M 6,46 y en su dirección Y. Indicando el periodo en el que se obtiene la máxima amplitud para las pseudo funciones de transferencia teorica (naranja) y empírica (verde).



Figura C. 28. Espectro de respuesta en roca para el sismo de Emilia, de magnitud M 6,00 y en su dirección Y.



Figura C. 29. Espectro de respuesta en el quiebre para el sismo de Emilia, de magnitud M 6,00 y en su dirección Y.





Figura C. 30. Comparación entre la función de transferencia teórica y empírica para el sismo de Emilia, de magnitud M 6,00 y en su dirección Y. Indicando el periodo en el que se obtiene la máxima amplitud para las pseudo funciones de transferencia teorica (naranja) y empírica (verde).



Figura C. 31. Espectro de respuesta en roca para el sismo del Centro de Italia, de magnitud M 5,00 y en su dirección Y.



Figura C. 32. Espectro de respuesta en el quiebre para el sismo del Centro de Italia, de magnitud M 5,00 y en su dirección Y.



Figura C. 33. Comparación entre la función de transferencia teórica y empírica para el sismo del Centro de Italia, de magnitud M 5,00 y en su dirección Y. Indicando el periodo en el que se obtiene la máxima amplitud para las pseudo funciones de transferencia teorica (naranja) y empírica (verde).





APÉNDICE D - ESPECTROS DE RESPUESTA ENERGÉTICOS

Figura D. 1. Espectro de respuesta en roca para el sismo de Baja California, de magnitud M 5,50 y en su dirección X. Utilizando los métodos convencionales y el energético.



Figura D. 2. Espectro de respuesta en el quiebre para el sismo de Baja California, de magnitud M 5,50 y en su dirección X. Utilizando el método convencional y el energético.



Figura D. 3. Comparación entre la pseudo función de transferencia teórica, convencional y energética para el sismo de Baja California, de magnitud M 5,50 y en su dirección X.



Figura D. 4. Espectro de respuesta en roca para el sismo de Umbría, de magnitud M 5,70 y en su dirección X. Utilizando los métodos convencionales y el energético.



ESPECTRO DE RESPUESTA EN EL QUIEBRE



Figura D. 5. Espectro de respuesta en el quiebre para el sismo de Umbría, de magnitud M 5,70 y en su dirección X. Utilizando el método convencional y el energético.



Figura D. 6. Comparación entre la pseudo función de transferencia teórica, convencional y energética para el sismo de Umbría, de magnitud M 5,70 y en su dirección X.



Figura D. 7. Espectro de respuesta en roca para el sismo de Chalfant, de magnitud M 6,19 y en su dirección Y. Utilizando los métodos convencionales y el energético.



Figura D. 8.Espectro de respuesta en el quiebre para el sismo de Chalfant, de magnitud M 6,19 y en su dirección Y. Utilizando los métodos convencionales y el energético.



PSEUDO FUNCION DE TRANSFERENCIA



Figura D. 9. Comparación entre la función de transferencia teórica, convencional y energética para el sismo de Chalfant, de magnitud M 6,19 y en su dirección Y.



Figura D. 10. Espectro de respuesta en roca para el sismo de Nueva Zelanda, de magnitud M 6,60 y en su dirección X. Utilizando los métodos convencionales y el energético



Figura D. 11. Espectro de respuesta en el quiebre para el sismo de Nueva Zelanda, de magnitud M 6,60 y en su dirección X. Utilizando los métodos convencionales y el energético.



Figura D. 12. Comparación entre la pseudo función de transferencia teórica, convencional y energético para el sismo de Nueva Zelanda, de magnitud M 6,60 y en su dirección X.





Figura D. 13. Espectro de respuesta en roca para el sismo de Landers, de magnitud M 7,28 y en su dirección X. Utilizando los métodos convencionales y el energético.



Figura D. 14. Espectro de respuesta en el quiebre para el sismo de Landers, de magnitud M 7,28 y en su dirección X. Utilizando los métodos convencionales y el energético.



Figura D. 15. Comparación entre la pseudo función de transferencia teórica, convencional y energética para el sismo de Landers, de magnitud M 7,28 y en su dirección X.



Figura D. 16. Espectro de respuesta en roca para el sismo de Duzce, de magnitud M 7,14 y en su dirección X. Utilizando los métodos convencionales y el energético.



ESPECTRO DE RESPUESTA EN EL QUIEBRE 0.50 0.00 0 0.5 1 1.5 2 2.5 3 Periodo [seg]

Figura D. 17. Espectro de respuesta en el quiebre para el sismo de Duzce, de magnitud M 7,14 y en su dirección X. Utilizando los métodos convencionales y el energético.



Figura D. 18. Comparación entre la pseudo función de transferencia teórica, convencional y energética para el sismo de Duzce, de magnitud M 7,14 y en su dirección X.



Figura D. 19. Espectro de respuesta en roca para el sismo de Duzce, de magnitud M 7,20 y en su dirección Y. Utilizando los métodos convencionales y el energético.



Figura D. 20. Espectro de respuesta en el quiebre para el sismo de Duzce, de magnitud M 7,20 y en su dirección Y. Utilizando los métodos convencionales y el energético.





