

**Universidad Católica Andrés Bello
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil**

**ANÁLISIS DE LA INTENSIDAD DEL SECTOR FUERTE DEL
ACELEROGRAMA CONSIDERANDO EL DESARROLLO DE LA PRESIÓN DE
POROS EN UN PERFIL GEOTÉCNICO**

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

Presentado ante la
UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO
Como parte de los requisitos para optar al título de
INGENIERO CIVIL

Nombre del Tutor:

Autor:

Ing. Heriberto Echezuría

Br. Gerardo Andrés, Ruiz Hermoso

C.I: 24.041.142

Caracas, 15 de Octubre del 2019

**Universidad Católica Andrés Bello
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil**

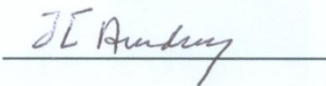
**ANÁLISIS DE LA INTENSIDAD DEL SECTOR FUERTE DEL
ACELEROGRAMA CONSIDERANDO EL DESARROLLO DE LA PRESIÓN DE
POROS EN UN PERFIL GEOTÉCNICO**

Este jurado; una vez realizado el examen del presente trabajo ha evaluado su contenido con el resultado: 20 puntos (Veinte)

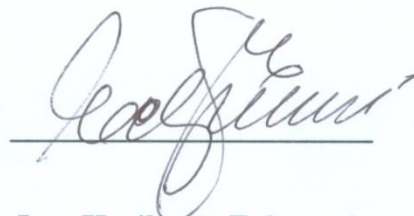


Ing. Pedro Carrillo

JURADO EXAMINADOR:



Ing. José Amundaray



Ing. Heriberto Echezuría

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

Presentado ante la
UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO
Como parte de los requisitos para optar al título de
INGENIERO CIVIL

Tesista:

Ruiz Hermoso, Gerardo Andrés

Tutor:

Ing. Heriberto Echezuría

Caracas, 15 de Octubre del 2019



**ANÁLISIS DE LA INTENSIDAD DEL SECTOR FUERTE DEL
ACELEROGRAMA CONSIDERANDO EL DESARROLLO DE LA PRESIÓN DE
POROS EN UN PERFIL GEOTÉCNICO**

Autor: Gerardo A. Ruiz H.

Tutor: Ing. Heriberto Echezuría

RESUMEN

Mediante los estudios de la respuesta dinámica de un perfil geotécnico sometido a la acción de un evento sísmico, es posible evaluar el desarrollo de presión de poros en los estratos de arenas si se hace con un método acoplado. La respuesta dinámica se evaluó con el programa deepsoil, la cual permitió obtener los acelerogramas tanto en la superficie como en la base de los estratos licuables del perfil. De esta manera se pudo evaluar el cambio de la intensidad del sector fuerte del Acelerograma en la base rocosa del depósito como a diferentes profundidades del perfil. Se verificó que es necesario que ocurra amplificación a distancias medianas a lejanas. Se demostró que al mantener los estratos licuables en los primeros 20 metros de un perfil cuyo periodo fundamental cambia, la ocurrencia de licuación también cambia. Se demostró que existe una correlación entre la intensidad del sector fuerte del acelerograma, la pseudo potencia de las ordenadas espectrales y la duración del sector fuerte del sismo.

Agradecimientos

A mi abuela Isabel Cecilia Hermoso por todo su cariño, compromiso y apoyo cuando más lo necesite.

A mi abuelo Reinaldo Hernández que en su lucha contra la enfermedad que cobro su vida en 2016 siempre se preocupó por todo lo concerniente a mi formación.

A mi Madre Ana Ruiz por su constancia y compromiso en velar por mi formación.

A mis amigos de la infancia en especial a Yao Lan, Adonis Rodríguez y Héctor Sánchez quienes considero parte de mi familia por todos los momentos compartidos y apoyos a lo largo de toda esta etapa de mi vida.

Al proyecto de Gabinete UCAB, en el que dedique cuatro años de mi vida universitaria. Proyecto que cambio mi perspectiva y me convirtió en la persona que soy hoy en día, por conocer a grandes amigos que cambiaron mi forma de percibir la realidad, en especial a Gabriel Ortiz, María José Ferrigno, María Goretti y Ignacio Sánchez por todo lo compartido y estar ahí cuando más lo necesite.

A la Cátedra de Honor Luis Ugalde Cohorte 2017-2018 por toda su formación que contribuyo al profesional integral que quiero llegar a ser, donde conocí a grandes amigos con los que compartí excelentes momentos juntos.

Al Programa de Liderazgo Ignaciano Universitario Latinoamericano (PLIUL) 2018-2019 por todas las grandes vivencias que me ha ofrecido y contribuir a mi formación personal.

A mis amigos dentro de los salones de clase en especial a Samuel Vejar, Israel Mendoza, Carlos Bravo y Hower Garban por todo el apoyo cuando fue necesario y todos los grandes momentos compartidos.

A la Dirección de Cooperación Económica al Estudiante (Dcee) en especial a Francisco Storms y Eduvigis Sánchez por toda su dedicación y compromiso en ayudarme cuando fue necesario para continuar mi formación.

A la Fundación Andrés Bello por todo su apoyo económico junto un gran compromiso y confianza en mi persona para poder convertirme en el profesional que quiero ser.

A la Fundación Oportunidad y Futuro en especial al Ing. Ricardo Larraín por toda su dedicación, la disposición en todo aspecto profesional y económico para poder culminar mis estudios Universitarios y cumplir este objetivo en la vida.

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

Simplemente ¡Gracias!

Índice General

Resumen.....	B
Agradecimientos.....	D
Índice de figuras	H
Índice de tablas.....	N
Apéndices	O
Capítulo 1.....	1
1.1 Planteamiento del Problema.....	1
1.2 Alcance y Limitaciones	1
1.3 Objetivo General	2
1.4 Objetivos Específicos	2
Capítulo 2.....	3
2. Marco Teórico	3
2.1. Origen de Movimientos Sísmicos	3
2.2.Tipos de Fallas Geológicas.....	4
2.2.1. Falla Normal.....	4
2.2.1. Falla Transcurrente.....	5
2.2.1. Falla Inversa	5
2.3.Mediciones Sísmicas	6
2.3.1. Magnitud de Momento.....	7
2.4.Ley de Atenuación	7
2.5. Acelerogramas.....	8
2.5.1. Sector Fuerte del Acelerograma.....	9
2.5.2. Error Medio Cuadrático	9
2.5.3. Intensidad de Arias.....	11
2.5.4. Intensidad del sector fuerte del Acelerograma por el método de Echezuría	11

2.6. Metodología de Dobry and Matasovic para presión de Poros en Arenas.....	13
2.6.1. Parámetro de Degradación	14
2.7. Metodología de Matasovic & Vucetic para presión de Poros en Arcillas.....	14
2.8. Licuación.....	15
2.9. Modulo cortante del suelo	16
Capítulo 3.....	18
3. Marco Metodológico	18
3.1 Registro de Acelerogramas en roca.....	19
3.2 Acelerogramas en superficie	21
3.2.1. DEEPSOIL	22
3.2.1.1. Condiciones para la presión de poros.....	23
3.2.1.2. Lecho Rocoso.....	28
3.2.1.3. Selección de Registros Sísmicos	31
3.2.1.4. Selección de Patrones de Análisis.....	32
3.2.1.5. Análisis de Resultados DEEPSOIL.....	33
3.2.1.6. Determinar el Estrato de Quiebre	34
3.2.2. Intensidad del Sector Fuerte del Acelerograma	35
3.2.3. Promedio de Aceleraciones Espectrales superiores a la Aceleración del Terreno	36
3.2.4. Energía Necesaria para la Licuación.....	37
3.3. Desarrollo de Presión de Poros al cambiar las velocidades del perfil	38
3.4. Comparación utilizando el Método del CSR.....	40
3.5. Perfil Geotécnico de Treasure Island	43
Capítulo 4.....	44
4.1. Comportamiento del Perfil durante el desarrollo de la presión de poros	44
4.2. Comportamiento de Análisis Lineal con No Lineal	47

4.2.1. Análisis comparativo con equivalente lineal en superficie para roca rígida y elástica....	47
4.2.2. Análisis comparativo del método Equivalente Lineal con roca elástica y no lineal con roca elástica.	50
4.3. Ocurrencia de licuación en análisis no lineales.....	51
4.3.1. Resultados Magnitud 5.00 - 5.99	51
4.3.2. Resultados Magnitud 6.00 - 6.99	53
4.3.3. Resultados Magnitud 7.00 - 7.99	54
4.4. Graficas de Resultados Globales	56
4.5. Relación de Pseudo Potencia Espectral con la intensidad del sector fuerte del Acelerograma	58
4.6. Desarrollo de Presión de Poros a distintos periodos fundamentales	60
4.6.1. Análisis comparativo de desarrollo de presión de poros para registros con distintas magnitudes y distancias epicentrales	63
4.6.2. Análisis comparativo del método no lineal con el equivalente lineal utilizando el CSR para los mismos registros que la sección anterior	69
Capítulo 5.....	73
Conclusiones	73
Recomendaciones.....	76
Referencias Bibliográficas	76
Apéndice	78

Índice de Figuras

Figura 1 - Movimiento de placas tectónicas y comportamiento en las zonas de subducción y dorsales (Fowler, 1990)	4
Figura 2 - Descripción de Falla Normal. (Kramer, 1996)	4
Figura 3 - Descripción de Falla Transcurrente. (Kramer, 1996)	5
Figura 4 - Descripción de Falla Inversa. (Kramer, 1996)	5
Figura 5 - Parámetros característicos de una falla (Shakal A., Benreuter, 1981)	6
Figura 6 - Parámetros característicos de un plano de falla (Shakal A., Benreuter, 1981)	7
Figura 7 - Ley de Atenuación - (Herrera, D., H. Muñoz, 2018)	8
Figura 8 - Comparación de acelerogramas con picos máximo y distintas duraciones (Kramer, 1996)	8
Figura 9 - Sector fuerte del Acelerograma (Kramer, 1996)	9
Figura 10 - Proceso de desratización de un registro de aceleraciones sísmicas para un intervalo de tiempo de $\Delta t=0,1$ s (Echezuría H., 2017).	10
Figura 11 - Función periódica de aceleración indicando la amplitud máxima y la duración del sector fuerte de dicha función. (Echezuría H., 2017)	11
Figura 12 - Comparación de las curvas dadas por Matasovic (1993) y Vucetic (1992) (líneas negras sólidas) para t , para diferentes valores de PI y OCR y las correlaciones presentadas (líneas rojas punteadas). (Carlton, 2014) como lo cita (Youssef M. A. Hashash, 2017)	15
Figura 13 - Comportamiento de vacíos luego de un esfuerzo al suelo (Echezuría H. 2018)	15
Figura 14 - Diagrama de tensión cortante vs esfuerzo (Matasovic, Vucetic. 1991)	16
Figura 15 - Comportamiento considerando la presión de poros (Matasovic, Vucetic. 1991)	17
Figura 16 - Página principal del portal web del PEER Ground Motion	19
Figura 17 - Registro de Usuario en el portal.	20

Figura 18 - Selección de tipo de registro a buscar.	20
Figura 19 - Patrones de búsqueda del portal de la base de datos.	20
Figura 20 - Archivos extraídos de la descarga de un registro.	20
Figura 21 - PEER Ground Motion - tabla de registros que nos arroja la base de datos que cumplen con los patrones de nuestra búsqueda.	21
Figura 22 - Paso 1 - DEEPSOIL - consideraciones para análisis No Lineal.....	22
Figura 23 - Paso 1 - DEEPSOIL - Definir parámetros en cada estrato.....	23
Figura 24 - Parámetros para análisis por el método de Dobry&Matasovic. (Youssef M. A. Hashash, 2017).....	24
Figura 25 - Parámetros para análisis por el método de Matasovic&Vucetic. (Youssef M. A. Hashash, 2017).....	24
Figura 26 - Parámetros seleccionados de la Comparación de las curvas dadas por Matasovic (1993) y Vucetic (1992), (Youssef M. A. Hashash, 2017).	26
Figura 27 - Espectro de Respuesta - Magnitud; 5,30 - Distancia; 0,74Km. Izmir. Turkey, Comparación de respuesta utilizando amortiguamiento del 0%, 5% y 20%.	27
Figura 28 - Paso 1 - DEEPSOIL - Definición de parámetros de lecho de Roca ‘‘Bedrock’’.	27
Figura 29 - Espectro de respuesta - Magnitud; 5,34 Distancia; 5.57Km. Dursunbey.Turkey, comparación de Espectro de respuesta en superficie con Lecho Rígido análisis no Lineal Vs Elástico.	30
Figura 30 - Diagramas del Perfil de suelo una vez determinados todos los parámetros de análisis.	30
Figura 31 - DEEPSOIL - agregar nuevos registros a la base de datos del software.	31
Figura 32 - formato para adicionar nuevos registros al software.	31
Figura 33 - Paso 2 - DEEPSOIL - Selección de registros a transitar en el perfil.....	32
Figura 34 - Paso 3 - DEEPSOIL - patrones de amortiguamiento.	32
Figura 35 - Paso 4 - DEEPSOIL - patrones de frecuencia.	33

Figura 36 - DEEPSOIL - Diagramas en función del tiempo, acelerogramas hasta intensidades.....	33
Figura 37 - Desarrollo de PWP en el Perfil - Registro Magnitud; 7.28. Distancia; 23.62 Km, Landers.....	34
Figura 38 - Respuesta de Acelerogramas - Registro de Magnitud 7.28, Distancia 23.62 Km, Landers.....	34
Figura 39 - ASM2 vs Tiempo - Grafico para determinar el fin del sector fuerte del Acelerograma - Registro Magnitud 7.51 - Distancia 7.57km. Kocaeli, Turkey.	35
Figura 40 - ASM2 vs Tiempo - Grafico para determinar el inicio del sector fuerte del Acelerograma - Registro Magnitud 7.51 - Distancia 7.57km. Kocaeli, Turkey.....	36
Figura 41 - Pseudo Intensidad Espectral Vs Tsm - Limites de Energía para Licuación Herrera, M. Muñoz, M. (2018).....	36
Figura 42 - valores límites de intensidad para licuación. (Herrera, M. Muñoz, M. 2018).	37
Figura 43 - Relación entre la distancia epicentral en la cual ocurre licuación con respecto a la magnitud de momento. Ambresys y Menu (1988).....	38
Figura 44 - DEEPSOIL – tabla de datos avanzados condiciones de los estratos variando la velocidad de ondas.	39
Figura 45 - DEEPSOIL – tabla de datos avanzados parámetros para la presión de poros variando la velocidad de ondas... ..	39
Figura 46 - Factor de reducción con respecto a la profundidad. Definido por (Seed e Idriss, 1971). Según cita (Kramer, 1996).	40
Figura 47 - Relación entre el esfuerzo cíclico con respecto al N _{1,60} del perfil para estimar licuación. Definido por (Seed e Idriss, 1971). Según cita (Kramer, 1996).	41
Figura 48 - Resultados de N _{1,60} por el ensayo SPT para el perfil de Treasure Island en sus Primeros 15 metros de perfil, (Daniel, G. 1994)	42
Figura 49 - digitalización de la Relación entre el esfuerzo cíclico para porcentaje de finos 35%, 15% y menores a 5% con respecto al N _{1,60} del perfil para estimar licuación. Definido por (Seed e Idriss, 1971). Según cita (Kramer, 1996).	42

Figura 50 - Ubicación de la isla de Treasure Island (Daniel, G. 1994).....	43
Figura 51 - perfil geotécnico de Treasure Island (Daniel, G. 1994).	43
Figura 52 - Desarrollo de PWP vs Profundidad - Registro M;6,60. D;10,27. CorinthGreece	45
Figura 53 - Desarrollo de PWP vs Profundidad - Registro M;6,30. D;82,76 Chi-ChiTaiwan06 ...	45
Figura 54 - Desplazamiento vs profundidad del perfil geotécnico al transitar el registro de Magnitud; 5,20. Distancia; 4,33. Managua Nicaragua 02.....	46
Figura 55 - Espectro de respuesta - Registro Magnitud; 7.28. Distancia; 23.62. Landers.....	47
Figura 56 - registros de tabla (10) para respuesta en superficie con roca rígida y elástica... ..	49
Figura 57 - Espectro de Respuesta - Registro Magnitud;6.61. Distancia; 42.30. Tottori Japan. - Comparación de Análisis no Lineal con lecho rocoso Elástico con Análisis lineal con lecho rocoso Rígido.....	50
Figura 58 - Registro de Magnitud 5.00 - 5.99 superiores a 80% de PWP para potencial de Licuación con la ley de atenuación	51
Figura 59 - Registros Magnitud 5.00 - 5.99 superiores a 80% de PWP - Pseudo Intensidad Espectral Vs Tsm.	52
Figura 60 - Mw vs Dist - Registro superiores a 80% de PWP - Relación entre la distancia epicentral en la cual ocurre licuación con respecto a la magnitud de momento. Ambresys y Menu (1988)	52
Figura 61 - Registros Magnitud 6.00 - 6.99 superiores a 80% de PWP para potencial de Licuación con la ley de atenuación..	53
Figura 62 - Registros Magnitud 6.00 - 6.99 superiores a 80% de PWP - Pseudo Intensidad Espectral Vs Tsm... ..	54
Figura 63 - Mw vs Dist - magnitud 6.00 - 6.99 - Relación entre la distancia epicentral en la cual ocurre licuación con respecto a la magnitud de momento. Ambresys y Menu (1988)..	54
Figura 64 - Registros Magnitud 7.00 - 7.99 superiores a 80% de PWP para potencial de Licuación con la ley de atenuación..	55

Figura 65 - Registros Magnitud 7.00 - 7.99 superiores a 80% de PWP - Pseudo Intensidad Espectral Vs Tsm...	55
Figura 66 - Mw vs Dist - magnitud 7.00 - 7.99 superiores a 80% de PWP - Relación entre la distancia epicentral en la cual ocurre licuación con respecto a la magnitud de momento. Ambresys y Menu (1988).....	56
Figura 67 - registros globales 5.00 - 7.99 para potencial de Licuación con la ley de atenuación.	56
Figura 68 - Registros Globales que desarrollan PWP - Pseudo Intensidad Espectral Vs Tsm..	57
Figura 69 - Registro globales 5.00 - 7.99 - Relación entre la distancia epicentral en la cual ocurre licuación con respecto a la magnitud de momento. Ambresys y Menu (1988)	58
Figura 70 - Pseudo potencia espectral - Relación de Promedio de la Aceleración Espectral al cuadrado por la duración del sector fuerte del Acelerograma vs La intensidad del sector fuerte del Acelerograma en el estrato de quiebre.	59
Figura 71 - Relación de la Intensidad del sector fuerte del Acelerograma en roca vs intensidad del sector fuerte del Acelerograma en Quiebre	60
Figura 72 - Espectro de respuesta con To de distintas Velocidades de ondas - Registro de Magnitud: 5,80 - Distancia Epicentral: 3,71 km ''San Salvador''.....	61
Figura 73 - Desarrollo de PWP vs Profundidad V500 a V600 - Registro M:5,80. D:3,71 ''San Salvador''	62
Figura 74 - Desarrollo de PWP vs Profundidad V100 a V400 - Registro M:5,80. D:3,71 ''San Salvador''	62
Figura 75 - Espectro de respuesta con To=1,53 s y períodos para de distintas Velocidades de ondas por debajo de los primeros 18,5 m del perfil - Registro de Mw:7,35 - Distancia Epicentral: 1,79 km ''Tabas Irán''	63
Figura 76 - Desarrollo de PWP vs Profundidad V500 a V600 - Registro de Mw:7,35 - Distancia Epicentral: 1,79 km ''Tabas Irán''	64
Figura 77 - Desarrollo de PWP vs Profundidad V100 a V400 - Registro de Mw:7,35 - Distancia Epicentral: 1,79 km ''Tabas Irán''	64

Figura 78 - Espectro de respuesta con $T_0=1,53$ s y períodos para de distintas Velocidades de ondas por debajo de los primeros 18,5 m del perfil - Registro de $M_w:6,93$ - Distancia Epicentral:74,16 km "Loma Prieta"	65
Figura 79 - Desarrollo de PWP vs Profundidad V500 a V600 - Registro de $M_w:6,93$ - Distancia Epicentral:74,16 km "Loma Prieta"	66
Figura 80 - Desarrollo de PWP vs Profundidad V100 a V400 - Registro de $M_w:6,93$ - Distancia Epicentral:74,16 km "Loma Prieta"	66
Figura 81 - Espectro de respuesta con $T_0=1,53$ s y períodos para de distintas Velocidades de ondas por debajo de los primeros 18,5 m del perfil - Registro de $M_w:6,61$ - Distancia Epicentral: 42,3 km "Tottori Japan"	66
Figura 82 - Desarrollo de PWP vs Profundidad V500 a V600 - Registro de $M_w:6,61$ - Distancia Epicentral: 42,3 km "Tottori Japan"	67
Figura 83 - Espectro de respuesta con $T_0=1,53$ s y períodos para de distintas Velocidades de ondas por debajo de los primeros 18,5 m del perfil Vs - Registro de $M_w:5,20$ - Distancia Epicentral:4,33 km "Managua_Nicargua-02"	67
Figura 84 - Desarrollo de PWP vs Profundidad V500 a V600 - Registro M:5,10. D:4,33 "Managua_Nicaragua-02"	68
Figura 85 - Desarrollo de PWP vs Profundidad V100 a V400 - Registro M:5,10. D:4,33 "Managua_Nicaragua-02"	68
Figura 86 - Registro M:5,80. D:3,71 "San Salvador" - Relación entre el esfuerzo cíclico con respecto al N1,60 del perfil para estimar licuación. Definido por (Seed e Idriss, 1971). Según cita (Kramer, 1996).....	71
Figura 87 Registro M:5,10. D:4,33 "Managua_Nicaragua-02" - Relación entre el esfuerzo cíclico con respecto al N1,60 del perfil para estimar licuación. Definido por (Seed e Idriss, 1971). Según cita (Kramer, 1996).....	71
Figura 88 - Relación entre aceleración pico en roca con la aceleración en superficie (Idriss, 1990)	72

Índice de Tablas

Tabla 1 - Modelos de Presión de Poros, (Youssef M. A. Hashash, 2017).	23
Tabla 2 - datos de ensayos realizados al perfil de Treasure Island (Daniel, G. 1994).	25
Tabla 3 - Modelos de Arena para el método de Dobry & Matasovic, (Youssef M. A. Hashash, 2017).	25
Tabla 4 - Datos de ensayos de Atterberg realizados al perfil de Treasure Island, (Daniel, G. 1994)	26
Tabla 5 - Modelos de arcillas para el método de Matasovic & Vucetic. (Youssef M. A. Hashash, 2017)	27
Tabla 6 - Parámetros de análisis no Lineal para todo el Perfil	27
Tabla 7 - DEEPSOIL - tabla de datos avanzados - Parámetros de Presión de Poros.	27
Tabla 8 - Características Geológicas del Perfil Geotécnico de Treasure Island con Parámetros de Análisis para DEEPSOIL.	28
Tabla 9 - Rangos de Intensidades requeridas para alcanzar la licuación - Potencial de licuación utilizando la intensidad del sector fuerte del sismo. (Echezuría, H. 2017).	37
Tabla 10 - Tabla comparativo Respuestas en análisis Lineal y No Lineal	48
Tabla 11 - Velocidades de Onda con periodos Fundamentales.....	61
Tabla 12 - Resultados de evaluación por el método del CSR para registros de distintas velocidades.	69

Apéndice

Apéndice 1	78
A1-1 - mejor ajuste correlacionando Vs (m / s) con el parámetro F del modelo de presión de agua de poro de Dobry para arenas. b) Carlton (2014), mejor ajuste correlacionando FC (%) al parámetro s del modelo de presión de agua de poro Dobry para arenas (Hashash, Youssef M. A, 2017)... ..	
	78
Apéndice 2	79
A2-1 - Relación de Vacíos vs Esfuerzo cíclico (γ_c) - (Matasovic, Vucetic. 1992).	
	79
A2-2 - Presión de Poros vs Esfuerzo cíclico (γ_c) - (Matasovic, Vucetic. 1992)... ..	
	79
A2-3 - Correlaciones Propuestas por Carlton (2014), (Hashash, Youssef M. A, 2017)... ..	
	80
Apéndice 3	80
A3-1 - Esfuerzo cortante vs relación de vacios, (Echezuría H. 2018).....	
	81
A3-2 - Degradación del módulo cortante con la deformación cortante al desarrollarse la presión de poros, (Matasovic, Vucetic. 1991).....	
	81
Apéndice 4	81
A4-1- DEEPSOIL - Diagramas Tensión Deformación - Desarrollo de presión de poros....	
	81
Apéndice 5	82
A5-1.1- Base de datos Magnitud 5.00 - 5.99 - Incidencia de Presión de poro, selección de registros a analizar.	
	82
A5-1.2 - Base de datos Magnitud 6.00 - 6.99 - Incidencia de Presión de poro, selección de registros a analizar.....	
	83

A5-1.3 - Base de datos Magnitud 7.00 - 7.99 - Incidencia de Presión de poro, selección de registros a analizar.	84
A5-2.1 - Resultados de Análisis - Sismos de magnitud 5.00 a 5.99 que desarrollaron Presión de Poros.	85
A5-2.2 - Resultados de Análisis - Sismos de magnitud 6.00 a 6.99 que desarrollaron Presión de Poros.	86
A5-2.3 - Resultados de Análisis - Sismos de magnitud 7.00 a 7.99 que desarrollaron Presión de Poros.	87
Apéndice 6	88
A6-1 - Calculo de Velocidad Promedio y Periodo Fundamental del perfil con una velocidad en el estrato inferior de 300 m/s... ..	89
A6-2 - Tabla de resultados cambiando las velocidades de las ondas de corte en el estrato inferior por el CSR... ..	90

Capítulo 1

1.1. Planteamiento del Problema

Los métodos constructivos pueden abarcar gran parte del diseño sísmico estructural para salvaguardar la vida de los ciudadanos, dentro de una estructura y las adyacentes a esta. No obstante estos no son inmunes a las condiciones de sitio donde reposan. Para esto último es posible la ocurrencia de licuación caracterizado por un cambio brusco en las condiciones del suelo, generando un corrimiento en sus estratos que causan un asentamiento brusco o colapso de las estructuras sobre o adyacentes a él.

En esta TEG se evaluará el análisis no lineal en un perfil geotécnico sometido a registros sísmicos de distintas magnitudes y distancias. Estos eventos sísmicos se transitarán en estratos arenas y arcillas con parámetros representativos de lo que se esperaría de perfiles geotécnicos similares en distintas provincias sísmicas. El desarrollo de la presión de poros en dichos estratos licuables no ha sido considerado en la mayoría de los estudios de respuesta dinámica por no contar con un modelo integrado en tiempo real. No obstante, para este TEG se cuenta con uno que sí realiza este tipo de análisis. El tránsito de las ondas desde el lecho rocoso se evaluará junto con la presión de poros, a fin de establecer cómo ésta incide en la variación de la energía transmitida y cómo contribuye con la degradación del módulo de corte del suelo del sitio de estudio. Adicionalmente se analizará cómo todo lo anterior afecta tanto la duración como la energía del sector fuerte del Acelerograma del registro sísmico de respuesta.

1.2. Alcance y Limitaciones

Se realizarán simulaciones con acelerogramas obtenidos de bases de datos sísmicos internacionales digitalizados de distintas magnitudes y distancias. Los sismos seleccionados constituyen la base de datos para este estudio, que consta con 206 registros acelerográficos en total. Las simulaciones se realizarán en modo no lineal acoplado con generación de presión y equivalente lineal con roca elástica en el fondo del perfil.

Se considerarán para este estudio sismos con magnitudes de Momento entre 5,00 y 7,99.

Se tomará un perfil geotécnico similar al de "Treasure island" el cual licuó con el sismo de Loma Prieta de 1989 y existen registro reales de ese mismo. A dicho perfil se le aplicarán los sismos seleccionados en la base de datos de este estudio con lo cual se tendrá la sensibilidad del perfil ante distintos terremotos de cualquier fuente.

Posteriormente, se variarían las velocidades de las ondas de corte en profundidad para contar con distintos periodos fundamentales, a los cuales se le aplicarían algunos de los sismos que causaron licuación en el perfil original. De esta manera se busca evaluar la sensibilidad del período fundamental del perfil geotécnico con los períodos de máxima energía del sismo y las variaciones de los espectros de respuesta y la generación de la presión de poros.

Seguidamente, se comparan las respuestas obtenidas en los distintos perfiles estudiados con los programas desacoplados y acoplados.

El estudio tendrá la limitación de los datos disponibles digitalmente en las bases de datos internacionales.

1.3. Objetivo General

Determinar la influencia de la presión de poros acoplada a la respuesta dinámica del perfil en el Acelerograma de respuesta en superficie.

1.4. Objetivos Específicos

- Evaluar la intensidad de los sectores fuertes de los acelerogramas en superficie (I_{sm}) utilizando el modelo acoplado.
- Comparar el potencial de Licuación estimado con el método de CSR con los estimados utilizando las distintas respuestas en la superficie del modelo acoplado para los distintos perfiles.
- Comparar las respuestas en la superficie del programa con el modelo acoplado con aquellas obtenidas con el programa desacoplado en los distintos perfiles.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Origen de Movimientos Sísmicos

La tierra como ente geológico está en constante movimiento por las corrientes de magma que compromete el manto superior e inferior. El manto superior (temperaturas baja) siendo la corteza exterior del planeta. El manto Inferior (Temperatura altas) siendo este el que está más cerca del núcleo externo y por consiguiente el que está expuesto a las mayores temperaturas del núcleo de la tierra. Este ultimo cambia de temperatura en la transición de los mantos lo que genera una corriente de magma (convección) donde en el manto inferior, siendo más caliente se hace menos denso causando que este ascienda a el manto superior para enfriarse, en su proceso de enfriamiento este transita longitudinalmente por la corteza hasta enfriarse lo suficiente para nuevamente recuperar su densidad y por consiguiente de manera inercial descender al manto inferior y repitiendo este ciclo hasta el fin de los días.

Es en este movimiento transitorio de las corrientes de magma el cual genera en las zonas donde tiene permanente contacto un desgaste y arrastre que posteriormente se convertirán en fracturas en la corteza que alcanzado cierto tiempo se convirtieron en las fallas geológicas activas de hoy en día como lo son el anillo de fuego en el océano pacifico, una vez que estas ya se encuentran fracturadas es en estos puntos donde se acumula el magma, esta acumulación genera desplazamientos en las zonas denominadas dorsal por donde transita el flujo de magma hacia la corteza superior, es en estas zonas donde junto con el arrastre que genera el magma en su paso por lo corteza en donde se generan los quiebres en una búsqueda de esta de recuperar el equilibrio su equilibrio geológico original de masa y densidad, en el proceso al presentarse el quiebre este por ser un evento geológico de gran relevancia al involucrar dos entes masivos como lo son distintas corteza terrestres es donde se genera el movimiento sísmico, como respuesta a la liberación de energía causada por la fractura en la que denominaremos como zona de falla, estas fracturas pueden liberar tanta energía que se tienen registros de eventos que alcanzaron valores superiores a las de una bomba de atómica.

La magnitud de estos movimientos está directamente relacionado con el tipo de zonificación en donde se encuentre la falla y generando distinto tipos de movimientos y fallas que posteriormente en la literatura se establecieron los parámetros para clasificarlos.

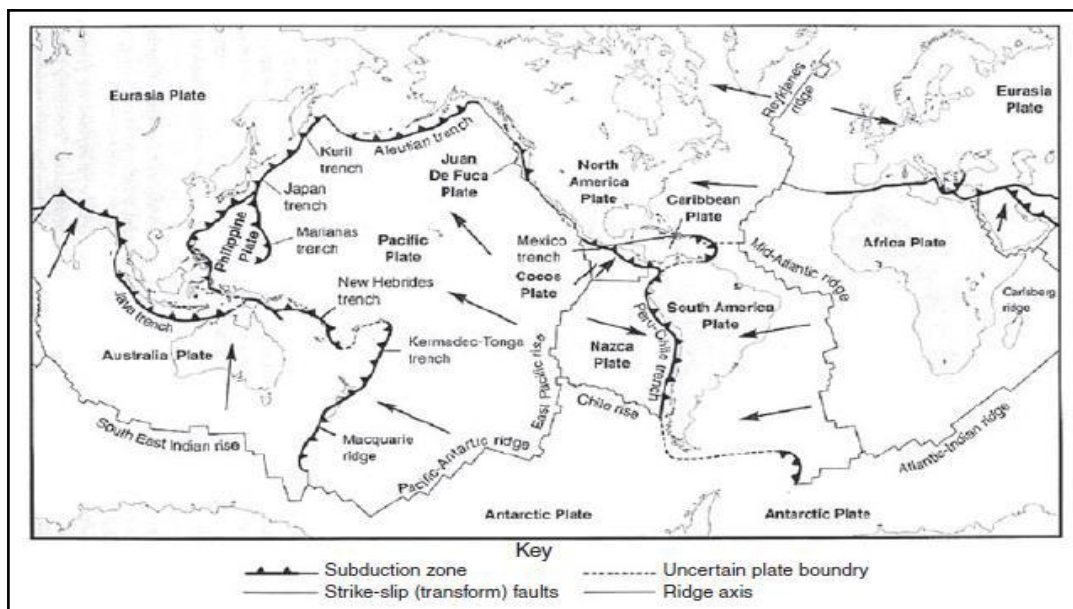


Fig. 1 - Movimiento de placas tectónicas y comportamiento en las zonas de subducción y dorsales (Fowler, 1990)

2.2. Tipos de Fallas geológicas

Una falla sísmica local corresponde al quiebre o ruptura de un perfil geotécnico en específico derivado de un movimiento sísmico de cierta magnitud que cuente con las características de energía necesaria para que el mismo se vea comprometido, dicha quiebre puede derivar de uno de mayor magnitud como los son las fallas geológicas de la corteza terrestre provenientes de las fallas activas.

2.2.1. Falla Normal

Donde se presenta un desplazamiento hacia abajo con respecto a la superficie siguiendo la tendencia del plano de la falla y manteniendo el mismo buzamiento, este por su característica es el más común y el que contiene menor cantidad de energía liberada.

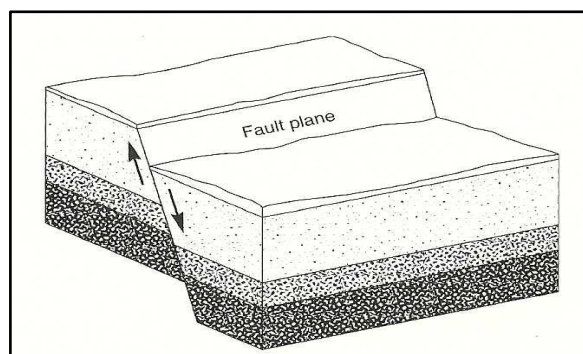


Fig. 2 - Descripción de Falla Normal. (Kramer, 1996)

2.2.2. Falla Transcurrente

Esta es característica ya que el desplazamiento no es de manera vertical sino que todo el desplazamiento se mantiene Horizontal, contiene poca energía al momento de presentarse.

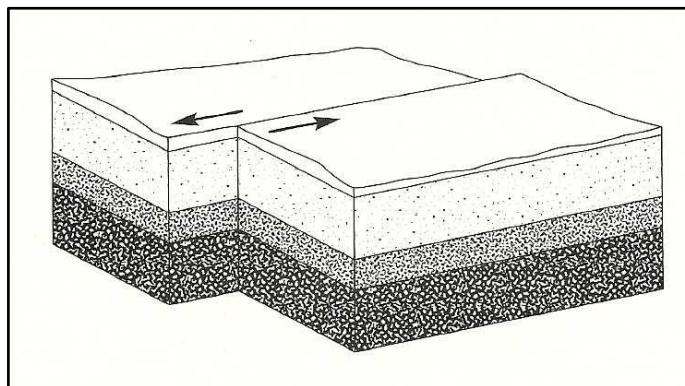


Fig. 3 - Descripción de Falla Transcurrente. (Kramer, 1996)

2.2.3. Falla inversa

En esta ocurre un cabalgamiento o sobre posición por parte de unos de los estratos desplazándose hacia arriba de manera abrupta, estas fallas son características al ser una de las que mayor energía poseen, ya que el poder desplazar dicho estrato en contra de su propio peso hasta posicionarse sobre otro estrato requiere de una gran cantidad de energía superior a las fallas normales y transcurrente, esto genera a su vez que se genere un doble espesor en la zona de ruptura y por consiguiente se presente una mayor atenuación al momento de transitar la onda sísmica por dicha zona.