Figura D. 21. Comparación entre la pseudo función de transferencia teórica, convencional y energética para el sismo de Duzce, de magnitud M 7,20 y en su dirección Y.



Figura D. 22. Espectro de respuesta en roca para el sismo de Umbría, de magnitud M 5,60 y en su dirección Y. Utilizando los métodos convencionales y el energético.



Figura D. 23. Espectro de respuesta en el quiebre para el sismo de Umbría, de magnitud M 5,60 y en su dirección Y. Utilizando los métodos convencionales y el energético.



Figura D. 24. Comparación entre la pseudo función de transferencia teórica, convencional y energética para el sismo de Umbría, de magnitud M 5,60 y en su dirección Y.





Figura D. 25. Espectro de respuesta en roca para el sismo de BigBear, de magnitud M 6,46 y en su dirección X. Utilizando los métodos convencionales y el energético.



Figura D. 26. Espectro de respuesta en el quiebre para el sismo de BigBear, de magnitud M 6,46 y en su dirección X. Utilizando los métodos convencionales y el energético.



Figura D. 27. Comparación entre la pseudo función de transferencia teórica, convencional y energética para el sismo de BigBear, de magnitud M 6,46 y en su dirección X.



Figura D. 28. Espectro de respuesta en roca para el sismo de Emilia, de magnitud M 6,00 y en su dirección Y. Utilizando los métodos convencionales y el energético.





Figura D. 29. Espectro de respuesta en el quiebre para el sismo de Emilia, de magnitud M 6,00 y en su dirección Y. Utilizando los métodos convencionales y el energético.



Figura D. 30. Comparación entre la pseudo función de transferencia teórica, convencional y energética para el sismo de Emilia, de magnitud M 6,00 y en su dirección Y.



Figura D. 31. Espectro de respuesta en roca para el sismo del Centro de Italia, de magnitud M 5,00 y en su dirección Y. Utilizando los métodos convencionales y el energético.



Figura D. 32. Espectro de respuesta en el quiebre para el sismo del Centro de Italia, de magnitud M 5,00 y en su dirección Y. Utilizando los métodos convencionales y el energético.





Figura D. 33. Comparación entre la pseudo función de transferencia teórica, convencional y energética para el sismo de Emilia, de magnitud M 5,00 y en su dirección Y.

APÉNDICE E - EXTRAS

E.1. Esfuerzo Cortante y Ángulo de Fricción

Como se dijo anteriormente el programa DEEPSOIL nos permite obtener ciertos valores que se colocaran en el programa Cyclic 1D, sin embargo, hay 2 valores que se obtienen de forma indirecta; siendo estos el esfuerzo cortante y el ángulo de fricción, siendo estos las fórmulas E.1.1 y E.1.2 respectivamente. El manual de DEEPSOIL nos demuestra cómo se calculan estos, utilizando los valores suministrados al momento de definir las capas del perfil geológico.

$$\tau = \rho V_s^2 \frac{G}{G_o} \gamma$$
(E.1.1)

Donde es el esfuerzo cortante, Vs es la velocidad de onda, es el peso específico del estrato, G es el módulo de corte, Go es el módulo de corte inicial y es el cizallamiento.

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\tau_{max}}{\sigma'_v} \right)$$
(E.1.2)

E.2. Importación de los Registros a Analizar

Seguido se le inserta el acelerograma, otra diferencia entre el DEEPSOIL y Cyclic 1D es que para que este último pueda leer los acelerogramas se debe importar en un formato en específico (.prn) en el cual solo se tiene el tiempo y aceleración en roca del registro que se vaya a analizar en una sola columna y separado, como se muestra en la figura E.1.



1	A	В
1	00	
2	0.005 -9.22528032619776E-07	
3	0.01 -1.01936799184506E-08	
4	0.015 -1.01936799184506E-08	
5	0.02 -1.01936799184506E-08	
6	0.025 -1.01936799184506E-08	
7	0.03 -1.01936799184506E-08	
8	0.035 -1.01936799184506E-08	
9	0.04 -1.12130479102956E-08	
10	0.045 -1.12130479102956E-08	
11	0.05 -1.12130479102956E-08	
12	0.055 -1.12130479102956E-08	
13	0.06 -1.12130479102956E-08	
14	0.065 -1.12130479102956E-08	
15	0.07 -1.12130479102956E-08	

16 0.075 -1.12130479102956E-08

Figura E. 1. Formato para insertar el acelerograma en roca en el programa Cyclic 1D.

Una vez importado el acelerograma al Cyclic 1D se salva el archivo, se verifica si los datos están colocados correctamente y se corre el análisis de un solo acelerograma.

Cuando haya terminado el análisis se seleccionan los gráficos de histogramas, para obtenerlos se selecciona "Output" seguido de "View Response Histories" se selecciona la profundidad respectiva al estrato licuable o de quiebre y se habilita la opción para mostrar los valores (Show Data Values). Luego de esto se copiarán y pegaran en un Excel nuevo el acelerograma, espectro de respuesta en función del tiempo, desplazamiento en función del tiempo, exceso de presión de poros y esfuerzo cortante en función del cizallamiento y por último, se procederá a obtener el sector fuerte del acelerograma e intensidad del sector fuerte para su comparación con lo obtenido en el programa DEEPSOIL.