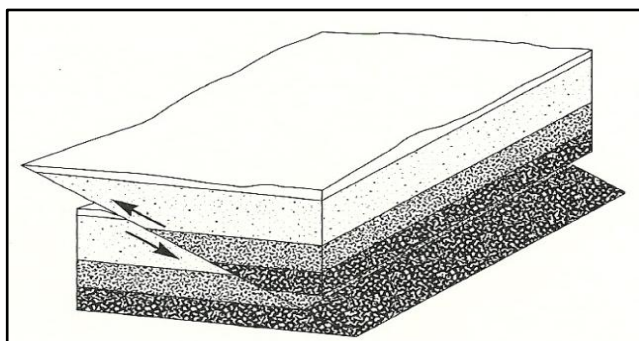


Fig. 4 - Descripción de Falla Inversa. (Kramer, 1996)

2.3. Mediciones Sísmicas

Con tal de definir la metodología para realizar la medición sísmica y de los parámetros que en esta intervienen se definen ciertos conceptos como el foco o hipocentro (focus or hypocenter) siendo este el origen de la falla o de fractura de la corteza o estrato que da origen al movimiento sísmicos, es en este punto donde la energía acumulada es liberada dando origen a todo el desplazamiento, El epicentro (epicenter) correspondería a la localización de dicho foco en la superficie del estrato medido de manera perpendicular desde la superficie hacia el hipocentro, este al estar directamente encima de la zona de falla que por consiguiente tiene la menor distancia de transición de las ondas generadas en el foco hasta la superficie es el que posiblemente presente mayor cantidad de repercusiones originadas por este movimiento, desde este punto hacia las zonas adyacentes, las distancia serán denominadas como distancia epicentral (epicentral distance) la cual define el punto un punto de estudio y al longitud a la cual este se ubica desde la falla en un plano horizontal, esta distancia será un dato indispensable para el estudio sísmico al ser uno de los parámetros que nos indiquen las principales incidencias sísmicas y como estas se relacionan con la energía y magnitud. Véase Fig. 5.

En base la magnitud de la zona de falla se pueden presentar los denominados planos de falla donde tenemos más zonas de interés sísmicos como lo sería la zona de mayores esfuerzos (R3), epicentro (R2), plano de falla (R4), proyección del plano de falla (R5) y el Hipocentro (R1) como se muestra en la Fig. 6.

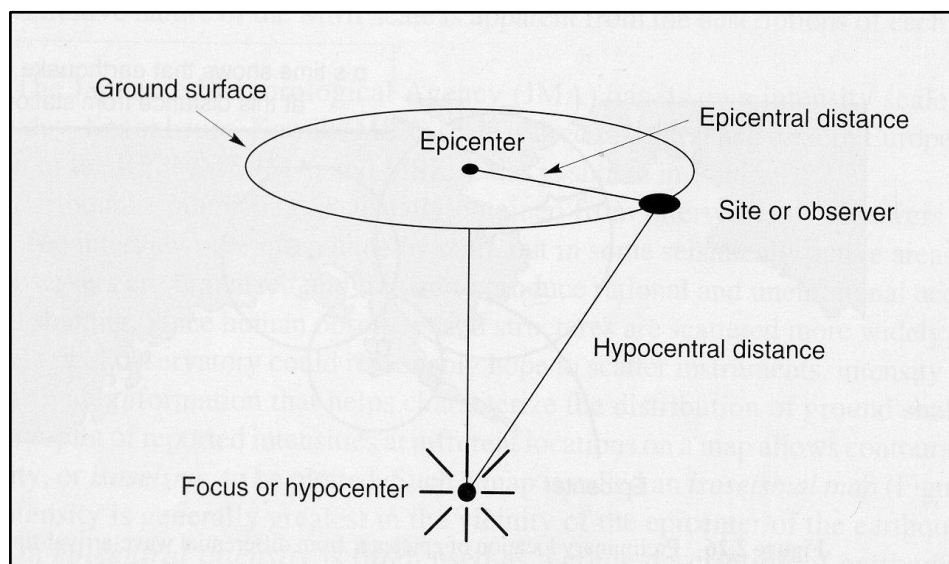


Fig. 5 -Parámetros característicos de una falla (Shakal A., Benreuter, 1981).

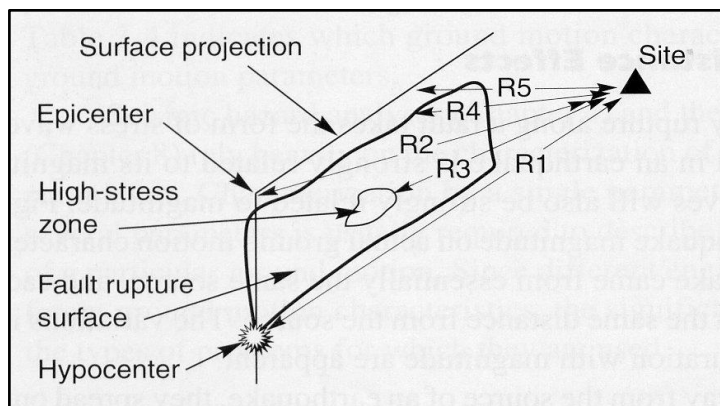


Fig. 6 - Parámetros característicos de un plano de falla (Shakal A., Benreuter, 1981)

2.3.1. Magnitud de Momento

Esta definición de magnitud utiliza un par de vectores de fuerzas separados a cierta distancia que corresponden a la energía necesaria para romper la zona de la falla que genera el movimiento sísmico. Al ser este un método que se basa implícitamente en la energía liberada en la falla cuenta con resultados en la medida más realistas de la energía asociada al sismo.

Para este método Kanamori (1977) estableció la relación numérica de la escala propuesta por Richter con su momento sísmico (M_0) para adecuarlo en Magnitud de momento con la siguiente ecuación;

$$M_w = \frac{2}{3} \times \log(M_0) - 6.07 \dots \dots \dots (1)$$

2.4. Ley de Atenuación

Esta ley plantea cómo varía la amplitud de las variables de intensidad sísmica con la distancia. Herrera. D, Muñoz. H, (2018) prepararon una ley de atenuación para la intensidad del sector fuerte del acelerograma, cuyas gráficas para magnitudes de momento $M=5,5$; $M=6,5$ y $M=7,5$ se ilustran en la Fig. 7 y se utilizarán para este trabajo.

$$10^{(A+Bx5,5+(C+Dx5,5)\log(Re(i))+(E+Fx5,5)x(Re(i)))} \dots \dots \dots (2)$$

Siendo $Re(i)$; la distancia epicentral y los parámetros $A=1.6581$, $B=0.4563$, $C=-0.5011$, $D=0.0614$, $E=-0.0519$ y $F=0.0052$:

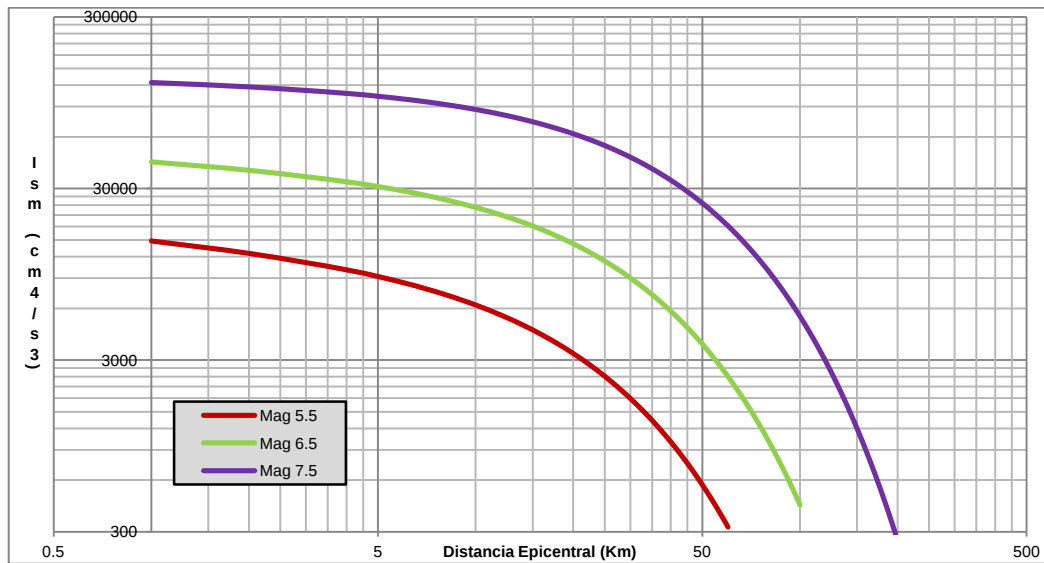


Fig. 7 - Ley de Atenuación (Herrera, D., H. Muñoz, 2018)

2.5. Acelerogramas

Son las respuestas de aceleraciones de un terreno en función del tiempo para la duración de un evento sísmico, estas respuestas son susceptibles a las condiciones geológicas del sitio, a la distancia desde la falla y el sitio de estudio, junto con la energía liberada por el evento sísmico categorizada en magnitud.

Gráficamente en el Acelerograma se tienen picos de aceleraciones, uno de los cuales es el máximo. Generalmente se toma dicho valor máximo como base para los cálculos de amenaza sísmica, considerando que el mismo es representativo de la capacidad de daño del sismo. Sin embargo, se ha demostrado que el tomar únicamente el pico del Acelerograma no es confiable al no considerar el resto de la energía que aporta el sismo y el tiempo por el cual esta se desarrolla.

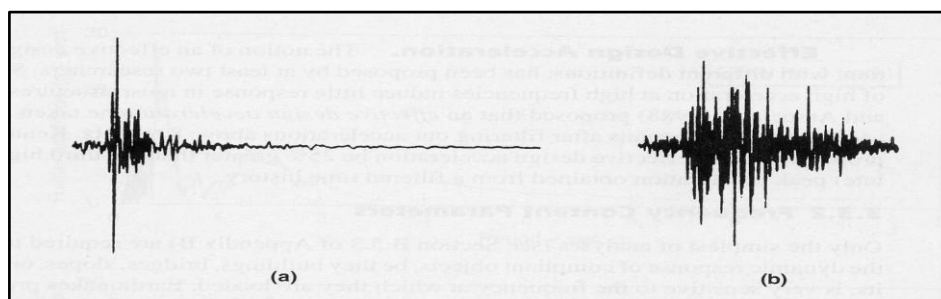


Fig. 8 - Comparación de acelerogramas con picos máximo y distintas duraciones (Kramer, 1996)

En la Fig.8 podemos observar que ambos registros poseen valores aproximados de sus aceleraciones máximas. No obstante el registro de la derecha aporta mucha más energía que el de la izquierda porque tiene aceleraciones altas durante mucho más tiempo que el otro. (Echezuría, 2017).

2.5.1. Sector Fuerte del Acelerograma

Teniendo en consideración que mientras más dure una secuencia de aceleraciones en un registro de tiempo mayor será la energía que el mismo contiene, se plantea la definición del "Sector fuerte del Acelerograma". Dicho sector fuerte (Tsm) es el periodo de tiempo en el cual se presentan los mayores valores de aceleraciones. Véase Fig. 9.

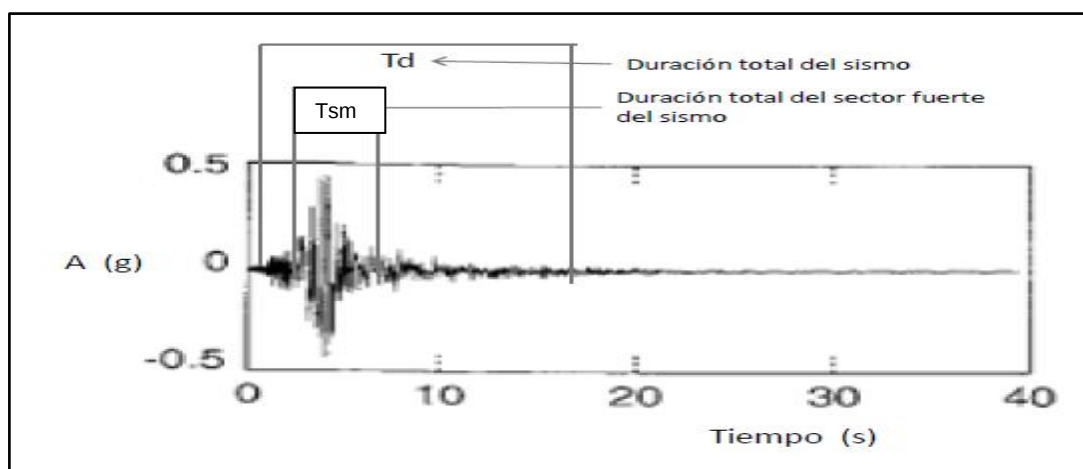


Fig.9 - Sector fuerte del Acelerograma (Kramer, 1996)

Una vez definidos los parámetros más relevantes de un Acelerograma y estos al considerar los datos más representativo se procede a definir los valores de intensidades.

2.5.2. Error Medio Cuadrático de la Aceleración

En un Acelerograma si la representación de los picos valles muestran cierta similitud con respecto al eje cero de aceleración, se considera que la media de estas aceleraciones tiende a cero, esto nos servirá como base al tener que la media de las aceleraciones tiende a cero en función del tiempo podemos simplificar que la suma del cuadrado de estas aceleraciones sería lo mismo que la varianza y a su vez la raíz cuadrada es la desviación estándar de las aceleraciones. Esto dado que el producto de la varianza multiplicado por la duración del terremoto, en nuestro caso del sector fuerte nos arroja una medida de energía lo bastante

consistente de cuanta aporta dicho registro en ese intervalo. En la *Fig. 10* podemos observar la representación grafica de la digitalización de los registros de aceleraciones y como están cumplen con lo anteriormente planteado para calcular el error medio cuadrático Arms.

Varios autores como Echezuría (2017) y los citados por Kramer (1996) a saber: Vanmarcke-Lai (1980) (VL); Trifunac-Brady (1975) (TB) y McCann-Shah (1980) (McS) han dado definiciones para la duración del sector fuerte de un Acelerograma. Los métodos de (VL y TB) usan la intensidad de Arias (1970), la cual es una medida de la energía de todo el registro sísmico, Arias no considera el sector fuerte del Acelerograma. McCann-Shah y Echezuría utilizan el error medio cuadrático pero de manera diferente tratando de ajustarse mejor a la zona de mayor energía del acelerograma. Otra definición de la duración como la de Bolt, se basa en los valores de las aceleraciones que usualmente causan daños en las obras (Kramer, 1996).

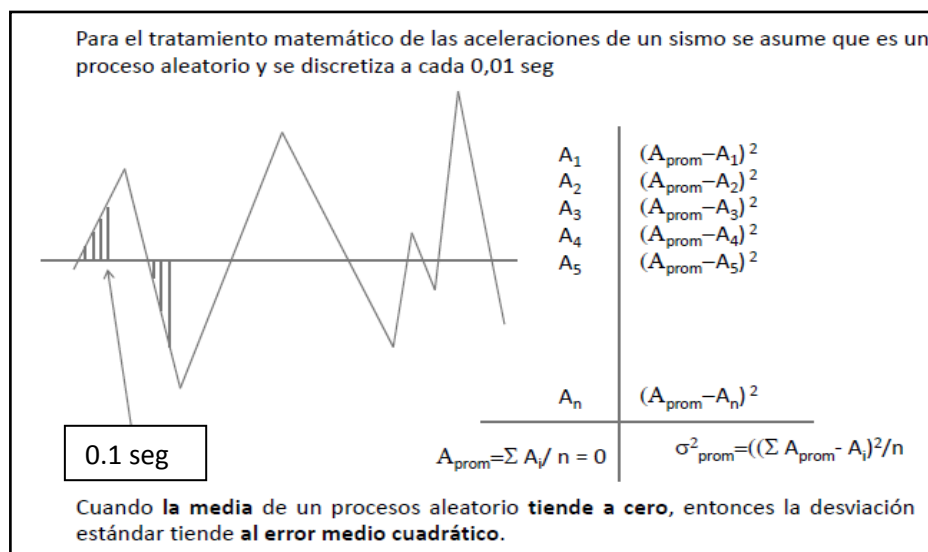


Fig. 10 - Proceso de desratización de un registro de aceleraciones sísmicas para un intervalo de tiempo de $\Delta t = 0,1$ s (Echezuría H., 2017)

2.5.3. Intensidad de Arias

El método de Arias nos permite obtener la energía disipada por un oscilador en un grado de libertad, donde I_0 , es la intensidad de Arias, E , es la energía disipada y w , es la frecuencia del oscilador, véase Ecuación 2.

$$I_0 = \int_0^{\infty} E(\omega) d\omega \dots\dots\dots (2)$$

Arias adaptó esta fórmula para un Acelerograma donde el equivalente a la energía por el producto de la frecuencia correspondería al cuadrado del error medio cuadrático (a_{rms}) por el producto de la duración del registro sísmico (T_d) como se ve en la Ecuación 3.

$$I_0 = (arms)^2 x Td \dots\dots\dots (3)$$

Esto nos indica que la media del cuadrado del error de las aceleraciones podría interpretarse como una potencia promedio constante que actúa en un tiempo igual a la duración del registro, considerando de esta forma tanto el valor de las aceleraciones como su desarrollo en el tiempo.

2.5.4. Intensidad del Sector Fuerte del Acelerograma con la definición de duración de Echezuría.

Echezuría (2017) desarrollo una metodología para definir la duración del sector fuerte del acelerograma considerando la energía alrededor de la aceleración máxima del sismo. La metodología se basa en la forma que varían tanto la intensidad (energía) y el cuadrado del error medio cuadrático para funciones armónicas y aleatorias o compuestas. Al comenzar el cómputo del error medio cuadrático (A_{rms}) desde la máxima aceleración se tiene, para una función armónica, véase Fig. 11 que para valores pequeños de la duración los valores de las aceleraciones involucradas en el cálculo del error medio cuadrático son parecidas a la aceleración máxima, con lo cual el (A_{rms}) será muy pequeño.

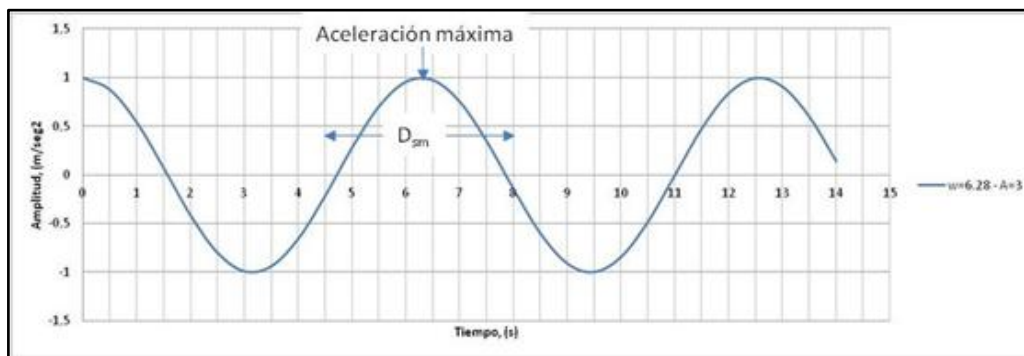


Fig. 11 - Función periódica de aceleración indicando la amplitud máxima y la duración del sector fuerte de dicha función. (Echezuría H., 2017)

A medida que aumenta la duración, comienzan a incluirse aceleraciones más pequeñas con lo cual el (A_{rms}) comienza a aumentar hasta alcanzar un valor de la duración equivalente a algo más del medio ciclo, donde alcanza un máximo. Eso se debe a que al aumentar la duración se incluyen aceleraciones con amplitudes cada vez más alejadas de la amplitud máxima. En otras palabras, el (A_{rms}) aumenta cuando incorporamos valores pequeños de las aceleraciones ya que nos alejamos del valor de la aceleración máxima. Contrariamente, cuando se incorporan aceleraciones crecientes entonces el (A_{rms}) disminuye ya que nos aproximamos a los valores de la aceleración máxima. Bajo esta premisa se realizarán las definiciones del inicio y final del sector fuerte del Acelerograma para considerar los cálculos de intensidades que le corresponden, esto se demostrará de manera práctica con un registro más adelante. Para reducir el impacto de los cambios en los valores de (A_{rms}), Echezuría recomienda trabajar con el cuadrado de dicho parámetro.

Al aplicar estos mismos conceptos acelerogramas compuestos se obtienen resultados similares a los descritos para una función periódica y es posible encontrar el inicio y el fin del sector fuerte observando los cambios en el gráfico del cuadrado de error medio cuadrático.

La intensidad del sector fuerte del acelerograma se puede plantear en los mismos términos que se plantea la intensidad de Arias, sólo que considerando la duración del sector fuerte (T_{sm}) en lugar de la del registro completo (T_d) tal como se indica en la ecuación 4, abajo. Las duraciones y las intensidades del sector fuerte de los acelerogramas incluidos en la base de datos de este estudio se determinaron con el Método de Echezuría.

$$I_{sm} (HE) = Arms^2 x T_{sm} \dots\dots\dots (4)$$

2.6 Metodología de Dobry and Matasovic para presión de poros en arenas.

Dobry's presentó evidencia de que la acumulación de presión de poro en la (prueba de tensión controlada) es principalmente una función de la relación de vacíos de arena (e) y el nivel de amplitud de la tensión cíclica (Y_{cv}), y la amplitud de la tensión juega un papel clave. Por otro lado, en Cyclic (Pruebas controladas por estrés), la acumulación de presión de poros es, además de la relación de vacío, muy afectada por (tejido de arena), alteración de la muestra, envejecimiento y K_0 . Todos los factores que disminuyeron la resistencia cíclica de las arenas también disminuyen el módulo de cizallamiento de la arena, G . Esta evidencia es consistente con el hecho del observador de que su relación, tensión de corte $Y = \tau/G$. Desarrolló un modelo simple (PWP) basado directamente en los resultados de una serie de pruebas controladas por tensión cíclica sin drenar.

Los parámetros de generación de presión de poros (P.W.P.) de Matasovic (1992) deben determinarse mediante un procedimiento de ajuste de curva de datos de pruebas de laboratorio sin drenar cíclicos. Una vez

que se obtienen los datos, se puede usar la siguiente ecuación, véase ecuación (5) propuesta por Matasovic y Vucetic (1993, 1995), para determinar los parámetros de mejor ajuste que se usarán en el análisis;

$$u_N = \frac{p * f * N_c * F * (\gamma_c - \gamma_{tvp})^s}{1 + f * N_c * F * (\gamma_c - \gamma_{tvp})^s} \dots\dots\dots (5)$$

El parámetro **u_N** se define como la relación de presión de agua con exceso de poro normalizada ($u = u' / \sigma_v'$). **Neq** es el número equivalente de ciclos calculado para la reversión de tensión más reciente. Para ciclos de tensión uniformes, el número equivalente de ciclos es el mismo que el número de ciclos de carga. Para los ciclos de tensión irregular, dado que el número de ciclos no aumenta uniformemente, Neq se calcula a las reversiones de tensión utilizando la u_N obtenida del paso anterior y luego se incrementa en 0.5 para el paso actual.

El parámetro (**γ_{tvp}**) es el valor de tensión de cizallamiento por debajo del cual las inversiones no generarán un exceso de presión de agua en los poros.

El parámetro (**f**) se utiliza para tener en cuenta la carga en múltiples dimensiones. f = 1 se utiliza para el movimiento en una dirección (1D). f = 2 se utiliza para el movimiento 2D. Tenga en cuenta que asignar un valor de f = 2 no duplica el exceso de presión de agua del poro, porque f está incluido tanto en el numerador como en el denominador de la ecuación. El resto de los parámetros se explica con mas detalles en el Apéndice (1).

2.6.1 Parámetro de Degradación

Matasovic (1993) representa la degradación de la resistencia al corte y la rigidez al corte del suelo dentro del modelo MKZ mediante la inclusión de dos índices de degradación. Véase la formula (7);

$$\begin{aligned} \delta_G &= \sqrt{1 - u^*} \\ \delta_\tau &= 1 - (u^*)^v \end{aligned} \dots\dots\dots (7)$$

Donde (δ_G) es la función de degradación del módulo de corte, (δ_τ) es la función de degradación del esfuerzo de corte, (u^*) es el exceso de presión de poros normalizado por el esfuerzo de sobrecarga inicial efectivo, y v es un parámetro de ajuste de curva para modelar mejor la degradación de la resistencia al corte con la generación de presión de poro en exceso.

Estas formulaciones de parámetros de degradación se implementan para todos los modelos de suelo, excepto el modelo Matasovic y Vucetic para arcillas. Los parámetros de degradación para el modelo de Matasovic y Vucetic para las arcillas se definen por Matasovic (1995) como:

$$\delta G = \delta \tau = N^{-1} \dots\dots\dots (8)$$

Donde δG es la función de degradación del módulo de corte, $\delta \tau$ es la función de degradación de la tensión de corte, y N es el número de ciclos equivalentes.

2.7 Metodología de Matasovic & Vucetic para presión de poros en arcilla

Mladen Vucetic. Ricardo Dobry. (1986) plantean las correlaciones de ensayos de laboratorio para su modelo de presión de poros, esto se encuentre en más detalle en el Apéndice (2).

De esto, **Matasovic y Vucetic (1995)** proponen la siguiente ecuación para la generación de presión de agua de poros en exceso para las arcillas:

$$u_N = AN_c^{-3s(\gamma_c - \gamma_{tvp})^r} + BN_c^{-2s(\gamma_c - \gamma_{tvp})^r} + CN_c^{-s(\gamma_c - \gamma_{tvp})^r} + D \dots\dots\dots (9)$$

El parámetro u_N es el mismo que en la relación de presión de agua con exceso de poro normalizada ($ru = u' / \sigma_v'$)

Neq es el número equivalente de ciclos calculado para la reversión de tensión más reciente. Para ciclos de tensión uniformes, el número equivalente de ciclos es el mismo que el número de ciclos de carga. Para los ciclos de tensión irregular, ya que el número de ciclos no aumenta uniformemente, y **Neq** se calcula utilizando la u_N obtenida del paso anterior y luego se incrementa en 0.5 para el paso actual.

γ_{tvp} es el valor de la tensión de corte del umbral por debajo del cual, las inversiones no generarán un exceso de presión de agua en los poros.

Carlton (2014) presenta correlaciones empíricas para los parámetros de ajuste de curva s , r , A , B , C y D . véase Apéndice (2. A2-3), (líneas negras continuas) se utilizan en las correlaciones. El parámetro t en la figura corresponde a $s * (\gamma_c - \gamma_{tvp})^r$. Las correlaciones empíricas toman las siguientes formas funcionales, véase Fig. 12.

Bajo esta metodología se plantearán los parámetros que conciernen a las arcillas en este trabajo.

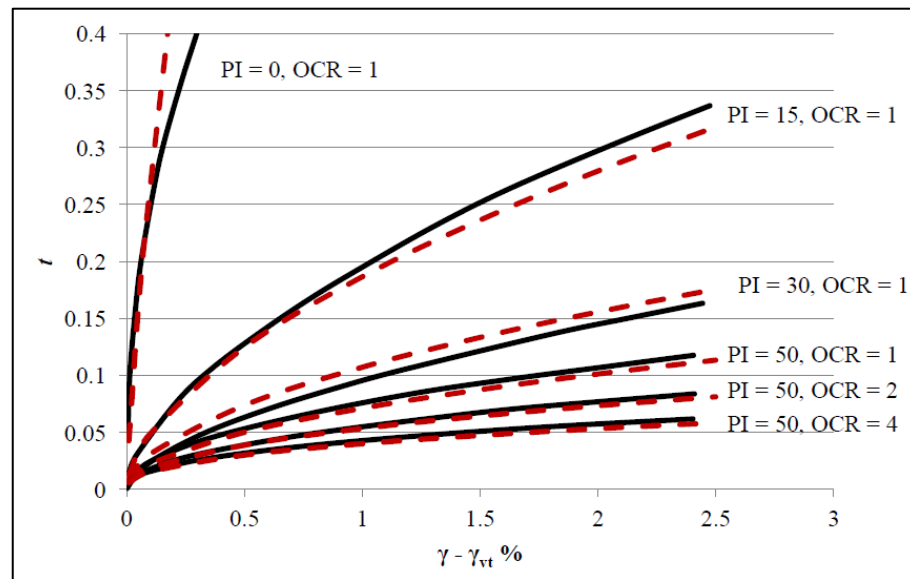


Fig.12 - Comparación de las curvas dadas por Matasovic (1993) y Vucetic (1992) (líneas negras sólidas) para t , para diferentes valores de PI y OCR y las correlaciones presentadas (líneas rojas punteadas). (Carlton, 2014) como lo cita (Youssef M. A. Hashash, 2017)

2.8. Licuación

Es el fenómeno geológico originado por un aumento brusco en la presión de poros durante posterior a la ocurrencia de un movimiento sísmico o evento artificial que conlleve gran cantidad de energía. Dicho aumento en la presión de poros es consecuencia de la tendencia al cambio en la relación de vacíos durante procesos de corte cíclico. Los parámetros del mismo como la capacidad portante y que dependiendo de las características tanto del suelo como de la energía incide en el evento, derive en una ruptura o quiebre del ordenamiento del perfil.

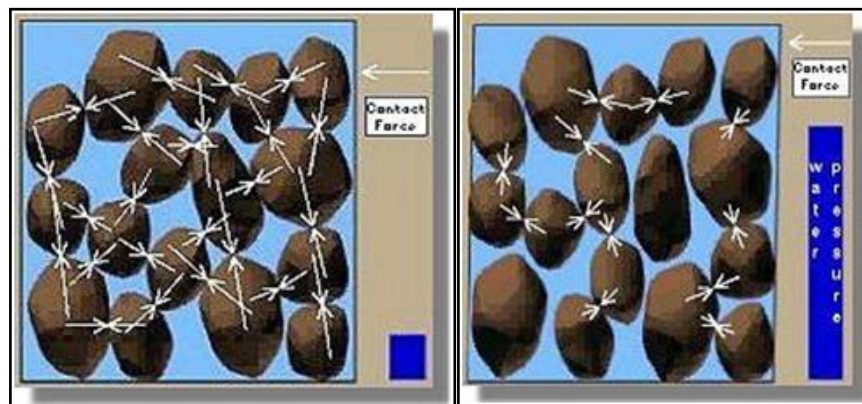


Fig.13 - Comportamiento de vacíos luego de un esfuerzo al suelo, (Echezuría H. 2018)

En el caso de arenas al ser sometidas a un corte cíclico producto de algún esfuerzo, tienden en general a disminuir su volumen, debido al reacomodo de los granos, ya que los más pequeños buscan llenar los poros o vacíos, véase Fig. 13. Este comportamiento se explica con más detalle en el Apéndice (3). Esa tendencia a compactarse de la arena para cualquier densidad relativa por reducción de su relación de vacíos es la que causa el aumento de presión de poros durante el evento sísmico.

2.9. Modulo Cortante del Suelo.

El módulo de corte máximo está definido como la tangente en la zona muy próxima a cero de las deformaciones de la curva de columna vertebral del material. En este caso el rango de deformaciones cortantes de la zona elástica del suelo está en el orden de $3 \times 10^{-4} \%$ para las arenas, entonces en cualquiera de esta zona que trazamos allí en módulo tangente a esta curva. Véase Fig. 14.

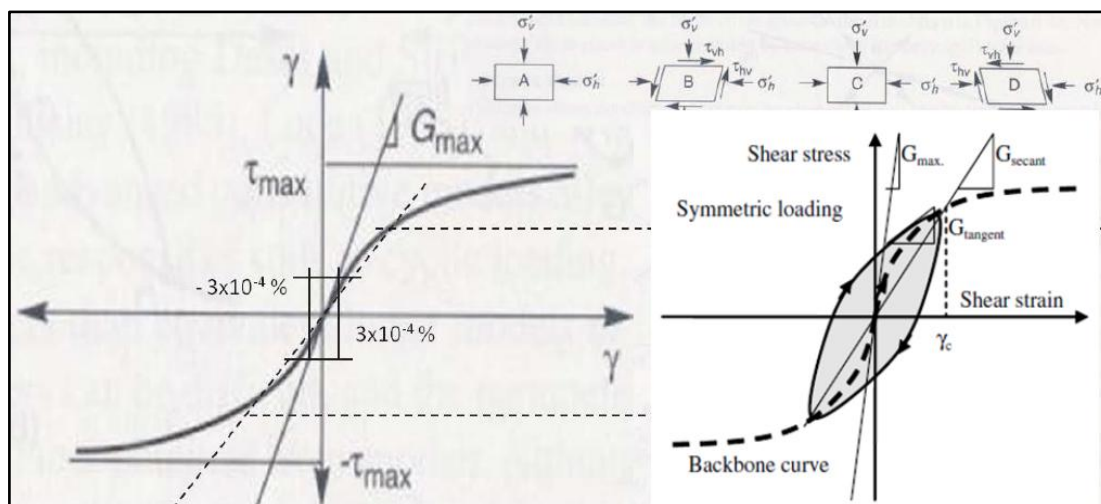
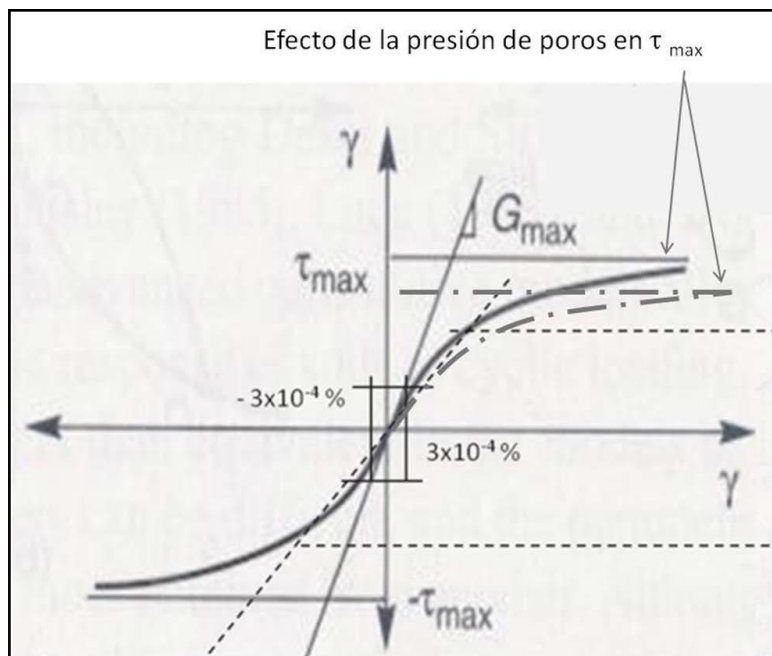


Fig. 14 - Diagrama de tensión cortante vs esfuerzo (Matasovic, Vucetic. 1991)

Este modulo se obtiene con el paso de las ondas que son de pequeña amplitud, que son generadas para ver cuál es la velocidad de las ondas de corte en el depósito. Estas ondas son normalmente generadas de manera artificial, sin embargo su función es comprobar el comportamiento del estrato basado en estas ondas. Al aplicar las cargas cíclicas al ya tener la primera carga de menor amplitud, evaluando está en una dirección, nótese que pasa por cero, luego vuelve a otra dirección de manera cíclica, lo que estamos haciendo es que ella responda al inicio por la curva de columna vertebral y al descargarla entonces ella alcanza un punto en el que hay cero esfuerzo cortante, se recupera muy poco la deformación y se mantiene una deformación cortante. De seguir cortando vamos a encontrar que llegamos hasta la curva de columna vertebral, véase Fig. 14.

Si se hace la relación entre modulo (G_{max}) y el modulo (G secante) obtenemos un valor de la deformación cortante (γ_c), a distintos valores de γ_c junto con la relación G/G_{max} podemos determinar el rango en el cual se encuentra el suelo. Véase apéndice para los resultados gráficos de estos ensayos (3. A3-2).

Cuando además del proceso de degradación por la deformación cortante también ocurre un incremento en la presión de poros lo que va a ocurrir es que la curva que antes tenía respuesta sobre la columna vertebral va a cambiar a la que se muestra segmentada, véase *Fig. 15*, en otras palabras, el suelo pierde rigidez debido al incremento de presión de poros, esto implica un proceso de reducción de la capacidad de tomar corte de la arena ya que se encuentra en una condición más débil por la incidencia de presión de poros, es decir un aflojamiento de la arena.



Capítulo 3

Marco Metodológico

Este T.E.G. se centrará en calcular la respuesta dinámica de un perfil geotécnico en el cual existen arenas licuables considerando el efecto de la presión de poros durante el movimiento sísmico. A tal efecto, se utilizará un método no lineal para la evaluación de la respuesta del perfil que permite la generación de la presión de poros tanto en arenas como en arcillas durante la ocurrencia del sismo. Estos resultados se compararán con los obtenidos mediante la aplicación de métodos equivalentes lineales también utilizado para obtener dicha respuesta.

La diferencia en la respuesta dinámica será evaluada con la ayuda de la intensidad del sector fuerte del Acelerograma (I_{sm}) obtenido en la superficie del terreno, la cual es una medida directa de la energía del sismo. Para calcular dicha energía se utilizará la definición de duración del sector fuerte del Acelerograma de Echezuría (2017).

Para la conducción del análisis se utilizará un perfil Geotécnico similar al del sitio Treasure Island de California, cuya caracterización ha sido ampliamente estudiada y ha sido utilizada antes para evaluar el cambio en el parámetro I_{sm} con la distancia epicentral por Herrera, M. Muñoz, M. (2018). Para obtención de la respuesta dinámica del perfil se utilizará el programa DEEPSOIL (Youssef M. A. Hashash, 2017), el cual es capaz de realizar análisis lineales equivalentes y no lineales incluyendo en este último caso la incorporación del desarrollo de la presión de poros en los estratos de suelos.

Debido a que el programa DEEPSOIL V7.0 (Youssef M. A. Hashash, 2017) es de reciente publicación y el perfil de Treasure Island es estudiado por haber licuado durante el sismo de Loma Prieta de 1989, no fue posible encontrar en la literatura los parámetros requeridos por los modelos para generación de presión de poros contenidos en dicho programa. Por lo tanto, fue necesario encontrar estratos similares debidamente estudiados con los parámetros requeridos para así poder completar la información requerida para realizar el estudio. Por eso el perfil estudiado en este TG es similar al de Treasure Island y no se pretende hacer una similitud con la generación de presión de poros ocurrida en ese sitio particular. Lo que se desea es estudiar un perfil con características geotécnicas conocidas sometido a distintos sismos de diferentes magnitudes y distancias para evaluar la influencia de las características del sismo en la generación de licuación.

Los registros sísmicos (acelerogramas en roca) utilizados para conducir los análisis se obtuvieron a partir del PEER Ground Motion Data Base la cual tiene registros en roca para distintos tipos de fallas. Debido a que uno de los objetivos del TG es evaluar la licuación para distintas magnitudes a diferentes distancias epicentrales, se utilizaron sismos con magnitudes entre 5,0 y 7,9 con distancias epicentrales representativas para cada magnitud. De esta manera es posible realizar una estimación de la probabilidad de licuación dadas las condiciones del sitio y compararla con los métodos existentes para evaluar la ocurrencia de dicho fenómeno. Las intensidades del sector fuerte del sismo en superficie fueron comparadas con valores estimados de intensidad cíclica requerida para licuar proveniente de ensayos de laboratorio estimada por Echezuría, (2017).

3.1. Registro de Acelerogramas en Roca

Estos fueron obtenidos de la base de datos norteamericana PEER Ground Motion Data Base (Pacific Earthquake Engineering Research Center), en la base de datos denominada NGA-West2 que cuenta con los parámetros necesarios para este trabajo, en esta fueron seleccionados diferentes registros variando su magnitudes entre 5.00 hasta 7.99, distintas distancias epicentrales y distintos tipos de fallas, seleccionando como dato a evaluar en el Software DEEPSOIL la dirección más fuerte de cada registro.

Paso 1; Entrar en la página principal del portal y seleccionar la base de datos NGA-West2;

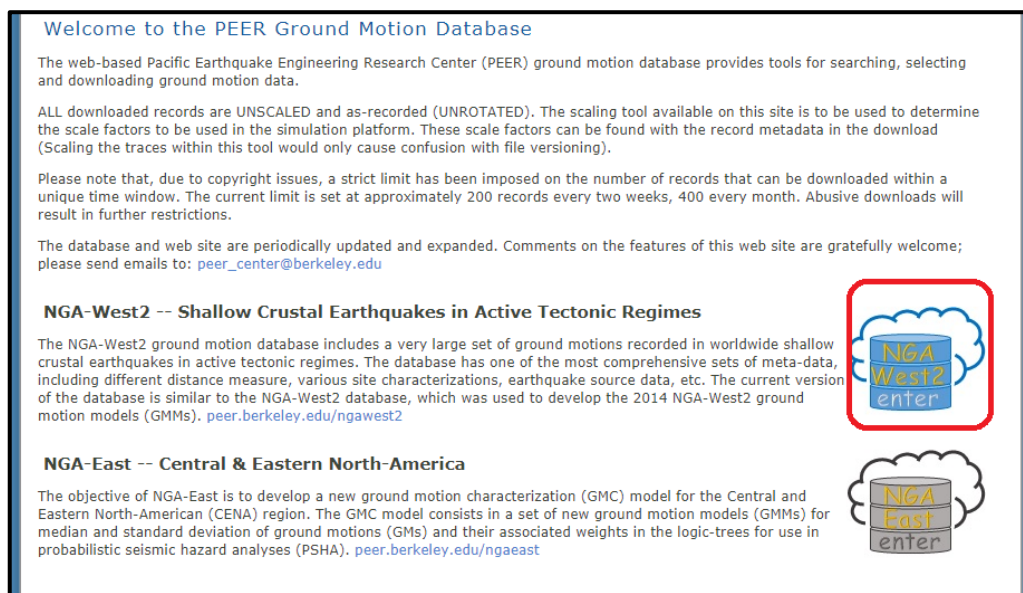


Fig. 16 - Pagina principal del portal web del PEER Ground Motion

Paso 2; Registrarse como usuario

Fig.17 - Registro de Usuario en el portal.

Paso 3; Seleccionar registros ‘No Escalados’

Fig. 18 - Selección de tipo de registro a buscar.

Paso4; Seleccionamos la Magnitud o intervalo de la misma, tipo de falla, distancia epicentro o algún otro patrón de nuestro interés;

Fig. 19 - Patrones de búsqueda del portal de la base de datos.

Paso 6; Se seleccionan los datos en formato .AT2 o .TXT que utiliza el Software DEEPSOIL, véase Fig. 20.

SearchResults.csv	01/04/2019 02:25 ...	Archivo de valores...	11 KB
RSN45_LYTLECR_DCF090.AT2	01/04/2019 02:25 ...	AT2 File	42 KB
RSN45_LYTLECR_DCF090.DT2	01/04/2019 02:25 ...	DT2 File	42 KB
RSN45_LYTLECR_DCF090.VT2	01/04/2019 02:25 ...	VT2 File	42 KB
RSN45_LYTLECR_DCF180.AT2	01/04/2019 02:25 ...	AT2 File	42 KB
RSN45_LYTLECR_DCF180.DT2	01/04/2019 02:25 ...	DT2 File	42 KB
RSN45_LYTLECR_DCF180.VT2	01/04/2019 02:25 ...	VT2 File	42 KB
RSN45_LYTLECR_DCFDWN.AT2	01/04/2019 02:25 ...	AT2 File	42 KB
RSN45_LYTLECR_DCFDWN.DT2	01/04/2019 02:25 ...	DT2 File	42 KB
RSN45_LYTLECR_DCFDWN.VT2	01/04/2019 02:25 ...	VT2 File	42 KB

Fig. 20 - Archivos extraídos de la descarga de un registro.

Paso 5; Seleccionamos de los Registros los que cumplen con nuestro patrón de búsqueda y descargamos (Download Time Series Records) el archivo .rar con todos los datos. Véase Fig. 21.

Estos Registros se adicionaran al software de análisis DEEPSOIL para luego transitarlos en el perfil geotécnico seleccionado.

Click heading of the column to be sorted in ascending order

☐ Rescale Using Checked Records

☐	view	37	SRSS	38	-	1.0	-	31.9	37.9	0.0	Borrego Mtn	1968	LB - Terminal Island	6.63	strik
☐	view	38	SRSS	39	-	1.0	-	25.0	37.4	0.0	Borrego Mtn	1968	Pasadena - CIT Athenaeum	6.63	strik
☐	view	39	SRSS	40	-	1.0	-	19.3	28.0	0.0	Borrego Mtn	1968	San Onofre - So Cal Edison	6.63	strik
☐	view	40	SRSS	41	-	1.0	-	4.9	10.1	0.0	Lytle Creek	1970	Castaic - Old Ridge Route	5.33	Reve Obli
☐	view	41	SRSS	42	-	1.0	-	1.4	3.2	0.0	Lytle Creek	1970	Cedar Springs Pumphouse	5.33	Reve Obli
☐	view	42	SRSS	43	-	1.0	-	3.4	21.9	0.0	Lytle Creek	1970	Cedar Springs, Allen Ranch	5.33	Reve Obli
☒	view	43	SRSS	44	-	1.0	-	7.5	18.3	0.0	Lytle Creek	1970	Colton - So Cal Edison	5.33	Reve Obli
☐	view	44	SRSS	45	-	1.0	-	1.0	2.2	0.1	Lytle Creek	1970	Devil's Canyon	5.33	Reve Obli
☐	view	45	SRSS	46	-	1.0	-	5.2	12.8	0.0	Lytle Creek	1970	LA - Hollywood Stor FF	5.33	Reve Obli
☐	view	46	SRSS	47	-	1.0	-	3.9	6.9	0.0	Lytle Creek	1970	Lake Hughes #1	5.33	Reve Obli
☐	view	47	SRSS	48	-	1.0	-	5.4	10.2	0.0	Lytle Creek	1970	Puddingstone Dam (shutment)	5.33	Reve Obli

Download Options

Download Search Results (metadata+spectra) **Download Time Series Records (metadata+spectra+traces)**

Fig. 21 - PEER Ground Motion - tabla de registros que nos arroja la base de datos que cumplen con los patrones de nuestra búsqueda.

3.2. Acelerogramas en Superficie

Para evaluar cómo influye el desarrollo de la presión de poros de un perfil geotécnico en la respuesta dinámica en superficie y en el estrato antes de desarrollarse la misma se analizaron los registros de la base de datos generada para este trabajo y se tomaron aquellos que demostraron un desarrollo de presión de poros superior al **80%**.

La base de datos generada para el TG cuenta con **206** registros de los cuales un total de **62** registros si desarrollaron los niveles de presión de poros indicados antes. Esto con la finalidad de evaluar cómo cambia la intensidad del sector fuerte del Acelerograma en la superficie y cómo compara dicho valor con las intensidades de ensayos de laboratorio (CSR), estimadas por Echezuría para alcanzar la licuación.

Por otra parte, también se compara la influencia de las ordenadas espectrales en la licuación mediante la comparación de la media de aquellas ordenadas mayores que la aceleración del terreno (a período cero en el espectro) con la duración del sector fuerte del acelerograma para sismos que logran licuar las arenas y aquellos que no lo logran. Nótese que este es un análisis en el que las condiciones locales están fijas y se

evalúan las características de la respuesta que inducen en el sitio distintos terremotos de diferentes magnitudes y cuáles logran hacer que las arenas alcancen la licuación.

3.2.1. Programa DEEPSOIL

La respuesta dinámica de un perfil Geotécnico fue obtenida utilizando el software **DEEPSOIL V7.0.19.0** el cual nos permite convertir los registros obtenidos del PEER Ground Motion en datos que utiliza directamente para el análisis, nos permite acoplar la presión de poros considerado la disipación de la misma para el perfil y distintos métodos de análisis y respuesta en función de las necesidades del estudio. Para este estudio se tomaron las siguientes consideraciones, Véase Fig. 22, 23.

El Software cuenta con ya con el perfil de TREASURE ISLAND instalado como "Example_10_Treasure-Island" el mismo ya viene definido por sus respectivos estratos y velocidades de ondas a sus respectivas Profundidades, dejando a decisión de las condiciones geológicas para el desarrollo de la presión de poros a criterio del usuario.

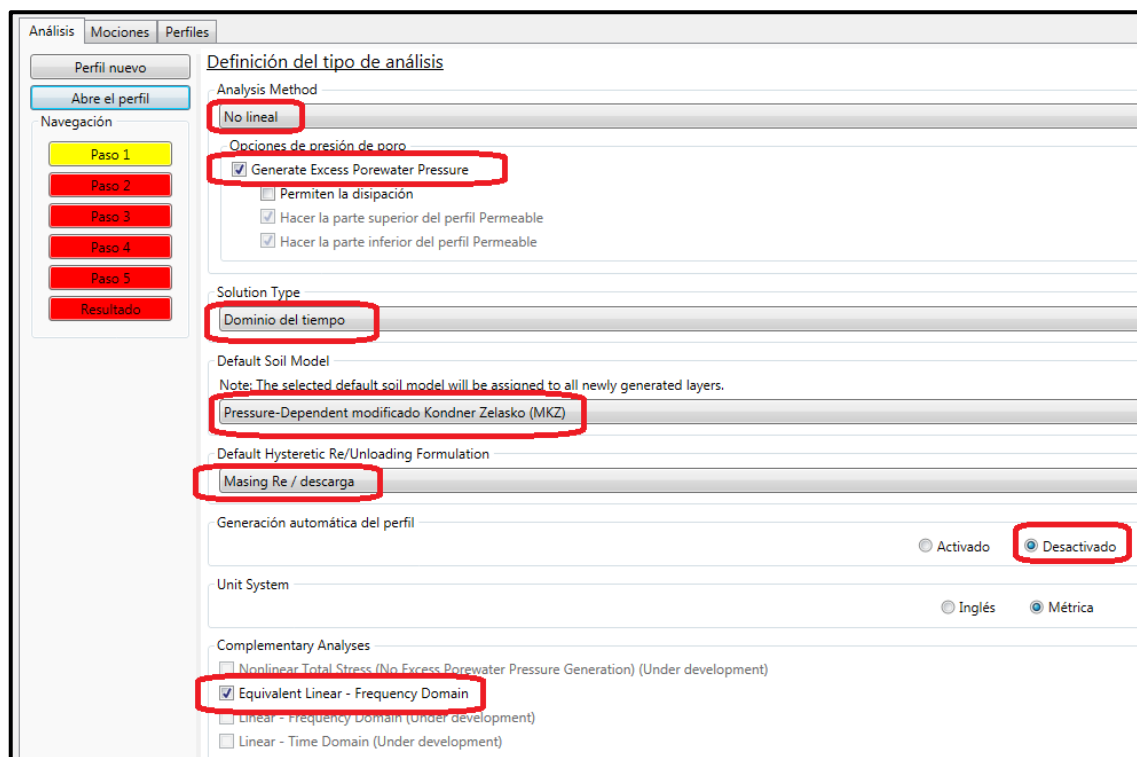


Fig. 22 - Paso 1 - DEEPSOIL - consideraciones para análisis No Lineal

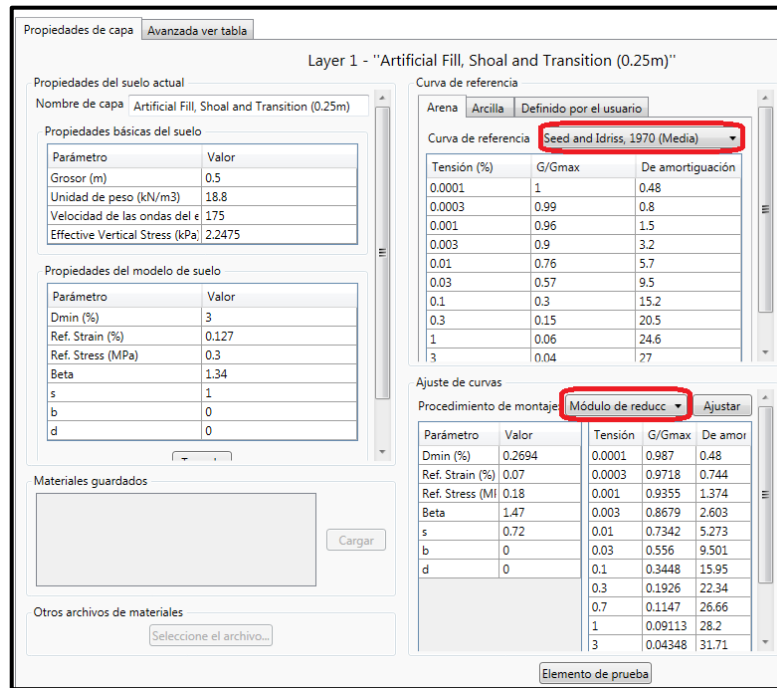


Fig. 23 - Paso 1 - DEEPSOIL - Definir parámetros en cada estrato.

3.2.1.1. Condiciones para la Presión de Poros

Al acoplar la Presión de Poros el software nos ofrece cinco metodologías de análisis para estratos de arenas y arcillas, cada una de estas cuenta con distintos parámetros a utilizar de diferentes ensayos de laboratorio y métodos numéricos que los autores determinaron, para este trabajo se utilizaran los métodos de **Dobry & Matasovic (1992)** (#1 Sand - *Vucetic/Dobry*) para los estratos con arenas y **Matasovic & Vucetic** (#2 Clay - *Matasovic*) para las arcillas. Véase *Tabla 1*.

Tabla 1 - Modelos de Presión de Poros, (Youssef M. A. Hashash, 2017).

PWP Model	Soil Type	Abbrev.	Model No:	Input 1	Input 2	Input 3	Input 4	Input 5	Input 6	Input 7
Dobry & Matasovic	Sand	S-M/D	1	f	p	F	s	γ_{vp}	v	-
Matasovic & Vucetic	Clay	C-M	2	s	r	A	B	C	D	γ_{vp}
GMP	Cohesionless	GMP	3	α	D_r (%)	FC(%)	-	-	v	-
Park & Ahn	Sand	P/A	4	α	β	$D_{rw=1.0}$	CSR _t	-	v	-
Generalized	Any	G	5	α	β	-	-	-	v	-

VARIABLE	DESCRIPTION
u_N	Normalized excess pore pressure (u_0).
N_{eq}	Equivalent number of cycles.
γ_c	The current reversal shear strain.
γ_{vp}	Threshold shear strain value.
p	Curve fitting parameter.
s	Curve fitting parameter.
F	Curve fitting parameter.
f	Dimensionality factor.
v	Degradation parameter

Fig. 24 - Parámetros para análisis por el método de Dobry&Matasovic. (Youssef M. A. Hashash, 2017).

VARIABLE	DESCRIPTION
u_N	Normalized excess pore pressure (u_0)
N_{eq}	Equivalent number of cycles
γ_c	The most recent reversal shear strain.
γ_{vp}	Threshold shear strain value.
r	Curve fitting parameter.
s	Curve fitting parameter.
A	Curve fitting coefficients
B	Curve fitting coefficients
C	Curve fitting coefficients
D	Curve fitting coefficients

Fig. 25 - Parámetros para análisis por el método de Matasovic&Vucetic. (Youssef M. A. Hashash, 2017).

En este trabajo al tener como **principal objetivo** evaluar las respuestas en superficie permitiendo el desarrollo de la presión de poros durante la propagación vertical de las ondas del sismo y a su vez analizar cómo se comportan las intensidades del sector fuerte de los acelerogramas en la superficie del terreno. **No se está buscando una respuesta precisa del comportamiento del perfil Geotécnico utilizado de TREASURE ISLAND** al transitarle registros sísmicos, por consecuente para este trabajo no será necesario que los valores asignados a los métodos de presión de poros anteriormente indicados sean los propios de dicho perfil, sin embargo para ser coherentes se buscó en ensayos de suelos realizados a TREASURE ISLAND los parámetros necesarios para los métodos del DEEPSOIL (Youssef M. A. Hashash, 2017).

Estos parámetros del suelo obtenidos de información disponible en las bibliografías como el Índice Plástico (PI), Porcentaje de Humedad (w), Gravedad Especifica (G_s), Limite Liquido (LL), Porcentaje de Finos (FC), Densidad Relativa (D_s) y Relación de Vacíos (VR), para una mejor eficiencia del análisis se correlacionaron con los ejemplos que nos suministra Carlton, (2014) en el manual de DEEPSOIL V7 para los métodos de **Dobry & Matasovic** para arenas y **Matasovic & Vucetic** para arcillas.

Se seleccionan de los modelos que tengan las propiedades más cercanas a las obtenidas en los ensayos con la finalidad de que el mismo sean lo más representativos del tipo de material presente en el perfil, véase *Tabla 2*, donde se tomaran los valores de porcentaje de finos a la profundidad de 7.5, 8.5 y 10.4 m obteniendo **25.5%, 38.5% y 15.4%** respectivamente, Véase *Tabla 2*. Observando que el modelo de Owi Island para arenas de (Thilakaratne and Vucetic, 1987) coincide con el intervalo de porcentaje de finos obtenidos anteriormente, **18% a 35%** véase *Tabla 3*. Junto con la profundidad de 6 a 14 metros de donde se encuentra dicha arena en semejanza al estrato de TREASURE ISLAND.

Tabla 2 - Datos de ensayos realizados al perfil de Treasure Island (Daniel, G. 1994)

P-38.5	6.3	Grey fill	SM	Dark grey silty fine sand, 15.4 % fines
P-38.5	7.4	Grey fill	SM	Dark grey slightly clayey silty fine sand
P-38.5	7.5	Grey fill	SM	Dark grey silty fine sand, 25.5 % fines
B-1	7.8	Grey fill	SM	Dark grey slightly clayey silty fine sand
B-3	8.5	Grey fill	SM	Dark grey slightly clayey silty fine sand, 38.5 % fines
P-38.5	8.8	Grey fill	SM	Dark grey slightly clayey silty fine sand
B-1	9.1	Grey fill	SM	Grey clayey silty fine sand with a clay lens
B-1	10.0	Shoal	SM	Grey silty fine sand, 12.9 % fines
B-3	10.0	Shoal	SM	Grey silty fine sand, 13.5 % fines
P-38.5	10.0	Shoal	SM	Dark grey silty fine sand
B-3	10.4	Shoal	SM	Grey silty fine sand, 15.4 % fines
P-38	10.6	Shoal	SM	Dark gray silty fine sand
B-1	10.9	Shoal	SM	Dark grey silty fine sand, 15.5 % fines

Tabla 3 - Modelos de Arena para el método de Dobry & Matasovic, (Youssef M. A. Hashash, 2017).

Santa Monica Beach									
Sand(SMB); clean uniform									
beach sand similar to Monterey	Matasovic	3.3x10 ⁻¹	3.8	1	1	0.73	1	0.02	
No. 0; void ratio = 0.56; zero	(1993)								
finer; dense; Vs ≈ 867 ft/s									
Owi Island Sand at depths	Thilakarathne								
from 6 to 14 m b.g.s.; silty fine	and	6.6x10 ⁻³	1	2	1.005	3	1.8	0.025	
sand placed as hydraulic fill;	Vucetic(1987)								
18% <fines<35%									
Owi Island Sand at depths of 6	Thilakarathne								
m; placed as hydraulic fill;	and	9.8x10 ⁻⁴	1	2	0.95	2.5	1.6	0.015	
50% <fines<85%	Vucetic(1988)								

Con este procedimiento obtenemos los parámetros para el estrato que corresponde a una arena “Grey Fine Sand” con fines de relleno y con límite inferior para una capa de transición hacia una arcilla de “Young Bay mud (YBM)” característica de la bahía de san francisco, para las arcillas se utilizara la misma metodología y criterios planteados anteriormente teniendo para el siguiente estrato, véase *Tabla 4*.

Tabla 4 - Datos de ensayos de Atterberg realizados al perfil de Treasure Island, (Daniel, G. 1994)

Test Specimen				Test Method		Test Results	
Borehole	Depth (m)	Layer	USCS Classification	Preparation Method	No. of Tests to obtain Liquid Limit	Liquid Limit	Plasticity Index
B-CDMG ¹	5.3	Grey fill	SM	---	---	NP ³	NP
B-CDMG	9.1	Shoal	SW-SM	---	---	NP	NP
P-38.5	10.0	Shoal	SM	Dry	---	NP	NP
B-1	13.6	Transition	CL	Dry	6	34	19
B-1	18.0	YBM	CL-CH	Wet	6	50	27
B-CDMG	18.3	YBM	CL-CH	---	---	51	26
B-CDMG	27.4	YBM	CL	---	---	42	19
B-1	33.6	Lower Sand, B	SM	Dry	---	NP	NP
B-CDMG	33.5	Lower Sand, C ²	SP	---	---	NP	NP
B-CDMG	39.6	Lower Sand, D	CL	---	---	37	23
B-1	44.5	OBC	CL	Wet	4	38	21
B-1	44.8	OBC	CL	Wet	4	38	23
B-CDMG	51.8	OBC	CL	---	---	34	19
B-CDMG	70.7	OBC	CL-CH	---	---	48	30

¹Sampling and testing of specimens from borehole B-CDMG performed by University of Texas (UT)
²Although test depth as provided by UT corresponds to sublayer B, description of sample corresponds to sublayer C (34.7+/- to 39 +/- m)
³NP = non plastic

Obteniendo para el estrato transitorio de Arcilla de YBM valores de Índice Plástico de 27, 26 y 16 a los 18.0 , 18.3 y 27.4 metros respectivamente, con ello se recurrió a la figura 4.3 del manual de DEEPSOIL (Youssef M. A. Hashash, 2017) para el método de **Matasovic & Vucetic** para arcillas véase Fig. 26, colocando los parámetros anteriormente obtenidos dentro de los limites de las curvas de PI=15 y PI=30 para de esta manera tener un valor estimado de OCR=1 que nos arroja esta tabla, con el cual seleccionando de los modelos del manual obtenemos los parámetros necesarios para este método en el estrato seleccionado, véase Tabla 5.

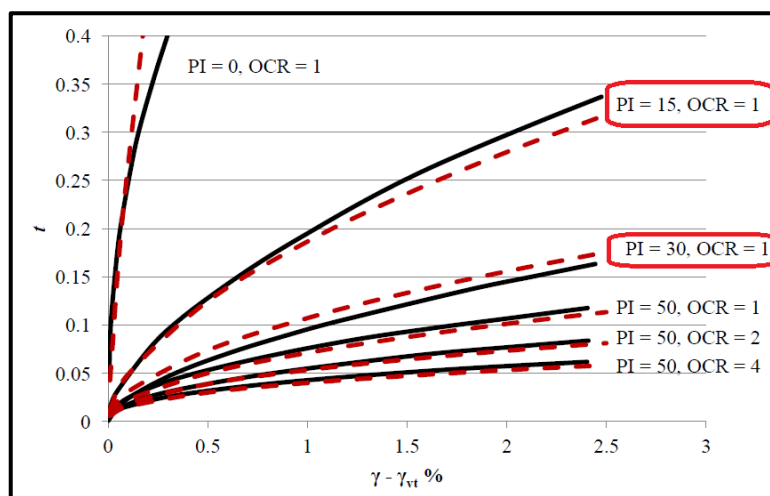


Fig. 26 - Parámetros seleccionados de la Comparación de las curvas dadas por Matasovic (1993) y Vucetic (1992), (Youssef M. A. Hashash, 2017).

Tabla 5 - Modelos de arcillas para el método de Matasovic & Vucetic. (Youssef M. A. Hashash, 2017).

Material	Reference	γ_{vp} (%)	Pore Water Pressure and Degradation Model					
			s	r	A	B	C	D
Marine Clay (OCR = 1.0)	Matasovic and Vucetic (1995)	0.1	0.075	0.495	7.6451	-14.7174	6.3800	0.6922
Marine Clay (OCR = 1.4)	Matasovic and Vucetic (1995)	0.1	0.064	0.520	14.62	-30.5124	18.4265	-2.5343

Se utilizaron las propiedades de los ejemplos #7 y #8 del manual, para los análisis no lineales en otros tipos de perfiles que consideran el lecho rocoso elástico y el desarrollo de la presión de poros de donde se tomaron los valores, véase *Tabla 6* a utilizar en este análisis.

Se Utilizo esta misma metodología para el resto del perfil en lo concerniente a los parámetros de arenas y arcillas. Obteniendo de esta manera al momento de realizar el análisis unos parámetros que guarden cierta relación con los propios del perfil. Véase *Tabla 7* y *8*.

Tabla 6 - Parámetros de análisis no Lineal para todo el Perfil

Max Ru	Cv (Ft^2/Sec)	Cv-Exponente
0.95	0.1	0.0

Tabla 7 - DEEPSOIL - tabla de datos avanzados - Parámetros de Presión de Poros.

Propiedades de capa		Avanzada ver tabla									
P3	Modelo de PMP	Max. RU	Cv (m2/sec)	Cv Exponent	Entrada DMD.1 - Entrada DMD.2 - Entrada DMD.3 - Entrada DMD.4 - Entrada DMD.5 - Entrada DMD.6 - Entrada DMD.7						
					f	p	F	s	Y	v	-
					s	r	A	B	C	D	V
					α	$D_r(\%)$	$F_c(\%)$	-	-	v	-
					α	β	$D_{rue1.0}$	CSRI	-	v	-
					α	β	-	-	-	v	-
	Clay - Matasovic	0.95		0.075	0.495	7.6451	-14.7174	6.38	0.6922	0.1	
	Clay - Matasovic	0.95		0.075	0.495	7.6451	-14.7174	6.38	0.6922	0.1	
	Clay - Matasovic	0.95		0.075	0.495	7.6451	-14.7174	6.38	0.6922	0.1	
	Clay - Matasovic	0.95		0.075	0.495	7.6451	-14.7174	6.38	0.6922	0.1	
	Clay - Matasovic	0.95		0.075	0.495	7.6451	-14.7174	6.38	0.6922	0.1	
	Clay - Matasovic	0.95		0.075	0.495	7.6451	-14.7174	6.38	0.6922	0.1	
	Clay - Matasovic	0.95		0.075	0.495	7.6451	-14.7174	6.38	0.6922	0.1	
	Clay - Matasovic	0.95		0.075	0.495	7.6451	-14.7174	6.38	0.6922	0.1	
	Sand - Vucetic/Dobry	0.95		1	1	0.493	1.761	0.06	1		
	Sand - Vucetic/Dobry	0.95		1	1	0.493	1.761	0.06	1		
	Sand - Vucetic/Dobry	0.95		1	1	0.493	1.761	0.06	1		
	Sand - Vucetic/Dobry	0.95		1	1	0.493	1.761	0.06	1		
	Clay - Matasovic	0.95		0.075	0.495	7.6451	-14.7174	6.38	0.6922	0.1	
	Clay - Matasovic	0.95		0.075	0.495	7.6451	-14.7174	6.38	0.6922	0.1	
	Clay - Matasovic	0.95		0.075	0.495	7.6451	-14.7174	6.38	0.6922	0.1	
	Clay - Matasovic	0.95		0.075	0.495	7.6451	-14.7174	6.38	0.6922	0.1	
	Clay - Matasovic	0.95		0.075	0.495	7.6451	-14.7174	6.38	0.6922	0.1	
	Clay - Matasovic	0.95		0.075	0.495	7.6451	-14.7174	6.38	0.6922	0.1	
	Clay - Matasovic	0.95		0.075	0.495	7.6451	-14.7174	6.38	0.6922	0.1	
	Clay - Matasovic	0.95		0.075	0.495	7.6451	-14.7174	6.38	0.6922	0.1	
	Clay - Matasovic	0.95		0.075	0.495	7.6451	-14.7174	6.38	0.6922	0.1	
	Clay - Matasovic	0.95		0.075	0.495	7.6451	-14.7174	6.38	0.6922	0.1	

Tabla 8 - Características Geológicas del Perfil Geotécnico de Treasure Island con Parámetros de Análisis para DEEPSOIL.

Prof (m)	Type Soil	Descripcion	Dobry and Matasovic	Matasovic ans Vucetic
-	Tan Fine Sand	Artificial Fills, Shoal and transition Material, SP-SM, G.S=2.74, FC=6.1%, PI(%)=0.	$v=1, f=2, p=0.95$ $f=2.5, s=1.60, Y_{vt}(\%)=0.015$, Owi Island Sand at depths of 6 m; placed as hydraulic fill; 50% < fines < 85%	
5.00	Grey fine Sand	Artificial Fills, Shoal and transition Material, SM, W(%)=19.9, VR=0.69, GS=2.81-2.74, PI(%)=29, FC(%)=15, 38, 25%	$v=1, f=2, p=1.005, F=3, s=1.8$ $Y_{vt}(\%)=0.025$, Owi Island Sand at depths from 6 to 14 m b.g.s.; silty fine sand placed as hydraulic fill; 18% < fines < 35%	
10.00				
15.00				
20.00	Young Bay Mud	Dark Grey silty clay / CL, W(%)=48.8-50.2, VR=1.39-1.34, DS(%)=97-100, GS=2.76, FC(%)=1.3, PI(%)=27-19, LL(%)=42.		$Y_{tvp}(\%)=0.1, s=0.075, r=0.495, A=7.6451, B=14.7174$, $C=6.3800, D=0.6922$ según fig 4.3, manual, OCR=1. Marine Clay (OCR = 1.0)
25.00				
30.00				
35.00	Fine To Medium Sand	San antonio / 33.5-39.6 / SP,CL, W(%)=21.8-37, VR=0.76-1.02, DS(%)=76-98, LL=37, PI(%)=23.	$v=1$ $f=1, p=1, F=0.493, s=1.761, Y_{tvp}(\%)=0.06$ Warrenton, Oregon Silt recovered from 130 to 248 ft b.g.s.; 73% < fines < 99%; 32.9% < water content < 37.3%; 86.3 < ydry < 88.9 pcf; 882 < Vs < 1086 fps; OCR = 1.0;	
40.00				
45.00				
50.00	Old Bay Clay	Grey-Green clay, CL, CL-CH / LL(%)=34, PI(%)=19, W(%)=20.7-33, VR=0.59-0.95, DS(%)=97-95, FC(%)=22.8		$Y_{tvp}(\%)=0.1, s=0.075, r=0.495, A=7.6451, B=14.7174$, $C=6.3800, D=0.6922$ según fig 4.3, manual, OCR=1. Marine Clay (OCR = 1.0)
55.00				
60.00				
65.00				
70.00	Sand, Arena	Gravelly, continental alameda	$v=1, f=2, p=1.04, F=2.6, s=1.7, Y_{tvp}(\%)=0.02$ Wildlife Site Sand A(WSA); void ratio 0.84 to 0.85; 37% fines; N=5; Vs=350ft/s	
75.00				
80.00	Clay, Arcilla	continental alameda		$Y_{tvp}(\%)=0.1, s=0.075, r=0.495, A=7.6451, B=14.7174$, $C=6.3800, D=0.6922$ según fig 4.3, manual, OCR=1. Marine Clay (OCR = 1.0)
85.00				
90.00	Arenas de arenisca y lutita de roca	Franciscan		
95.00				
100.00				
105.00				

3.2.1.2. Lecho Rocoso

Se asignara al lecho rocoso “*Bedrock*” con el tipo de “*Halfspace Elástico*” el cual permite obtener resultados más realistas ya que no mantiene atrapada la energía de las ondas reflejadas en la base del perfil, Véase Fig. 27. Para esto es necesario contar con parámetros como la velocidad de onda (m/s), la unidad de peso (KN/m³) y la relación de amortiguamiento (%) del mismo. De las bibliografías consultadas y el mismo software se considero la velocidad de onda como **1.900,00 (m/s)** y la unidad de peso como **22,00 (KN/m³)** véase Fig. 28, para la relación de amortiguación se tomo el valor de 0% luego de corroborar de manera grafica que al asignarle valores de 0%, 5% y 20%, no influyen de manera directa en los aspectos a analizar en este trabajo, esto se nos indica previamente en el manual del software; “*En general, la velocidad de la onda de corte del lecho de roca debe ser mayor que la del perfil del suelo supra yacente. Se debe tener en cuenta que la relación de amortiguación de lecho de roca no tiene efecto en los análisis de dominio de tiempo y solo un efecto insignificante en los análisis de dominio de frecuencia, independientemente del valor especificado por el usuario*”. Esto fue corroborado al utilizar varios registros y cambiar dicho valor

evaluando principalmente la respuesta en superficie dando como correcto lo indicado en el manual. Véase Fig. 29.

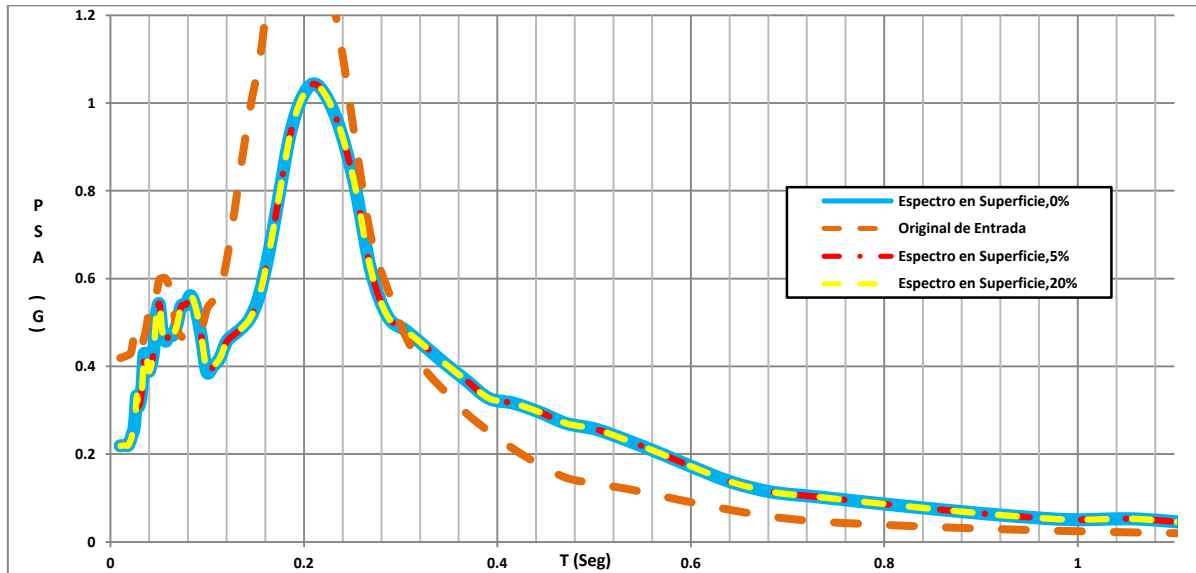


Fig. 27 - Espectro de Respuesta - Magnitud; 5,30 - Distancia; 0,74Km. Izmir. Turkey, Comparación de respuesta utilizando amortiguamiento del 0%, 5% y 20%.

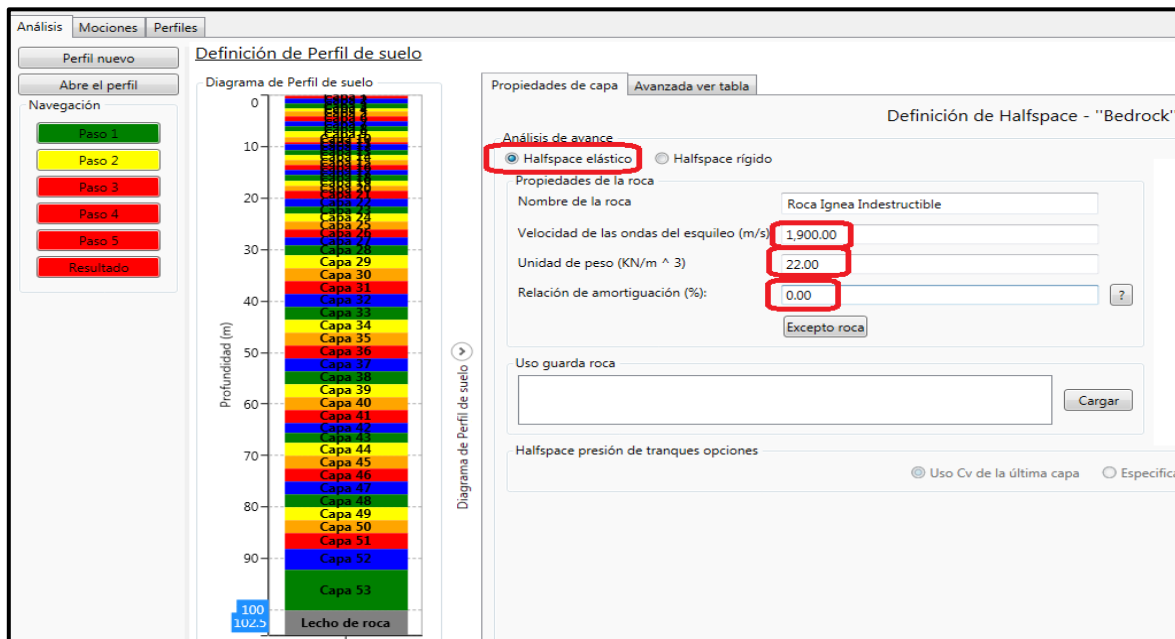


Fig. 28 - Paso 1 - DEEPSOIL - Definición de parámetros de lecho de Roca "Bedrock".

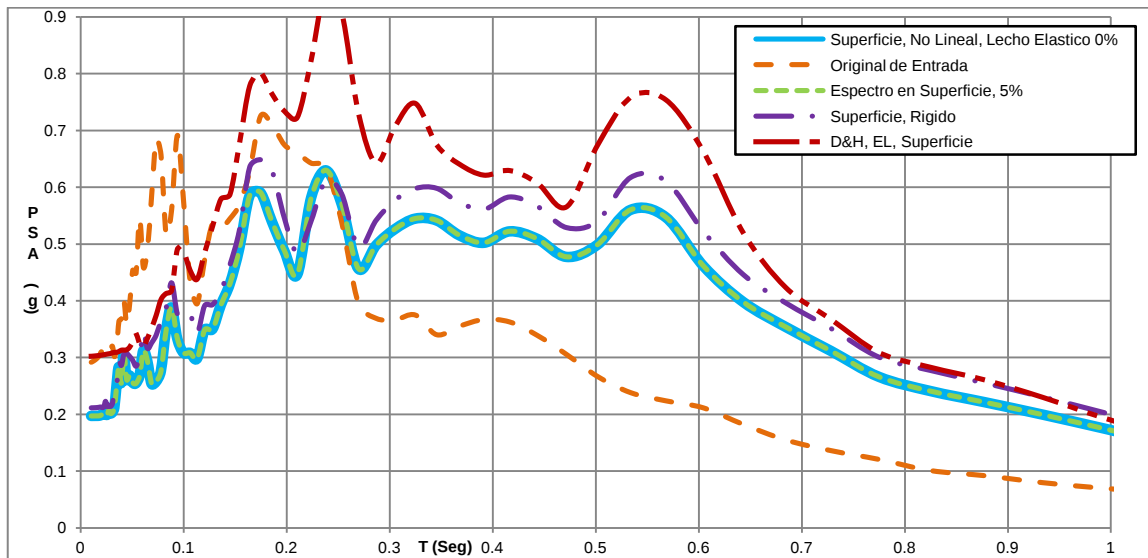


Fig. 29- Espectro de respuesta - Magnitud; 5,34 Distancia; 5.57Km. Dursunbey.Turkey, comparación de Espectro de respuesta en superficie con Lecho Rígido análisis no Lineal Vs Elástico.

Obtenidos todos parámetros del perfil y una vez comprobados por el software este nos arroja el comportamiento del perfil teniendo en cuenta la información seleccionada, donde este calcula el periodo fundamental del mismo, diagramas de frecuencia, tensiones, Angulo de fricción y velocidad de onda a lo largo de todo el perfil, véase Fig. 30.

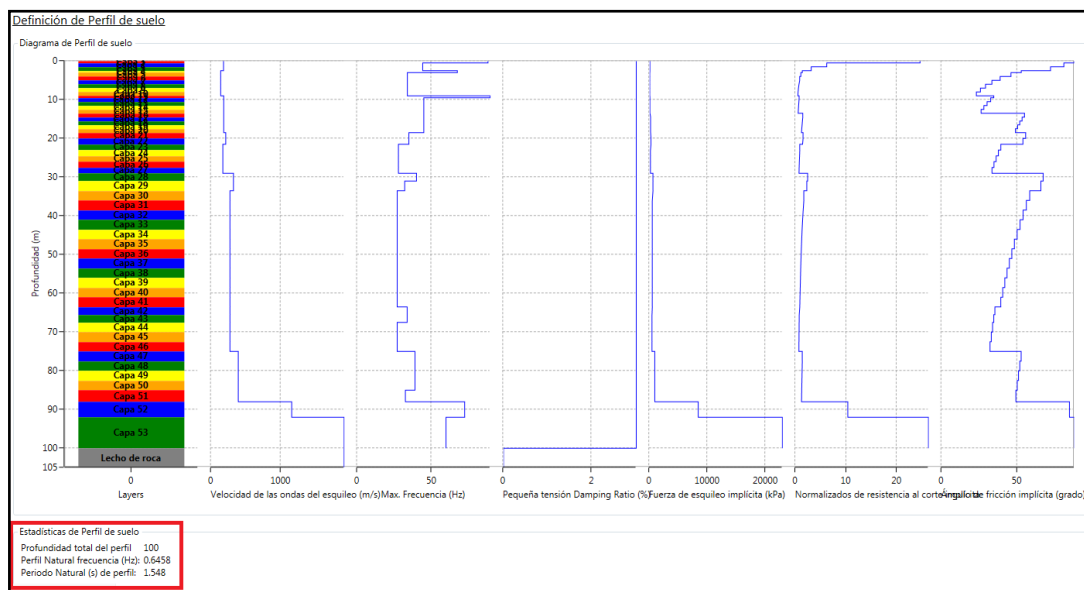


Fig. 30 - Diagramas del Perfil de suelo una vez determinados todos los parámetros de análisis.

3.2.1.3. Selección de Registros Sísmicos

De la base de datos recopilada del PEER Ground Motion es necesario convertirla a un formato que el software pueda procesar para posteriormente transitarlo en el perfil, este procedimiento lo realiza internamente en los comandos señalados, estos deben estar en formatos que el programa reconozca como el .AT2 o .txt véase Fig. 31 y corroborar que los datos iniciales sean coherentes con los que trae propiamente el registro, Véase Fig. 32.

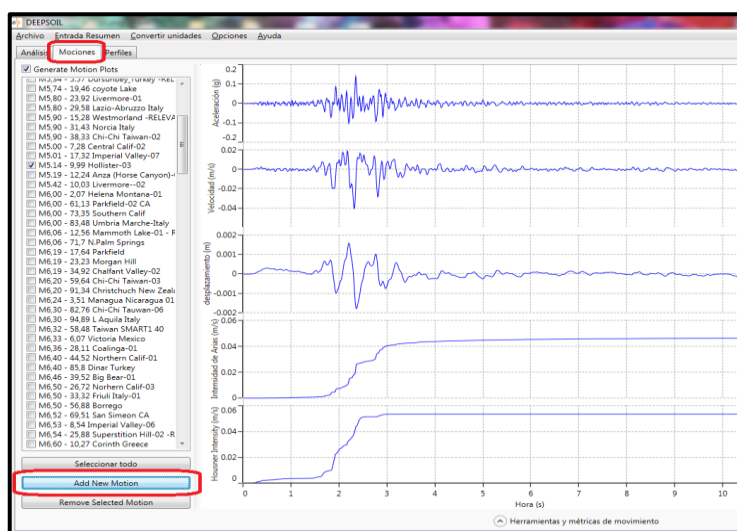
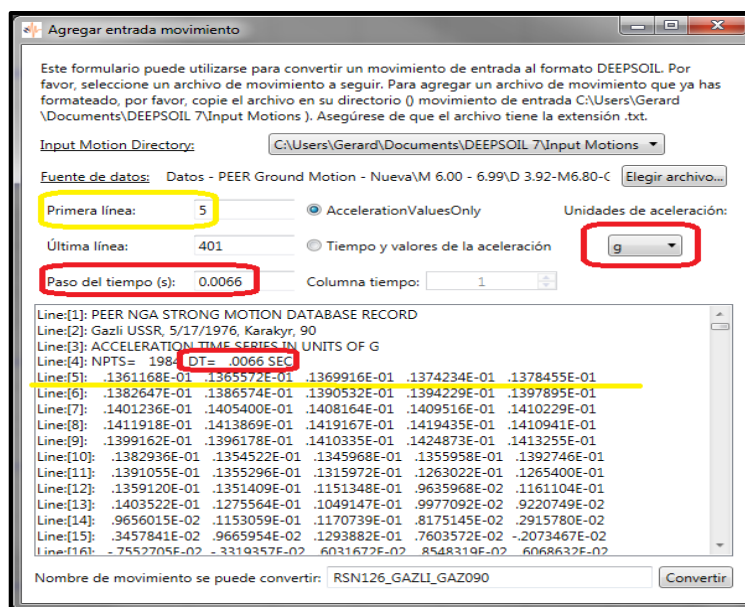


Fig.31 - DEEPSOIL - agregar nuevos registros a la base de datos del software.



Este formulario puede utilizarse para convertir un movimiento de entrada al formato DEEPSOIL. Por favor, seleccione un archivo de movimiento a seguir. Para agregar un archivo de movimiento que ya ha sido formateado, por favor, copie el archivo en su directorio () movimiento de entrada C:\Users\Gerard\Documents\DEEPSOIL 7\Input Motions). Asegúrese de que el archivo tiene la extensión .txt.

Input Motion Directory: C:\Users\Gerard\Documents\DEEPSOIL 7\Input Motions

Fuente de datos: Datos - PEER Ground Motion - Nueva\6.00 - 6.99\D 3.92-M6.80-C [Elegir archivo...]

Primera línea: 5

Última línea: 401

Paso del tiempo (s): 0.0066

Unidades de aceleración: g

Columna tiempo: 1

Line[1]: PEER NGA STRONG MOTION DATABASE RECORD
 Line[2]: Gazli USSR, 5/17/1976, Karakyr, 90
 Line[3]: ACCELERATION TIME SERIES IN UNITS OF G
 Line[4]: NPTS= 1984 DT= .0066 SEC
 Line[5]: .1361168E-01 .1365572E-01 .1369916E-01 .1374234E-01 .1378455E-01
 Line[6]: .1382647E-01 .1386574E-01 .1390532E-01 .1394229E-01 .1397895E-01
 Line[7]: .1401236E-01 .1405400E-01 .1408164E-01 .1409516E-01 .1410229E-01
 Line[8]: .1411918E-01 .1413869E-01 .1419167E-01 .1419435E-01 .1410941E-01
 Line[9]: .1399162E-01 .1396178E-01 .1410335E-01 .1424873E-01 .1413255E-01
 Line[10]: .1382936E-01 .1354522E-01 .1345968E-01 .1355958E-01 .1392746E-01
 Line[11]: .1391055E-01 .1355296E-01 .1315972E-01 .1263022E-01 .1265400E-01
 Line[12]: .1359120E-01 .1351409E-01 .1151348E-01 .9635968E-02 .1161104E-01
 Line[13]: .1403522E-01 .1275564E-01 .1049147E-01 .9977092E-02 .9220749E-02
 Line[14]: .9656015E-02 .1153059E-01 .1170739E-01 .8175145E-02 .2915780E-02
 Line[15]: .3457841E-02 .9665954E-02 .1293882E-01 .7603572E-02 .2073467E-02
 Line[16]: .7552705E-02 .3319357E-02 .6031672E-02 .8548319E-02 .6063632E-02

Nombre de movimiento se puede convertir: RSN126_GAZLI_GAZ090

Convertir

Fig. 32 - DEEPSOIL - Formato para adicionar nuevos registros al software.

Una vez adicionados los registros al software, este los almacena en su biblioteca interna para que posteriormente sean seleccionados y transitados directamente al perfil, mostrándonos algunas de las características del registro, véase Fig. 33.

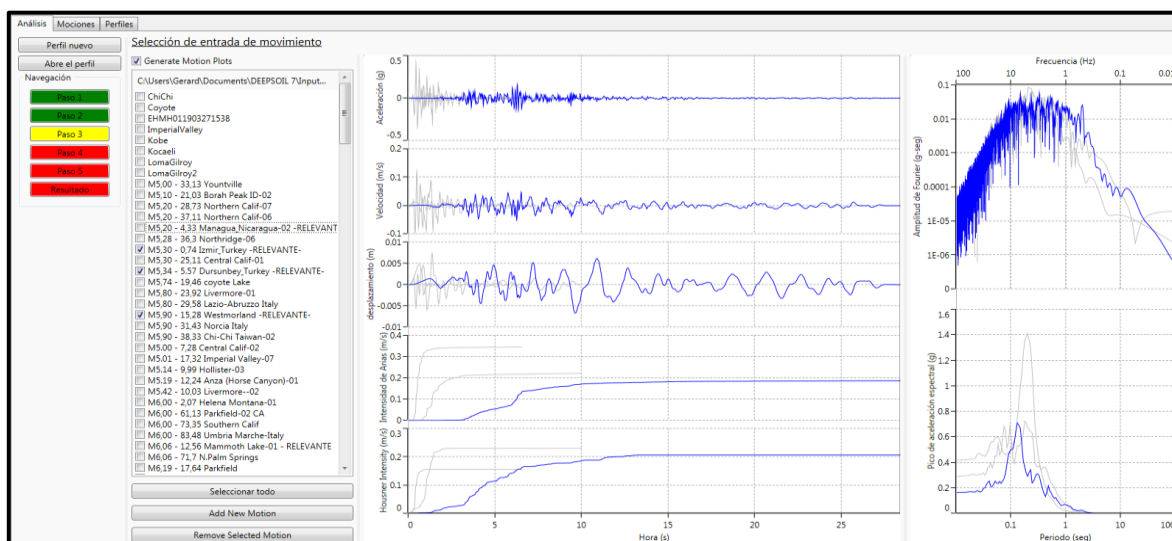


Fig.33 - Paso 2 - DEEPSOIL - Selección de registros a transitar en el perfil.

3.2.1.4. Selección de patrones de Análisis

Una vez determinados los registros a evaluar se procede a determinar los patrones restantes para el análisis como el tipo de matriz de amortiguamiento a utilizar, seleccionando ‘Frecuencia Independiente’ y la ‘Matriz de Actualización’, véase Fig. 34 y 35.

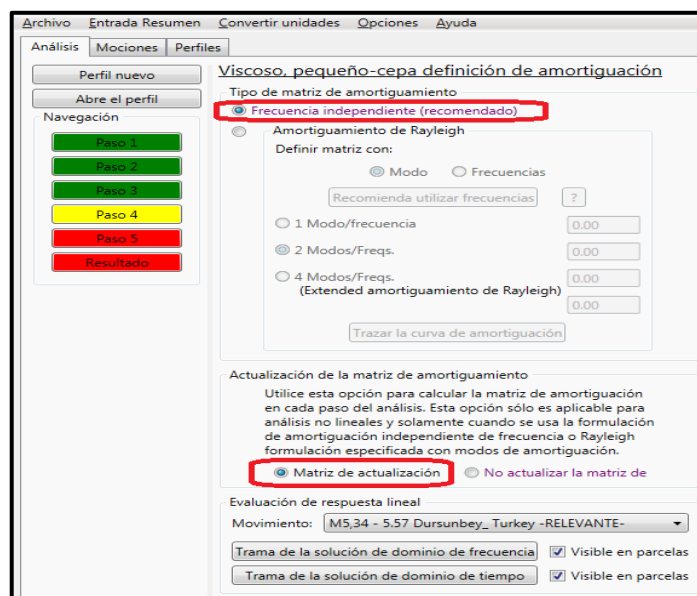


Fig. 34 - Paso 3 - DEEPSOIL - patrones de amortiguamiento.

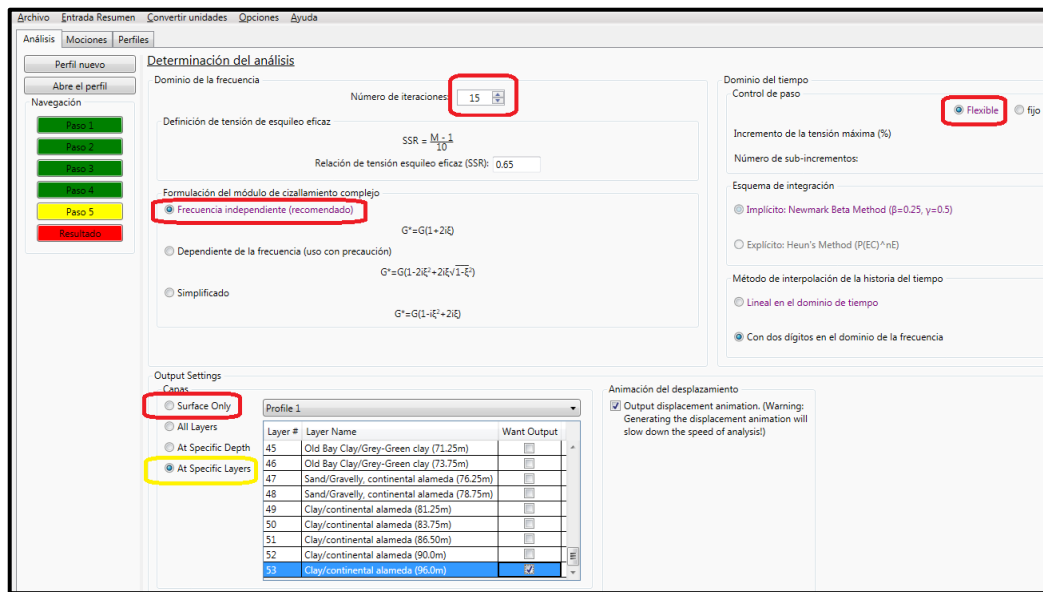


Fig. 35 - Paso 4 - DEEPSOIL - patrones de frecuencia.

3.2.1.5. Análisis de Resultados DEEPSOIL

Luego de definir todos los patrones necesarios el software procede a realizar los análisis concernientes a lo solicitado para posteriormente permitirnos interactuar con los mismos en la interfaz del programa o descargar los mismos en un archivo Excel, esta interfaz nos permite acoplar y desacoplar los estratos seleccionados y ver cómo se comportan con los otros registros analizados, véase Fig. 36. En el caso del análisis no lineal al seleccionar los estratos donde se desarrolla la presión de poros podemos ver como esta se comportan a lo largo del mismo, véase Apéndice (4).

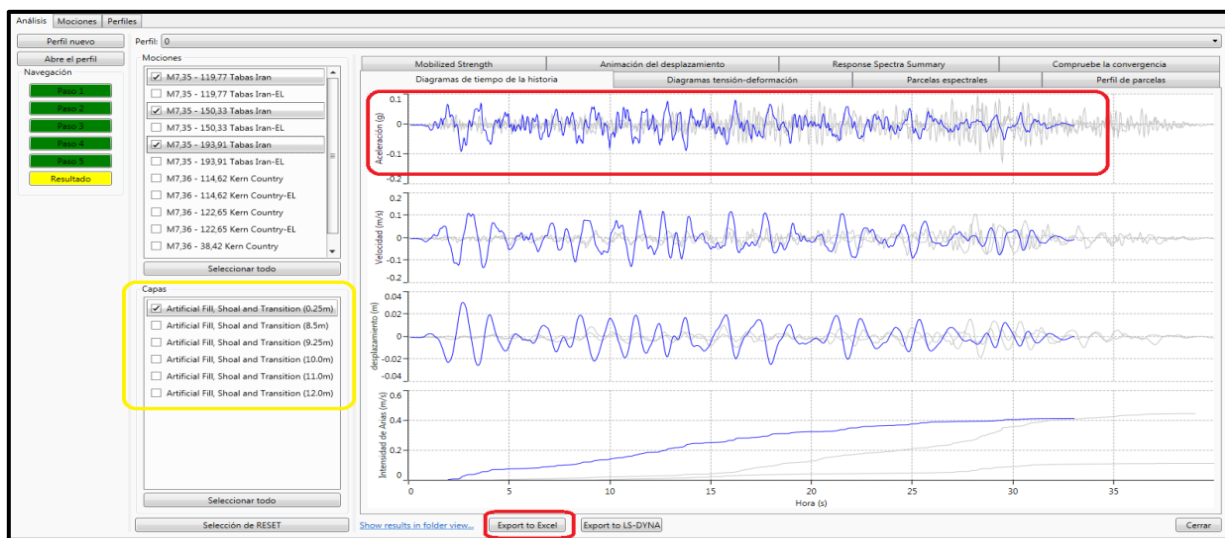


Fig. 36 - DEEPSOIL - Diagramas en función del tiempo, acelerogramas hasta intensidades.

3.2.1.6. Determinar el Estrato de Quiebre

El software nos permite obtener los datos a una profundidad específica del perfil opción que fue utilizada una vez obtenidas las respuestas en superficie, determinando a que profundidad se empieza a desarrollar la presión de poros en el perfil de manera grafica, se vuelve a realizar la metodología anteriormente planteada y se selecciona en el ‘‘paso 4’’ véase Fig. 37, los estratos antes de desarrollarse la presión de poros y durante la misma, obteniendo las respuestas que consideran estas dos condiciones para su posterior análisis de la intensidad del sector fuerte del Acelerograma y como estas intervienen en la respuestas del perfil.

Se demuestra en la Fig. 37 que a una profundidad de 16 metros es donde se presenta el ultimo estrato sin desarrollar valores de presión de poros representativos, luego a los 8,5 metros tenemos el máximo valor de presión de poros, tomando este como el estrato de quiebre para el análisis de respuesta dinámica.

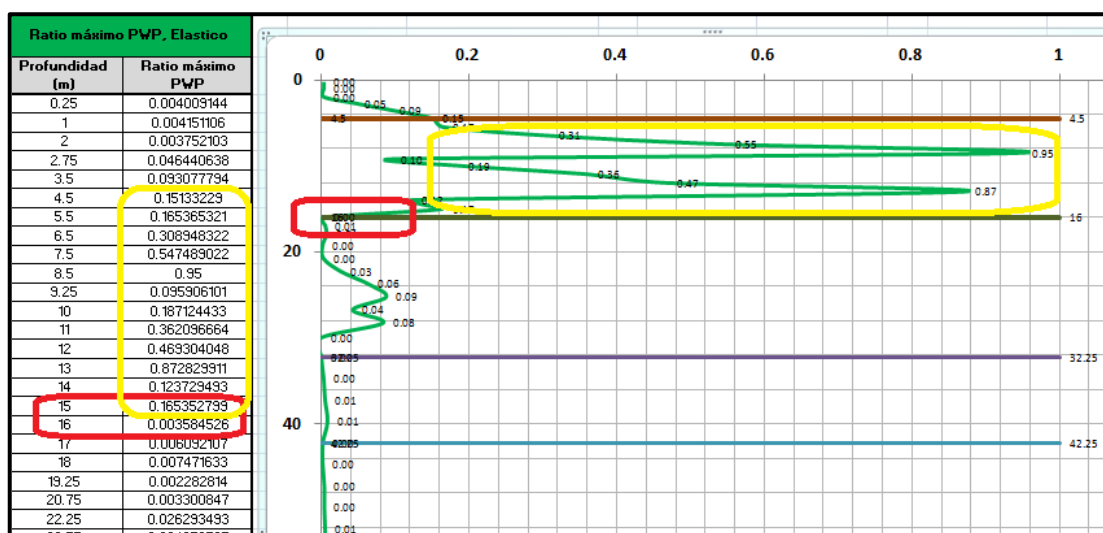


Fig. 37 - Desarrollo de PWP en el Perfil - Registro Magnitud; 7.28. Distancia; 23.62 Km, Landers.

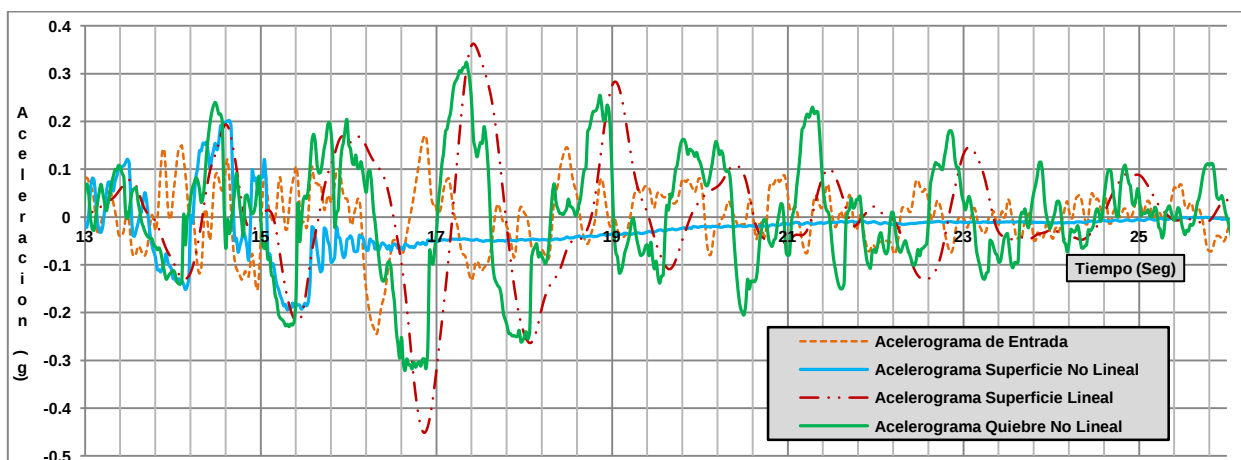


Fig. 38 - Respuesta de Acelerogramas - Registro de Magnitud 7.28, Distancia 23.62 Km, Landers

En la Fig. 38 se corrobora la divergencia en entre el Acelerograma en superficie y en el estrato de Quiebre al desarrollar la presión de poros.

3.2.2. Intensidad del Sector Fuerte del Acelerograma

El cálculo de la intensidad a utilizar en este trabajo será la del método de Echezuría ya que se corrobora en literatura y anteriores trabajos que presenta datos más representativos en sus análisis, la misma viene dada por el producto del cuadrado del Error medio cuadrático ($ARMS^{21}$) y la duración del Sector Fuerte del Acelerograma (Tsm), esta intensidad se denomina (Ism);

$$Ism(HE) = Arms^2 \times Tsm \dots \dots \dots (4)$$

La duración del sector fuerte del Acelerograma fue determina de manera gráfica y numérica siguiendo la siguiente metodología; Se determina el tiempo y valor pico del Acelerograma a analizar, partiendo de este se procede a calcular el error medio cuadrático (A_{rms}) y el cuadrado del error medio cuadrático ($Arms^2$) a ambos extremos del Acelerograma (inicio y fin) donde de manera grafica determinar el cambio de pendiente o donde la línea de tendencia de un segmento sea constante indicando que el registro ya no aporta energía al sector fuerte como se ve en las Fig. 39, 40, denominando a estos puntos de inflexión como el inicio o fin del sector fuerte del Acelerograma.

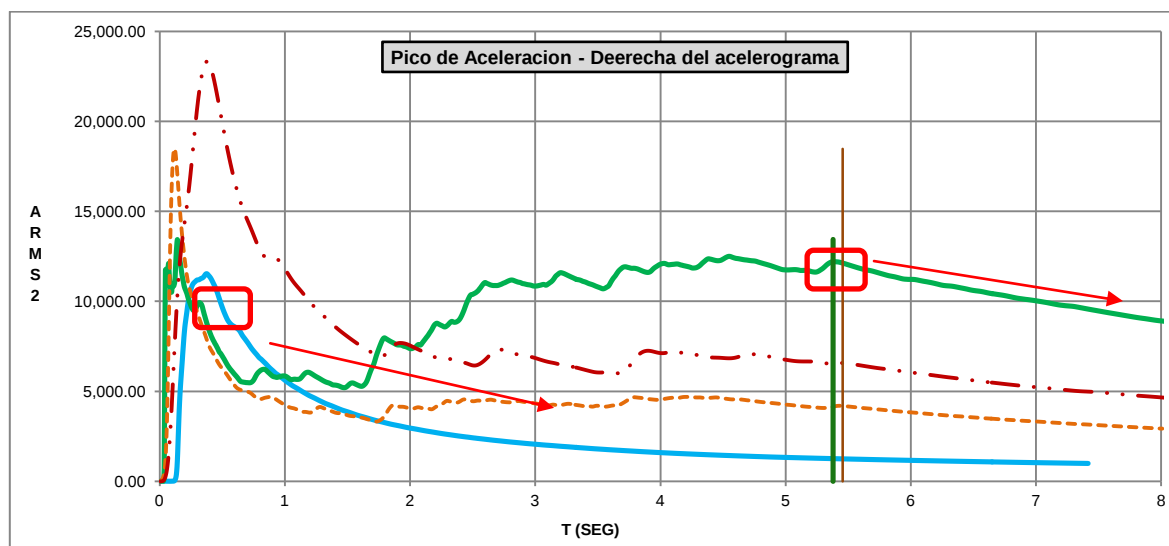


Fig. 39 - ASM2 vs Tiempo - Grafico para determinar el fin del sector fuerte del Acelerograma - Registro Magnitud 7.51 - Distancia 7.57km. Kocaeli, Turkey.

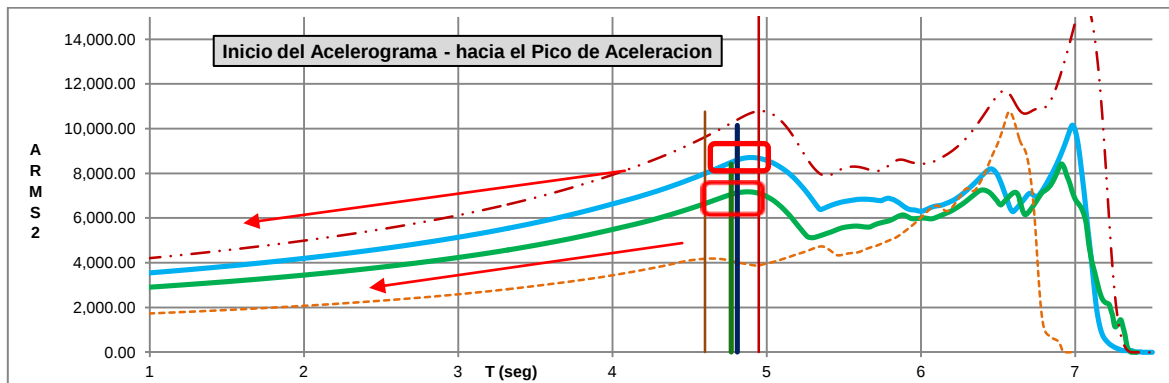


Fig. 40 - ASM2 vs Tiempo - Grafico para determinar el inicio del sector fuerte del Acelerograma - Registro Magnitud 7.51 - Distancia 7.57km. Kocaeli, Turkey.

Definido el Inicio (T_o) y el final (T_f) del sector fuerte del Acelerograma se procede a delimitar la duración del mismo, $T_{sm} = T_f - T_o$. Teniendo definidas las duraciones del sector fuerte de los acelerogramas (T_{sm}) y los valores del cuadrado del error medio cuadrático ($ARMS^2$), tendremos todos los datos para obtener la intensidad (I_{sm}) por el método de Echezurúa.

3.2.3. Promedio de Aceleraciones Espectrales superiores a la Aceleración del Terreno.

Obtenidos los espectros de respuesta en los estratos solicitados se procede a definir la aceleración del terreno, siendo este el valor inicial en cada espectro de respuesta, y tomando los valores mayores o iguales para determinar el Promedio de Aceleración Espectral del Mismo, obtenido este valor se procede a comparar en el método grafico *Pseudo Intensidad Espectral Vs Tsm*, véase Fig. 41 para determinar que registro pueden generar licuación.

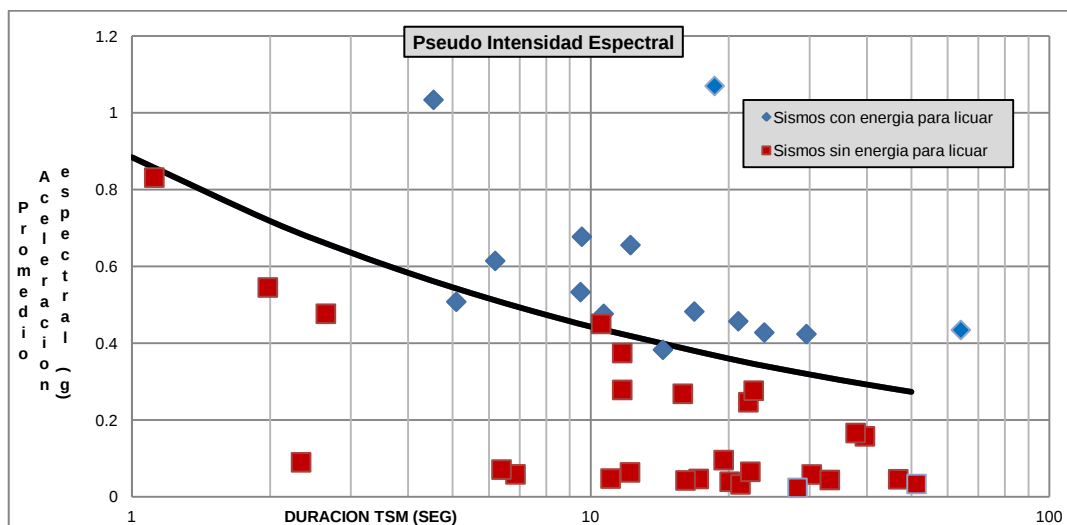


Fig. 41 - Pseudo Intensidad Espectral Vs Tsm - Limites de Energía para Licuación. Herrera, D., H. Muñoz, (2018).

Esto con la finalidad de cumplir como recurso comparativo ante las otras metodologías y corroborar la coherencia entre las mismas al momento de indicar los resultados.

3.2.4. Energía necesaria para la Licuación.

Se graficaron en la *Tabla 9* junto con la ley de atenuación de I_{sm} las intensidades necesarias para alcanzar la licuación estimadas por Echezuría (2018), obtenidas de ensayos de Laboratorios para arenas con distintas densidades relativas sometidas a ciclos de amplitud constante controlados por la magnitud. Adicionalmente, se incluyen los estimados realizados por Echezuría (2018) de las intensidades requeridas para licuar arenas limpias similares a las ensayadas utilizando el método de Seed and Idriss basado en el CSR (Seed e Idriss, 1971). Debido a que estos resultados son muy similares para las magnitudes 5.00 – 7.00 con ambos métodos, véase la *Tabla 9*. Los valores presentados en el *Fig. 42* corresponden al promedio de ambos métodos para cada magnitud. Las distancias epicentrales límites a la que se observa licuación para cada magnitud se obtuvieron del *Fig. 43*, las cuales se incluyen en la *Tabla 9* (Echezuría, 2017).

Tabla 9 - Rangos de Intensidades requeridas para alcanzar la licuación - Potencial de licuación utilizando la intensidad del sector fuerte del sismo. (Echezuría, H. 2017).

Magnitud de momento	5,5	6,5	7,5
Distancia límite, (km)	5,5	50	200
I_{sm} en roca a las distancias límites para la magnitud, (cm^2/s^3)	9000	3900	210
Rango de I_{sm} para licuación, (cm^2/s^3)	76.321 a 76.768	80.993 a 114.221	106.768 a 172.607

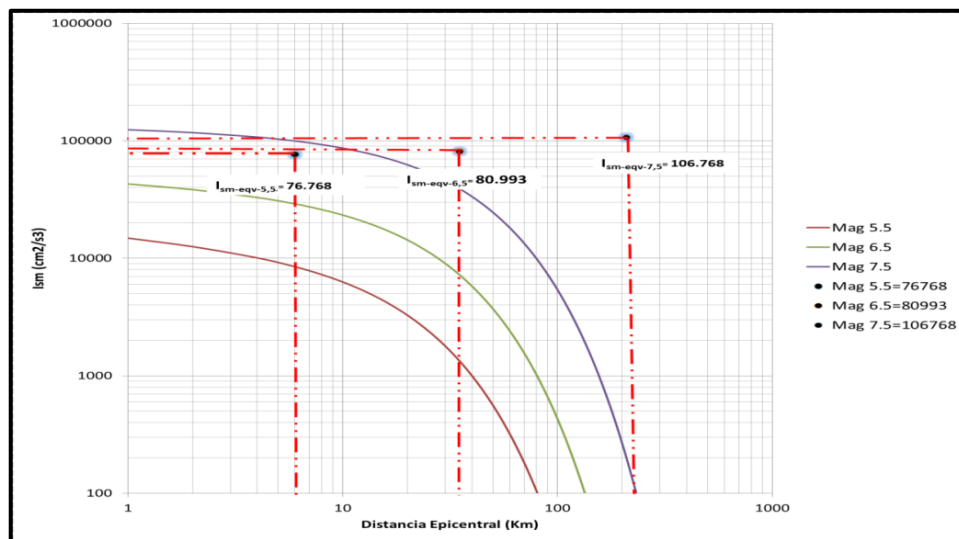


Fig. 42 - Valores límites de intensidad para licuación. (Herrera, D., H. Muñoz, (2018).

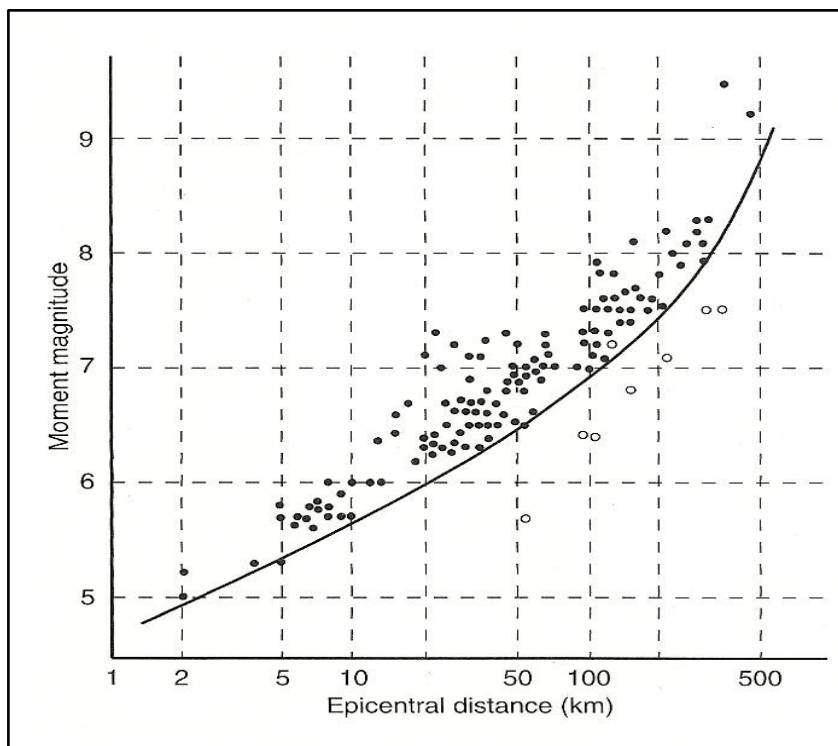


Fig. 43 - Relación entre la distancia epicentral en la cual ocurre licuación con respecto a la magnitud de momento.

Ambresys y Menu (1988)

3.3. Desarrollo de Presión de Poros al cambiar las velocidades del perfil

Se realizara un nuevo análisis donde se dejara sin alteración los estratos de arenas de relleno presentes en los primeros 20 metros del perfil con sus respectivas velocidades de ondas de cada estrato, que son proporcionadas directamente por el DEEPSOIL. Teniendo estos estratos fijos se utilizara desde este punto un único estrato con espesor de 77.5 metros con los mismos parámetros de arcillas que se utilizaron anteriormente, hasta llegar a la profundidad donde se inicia el estrato rocoso y así cumplir con la profundidad del perfil analizado anteriormente. A este único estrato se le asignaran distintas velocidades de ondas iterando desde 100 (m/s) hasta 600 (m/s), véase Fig. 44 y 45.

Adicionalmente se seleccionaran nueve registros, tres de cada intervalo de magnitud, que desarrollen valores de presión de poros significativos a lo largo de todo el perfil. Se busca demostrar que el desarrollo de presión de poros y la respuesta del perfil dependen no solo de las características de los estratos superiores, los primeros 30 metros desde la superficie (Martin et al, 2004). Donde se espera el desenvolvimiento de la misma sino de la velocidad de onda que transita a lo largo de todo el perfil desde el lecho rocoso hasta la superficie.

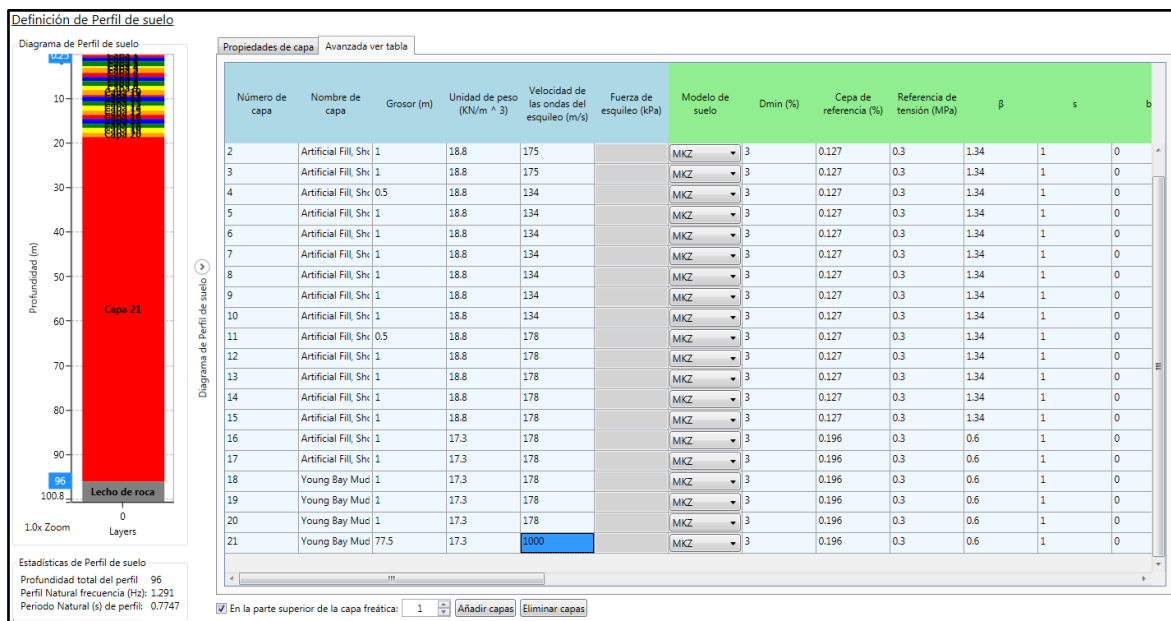


Fig. 44 – DEEPSOIL – tabla de datos avanzados, condiciones de los estratos variando la velocidad de ondas.

Para esto se obtendrán las velocidades promedio de todo el perfil considerando los estratos superiores detalladamente que tienen velocidades fijas y las variaciones del estrato inferior, con las mismas características del lecho rocoso utilizadas anteriormente, véase Fig. 28.

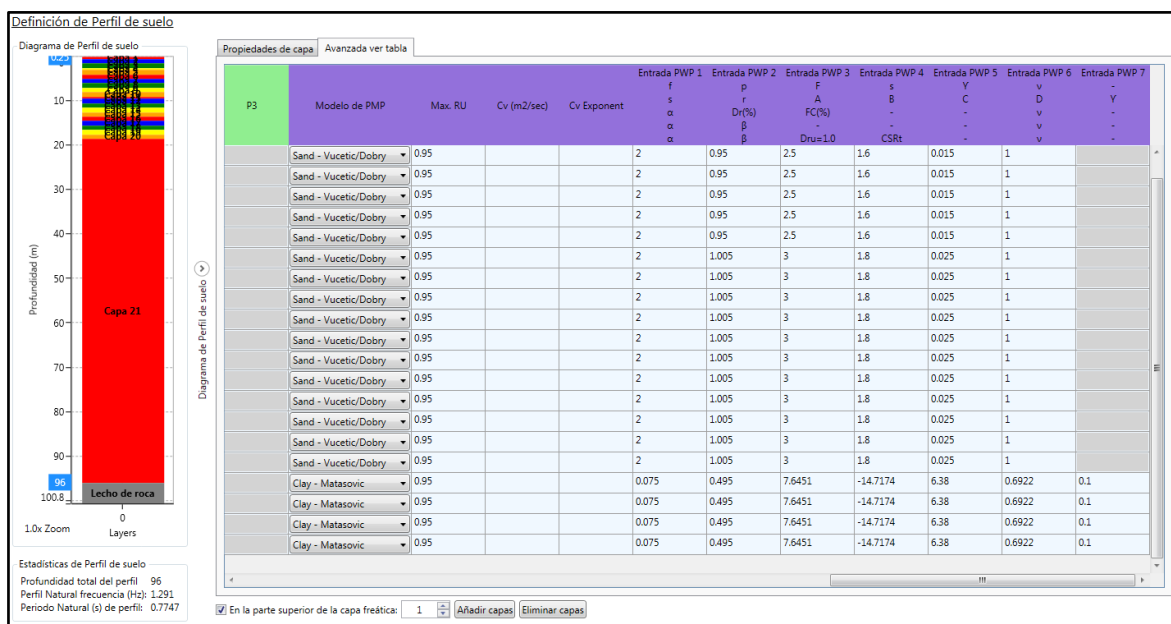


Fig. 45 – DEEPSOIL – tabla de datos avanzados, parámetros para la presión de poros variando la velocidad de ondas.

Adicionalmente se graficaran las respuestas en roca de dichos registros y con los periodos fundamentales generados con las distintas velocidades promedios generadas en el perfil, para estimar a cual periodo fundamental ocurre amplificación en las aceleraciones presentadas por el movimiento sísmico y como esta se relaciona con el desarrollo de presión de poros con esa respectiva Velocidad.

3.4. Comparación Utilizando el Método del CSR

Para obtener el valor de CSR es necesario determinar el esfuerzo máximo alcanzado por cada registro a evaluar, dicho valor se obtiene de la *Ecuación 10* donde a: aceleración espectral pico, g: gravedad, σ : Esfuerzo total, R_d : Factor de profundidad definido por (Seed e Idriss, 1971). Según cita (Kramer, 1996).

$$T_{max} = 0.65 \times \frac{a_{pico}}{g} \times \sigma_{total} \times R_d \dots \dots \dots (10)$$

Para el factor R_d se consideró una profundidad de 15 m al ser esta donde se inicia el desarrollo de presión de poros y se utilizó el *Fig. 46* para obtener el factor de reducción de **0.95**.

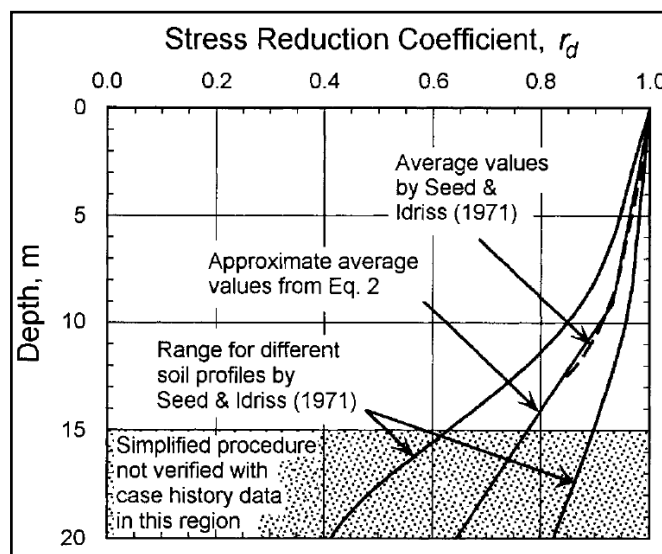


Fig. 46- Factor de reducción con respecto a la profundidad. Definido por (Seed e Idriss, 1971). Según cita (Kramer, 1996).

Teniendo el valor de T_{max} se debe determinar el Esfuerzo Vertical Efectivo (σ'_v) del estrato en estudio, con sus respectivas consideraciones de nivel freático y peso específico del suelo, una vez determinado el mismo el CSR se calcula con la siguiente *Ecuación 11*;

$$CSR = \frac{T_{max}}{\sigma'_v} \dots \dots \dots (11)$$

Una vez determinado el valor de CSR se debe aplicar un factor de corrección relacionado con la magnitud propia del registro para convertirlo en CSR 7,5 como se ve en la *Ecuación 12*, donde posteriormente evaluarlo y compararlo en la *Fig. 47*. Para determinar si dichos registros pueden desarrollar licuación.

$$CSR_{7,5} = \frac{CSR}{\text{Factor de Corrección}} \dots\dots\dots (12)$$

Para el factor de corrección se utilizara la ecuación de la curva que se obtiene al graficar los factores de CSR con CSR 7,5 establecidos por (Seed e Idriss, 1971) para cada magnitud. Siendo esta *Ecuación 13*, la cual también fue obtenida por (Herrera, D., H. Muñoz, (2018):

$$y = 9.5284X^{-1.112} \dots\dots\dots (13)$$

Es necesario determinar el valor del número de golpes del estrato a analizar. Para esto (Herrera, D. Muñoz, H. 2018) se basaron en la correlación de la Norma COVENIN 1756:82 donde obtuvieron una correlación entre el N_{1,60} y la velocidad de Onda promedio de todo el perfil, teniendo la siguiente *Ecuación 14* y utilizando la velocidad promedio de todo el perfil. Para este trabajo se tomaran los valores de numero de golpes de los ensayos de laboratorio SPT, véase *Fig. 48* realizados por (Daniel, G. 1994) obteniendo para el punto de quiebre un N_{1,60} de 6 siendo este el valor a tomar para todos los registros.

$$Vs = 89,8 \times N_{1(60)}^{0.341} \dots\dots\dots (14)$$

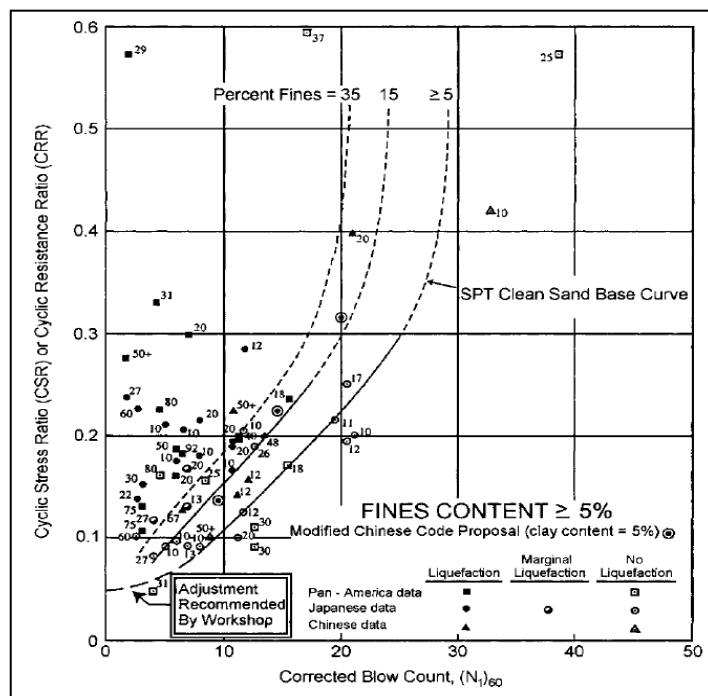


Fig. 47- Relación entre el esfuerzo cíclico con respecto al N_{1,60} del perfil para estimar licuación. Definido por (Seed e Idriss, 1971). Modificado por (Seed et al, 1985).

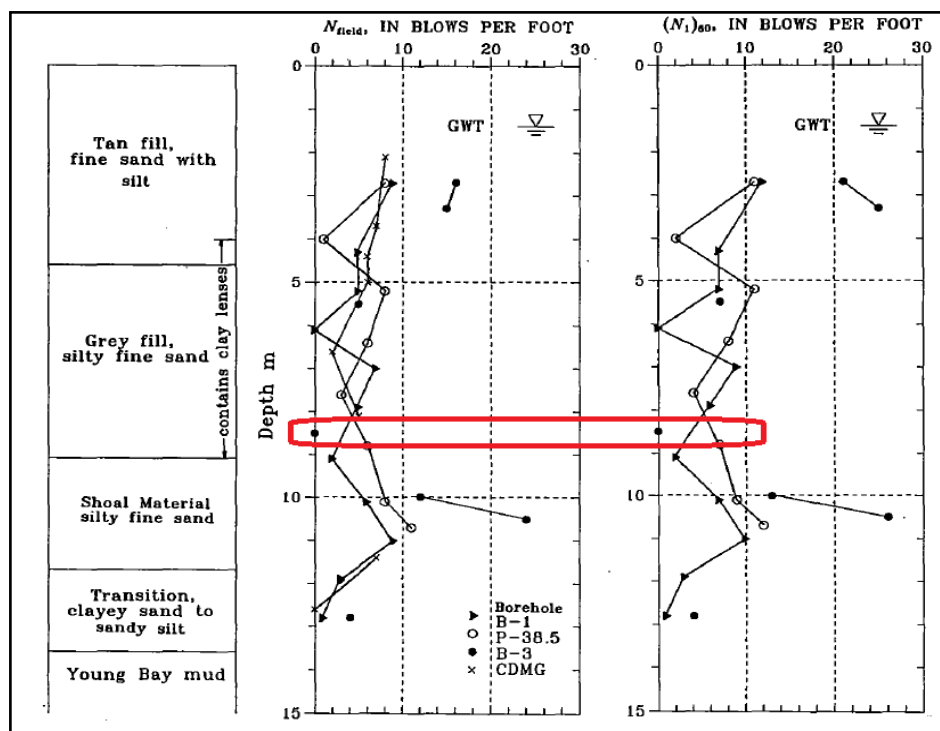


Fig. 48 – Resultados de $N_{1,60}$ por el ensayo SPT para el perfil de Treasure Island en sus Primeros 15 metros de perfil, (Daniel, G. 1994)

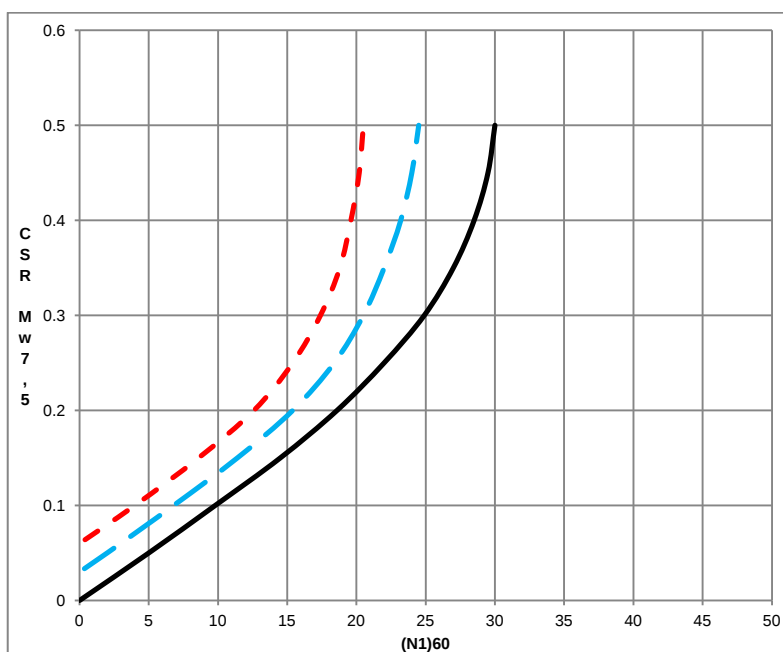


Fig. 49 – digitalización de la Relación entre el esfuerzo cíclico para porcentaje de finos 35%, 15% y menores a 5% con respecto al $N_{1,60}$ del perfil para estimar licuación. Definido por (Seed e Idriss, 1971). Según cita (Kramer, 1996).

3.5. Perfil Geotécnico de Treasure Island

Se seleccionó un perfil similar al de la isla artificial ubicada en el centro de la Bahía de San Francisco denominada Treasure Island a la cual se accede por la otra isla artificial de Yerba Buena. El perfil geotécnico de la isla Treasure Island, cuenta con un periodo fundamental de **1,548** segundos y una velocidad promedio de onda de corte (V_s) de 240 m/s y en la misma se verificó la ocurrencia de la licuación posterior al terremoto de Loma Prieta en 1989. Véase Fig. 50 y 51.

A este perfil se le modificaron los parámetros del suelo para el desarrollo de presión de poros a evaluar en este trabajo, por consiguiente los resultados obtenidos no son los respectivos del perfil original del Treasure Island.

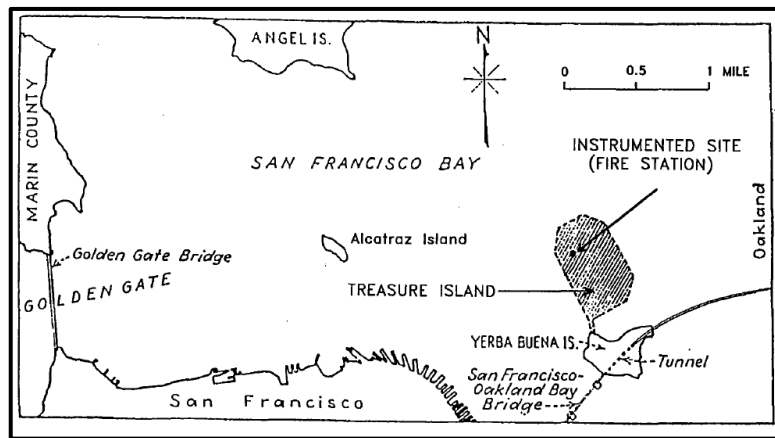


Fig. 50 - Ubicación de la isla de Treasure Island (Daniel, G. 1994)

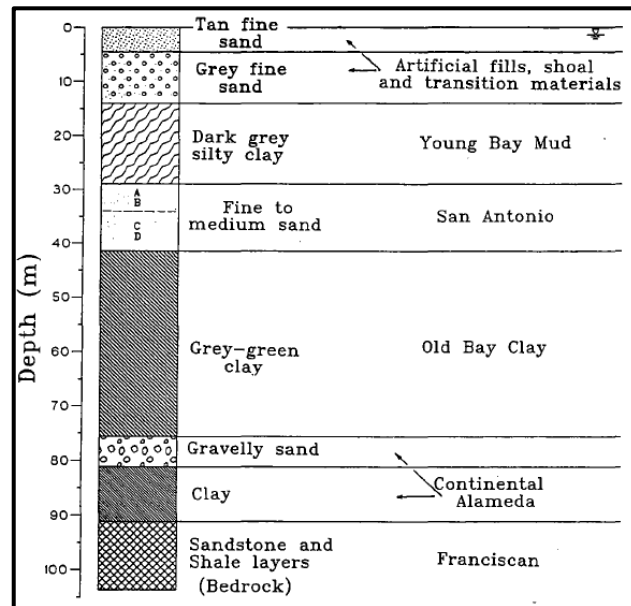


Fig. 51 - Perfil geotécnico de Treasure Island (Daniel, G. 1994)

Capítulo 4

Análisis y Discusión de Resultados

Realizados los cálculos por las metodologías expuestas en el capítulo anterior se procede a realizar la comparación e interpretación de los datos obtenidos, dentro de los límites y alcances de este trabajo. Recuérdese que la finalidad de demostrar la influencia del desarrollo de la presión de poros en la respuesta dinámica de un perfil y por consiguiente cumplir con los objetivos planteados para este trabajo.

4.1. Comportamiento del Perfil durante el desarrollo de la Presión de Poros

En el análisis de un perfil geotécnico las condiciones geológicas de los estratos y su consideración en el análisis son indispensables, el no considerarlas excluye el verdadero comportamiento de dicho perfil ante un evento sísmico que pueda comprometer la integridad del mismo. Eso tiene repercusión en costos de inversión en el área constructiva que reposen sobre dicho perfil.

Al acoplar el desarrollo de presión de poros en el análisis no lineal con el software DEEPSOIL se está considerando el incremento de la presión de poros del agua al momento de transitar las ondas sísmicas del registro hasta la superficie del terreno. Este aumento de la presión del agua contribuye a aumentar la degradación inducida en el módulo de corte por el nivel de deformación cortante. Los niveles de presión de poros las calcula el programa DEEPSOIL con base en los métodos de **Dobry & Matasovic** para arenas y **Matasovic & Vucetic** para arcillas que fueron indicados anteriormente.

Sin embargo, conociendo que las ondas sísmicas y su energía en la roca se atenúan con la distancia epicentral en forma logarítmica, véase la Fig. 42 y que la licuación se espera hasta distancias a las cuales la energía disponible en la roca es muy baja, Véase las Fig. 42 y 43, es necesario destacar qué ocurre en el perfil a medida que se desplazan las ondas en el mismo.

Un registro sísmico puede contener una alta cantidad de energía mientras viaja en la roca pero no impulsar el desarrollo significativo de la presión de poros en el perfil. Esto se debe a que el efecto combinado de alta energía y acumulación de presión de poros a bajos niveles (relación de presión de poros $< 0,45$) terminan por ablandar mucho los estratos que se deforman mucho y no dejan pasar la energía de las ondas. Esto es posible para sismos en las cercanías de las fuentes.

La diferencia en respuesta de presión de poros para dos sismos diferentes en el mismo perfil se observa en los Fig. 52 y 53. En este caso particular, el registro de CorinthGreece tiene una distancia epicentral de 10,27 km mientras que el de "Chi-chi Taiwan06" con una de 82,76 km. Nótese que este último sismo solamente genera una relación de presión de poros de **0,45** en uno de los estratos, mientras que el primero alcanza relaciones de **0,91** y **0,95** en dos estratos. Eso se debe al contenido de energía o amplitud de las ordenadas espectrales de los sismos cercanos el cual es mucho mayor que el de los sismos lejanos, en particular porque las altas frecuencias se amortiguan más temprano durante el viaje de las ondas. Es muy posible, entonces, que las frecuencias inmediatamente inferiores al período fundamental en el segundo caso se hayan amortiguado casi completamente a los 82 km, mientras que en el primer caso las mismas estén presentes.

Esa diferencia en las frecuencias que contienen la energía es lo que influye en el desarrollo de la presión de poros, haciendo que los estratos licuables no generen suficiente presión de poros con el segundo sismo. De este caso observamos que mientras menor sea la distancia epicentral a sitio de interés, se espera un mayor desarrollo de presión de poros.

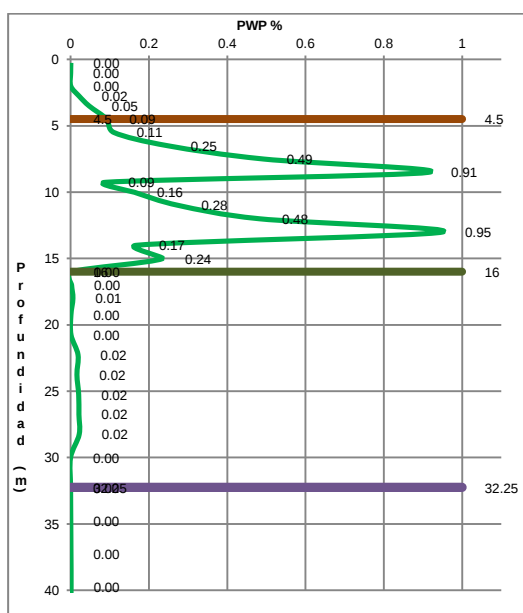


Fig. 52 - Desarrollo de PWP vs Profundidad - Registro
M;6,60. D;10,27. CorinthGreece

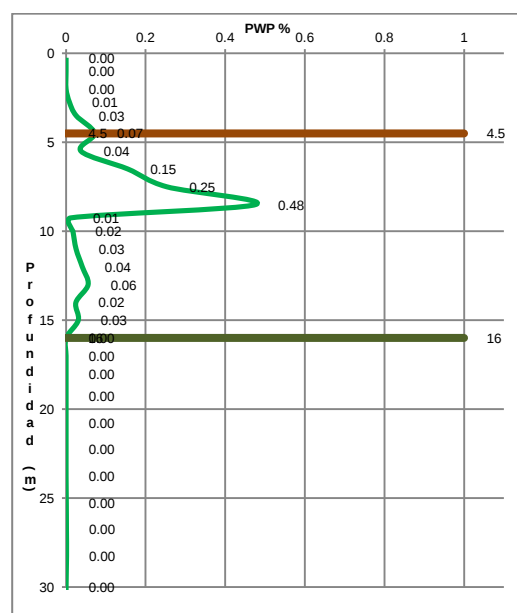


Fig. 53 - Desarrollo de PWP vs Profundidad - Registro
M;6,30. D;82,76 Chi-ChiTaiwan06.

Para el caso de un registro cuyo contenido de energía en la roca sea bajo, es decir, que esté a una distancia epicentral donde ya hayan atenuado suficiente las ondas, pero que contenga energía en los períodos espectrales cercanos al período fundamental del depósito, podría ser amplificado y dar inicio a un cambio

violento del desarrollo de presión de poros en uno o varios estratos. Eso es precisamente lo que explica la Fig. 43 y hace que se observe licuación y sus efectos a distancias donde el sismo en la roca no tiene suficiente energía y será estudiado en detalle en las Sec. 4.5 y 4.5.1 de este TG.

El contenido de energía del sismo depende de algunos factores tales como; la distancia epicentral, la magnitud, el tamaño de la zona rota en la superficie de la falla, el tiempo de ocurrencia de la ruptura de la falla, entre otras, las cuales determinan las frecuencias espectrales con mayor energía del sismo (Kramer, 1996). No obstante, es la combinación del contenido de energía en las distintas ondas componentes del sismo y las condiciones de rigidez del perfil, lo que determina la potencial ocurrencia de la licuación a niveles significativos capaces de generar daños.

Ahora bien, al integrar el aumento en la presión de poros en el análisis se está incluyendo el efecto adicional de degradación del módulo cortante y la respuesta en la superficie es de poca utilidad pues con un módulo tan bajo se desarrollan grandes desplazamientos que limitan la credibilidad del registro. Esto se ilustra en la Fig. 54, donde se presenta el desplazamiento en los distintos estratos del perfil. Es evidente la diferencia entre el análisis no lineal, indicado en color verde, con el equivalente lineal señalado en línea segmentada morada.

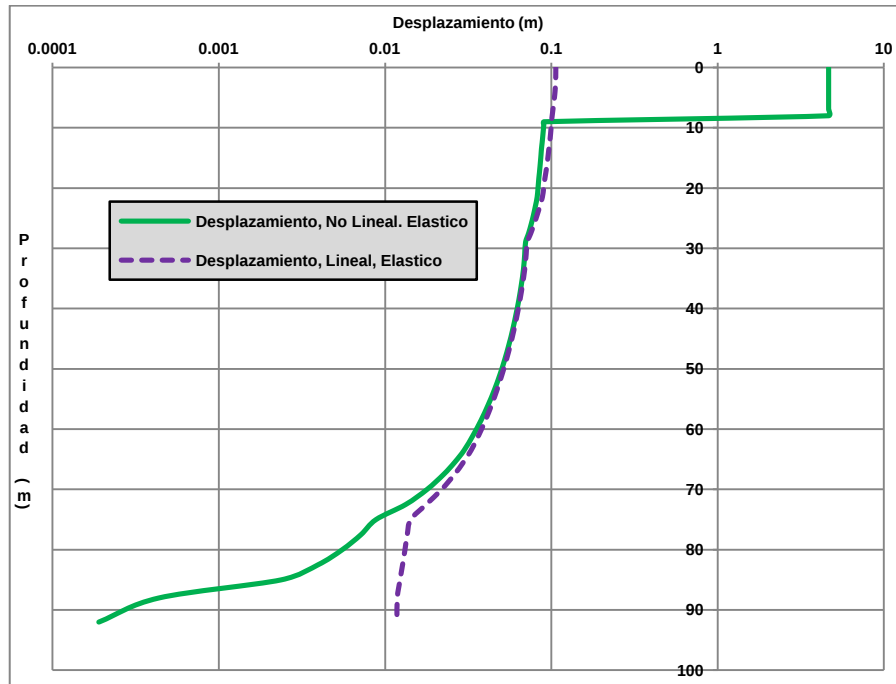


Fig. 54 - Desplazamiento vs profundidad del perfil geotécnico al transitar el registro de Magnitud; 5,20. Distancia; 4,33. Managua Nicaragua 02.

Por otra parte, es bueno destacar que la respuesta en superficie no muestra lo que sucede antes de alcanzar los estratos licuables por cuanto el espectro obtenido a ese nivel es muy similar al de entrada en roca, tal como se ilustra en la Fig. 55. Contrariamente, el espectro justo antes de la entrada en el estrato (denominado quiebre) es muy parecido al obtenido con el método equivalente lineal en superficie, lo cual es más representativo de lo que realmente experimenta la arena. Por esa razón en este TG se denominan con la palabra “quiebre” aquellos estratos donde se puede generar y acumular suficiente presión de poros para indicar que se evaluarán los espectros y los acelerogramas antes de que la licuación afecte el comportamiento de la arena.

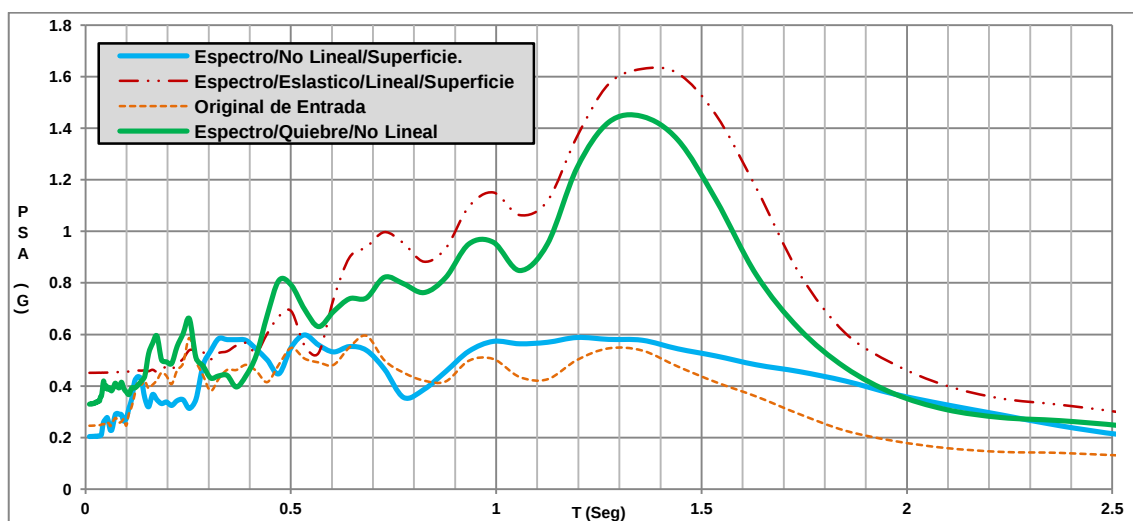


Fig. 55 - Espectro de respuesta - Registro Magnitud; 7.28. Distancia; 23.62. Landers

4.2. Comparación de Análisis Equivalentes Lineales y No Lineales

Debido a que el programa tiene dos opciones para los análisis equivalentes lineales, primeramente, se compararán los análisis equivalentes lineales considerando lecho rocoso rígido y elástico, respectivamente. Posteriormente, se compararán los resultados de los análisis equivalentes lineales con el no lineal.

4.2.1. Análisis comparativo con equivalente lineal en superficie para roca rígida y elástica

Los resultados obtenidos en el análisis equivalente lineal con lecho rocoso rígido con trece registros sísmicos realizado por Herrera y Muñoz (2019) fueron comparados con los obtenidos en este TG con lecho rocoso elástico para comprobar su efecto en la licuación. Esta comparación se muestra en la Tabla (10) en las columnas con encabezado en fondo rojo y letras blancas. En esta comparación ambos análisis utilizarán el método CSR con respuesta en superficie para evaluar la potencialidad de licuación.

Tabla 10 - Tabla comparativo Respuestas en análisis Lineal y No Lineal

Registro			Análisis No Lineal, Desarrollo PWP, Roca Elástica				Vs	Análisis Lineal, Roca Rígida	Limite de Ism	licua
Dist Epic(Km)	Mw	sismo	Ism (cm4/s3)				Licua	Ism (cm4/s3)		
			Superficie No Lineal (PWP)	Superficie Lineal (EL)	Quiebre No Lineal	Roca		Superficie Lineal		
0.7400	5.30	"Izmir_ Turkey"	12077	14847	10722	16912	no	14,220	76768	No
15.2800	5.90	"Westmorland"	21617	22985	10600	10238	no	43,894		No
4.3300	5.20	"Managua_ Nicaragua-02"	25791	54511	54247	23081	no	88,138		si
5.5700	5.34	"Dursunbey_ Turkey"	15857	21603	11652	11583	no	29,494		no
25.880	6.54	"Superstition Hills-02"	26971	63690	69291	18619	no	90,869	80993	si
79.590	6.88	"Borah Peak_ ID-01"	4070	4583	1726	1040	no	6,429		No
12.560	6.06	"Mammoth Lakes-01"	43078	76298	83115	66769	si	117,163		si
42.300	6.61	"Tottori_ Japan"	65633	92071	93794	132919	si	111,466		si
93.70	7.00	"Darfield_ New Zealand"	49275	60079	36669	9951	no	47,171	106768	no
135.00	7.62	"Chi-Chi_ Taiwan"	20079	23233	14714	2558	no	37,565		No
55.82	7.30	"Taiwan SMART1(45)"	37932	167373	143346	29332	si	227,721		si
69.21	7.28	"Landers"	54082	129640	100544	39248	No	195,642		si
89.76	7.35	"Tabas_ Irán"	27093	28930	7652	6566	no	46,059		No

Se observa en la *Tabla 10* que en el análisis lineal con roca rígida seis registros (resaltados en fondo gris) desarrollaron la suficiente energía para generar licuación de acuerdo con la respuesta en superficie, mientras que sólo tres lo hacen cuando se cambia el lecho rocoso a elástico. En el primer caso representa un 46.15% de los casos, mientras que en el segundo solamente 23%. Eso se debe a que la roca rígida permite menos disipación de la energía de las ondas reflejadas desde la superficie y mantiene más la energía dentro del perfil.

En la *Fig. 56* observamos la variación de la energía debido al tránsito de las ondas en el perfil que actúa como amplificador de la respuesta dinámica, ubicando a los registros en valores de energía superior o cercanos a los necesarios para desarrollar licuación. A su vez se tiene que por el método del equivalente lineal con roca rígida, registros en color morado, se obtienen mayores niveles de respuesta para todos los casos. Los análisis con el método equivalente lineal con roca elástica resultan más pequeños que los anteriores, lo cual es consistente con lo presentado. A continuación se discutirán dos casos particulares de sismos que muestran esta tendencia.

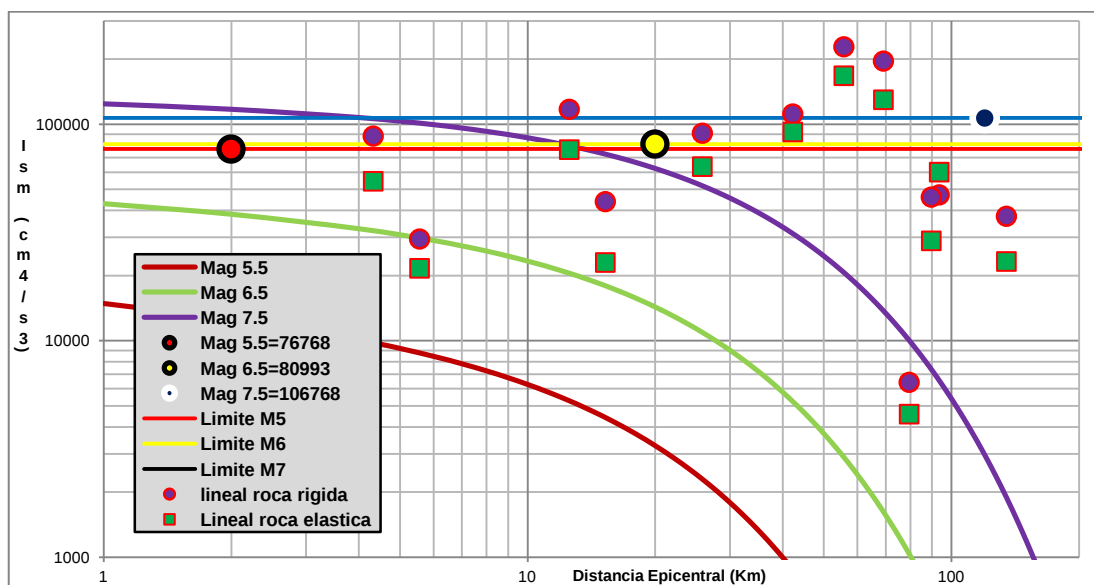


Fig. 56 - Registros de tabla (10) para respuesta en superficie con roca rígida y elástica.

Para el caso del registro de Magnitud 5.20 de "Managua_ Nicaragua-02" para equivalente Lineal con roca rígida, desarrolla una intensidad, $I_{sm}=88,137.75 \frac{cm^4}{s^3}$ indicando la presencia de licuación, sin embargo para el análisis equivalente lineal con roca elástica, se obtiene una intensidad $I_{sm}=54,511 \frac{cm^4}{s^3}$ por debajo de la energía necesaria para licuación. Nótese que en este caso, el método equivalente lineal con roca rígida predice licuación, mientras que el lineal con roca elástica no lo hace y presenta un diferencial de al menos **38.15%** con respecto al análisis con roca rígida. Corroborando la acumulación de energía originada por la consideración de roca elástica en el perfil.

Por otra parte, para el registro de magnitud 7.30 y distancia Epicentral de 55.82 Km, "Taiwan SMART1(45)" el análisis equivalente lineal con roca rígida, indico ocurrencia de Licuación alcanzando una $I_{sm}=227.721 \frac{cm^4}{s^3}$. Sin embargo, en el análisis equivalente lineal con roca elástica, la respuesta en superficie es $I_{sm}=167.373 \frac{cm^4}{s^3}$. En este caso la energía necesaria para la licuación es $I_{sm}=106768 \frac{cm^4}{s^3}$ por lo que se predice la licuación con ambos métodos de análisis. No obstante los valores arrojados con roca elástica presentan una reducción de al menos **62.94%** con respecto al análisis con roca rígida.

Con estos casos de corrobora lo observado en la Fig. 56 donde por esta disipación de energía, vemos que los registros que licuan en el equivalente lineal con roca rígida indicados en color morado, ahora en el equivalente lineal con roca elástica indicados en color verde se ven desplazados hacia abajo con respecto a los anteriores. Se observa adicionalmente que para los sismos con mayor distancia epicentral necesitan amplificar más sus respuestas para poder alcanzar la licuación.

4.2.2. Análisis comparativo del método Equivalente Lineal con roca elástica y no lineal con roca elástica.

En el Fig. 57 correspondiente al registro de "Tottori Japan" que licuó los estratos de arena del perfil con los dos análisis anteriormente presentados, véase la Tabla 10, se observa que la respuesta no lineal en superficie es menor que la respuesta en roca, lo cual indica disipación de energía. Por otra parte, en espectro en el quiebre es bastante parecido al del método equivalente lineal en superficie.

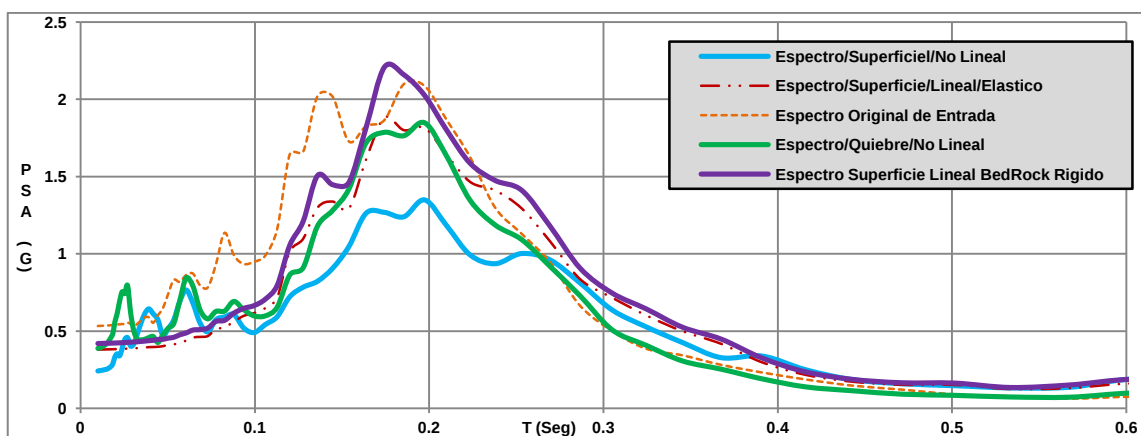


Fig. 57 - Espectro de Respuesta - Registro Magnitud; 6.61. Distancia; 42.30. Tottori Japan. - Comparación de Análisis no Lineal con lecho rocoso Elástico con Análisis lineal con lecho rocoso Rígido.

Continuando con el registro de "Tottori Japan" es oportuno destacar también que con la energía original de su respuesta en roca cuenta con la suficiente energía para desarrollar por sí mismo licuación. No obstante, este registro con el análisis no lineal y roca elástica produce una disminución de su energía, la cual pasa de $I_{sm} = 132.919 \frac{cm^4}{s^3}$ en roca a $I_{sm} = 93.794,47 \frac{cm^4}{s^3}$, la cual es suficiente para licuar en superficie donde se requiere: $I_{sm} = 80.993 \frac{cm^4}{s^3}$. De esta manera tenemos que al generar la presión de poros se observa una disipación de al menos **29.43%** de la energía del estrato de quiebre con respecto a la roca. Si se considerara el nivel de energía en la superficie se tiene que el mismo es $I_{sm} = 65.633 \frac{cm^4}{s^3}$ el cual no es suficiente para licuar.

Caso contrario el registro de "Mammoth Lakes-01" se nos presenta una amplificación de la respuesta en el quiebre, partiendo de una $I_{sm} = 66.769 \frac{cm^4}{s^3}$ en roca que se amplifica hasta $I_{sm} = 83.115 \frac{cm^4}{s^3}$ la cual es superior al límite de los ensayos de laboratorio que es $80.993 \frac{cm^4}{s^3}$. Nótese que en este caso la energía en roca se disipa hasta, $I_{sm} = 43.078 \frac{cm^4}{s^3}$ en superficie. Por ello, tanto en este caso como en el anterior no se supera lo necesario para licuar si se tomase la respuesta en la superficie en la cual ya se ha degradado la arena y puede

indicar niveles no suficientes para causar la licuación. No obstante en el estrato de quiebre se tiene una mejor idea de lo que sucede con la amplificación con respecto a la roca y su efecto en la licuación.

Esto coincide con lo propuesto para los análisis no lineales en el estrato de quiebre, ya que el mismo aporta la información representativa, que podría indicar el desarrollo de licuación que las otras consideraciones en superficie no contemplan. Esto también concuerda con los cambios en las condiciones de respuesta en la entrada de los estratos licuables (quiebre) y la superficie del perfil, motivado al exceso de ablandamiento de los módulos de corte.

4.3. Ocurrencia de licuación en análisis no lineales

4.3.1. Resultados Magnitud 5.00 - 5.99

De los 55 registros correspondientes al intervalo de Magnitud 5.00 a 5.99 únicamente 9 desarrollaron presiones de poros por encima del 80 %. Se toma el límite del 80% para la licuación pues se asume que desde ese valor en adelante se pueden presentar signos visibles de la misma. Con esta consideración, lo anterior representa un 16,36% de los sismos $5,00 \leq M \leq 5,9$ causando licuación. Para el detalle de los registros de esta magnitud, véase el Apéndice (5. A5-1.1) y el Apéndice (5. A5-2.1).

En la Fig. 58 se incluye la curva de atenuación para $M_w=5,5$ con el rango $5,5-1\text{desvest} < M_w = 5,5 < 5,5+1\text{desvest}$ y los resultados de la amplificación de los 9 registros que superan el 80% de la razón de presión de poros. Se observa que los niveles de energía de respuesta quedan relativamente dispersas con relación a la energía requerida para licuar en el laboratorio. Alternativamente, se evaluará su situación en la gráfica de pseudo intensidad espectral, a fin de comprobar esa relación.

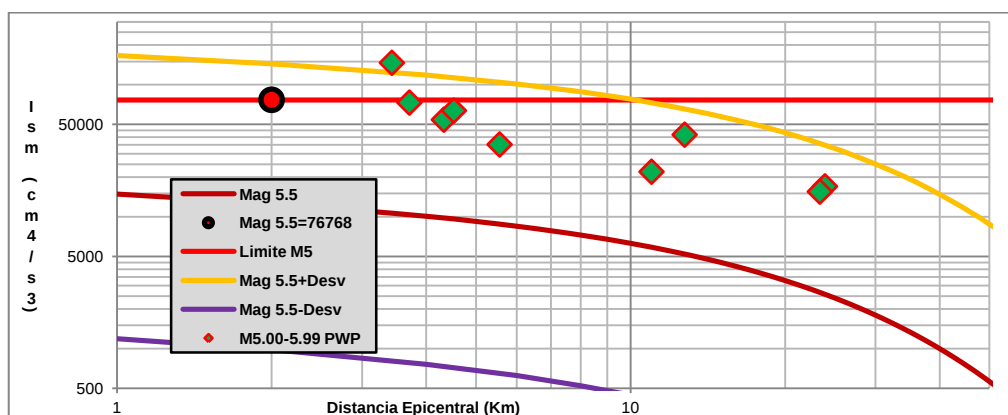


Fig. 58 - Registro de Magnitud 5.00 - 5.99 superiores a 80% de PWP para potencial de Licuación con la ley de atenuación.

Tomando los promedios de Aceleraciones Espectrales mayores que la aceleración del terreno que se indican en el *Apéndice (A5-2.1)*, se grafican dichas aceleraciones para quiebre con sus respectivas duraciones de sus sectores fuertes (Tsm). Observamos que con la frontera propuesta por en análisis equivalente lineal con roca rígida, se deja por fuera registros que superan el 80% de presión de poros. Lo anterior se ilustra en la *Fig. 59*.

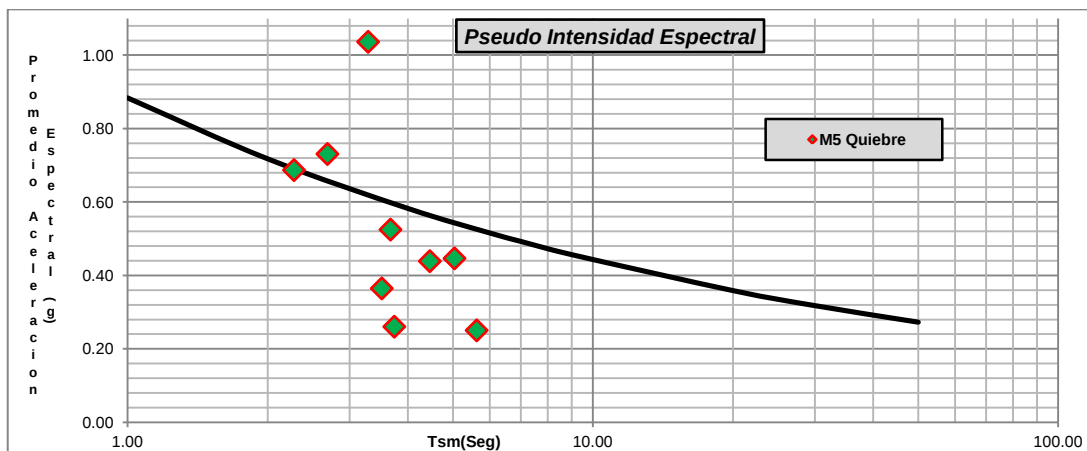


Fig. 59 - Registros Magnitud 5.00 - 5.99 superiores a 80% de PWP - Pseudo Intensidad Espectral Vs Tsm.

Finalmente se busca comprobar que estos registros cumplen con la relación entre la distancia epicentral en la cual ocurre licuación con respecto a la magnitud de momento, *Ambresys y Menu (1988)*, donde al graficarlos observamos que el grueso de los registros se encuentran dentro de los límites para que se desarrolle la licuación, Véase *Fig. 60*.

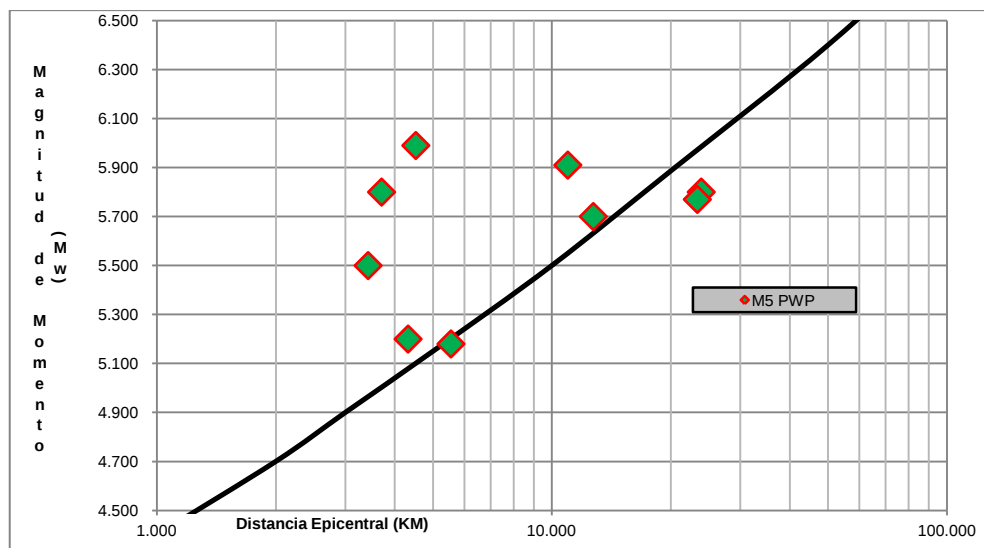


Fig. 60 - Mw vs Dist - Registro de Magnitud 5.00 - 5.99 superiores a 80% de PWP - Relación entre la distancia epicentral en la cual ocurre licuación con respecto a la magnitud de momento. *Ambresys y Menu (1988)*.

Se seguirá la misma metodología del caso anterior de magnitud 5 para presentar los resultados y figuras de las magnitudes 6 y 7, por consiguiente todas tablas se presentaran en los apéndices en su respectivo orden.

4.3.2. Resultados Magnitud 6.00 - 6.99

De los **80** registros, correspondientes al intervalo de Magnitud 6.00 a 6.99 únicamente 25 superaron el desarrollo de 80%. Lo que corresponde a una ocurrencia del **31.25%**, de todos los registros de esta magnitud. Para más detalle de todos los registros de esta magnitud, véase el Apéndice (5. A5-1.2) y el Apéndice (5. A5-2.2).

Graficando estos registros se observa la consistencia con lo propuesto para magnitud 5.00 a 5.99, donde evaluando con la intensidad y distancia epicentral tenemos que el grueso de los registros alcanzan la intensidad necesaria para licuar. Aquellos que no la alcanzan se mantienen cercanos a esa frontera. Véase Fig. 61.

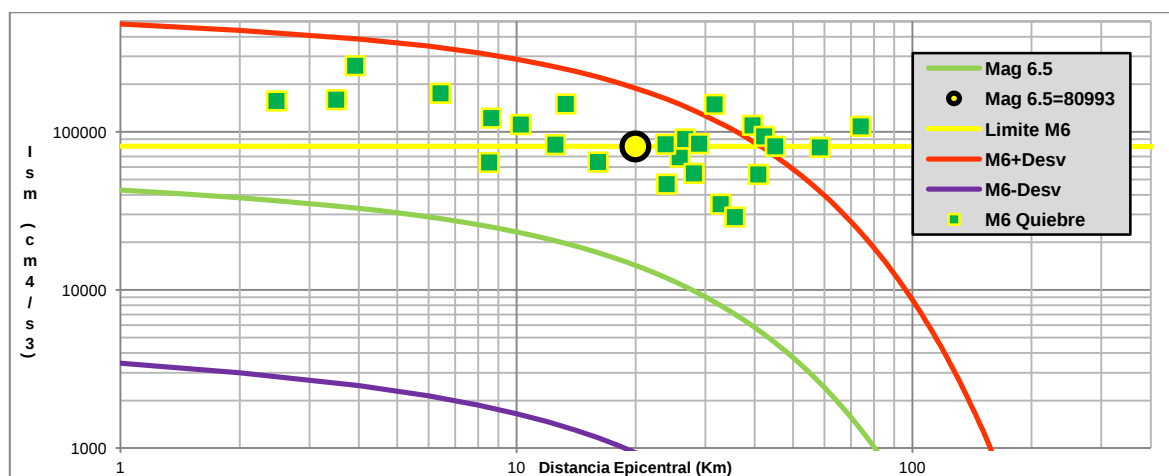


Fig. 61 - Registros Magnitud 6.00 - 6.99 superiores a 80% de PWP para potencial de Licuación con la ley de atenuación.

Con la pseudo intensidad espectral la mayoría de los registros superan la frontera, no obstante un grupo de registros queda por fuera de la frontera pero no dista mucho de la misma, sugiriendo un leve ajuste. Véase Fig. 62.

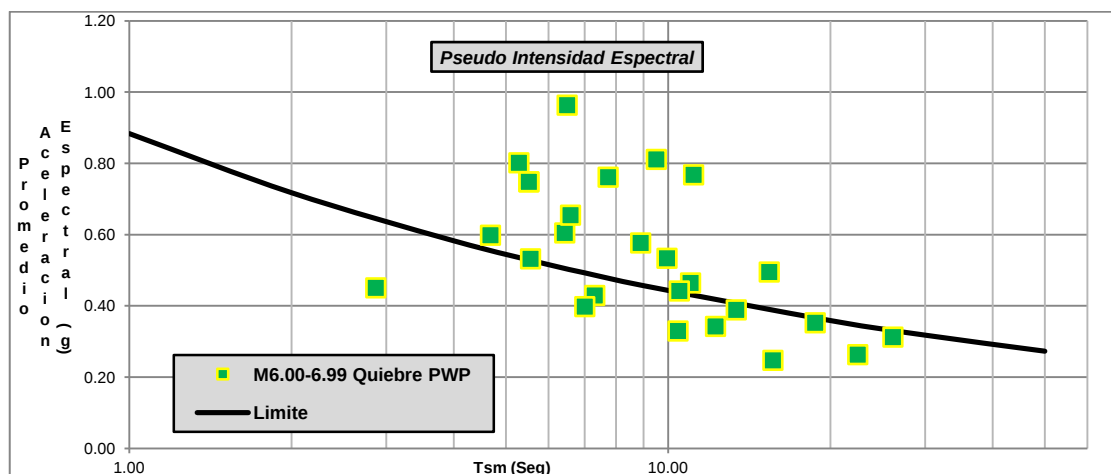


Fig. 62 - Registros Magnitud 6.00 - 6.99 superiores a 80% de PWP - Pseudo Intensity Spectral Vs Tsm.

De la relación de magnitud vs distancia obtenemos la coherencia con esta frontera propuesta, teniendo dos casos particulares que quedan por fuera de la misma. Véase Fig. 63.

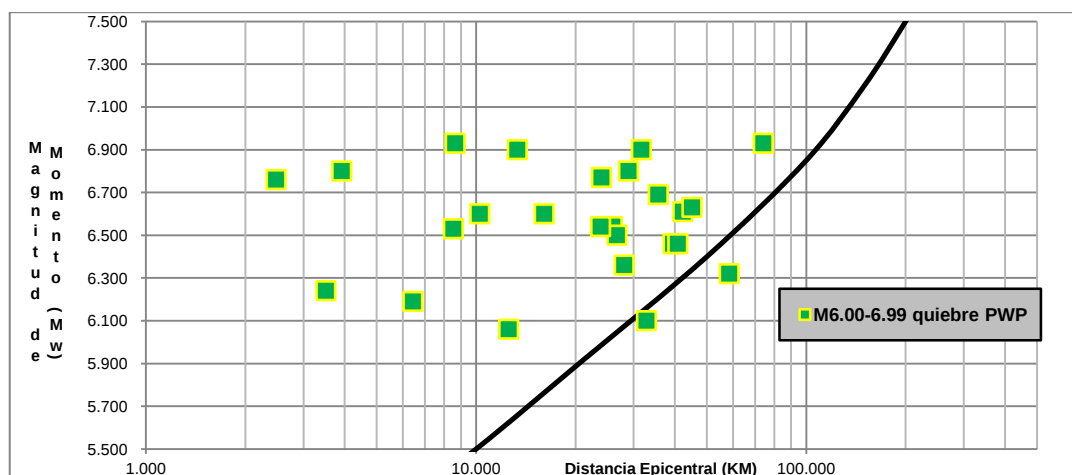


Fig. 63 - Mw vs Dist - Registros de Magnitud 6.00 - 6.99 superiores a 80% de PWP - Relación entre la distancia epicentral en la cual ocurre licuación con respecto a la magnitud de momento. Ambresys y Menu (1988).

4.3.3. Resultados Magnitud 7.00 - 7.99

De los 71 registros, correspondientes al intervalo de Magnitud 7.00 a 7.99 únicamente 28 superaron el desarrollo de 80%. Lo que corresponde a una ocurrencia del **(39.43%)**, de todos los registros de esta magnitud. Véase el Apéndice (5. A-1.3) para todos los registros de esta magnitud y el Apéndice (5. A5-2.3) para más detalle sobre licuación.

Graficando estos registros encontramos la consistencia con lo propuesto en los casos anteriores, donde evaluando con la intensidad y distancia epicentral tenemos que el grueso de los registros si alcanzan la intensidad necesaria para licuar, los que no la alcanzan se mantienen cercanos a esta frontera. Véase Fig. 64.

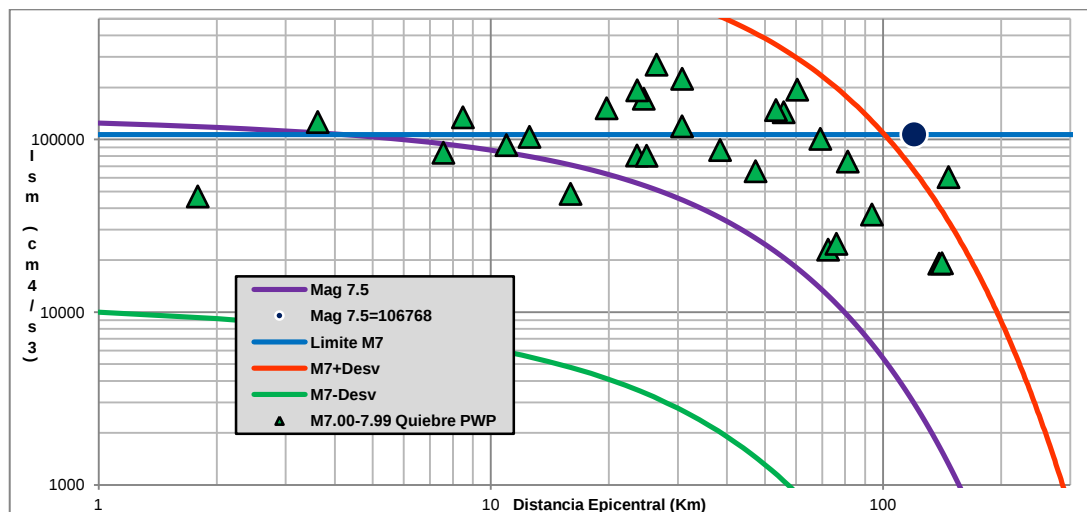


Fig. 64 - Registro de Magnitud 7.00 - 7.99 superiores a 80% de PWP para potencial de Licuación con la ley de atenuación.

Con la pseudo intensidad espectral la mayoría de los registros superan la frontera, no obstante un grupo de registros queda por fuera de la frontera pero no dista mucho de la misma, sugiriendo un leve ajuste, nótese que a su vez se corrobora que mientras mayor sea la distancia epicentral mayor será la amplificación del registro para licuar. Véase Fig. 65.

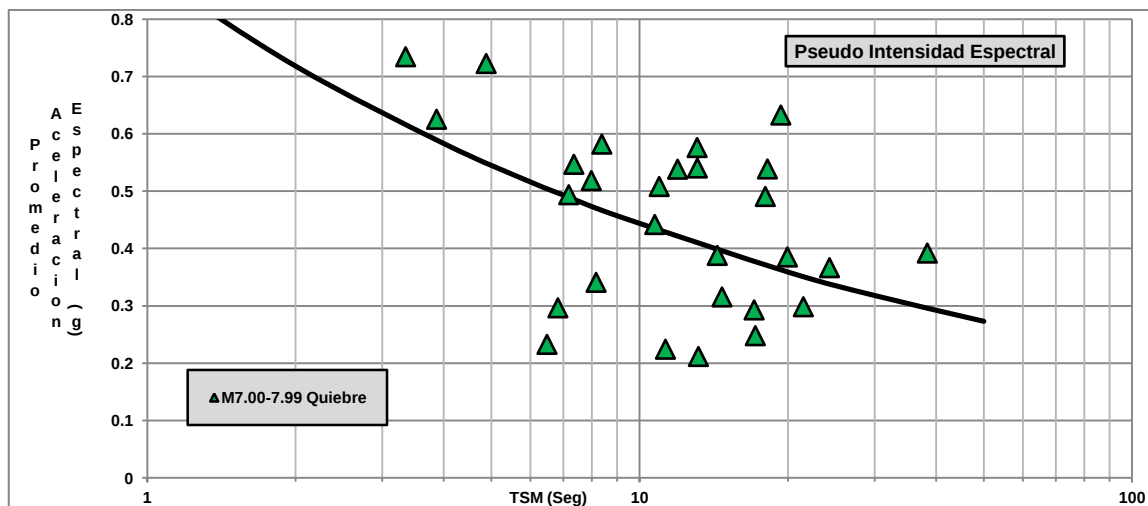


Fig. 65 - Registros Magnitud 7.00 - 7.99 superiores a 80% de PWP - Pseudo Intensidad Espectral Vs Tsm.

De la relación de magnitud vs distancia obtenemos la coherencia con esta frontera propuesta. Véase Fig. 66.

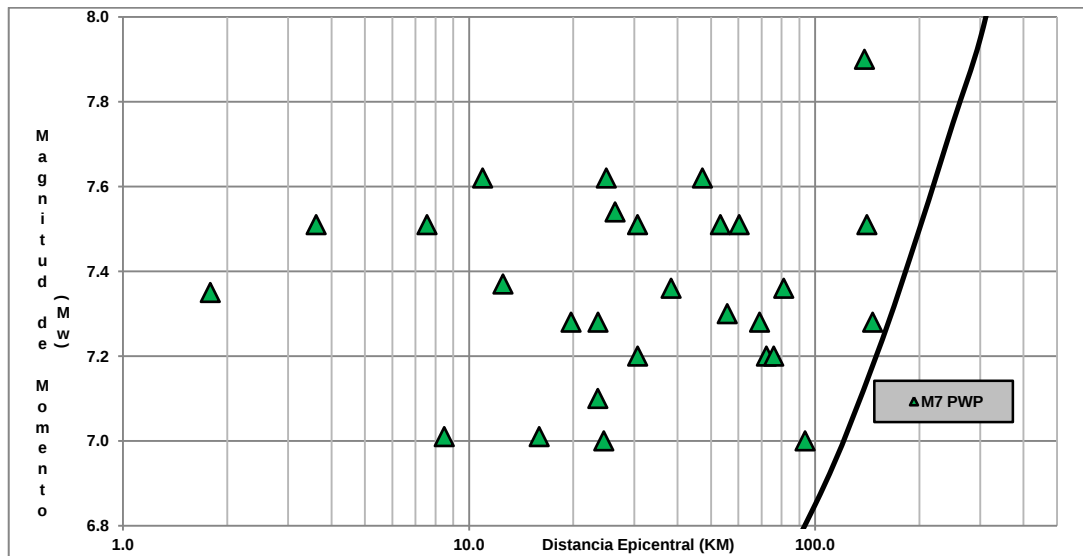


Fig. 66 - M_w vs Dist - Registro de Magnitud 7.00 - 7.99 superiores a 80% de PWP - Relación entre la distancia epicentral en la cual ocurre licuación con respecto a la magnitud de momento. Ambresys y Menu (1988).

4.4 Graficas de Resultados Globales

Para apreciar la tendencia que presentan los registros analizados, se evaluarán de manera global todos los que desarrollen presión de poros, haciendo énfasis en los que superen el 80% de la misma.

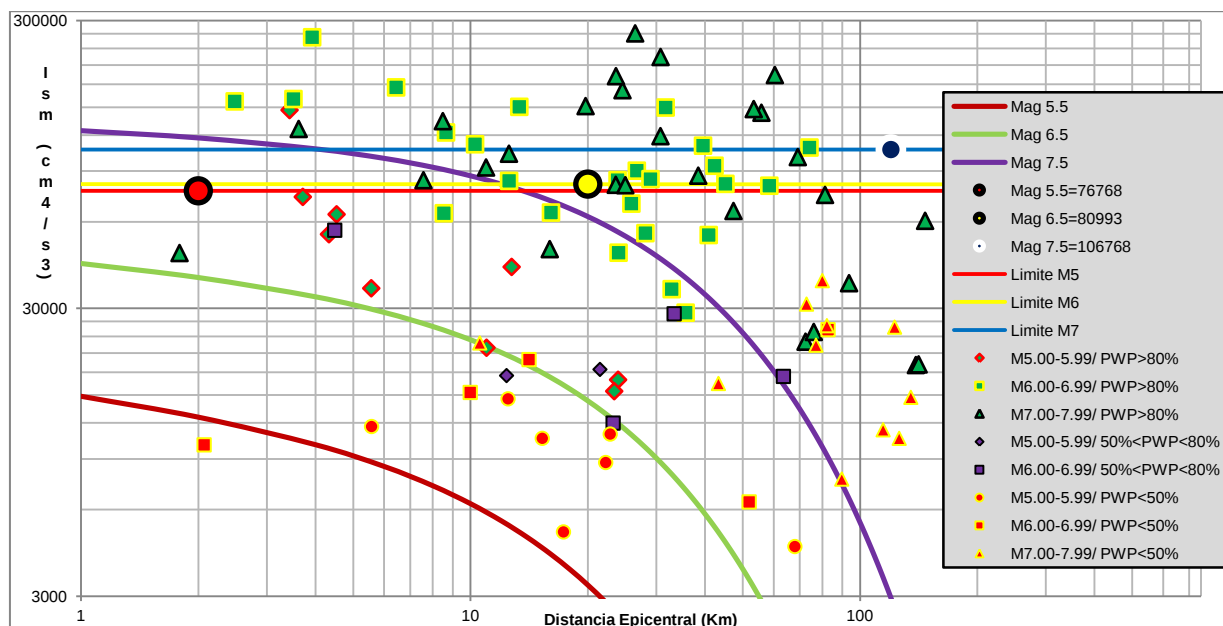


Fig. 67- Registros globales 5.00 - 7.99 para potencial de Licuación con la ley de atenuación.

Para el análisis de intensidad del sector fuerte del Acelerograma observamos en la Fig. 67 en la cual un grueso de los registros desarrolla el valor de intensidad necesario para licuar en su respectiva magnitud, obteniendo una ocurrencia para los 206 registros de **13,59%**, corroborando que el desarrollo de máximas presiones de poros está directamente relacionado con la amplificación de la respuesta dinámica.

Para la gráfica de Pseudo Intensidad Espectral se observa que debido a la dispersión de los registros la frontera propuesta anteriormente no los contempla a todos, por esto se propone una nueva frontera, para asegurar que la misma contemple en mayor medida los registros que superen el 50% de presión de poros, al ser este porcentaje el que demuestra resultados más representativas en lo que respecta a valores de energía e intensidad del movimiento sísmico. Siendo esta propuesta una curva más pronunciada al inicio del gráfico y que al transcurrir el tiempo decrece de manera constante a una ordenada de 0.20 (Línea en Rojo), véase Fig. 68.

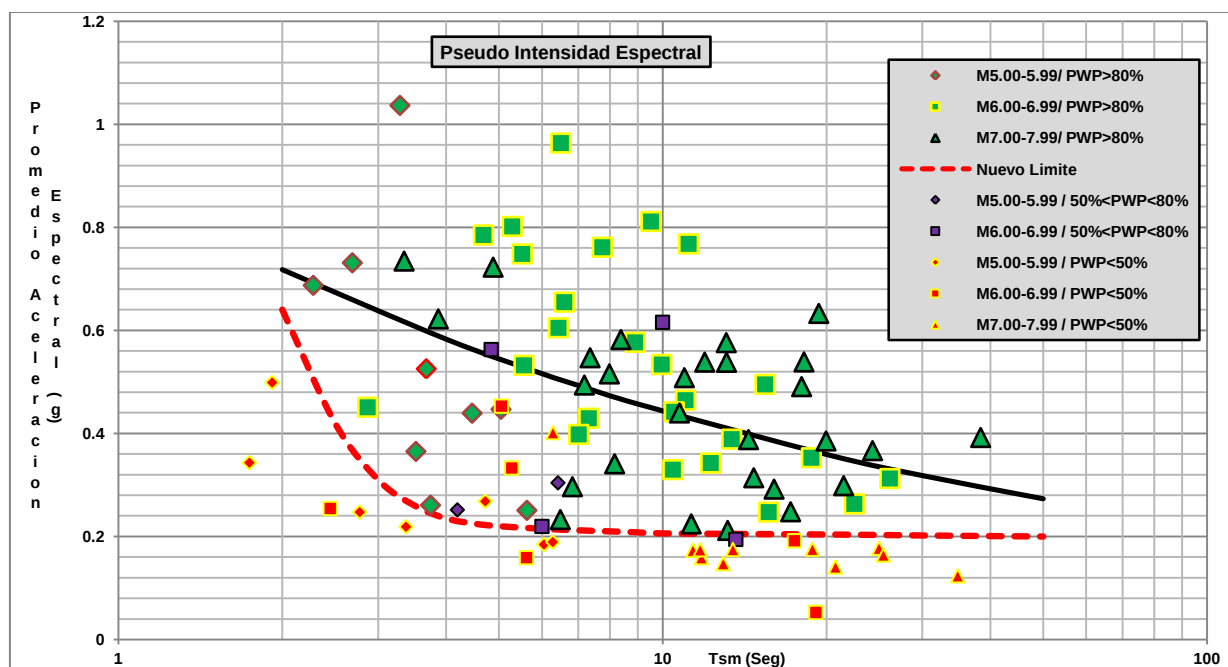


Fig. 68 - Registros Globales que desarrollan PWP - Pseudo Intensidad Espectral Vs Tsm.

Con esto se tiene una nueva metodología que es coherente con las ya propuestas en la literatura y arroja resultados más robustos. Para esta grafica como se indica en la leyenda, se tienen en color verde todos los registros que superan el 80% de presión de poros, en morado los registros que van desde 50% a 80% de presión de poros y en rojo los que van desde 0% a 50% de desarrollo de presión de poros.

Para la relación de Magnitud de Momento y Distancia epicentral se presenta un sutil divergencia para la frontera de licuación, teniendo unos registros que superaron el 80% de presión de poros que se encuentran por debajo de la frontera, pero al ser bajo el número de los mismos con respecto a todo los evaluados, se demuestra la efectividad y consistencia de dicha frontera.

Aunque se podría ajustar para el rango entre $M=5,00$ y $M=7,20$ Véase Fig. 69. con la línea roja segmentada pues podría pensarse que hasta ahora no han ocurrido sismos capaces de generar licuación a perfiles como el estudiado en este trabajo.

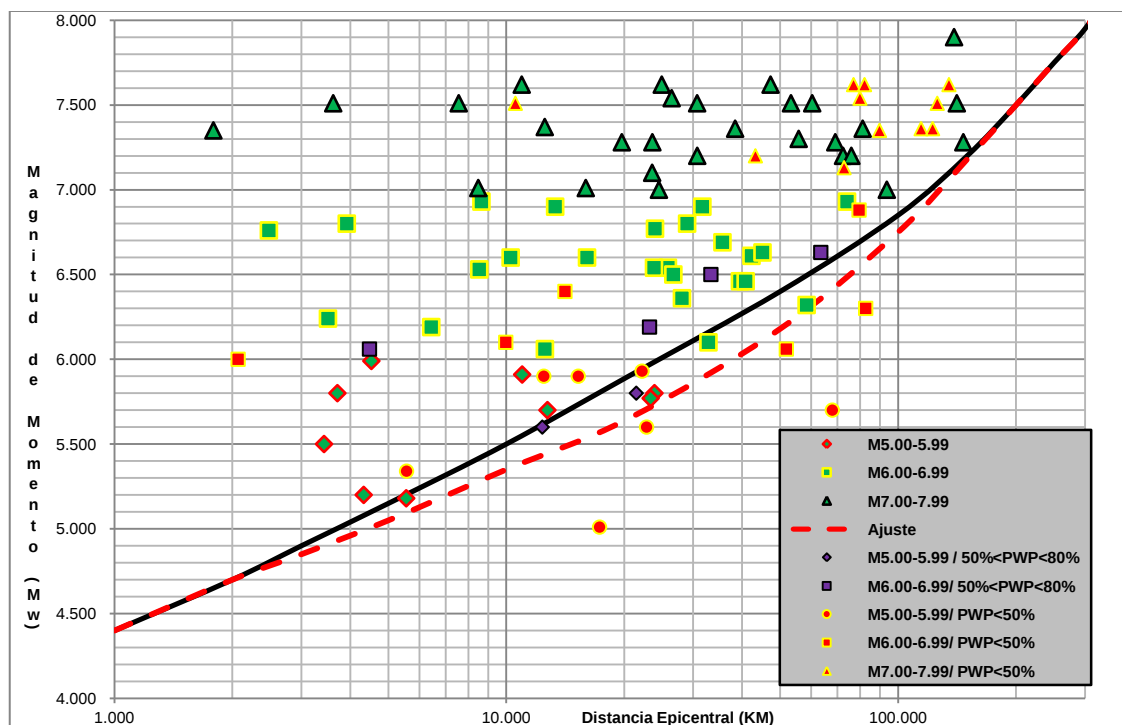


Fig. 69 - Registro globales 5.00 - 7.99 - Relación entre la distancia epicentral en la cual ocurre licuación con respecto a la magnitud de momento. Ambresys y Menu (1988)

4.5. Relación de Pseudo Potencia Espectral con la intensidad del sector fuerte del Acelerograma

Se propone una correlación entre las ordenadas espectrales y la energía del evento expresada por la metodología de la intensidad del sector fuerte del Acelerograma, la cual denominaremos como ‘pseudo potencia espectral’, donde en el eje de las ordenadas se expresa el promedio de las ordenadas espectrales mayores a la aceleración del terreno (g) al cuadrado, llevando a unidades cónsonas multiplicándolo por 980 al cuadrado (cm/seg²) para luego multiplicarlo por la duración del sector fuerte del Acelerograma (Tsm), y en el eje de las abscisas la intensidad del sector fuerte del Acelerograma (Ism) del estrato en estudio, para

este caso analizaremos el estrato de quiebre. Se graficaron en color verde los todos registros que superan el 80% de presión de poros, en morado los que tengan un desarrollo entre 80% y 50%, y en color rojo todos los que estén menor a 50%. Véase *Fig. 70*.

Se observa con los registros en rojo, que es necesario una potencia mínima para que se desarrolle licuación, a su vez debe ocurrir amplificación en la respuesta en roca cuando la misma es baja, para que se alcancen los valores de ordenas necesarios por cada evento. Para que una respuesta dinámica pueda indicar licuación, se tiene que desarrollar una potencia dada por el promedio de las ordenadas espectrales al cuadrado, junto con un mínimo de tiempo similar al del Sector fuerte del Acelerograma, para que este desarrolle todo su potencial como se observó en la pseudo intensidad espectral.

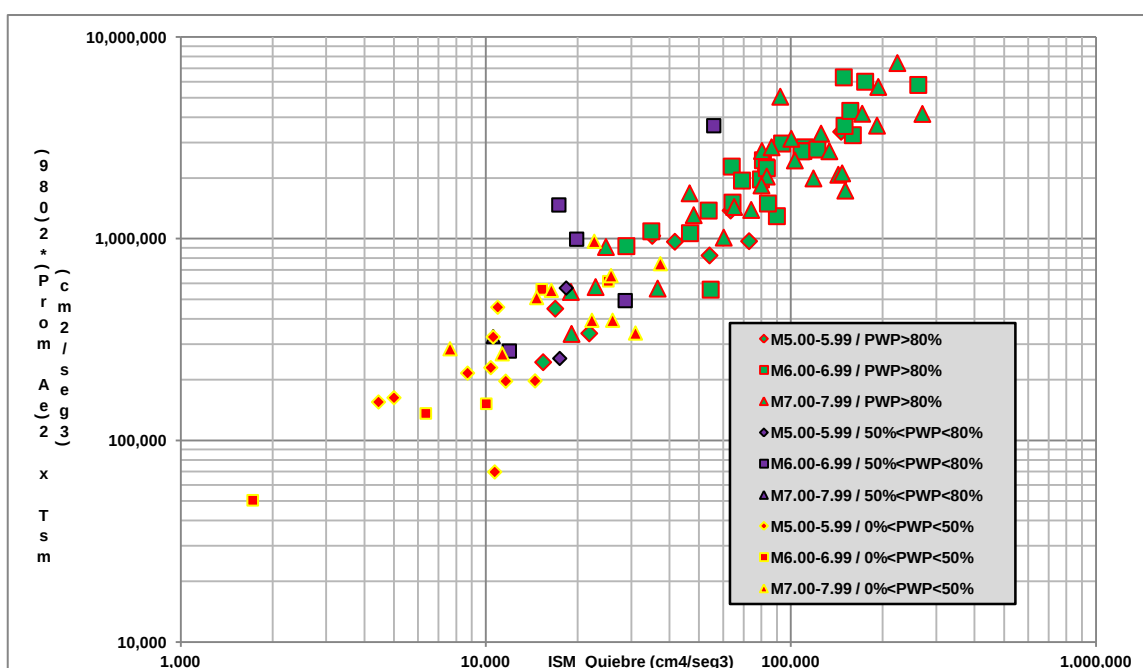


Fig. 70 - Pseudo potencia espectral - Relación de Promedio de la Aceleración Espectral mayores que la aceleración del terreno al cuadrado por la duración del sector fuerte del Acelerograma vs La intensidad del sector fuerte del Acelerograma en el estrato de quiebre.

Nótese que se define un intervalo en el eje de las ordenadas que va desde 100.000 a 1.000.000 donde se encuentran los registros con una presión de poros menor al 50% y unos casos particulares de los otros intervalos, luego superada la ordenada de 1.000.000 tenemos al grueso de los registros que desarrollan valores superiores al 80% de presión de poros, junto a casos particulares que desarrollan entre 50% y 80% de la misma. Esto corrobora lo obtenido con la grafica de pseudo intensidad espectral donde el desarrollo de las ordenadas espectrales es proporcional a la energía liberada en el movimiento sísmico.

Posteriormente se analiza la I_{sm} en roca con respecto a la I_{sm} en el quiebre, si originalmente el evento tiene poca energía esta tendrá que amplificarla en los estratos licuables para desarrollar la licuación, no obstante si el evento por su naturaleza cuenta con mucha energía, esta tiende a mantener un nivel mínimo de ordenadas que son suficientes para desarrollar licuación. Nótese que el grueso de los registros con presión de poros superior al 80% amplificó su respuesta en los licuables, véase los registros en color verde en la Fig. 71.

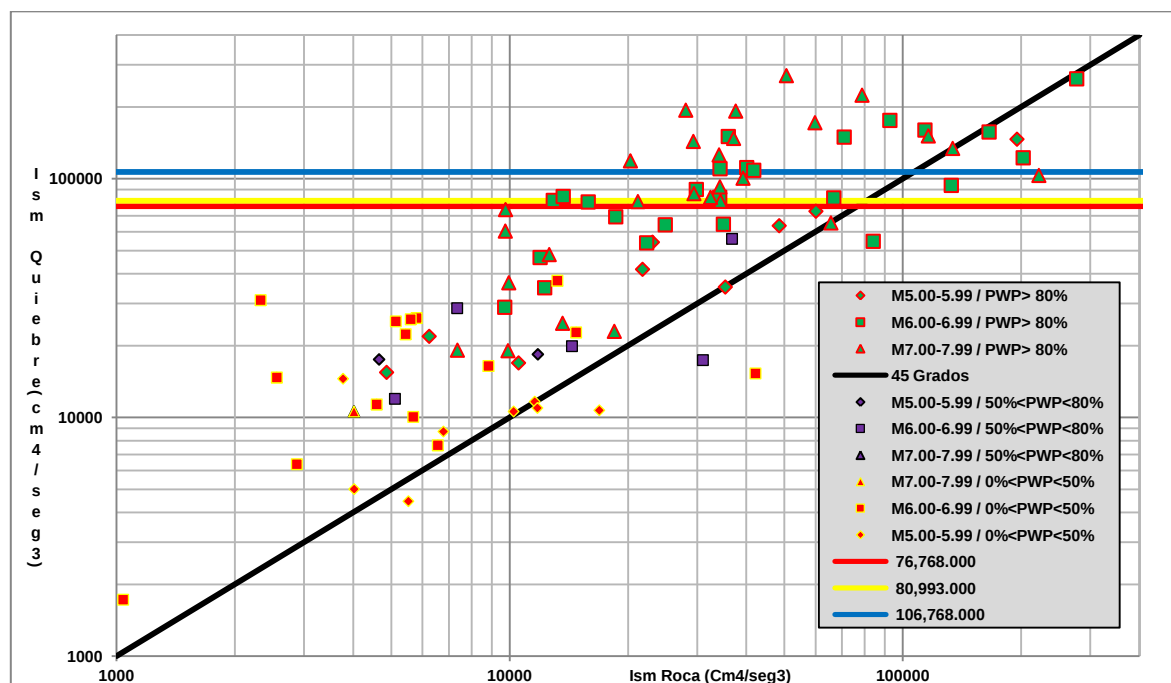


Fig. 71 - Relación de la Intensidad del sector fuerte del Acelerograma en roca vs intensidad del sector fuerte del Acelerograma en Quiebre

Contrariamente se observa con los registros con una presión de poros menor al 80%, cuentan con un bajo valor de ordenadas en roca y no logran amplificar lo suficiente para desarrollar la licuación.

4.6. Desarrollo de Presión de Poros a distintos periodos fundamentales.

Una vez definidas las características de los estratos licuables, los cuales se encuentran a menos de 20 m de profundidad, se cambiaron los promedios de las velocidades de las ondas de corte de los estratos por debajo de los primeros 20 m del perfil para obtener diferentes periodos fundamentales, pero manteniendo intactos los estratos licuables en los 20 m superiores. De esta manera se pueden comparar las respuestas dinámicas y cómo varía el desarrollo de presión de poros en los estratos licuables al variar los periodos fundamentales del depósito. En la *Tabla 11* se presentan esos resultados. Para mayores detalles sobre la metodología para obtener el período fundamental del depósito, T_0 , véase el *Apéndice (6)*.

Tabla 11 - Velocidades de Onda con periodos Fundamentales

Vs estrato inferior	Vs100	Vs200	Vs300	Vs400	Vs500	Vs600	
Periodo Fundamental (To)	3.56	2.01	1.50	1.25	1.08	0.98	Seg
Velocidad Promedio del Perfil	108	191	256	310	354	391	m/s

Nota: Las velocidades promedios indicadas en esta tabla corresponden al promedio de velocidades de todo el perfil sin cambiar el promedio de los 20 metros superiores del perfil, se tomara el término ‘Vs’ para referirse a la velocidad del estrato por debajo de los 20 metros del perfil. Se mantendrá una nomenclatura de colores, donde los colores que están indicados en los recuadros de Vs100 a Vs600 en esta tabla, corresponderán a sus respectivas curvas en las gráficas que se verán desde este apartado.

Tal como se muestra en las Fig. 72 a 74, para el sismo de San Salvador, se verifica que el máximo desarrollo de presión de poros no ocurre en un estrato en particular y el mismo cambia de manera cíclica entre los estratos licuables en función del período fundamental del depósito.

La Fig. 72 muestra que los períodos fundamentales (To) correspondientes a las velocidades de onda de corte de 300 m/s hasta 600 m/s que van desde 1,49 seg a 0,98 seg véase Tabla 11, tienden a coincidir o están muy próximos a picos de las ordenadas espectrales del espectro en roca. Se incluyen también en la Fig. 72 los espectros de respuesta obtenidos en superficie con el método equivalente lineal y roca elástica, con el método no lineal y roca elástica y en estrato de quiebre. La Fig. 73 incluye los gráficos de desarrollo de presiones de poros para los rangos de velocidades entre 500 m/s y 600 m/s, mientras que la Fig. 74 lo hace para el rango entre 100 m/s y 500 m/s.

Para el caso de Vs=600 m/s con To=0,981 seg, se definen las profundidades donde se desarrollan las altas presiones de poros, en estos se alcanza un 95% en el estrato superior y 87% en el estrato inferior. Véanse las Figs. 72 y 73.

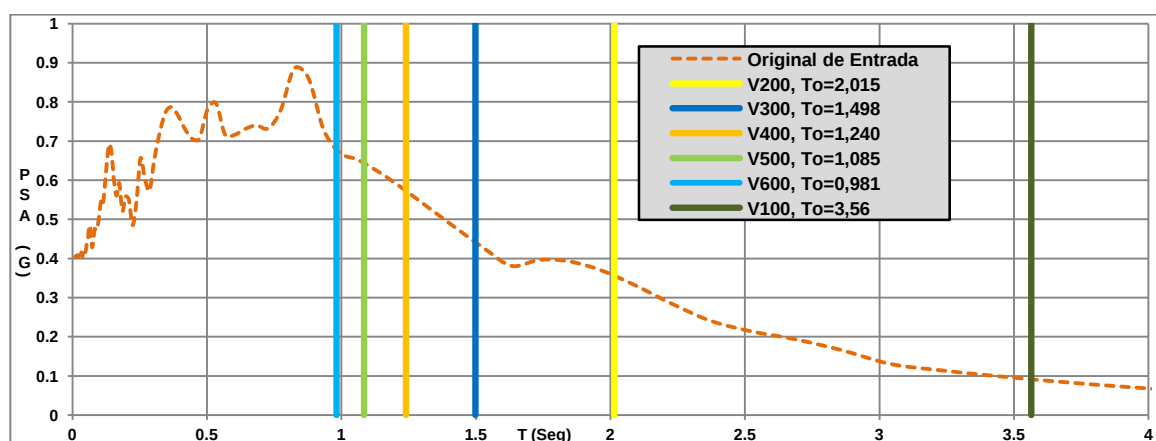


Fig. 72 - Espectro de respuesta con To=1,53 s y períodos para de distintas Velocidades de ondas por debajo de los primeros 20 m del perfil - Registro de Magnitud: 5,80 - Distancia Epicentral: 3,71 km 'San Salvador'

Para el caso de $V_s=500$ m/s con un $T_o=1,084$ seg, se alcanzan las presiones de poros del 95% para los dos estratos del caso anterior, no obstante se presencia un mayor desarrollo de la presión de poros en los estratos adyacentes a estos. Véase Fig. 73. Para el caso de $V_s=400$ m/s con un $T_o=1,239$ seg se desplazan las profundidades donde se desarrolla las máximas presiones de poros, en un intervalo alrededor de un metro de los casos anteriores, regresando a un caso similar al observado para el caso de $V_s=600$ m/s y $T_o=0,98$, es decir, 95% en el estrato superior y 50% en el inferior. Véase Fig. 74.

Finalmente, para el caso de $V_s=300$ m/s con $T_o=1,498$ seg, el más cercano al valor original del período fundamental del depósito: $T_o=1,532$ seg, se invierten las profundidades en donde se desarrollan las máximas presiones de poros, siendo para el estrato inferior de 95% y de 76,65% para el estrato superior. Véase Fig. 74.

Lo anterior demuestra la importancia de la respuesta dinámica del sitio y, en particular, del período fundamental del depósito considerando la profundidad hasta la roca y no en los 25 a 30 metros superiores del perfil, los cuales no fueron modificados en el análisis.

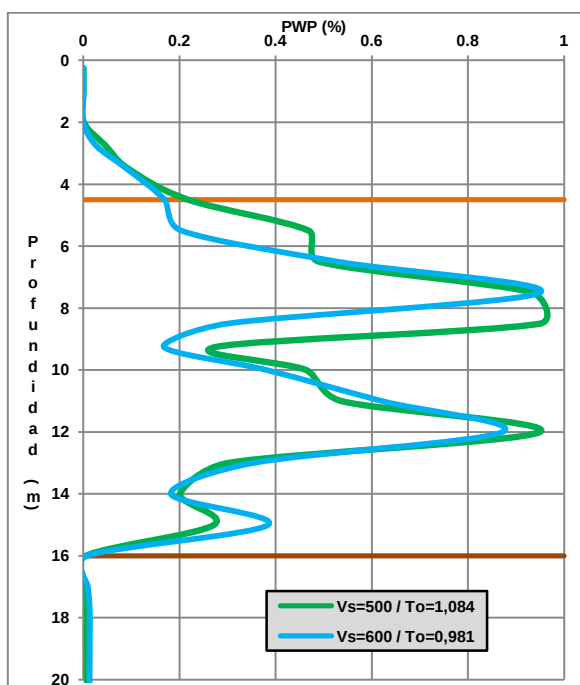


Fig. 73 - Desarrollo de PWP vs Profundidad V500 a V600 - Registro M: 5,80. D: 3,71 "San Salvador"

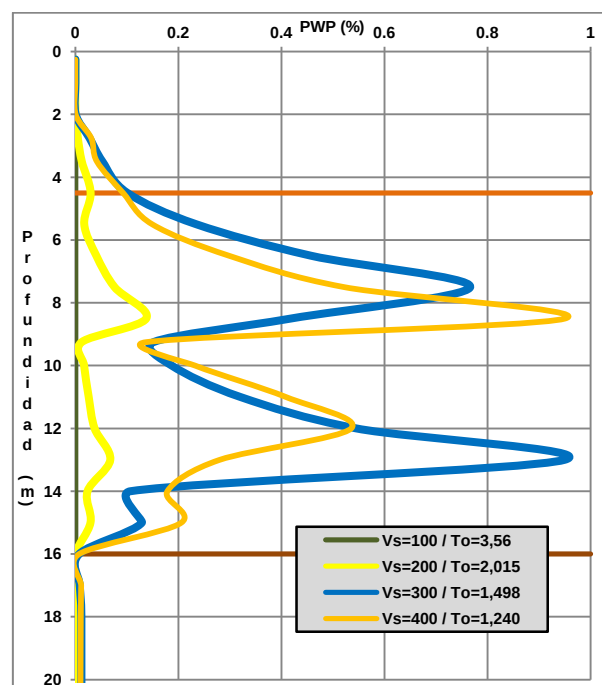


Fig. 74 - Desarrollo de PWP vs Profundidad V100 a V400 - Registro M: 5,80. D: 3,71 "San Salvador".

4.6.1. Análisis comparativo de desarrollo de presión de poros para registros con distintas magnitudes y distancias epicentrales

Considerando lo expuesto en la Sección 4.1 arriba, a continuación se presenta un análisis comparativo de cuatro registros, dos de los cuales tienen mucha energía en roca con otros dos registros que originalmente tienen poca energía en roca. Para los dos primeros sismos la energía disponible en roca les permitiría alcanzar la licuación, mientras que en el segundo caso no. Se verificará, entonces, el papel de la respuesta del perfil en el desarrollo de las presiones de poros.

Para el análisis se utilizará primero el registro de “Tabas Irán” que cuenta con una $M_w=7,35$ y una distancia epicentral de 1,79 km. Se observa en la Fig. 75 que el mismo tiene ordenadas espectrales sumamente altas para períodos por debajo de los $T=1,3$ s, alcanzado la ordenada 3,75 g a un $T_o=0,19$ seg. Sin embargo este umbral de altas ordenas espectrales solo se desarrolla hasta el $T_o=1$ seg, aproximadamente. Posterior a ese período se mantiene una amplitud más o menos constante alrededor de 0,5 g.

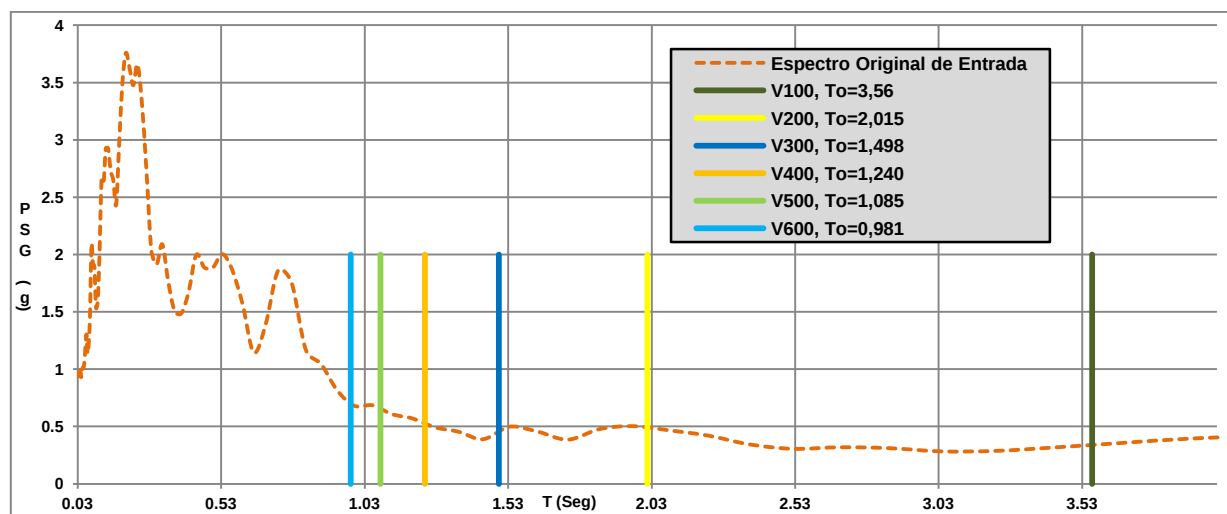


Fig. 75 - Espectro de respuesta con $T_o=1,53$ s y períodos para de distintas Velocidades de ondas por debajo de los primeros 20 m del perfil - Registro de $M_w: 7,35$ - Distancia Epicentral: 1,79 km "Tabas Irán"

Para la respuesta dinámica en el quiebre, incluida en la Fig. 75 con color verde, las ordenadas espectrales no llegan a amplificar la respuesta y las amplitudes se mantienen similares a los valores correspondientes al espectro en la roca. Sin embargo, debido a la naturaleza del evento, los valores de las ordenadas espectrales que se desarrollan en la respuesta en el quiebre (antes de entrar en el estrato licuable), están en promedio alrededor de 0,50 g y resultan superiores al mínimo establecido en la pseudo intensidad espectral de 0,20 g, para desarrollar presiones de poros máximas en los estratos licuables. Véanse las Figs. 75, 76 y 77.

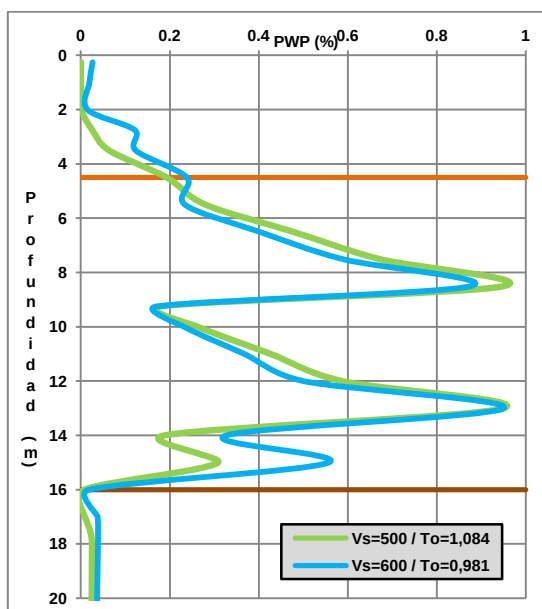


Fig. 76 - Desarrollo de PWP vs Profundidad V500 a V600 - Registro de Mw: 7,35 - Distancia Epicentral: 1,79 km "Tabas Irán"

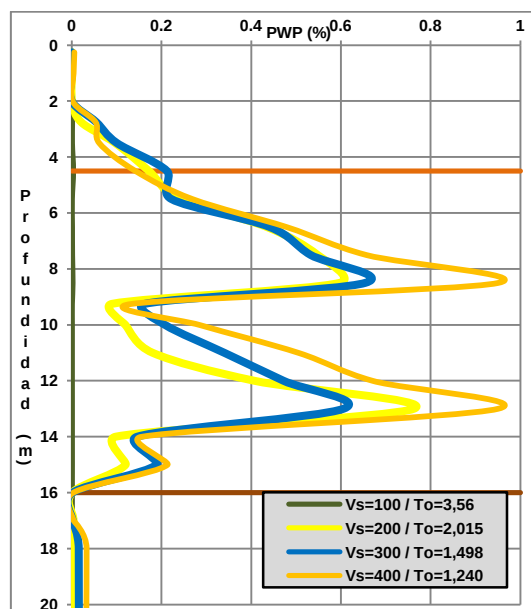


Fig. 77 - Desarrollo de PWP vs Profundidad V100 a V400 - Registro de Mw: 7,35 - Distancia Epicentral: 1,79 km "Tabas Irán"

Se observa en Figs. 76 y 77 que para casi todos los periodos fundamentales estudiados, este sismo desarrolla altas presiones de poros (por encima de 60% en uno o ambos estratos) con la excepción de los períodos fundamentales para velocidades de ondas por debajo de 200 m/s en los estratos inferiores a los 20 primeros metros del perfil. Igualmente para los períodos que van desde $To=0,98$ con $Vs=600$ m/s hasta $To=1,24$ con $Vs=400$ m/s que se encuentran fuera del umbral de máximas ordenadas, desarrollan valores máximos de presión de poros a distintas profundidades en los estratos licuables. Véase Fig. 76 y 77. En este caso, a pesar de que el sismo es atenuado durante el paso por el perfil, el resultado de las ordenadas espectrales es suficiente para lograr la licuación de los estratos en los primeros 20 m del perfil. Recuérdese que Tabas-Irán es un sismo cercano $Re=1,79$ km con $Mw=7,35$.

Contrariamente para el registro de "Loma Prieta" que cuenta con una $Mw=6,93$ (algo menor que el de Tabas-Irán) y una distancia epicentral de 74,16 km (sismo lejano), se tiene una respuesta en roca con relativamente bajas ordenadas espectrales, que son amplificadas por el perfil para la respuesta en los estratos licuables y en superficie, tal como se ilustra en la Fig. 77. Es con esta amplificación en las ordenadas espectrales que sucede el desarrollo de máximas presiones de poros.

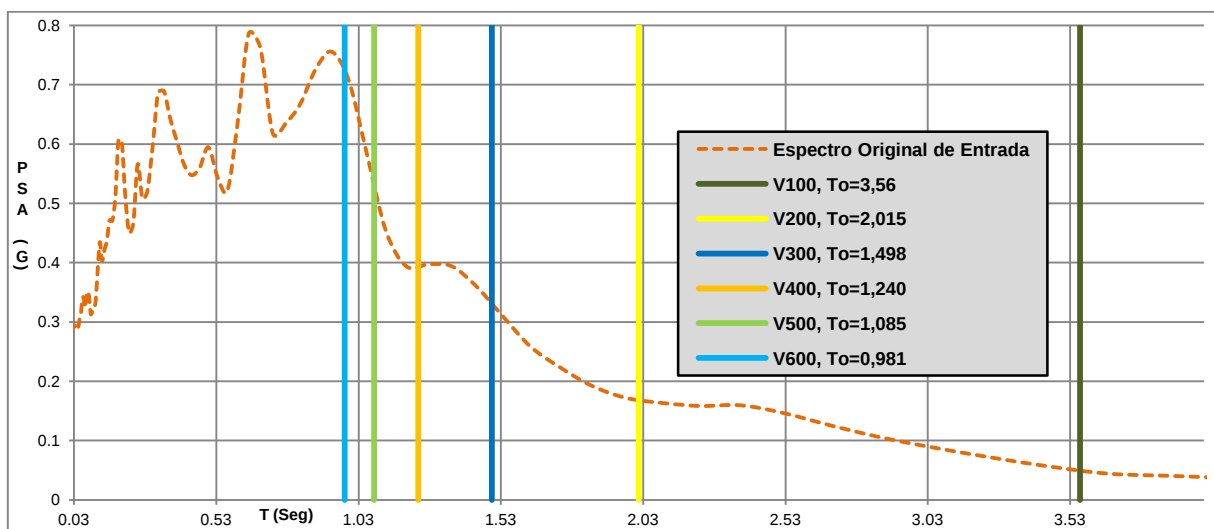


Fig. 78 - Espectro de respuesta con $T_o=1,53$ s y períodos para de distintas Velocidades de ondas por debajo de los primeros 20 m del perfil - Registro de M_w : 6,93 - Distancia Epicentral: 74,16 km "Loma Prieta"

Es la respuesta en el quiebre la que desarrolla las máximas amplificaciones en la respuesta, como se observa en la Fig. 78, se genera un umbral donde coinciden la mayoría de los periodos fundamentales estudiados y el original del perfil de Treasure Island, siendo esta coincidencia con el periodo fundamental del perfil lo que originó que el mismo licuara con el sismo de Loma Prieta. A su vez se analizara cómo se comporta el perfil al iterar los periodos fundamentales estudiados.

Para los casos de $T_o=1,49$ seg con $V_s=300$ hasta $T_o=0,98$ seg con $V_s=600$ m/s coinciden con las máximas ordenadas de la respuesta en quiebre, nótese que el caso de $T_o=1,49$ seg es el último en alcanzar las máximas presiones de poros véase Fig. 79 y 80. El cual es cercano al $T_o=1,53$ seg original del perfil de Treasure Island, corroborando que en este caso espera que ocurra la licuación, como en efecto ocurrió con el sismo de Loma Prieta-89.

Esto es consistente con lo demostrado anteriormente, si el registro por su naturaleza cuenta con poca energía, esta deberá amplificar su respuesta en los estratos licuables, de no ser por esta amplificación el registro con su energía en roca, al contrario del caso anterior de "Tabas Irán" no podría generar máximas presiones de poros y por consecuente no se genere licuación.

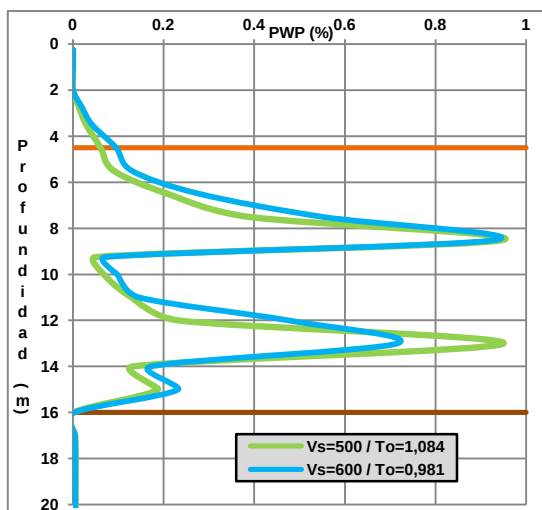


Fig. 79 - Desarrollo de PWP vs Profundidad V500 a V600 - Registro de Mw: 6,93 - Distancia Epicentral: 74,16 km "Loma Prieta"

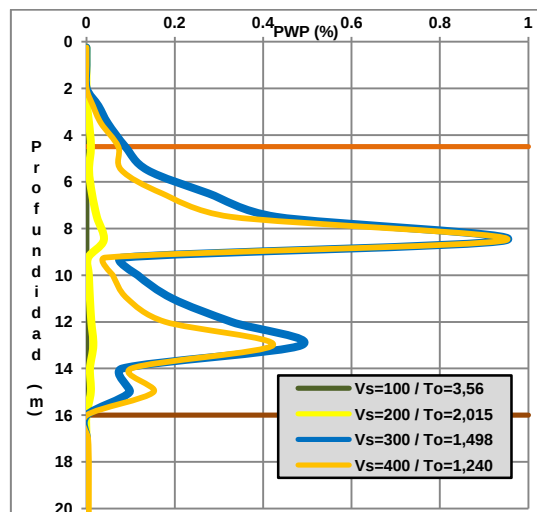


Fig. 80 - Desarrollo de PWP vs Profundidad V100 a V400 - Registro de Mw: 6,93 - Distancia Epicentral: 74,16 km "Loma Prieta"

Para el registro "Tottori, Japan" con Distancia epicentral de 42.3km y Mw=6.61, se observa en la Fig. 81 que al igual que para el registro de "Tabas, Irán", ninguno de los periodos fundamentales que van desde Vs=600 m/s, To=0,98 seg hasta Vs=100, To=3.56 coinciden con ningún máximo visible de las ordenadas espectrales para las tres respuestas mostradas: roca, quiebre y superficie. A su vez se tiene que los máximos valores de ordenas espectrales para las tres respuestas, se encuentran bastante por debajo de 1 segundo similar al caso de "Tabas Irán". Véase Figs. 81 y 75.

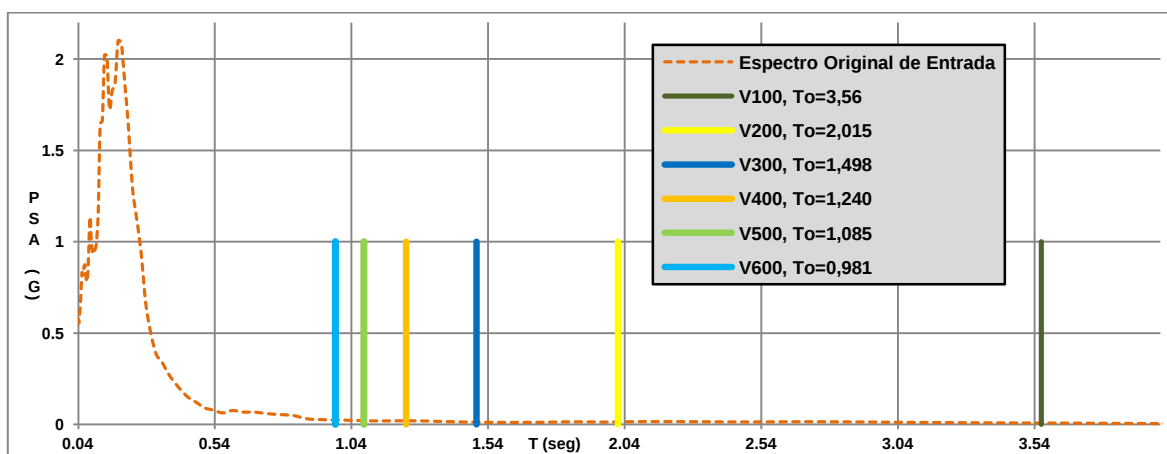


Fig. 81 - Espectro de respuesta con To=1,53 s y periodos para de distintas Velocidades de ondas por debajo de los primeros 20 m del perfil - Registro de Mw: 6,61 - Distancia Epicentral: 42,3 km "Tottori Japan"

No obstante a diferencia del registro de "Tabas Irán", en este caso se observa en la Fig. 82 que para To=0,98 seg con Vs=600 m/s se alcanza un desarrollo de presión de poros del 5,0 % muy por debajo del 80% de

presión de poros, definido para observar la licuación. Para el resto de los casos con velocidades desde 500 m/s hasta 100 m/s en los estratos inferiores a los 20 m de profundidad no se desarrollan valores visibles de presión de poros. Es dentro del umbral de $T_0=0$ seg a $T_0=1$ seg donde se aporta toda la energía del evento para que desarrolle licuación y el período fundamental está bastante lejos de dichos valores.

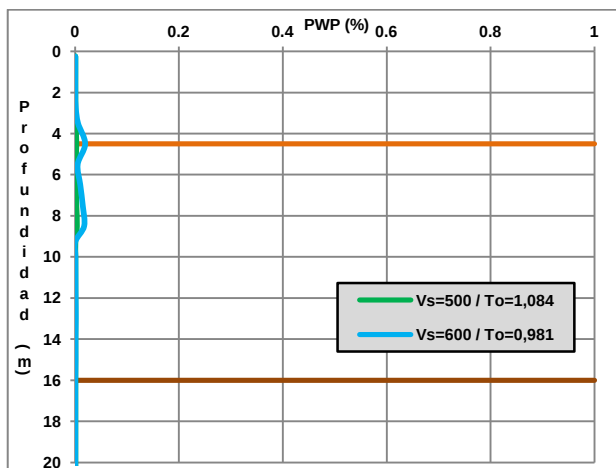


Fig. 82 - Desarrollo de PWP vs Profundidad V500 a V600 - Registro de Mw: 6,61 - Distancia Epicentral: 42,3 km "Tottori Japan"

Esto es consistente con lo observado para el sismo de "Tabas Irán" de que por la naturaleza del mismo y las condiciones del sitio no necesita amplificar su respuesta en roca para generar licuación. Por el contrario, la energía del mismo es atenuada significativamente por el perfil.

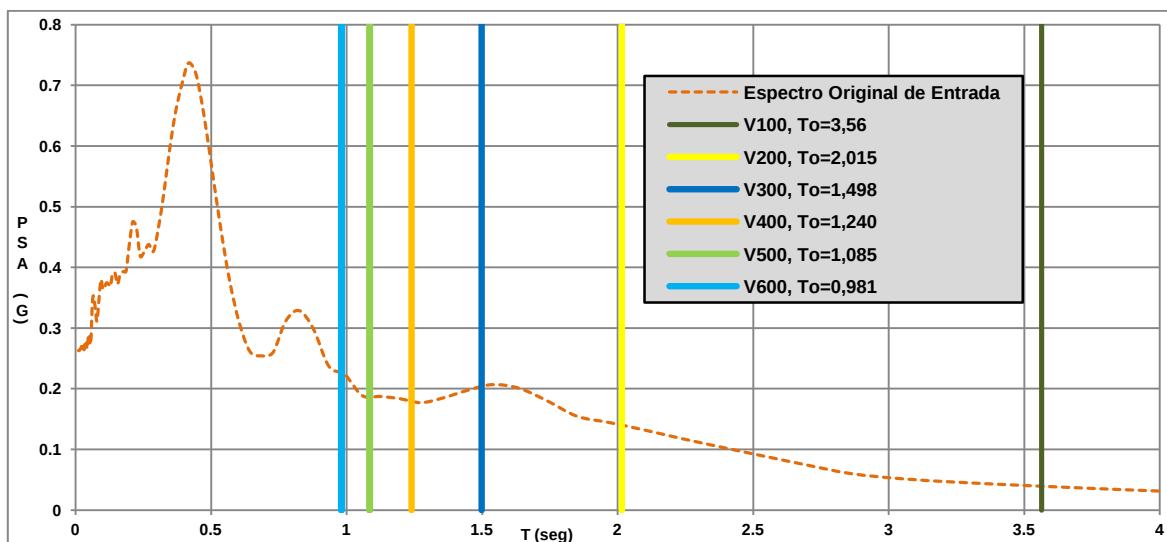


Fig. 83 - Espectro de respuesta con $T_0=1,53$ s y períodos para de distintas Velocidades de ondas por debajo de los primeros 20 m del perfil Vs - Registro de Mw: 5,20 - Distancia Epicentral: 4,33 km "Managua_Nicargaua-02"

Contrariamente, el registro de “Managua Nicaragua_02” con un $M_w=5.10$ y distancia epicentral de 4,33 km, presenta altas ordenadas espectrales para períodos por debajo de los 2,5 s, tal como se muestra en la Fig. 83. De acuerdo con las Fig. 84 y 85, es a partir del $T_o=0,98$ seg, $V_s=600$ m/s hasta el $T_o=1,5$, $V_s=300$ m/s que se desarrollan las máximas presiones de poros. Recuérdese que el periodo fundamental original del perfil ($T_o=1,53$ s) se encuentra muy próximo a este último valor que desarrolla las máximas presiones de poros en el estrato superior.

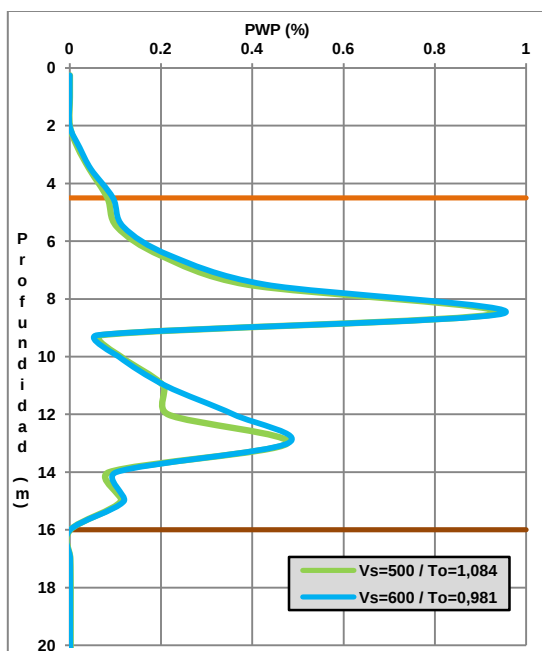


Fig. 84 - Desarrollo de PWP vs Profundidad V500 a V600 - Registro M: 5,10. D: 4,33
“Managua_Nicaragua-02”

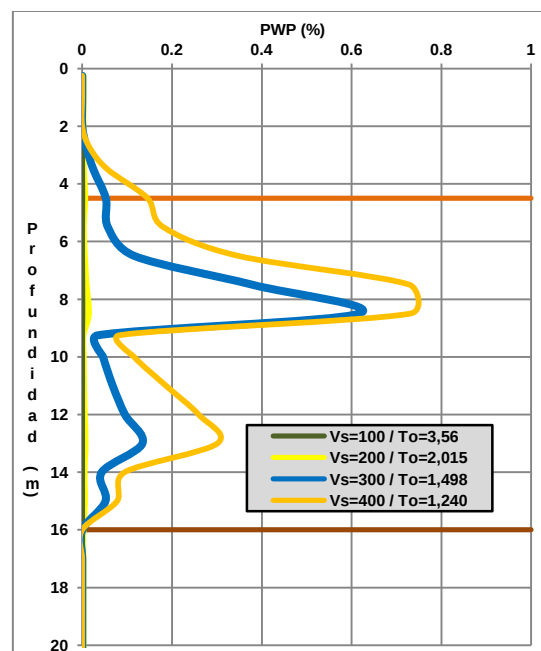


Fig. 85 - Desarrollo de PWP vs Profundidad V100 a V400 - Registro M: 5,10. D: 4,33
“Managua_Nicaragua-02”

A diferencia del registro de “Tottori Japan” el cual no amplificó su respuesta en el quiebre por encima de los valores en roca, en este caso sí ocurre la amplificación porque el sismo tiene suficiente energía en varios de los períodos seleccionados para el estudio. En consecuencia, si no se cuenta con una altísima energía en los períodos bajos del espectro en roca, como en los registros de “Tabas Irán” o “Tottori Japan” es el perfil quien debe amplificar la respuesta en roca, son estas las condiciones necesarias para alcanzar los valores de energía que se desarrollen la licuación en un depósito de suelo.

4.6.2. Análisis comparativo del método no lineal con el equivalente lineal utilizando el CSR para los mismos registros que la sección anterior

Utilizando la metodología del CSR para la aceleración espectral en la superficie por el método equivalente Lineal pero considerando el Lecho Rocosu Elástico, se obtiene los valores de CSR para cada iteración del periodo fundamental véase *Tabla 12*, donde se indican los registros utilizados para este análisis. Dichos registros corresponden a los mismos del caso anterior presentado en la Sección 4.6.1 de este TG. En la Tabla 12 se muestran los valores de CSR (modificado para su respectiva magnitud), resaltando en amarillo aquellos que superan la frontera para licuación para el porcentaje de finos de 35%. Se tomara para el intervalo de los estrados licuables un N_1 , 60 igual a 6. Es bueno resaltar que con el método CSR no es posible establecer el nivel de presión de poros a alcanzar por los estratos potencialmente licuables, lo cual hace difícil establecer si se evidenciará en todos los casos efectos adversos debidos a la licuación o si solamente habrá aumento de la presión de poros sin otras consecuencias indeseables. Esto último es, precisamente, lo que se desea resaltar en este análisis.

Tabla 12 - Resultados de evaluación por el método del CSR para registros de distintas velocidades.

Dist epic (Km)	Mw	sismo	año	σ'_v	σ_T	Fc Cr	Vs100	Vs200	Vs300	Vs400	Vs500	Vs600
							CSR FcCr	CSR FcCr	CSR FcCr	CSR FcCr	CSR FcCr	CSR FcCr
4.33	5.20	"Managua_ Nicaragua-02"	1972	86.3	159.8	1.24387	0.02354	0.0619	0.0896	0.1034	0.1254	0.1399
			Desarrollo de Presión de Poros (%)				0	0,04	62	73	95	95
1.79	7.35	"Tabas_ Irán"	1978	86.3	159.8	1.03683	0.04205	0.1324	0.1743	0.2130	0.3122	0.3534
			Desarrollo de Presión de Poros (%)				0	95	95	95	95	95
55.82	7.30	"Taiwan SMART1(45)"	1986	86.3	159.8	1.04473	0.02781	0.0758	0.1145	0.1468	0.1780	0.1823
			Desarrollo de Presión de Poros (%)				0	10	20	80	95	95
026.46	7.54	"St Elías_ Alaska"	1979	86.3	159.8	1.00782	0.05200	0.1177	0.1729	0.1615	0.1636	0.1474
			Desarrollo de Presión de Poros (%)				0	18	95	95	95	95
6.44	6.19	Chalfant Valley-02	1986	86.3	159.8	1.25505	0.04275	0.1165	0.1303	0.1162	0.1385	0.1694
			Desarrollo de Presión de Poros (%)				0	0,2	87	95	95	95
74.16	6.93	Loma Prieta	1989	86.3	159.8	1.10694	0.03950	0.0987	0.1552	0.2067	0.2078	0.1929
			Desarrollo de Presión de Poros (%)				0	0,05	95	95	95	95
3.71	5.80	San Salvador	1986	86.3	159.8	1.34924	0.02535	0.0998	0.1073	0.1149	0.1328	0.1191
			Desarrollo de Presión de Poros (%)				0	13,75	95	95	95	95
4.53	5.99	Whittier Narrows-01	1987	86.3	159.8	1.30173	0.03667	0.1019	0.1205	0.1508	0.1290	0.1259
			Desarrollo de Presión de Poros (%)				0	0	20	72	95	95
42.30	6.61	"Tottori_ Japan"	2000	86.3	159.8	1.16669	0.05759	0.1490	0.2065	0.2189	0.2636	0.2541
			Desarrollo de Presión de Poros (%)				0	0	0	0	0,5	1,7

Considerando nuevamente la Tabla 12, se observa que para el registro de “San Salvador” el caso con $V_s=500$ m/s y $T_o=1,084$ seg, es el único que supera la frontera de licuación. Ahora bien, de acuerdo con la Fig. 72 ese es el periodo fundamental que se encuentra cercano a la ordenada espectral pico de la respuesta amplificada en quiebre ($T_o=1,0846$ seg). En consecuencia, para este registro se evidencian desarrollos de presión de poros superiores al 80% tal como se ilustra en Figs. 73 y 74. Nótese que lo anterior no se ve reflejado en la respuesta por el CSR, la cual solamente indica que habrá licuación pero no es posible predecir para cuál valor de la velocidad del perfil por debajo de los estratos licuables. De hecho, para velocidades iguales por debajo de $V_s=300$ m/s no ocurre incremento significativo de la presión de poros.

Para los casos de “Tabas Irán”, “Taiwan SMART1(45)”, “St Elías_ Alaska”, “Loma Prieta” y “Whitter Narrows-01” como se observa en la Tabla 12, estos registros tienden a coincidir su ocurrencia de licuación por el método del CSR, con lo evidenciado en el análisis no lineal para un desarrollo de presión de poros superior al 72%. Por otra parte, para los casos de “Managua_Nicaragua-02” y “Chalfant Valley-02” el método del CSR no logra predecir en algunos casos la ocurrencia de licuación con lo evidenciado para el análisis no lineal: para el caso de “Managua_Nicaragua-02” se evidencia desarrollo de presión de poros superior al 73% sin indicar ocurrencia de licuación por el CSR, y no es hasta el desarrollo superior al de 95% que el CSR predice la ocurrencia de licuación. Para el caso de “Chalfant Valley-02” se evidencia un desarrollo de presión de poros superior al 87% donde este coincide con su ocurrencia por el método del CSR, pero para el siguiente análisis con 95% de desarrollo de presión de poros el CSR no predice licuación. Finalmente el caso de “Tottori Japan” que no desarrolla valores de presión de poros visibles en todos sus análisis, pero el método del CSR si predice ocurrencia de licuación para este evento sísmico. Esto está de acuerdo con lo evidenciado en este TG con relación a que debe ocurrir amplificación de las ordenadas espectrales para que ocurra la licuación ya que al cambiar las velocidades de los estratos por debajo de los 20 m y cambiar así el período fundamental del depósito, cambia el potencial de licuación del perfil. Esto último no puede ser detectado por el método con el CSR que trabaja solamente con la aceleración en superficie y no considera las ordenadas espectrales que definen la potencia del evento sísmico.

Se evidencia la coherencia del método del CSR para la predicción de la licuación, no obstante se tienen casos donde por la propia naturaleza del método, junto a los parámetros necesarios para este análisis, que no es posible realizar una buena predicción de la ocurrencia para la licuación como lo fue en los casos de “San Salvador” y “Tottori Japan”.

Lo anterior se expresa gráficamente en las Figs. 86 evaluando el sismo de "San Salvador" y 87 para el sismo de "Managua_Nicaragua-02". En el primer caso, sismo de San Salvador, Fig. 86, se observa que para las condiciones de sitio, porcentaje de finos y numero de golpes, únicamente un caso supera la frontera para alcanzar licuación, el cual corresponde a la velocidad promedio por debajo de los 20 m de $V_s=500$ m/s, mientras que el correspondiente a velocidad promedio de $V_s=600$ m/s que da justo por debajo del límite. Esto se ilustra en la Fig. 86. Ahora bien, en la Sec. 4.6 el resultado es diferente ya que el sismo de "San Salvador" logra licuar uno o los dos estratos dentro de los primeros 20 m para todos los perfiles, con la excepción de los perfiles con velocidades promedio por debajo de los 20 m de $V_s=100$ y 200 m/s. Véanse las Figs. 73 y 74.

Para el registro de "Managua_Nicaragua-02" los perfiles con $V_s \leq 400$ m/s no desarrollan la presión superiores al 80%, sin embargo, los perfiles con $V_s=300$ y 400 m/s alcanzan al menos el 60%, lo cual podría generar efectos visibles en esos perfiles. Véase las Figs. 84 y 85. En el caso del análisis CSR para este sismo la licuación se alcanza para perfiles con $V_s \geq 400$ m/s, tal como se observa en la Tabla12 y la Fig. 87.

Con esto se corrobora que para un mismo grupo de estratos licuables localizados dentro de los 20 primeros metros de un perfil, tal como se define en las condiciones potenciales para licuación, esta condición podría no alcanzarse dependiendo de las velocidades de ondas de corte por debajo de los primero 20 metros del perfil.

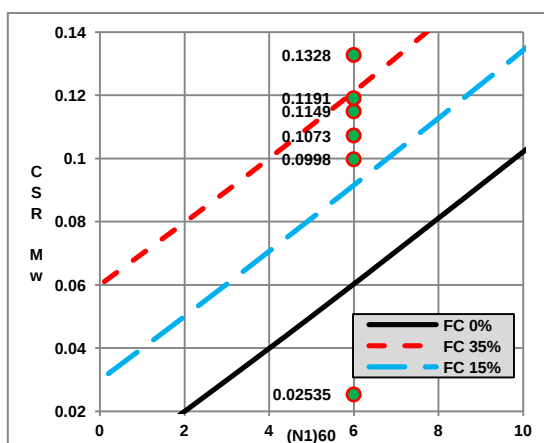


Fig. 86- Registro M: 5,80. D: 3,71 "San Salvador" - Relación entre el esfuerzo cíclico con respecto al N1,60 del perfil para estimar licuación. Definido por (Seed e Idriss, 1971). Según cita (Kramer, 1996).

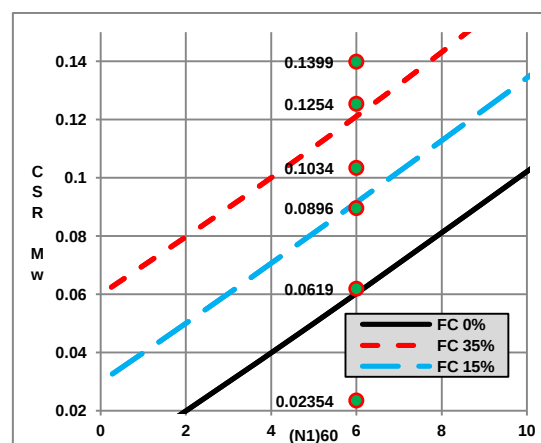


Fig. 87- Registro M: 5,10. D: 4,33 "Managua_Nicaragua-02" - Relación entre el esfuerzo cíclico con respecto al N1,60 del perfil para estimar licuación. Definido por (Seed e Idriss, 1971). Según cita (Kramer, 1996).

En otras palabras, no es una condición suficiente para indicar la ocurrencia de la licuación. Eso constituye una limitación importante del método del CSR pues el mismo no considera si ocurrirá amplificación o reducción en la respuesta espectral de estos perfiles con estrados licuables. Para más detalle de los cálculos mostrados en esta Sección véase el Apéndice (6. A6-2).

Es oportuno destacar que para este análisis se utilizó la aceleración de respuesta en la superficie obtenidas con el análisis de respuesta equivalente lineal en cada caso estudiado. Sin embargo, en la práctica se utiliza la aceleración en roca proveniente de estudios de amenaza sísmica ajustada a la superficie por el gráfico de (Idriss, 1990), mostrado en la Fig. 88. Este procedimiento conlleva a errores importantes en la estimación del valor del CSR que le restan credibilidad al mismo.

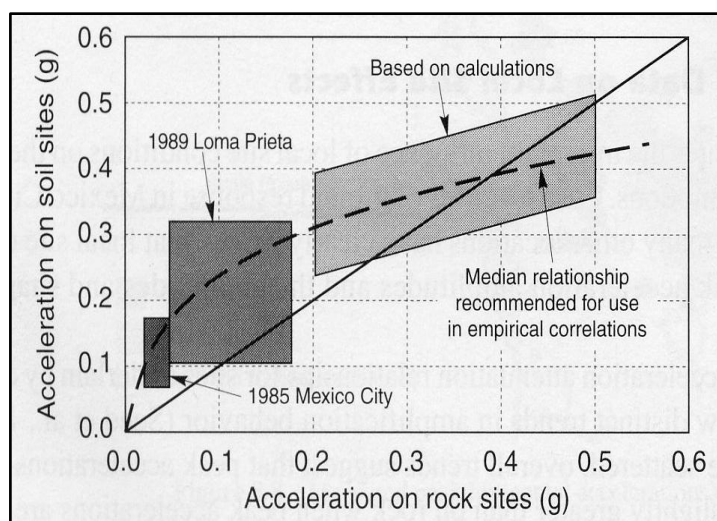


Fig. 88 - Relación entre aceleración pico en roca con la aceleración en superficie (Idriss, 1990)

Capítulo 5

Conclusiones

La intensidad del sector fuente del Acelerograma (Ism) muestra ser una variable bastante robusta para evaluar el potencial de licuación. A su vez, la Ism muestra valores más realistas de la energía asociada con la respuesta del depósito de suelo para generar incrementos en la presión de poros en los estratos licuables.

Se corrobora la influencia de la presión de poros en el análisis de respuesta dinámica y se demuestra que el modelo no lineal aporta más información sobre el comportamiento del perfil, que el equivalente lineal. Principalmente en relación con la degradación del módulo de corte de los estratos licuables. De la misma manera, se demuestra que cuando se realizan análisis de respuesta no lineal considerando el desarrollo de la presión de poros, la energía, medida en términos del Ism, que afecta al estrato licuable debe ser medida justo antes de entrar al mismo. En este trabajo esto se ha denominado el estrato de quiebre.

Considerando que existen valores mínimos de energía para lograr la licuación en ensayos de laboratorio que son bastante cercanos entre sí para las distintas magnitudes, y que la Ism es una intensidad que se atenúa con magnitud y distancia, los valores de dicha variable para roca y distancia epicentral cercana (<20Km) pueden alcanzar o sobrepasar esa frontera. Eso se debe a la alta energía que tiene los eventos la cual no se atenúa lo suficiente para ese rango de distancias. Para los eventos con una distancia epicentral mediana o lejana (>20Km) la Ism en roca ya se ha atenuado considerablemente y no es suficiente para generar licuación. Por lo tanto, es necesario que la Ism sea amplificada por el perfil para alcanzar los valores requeridos para licuación.

Se realizó la comparación de los resultados del modelo no lineal con roca elástica y los del equivalente lineal con roca rígida, donde se observa que ocurre una disminución en la energía del sismo, Ism, en superficie al utilizar el análisis con roca elástica. Eso se debe a que la roca rígida permite menos disipación de la energía de las ondas reflejadas desde la superficie y mantiene más la energía dentro del perfil. Este porcentaje de energía atrapada al considerar la roca rígida, puede condicionar la ocurrencia de licuación al arrojar resultados sobredimensionados.

De los **206** registros utilizados solamente **30.09%** de estos presentaron desarrollo de presión de poros superior al 80%. Estos 206 sismos se subdividen de la siguiente manera: para la magnitud 5.00 a 5.99 se tienen 55 registros de los cuales únicamente **9** superaron el desarrollo de **80%**, lo que representa un **16.36%** para estos registros. Para magnitud 6.00 a 6.99 de los 80 registros estudiados únicamente **25** superaron el desarrollo de 80%, representando una ocurrencia del **31.25%** de los mismos. Para magnitud 7.00 a 7.99 se utilizaron 71 registros de los cuales **28** superaron el desarrollo de 80% teniendo una ocurrencia del **39,43%** de estos registros. Cabe destacar si bien tenemos mayor ocurrencia en las magnitudes más altas, siendo esto

coherente con el hecho que liberan más energía, son estos los que normalmente tienen una menor recurrencia. Queda a criterio del ingeniero en evaluar cómo es el comportamiento de las fuentes sísmicas de sus adyacencias y la importancia de la obra, para determinar los parámetros de diseño de la estructura que repose sobre dicho depósito de suelos licuable.

Se corrobora lo propuesto en la literatura de que el desarrollo de presión de poros significativa ocurre dentro de las distancias establecidas para cada magnitud entre 2 km y 200 km. Para los 62 registros que desarrollan una presión de poros superior al 80%, estos se encontraban en el intervalo de distancia epicentral que va desde 1,79 Km hasta 147 km dependiendo de la magnitud. Por la propuesta de Ambresys se tiene dispersión en la ocurrencia de los registros en las magnitudes evaluadas, a distancias epicentrales cercanas. Contrario a lo observado en la propuesta de relación de distancia epicentral contra magnitud de momento para la frontera de licuación.

Los sismos con distancia epicentral cercana (<20 km) tienen alta energía y el proceso de propagación dentro de los perfiles estudiados evidencia reducción de sus ordenadas espectrales. Similarmente, se observaron registros que aunque cuentan con una distancia epicentral superior a los 40 km, que desarrollan altas ordenas espectrales, altos valores de I_{sm} y un máximo desarrollo de presión de poros en los estratos licuables, tal como se ha mencionado, esto es originado por la amplificación de la respuesta dinámica en el estrato de quiebre.

De los 206 registros utilizados únicamente 28 registros que corresponde a un **13,59%** superan los límites para licuación indicados en la intensidad del sector fuerte del Acelerograma, estos se subdividen de la siguiente manera: para la magnitud 5.00 a 5.99 donde de los 55 registros se tiene un único registro el límite de intensidad, lo que representa una ocurrencia de 1,38% para esta magnitud. Para la magnitud 6.00 a 6.99 donde de los 80 registros se tienen 16 que superan el límite de intensidad, lo que representa una ocurrencia del 20% para esta magnitud. Para la magnitud 7.00 a 7.99 donde de los 71 registros se tienen 11 que superan el límite de intensidad, lo que representa una ocurrencia del 15,49% para esta magnitud. Cabe destacar que todos estos registros superan el desarrollo de presión de poros del 80%.

Se propone en este trabajo una nueva frontera para la pseudo intensidad que correlaciona las aceleraciones espectrales y la duración del sector fuerte del acelerograma. Esta nueva frontera representa el límite para sismos capaces de alcanzar un desarrollo de presión de poros superior al 50% y desarrollarían licuación en su respuesta.

Se evaluó, iterando con distintos periodos fundamentales, como influyen estos en el desarrollo de la presión de poros. Se observó que el desarrollo de presión de poros en los primeros 20 metros del perfil es dependiente del período fundamental del depósito considerando la velocidad promedio hasta donde se alcanza una velocidad de ondas de corte $V_s=700$ m/s. Se observa que el desarrollo de presión de poros, no

depende exclusivamente de las velocidades en los primeros metros de profundidad. A su vez se demostró que cuando hay más de un estrato licuable en los primeros 20 m de profundidad, la ocurrencia de licuación varía de uno a otro por separado o en los dos simultáneamente, dependiendo del período fundamental del depósito.

Se demostró que la respuesta de un perfil geotécnico al cual se le varía el período fundamental varía significativamente ante un mismo evento sísmico. Para eventos que por su naturaleza cuentan con una altísima energía al viajar por la roca la misma puede ser reducida al ascender por el perfil. Si la reducción es alta entonces podrían no alcanzar los valores de energía requeridos para licuar los estratos en los primeros 20 m. Pero si no disipan toda la energía, pueden entonces licuar dichos estratos. Caso contrario, los registros que en roca cuenta con muy poca energía es el perfil que actúa como amplificador de esta respuesta. De la misma manera, si logran suficiente amplificación los estratos en los primeros 20 m licuarán y si no la alcanzan no generarán licuación en los mismos.

Se evidencia la falta de coincidencia entre ambos métodos, es decir el método del CSR y el que calcula la respuesta con la presión de poros acoplada. Esto es interesante ya que el método con CSR predice licuación para algunos casos de respuesta acoplada que desarrollan presiones por encima del 72%, pero no es capaz de identificar otros casos que, de acuerdo con el método de respuesta acoplada, desarrollan presiones por encima del 73%. Aquí es necesario tratar de contestar la pregunta ¿A partir de qué valor de la presión de poros la misma resulta realmente de cuidado para prevenir los potenciales daños? Esta investigación indica que es necesario utilizar mejor un método derivado de análisis de respuesta acoplados para mejorar las predicciones de daños potenciales. Tal como se mencionó antes, eso se debe a que debe ocurrir amplificación de las ordenadas espectrales para que ocurra la licuación y, al cambiar las velocidades de los estratos por debajo de los 20 m también se cambia el período fundamental del depósito, con lo cual cambia el potencial de licuación del perfil. Esto último no puede ser detectado por el método con el CSR que trabaja solamente con la aceleración en superficie y no considera las ordenadas espectrales que definen la potencia del evento sísmico.

Se encontró que para los análisis no lineales con desarrollo de presión de poros la energía en la superficie no es representativa para predecir la ocurrencia de licuación debido a que los estratos afectados por la presión de poros se desplazan mucho y hacen poco representativa la energía que afecta a los estratos licuables. En estos análisis, es preferible utilizar la energía en el límite inferior del estrato licuable, es decir, la energía que entra en el mismo y es capaz de desarrollar la licuación.

El modelo no lineal demuestra ser más realista que el equivalente lineal para evaluar la respuesta del perfil cuando se tiene conocimiento de las variables que controlan el desarrollo de presión de poros en los estratos. Sin embargo cuando no se tiene certeza de esos valores el método equivalente lineal con roca elástica da valores de ordenadas espectrales similares a los del método no lineal.

Recomendaciones

Evaluar en mayor medida el comportamiento de la pseudo potencia espectral y como esta se desarrolla en sismos a una distancia epicentral específica, determinar por grupos a qué distancia se considera un evento sísmico es cercano, intermedio y lejano con base en cómo es su respuesta dinámica con un análisis no lineal, como se presenta la ocurrencia de licuación en el perfil geotécnico y como se comportaría el mismo ante distintos periodos fundamentales.

Referencias Bibliográficas

Ambraseys, N. N and J. M. Menu, (1988), “Earthquake-induced ground displacements”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.16, pp 985-1006.

Ashford, S. A. and K. M. Rollins. (2002). TILT: The Treasure Island Liquefaction Test. Department of Structural Engineering School of Engineering University of California, San Diego La Jolla, California 92093-0085.

Baise, L G. Glaser, Steven D. Dreger, D. (2003) Site response at Treasure and Yerba Buena Islands, California.

Chen Yunmin, Ke Han, Chen Ren-Peng (2005). Correlation of shear wave velocity with liquefaction resistance bases on laboratory tests.

Daniel, G. (1991). Soil Characterization of the deep accelerometer site at treasure island, San Francisco, California.

Dobry, R., T. Abdoun, K. H. Stokoe II, R. E. S. Moss, M. Hatton, A.M. and H. El Ganainy, (2015). Liquefaction Potential of Recent Fills versus Natural Sands Located in High-Seismicity Regions Using Shear-Wave Velocity.

Echezuría H., (1983) “Determination of liquefaction opportunity for downtown San Francisco, Thesis submitted to the Department of Civil Engineering and the Committee of Graduate Students of Stanford University, for the Degree of Engineer, June.

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, 9, 1-14.

Echezuría, H., (2017), "Earthquake strong motion duration: Unifying criteria for definition and a new method to calculate it", Tekhné, Vol.20, No.2 , pp 39-50.

Echezuría, H. (2018). Potencial de licuación utilizando la intensidad del sector fuerte del sismo. Centro de Investigación y Desarrollo en Ingeniería, Univ. Católica Andrés Bello, Caracas, Venezuela.

Graizer, V. (2011). TREASURE ISLAND GEOTECHNICAL ARRAY – CASE STUDY FOR SITE RESPONSE ANALYSIS.

Herrera, D., H. Muñoz, (2018). Análisis de la intensidad del sector fuerte del acelerograma para establecer el potencial de licuación. Caracas, Venezuela.

Hashash, Youssef M. A. (2017). Programa DEEPSOIL manual V7 Nonlinear and Equivalent Linear Seismic Site Response of One-Dimensional Soil Columns.

Idriss, I.M. (1990). Response of soft soil sites during earthquakes. H.B. Seed Memorial Symposium, (J.M. Duncan, ed.), BiTech Publishers, Vancouver.

Joyner, W. B., R. E. Warrick, and A. A. Oliver III (1976) ANALYSIS OF SEISMOGRAMS FROM A DOWNHOLE ARRAY IN SEDIMENTS NEAR SAN FRANCISCO BAY.

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

Matasovic, N., M. Vucetic (1992). Pore pressure model for cyclic straining of clay.

Moreno-Torres, O, G. Chang-Nieto & A. Salas-Montoya (2017). Evaluación de modelos constitutivos esfuerzo-deformación acoplados con presión de poros en suelos granulares.

Seed, H. B. and I. M. Idriss, (1971) "Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol.107, No. SM9, pp1249-1274.

T. L. Youd, I. M. Idriss (2001). liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering . Vol. 127

Vucetic, M., R. Dobry. (1986). Pore Pressure Buildup and liquefaction at level sandy sites during earthquakes.

Zhang, G., P.K. Robertson, and R.W.I. Brachman (2002). Estimating liquefaction-induced groundsettlements from CPT for level ground.

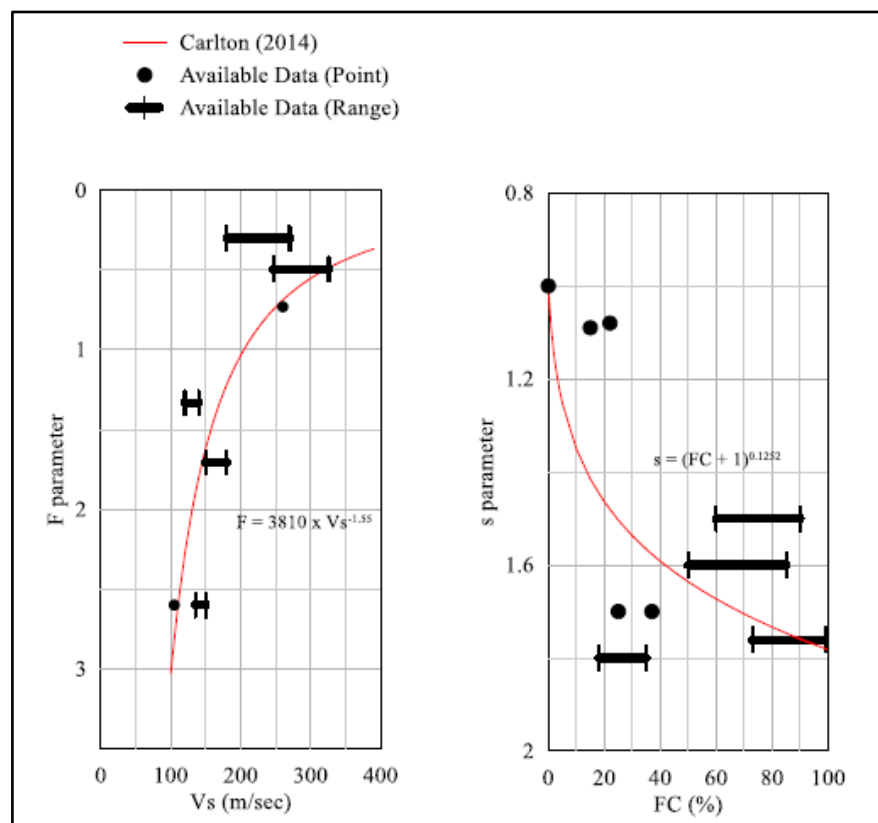
Apéndices

Apéndice 1

F, s y p son los parámetros de ajuste de la curva y se pueden obtener a partir de pruebas de laboratorio, Carlton (2014) presenta correlaciones empíricas para los parámetros de ajuste de curva F y s para las arenas. El mejor ajuste de datos se muestra en el apéndice (A1-1) y tiene las siguientes formulas, véase ecuación (6):

$$\begin{aligned} F &= 3810 * V_s^{(-1.55)} \\ s &= (FC + 1)^{0.1252} \end{aligned} \dots\dots\dots (6)$$

Donde V_s es la velocidad de onda de corte en (m / s) y FC es el porcentaje del contenido de finos.

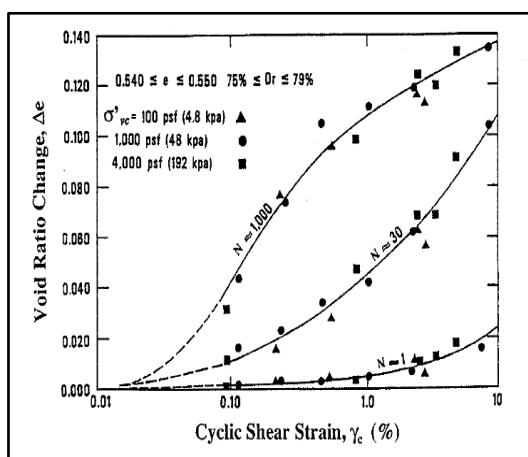


A1-1 - mejor ajuste correlacionando V_s (m / s) con el parámetro F del modelo de presión de agua de poro de Dobry para arenas. b) Carlton (2014), mejor ajuste correlacionando FC (%) al parámetro s del modelo de presión de agua de poro Dobry para arenas (Hashash, Youssef M. A, 2017).

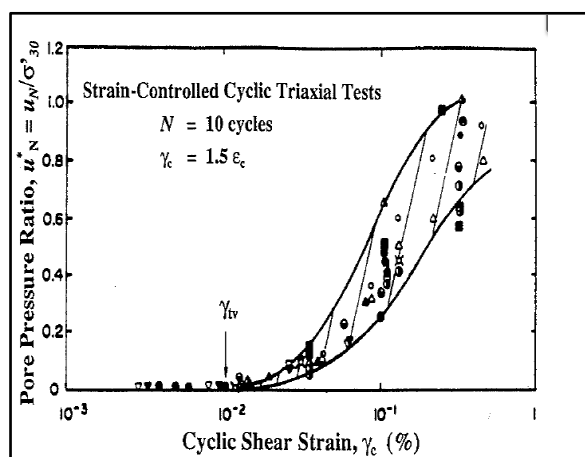
Apéndice 2

Se centra en el desarrollo y moldeado de la presión de poros (P.W.P.) para un ciclo residual (u), en arcilla durante la carga controlada por deformación cíclica sin drenaje. Se utilizaron datos obtenidos de series de pruebas de cizallamiento cíclico simples de tipo (NG1). Además de la amplitud de la tensión de corte cíclica, (Y_c) el número de ciclos, (N) y la relación de sobre consolidación (OCR), un nuevo componente se incorpora en la caracterización convencional de (u), este nuevo componente es el volumétrico Umbral de esfuerzo cortante (Y_{tv}). Para suelos arcillosos, debajo de los cuales para el desarrollo (u) no se desarrolla. La falta de comprensión de la compleja micro estructura de arcilla y la interacción asociada entre las partículas de arcilla durante el corte cíclico hace que el modelado de (u) de una manera diferente a la adaptación de la curva sea bastante difícil. Esto es especialmente cierto con respecto al desarrollo de (u) negativo en las arcillas sobre consolidadas.

De estos ensayos se presentó un modelo basado en el ajuste sistemático de la curva de los datos (presión de poro) expresado en términos de (y_c , y_{tv}) N y OCR. Las posibilidades de incorporar un modelo de este tipo en las herramientas numéricas existentes para la simulación de la respuesta de carga de onda sísmica y oceánica de los depósitos de suelo natural también se discuten brevemente. Este modelo se basa en el ensayo cíclico de esfuerzo controlado (Cyclic strain controlled) propuesto por *Ohara and Matsuda (1987,1988)* en un avanzado modelo que incorpore todos los parámetros que relacionan la (u) ciclo residual. Véase figura A2-1, A2-2.



A2-1 – Relación de Vacíos vs Esfuerzo cíclico (y_c) - (Matasovic, Vucetic. 1992)



A2-2 – Presión de Poros vs Esfuerzo cíclico (Y_c) - (Matasovic, Vucetic. 1992)

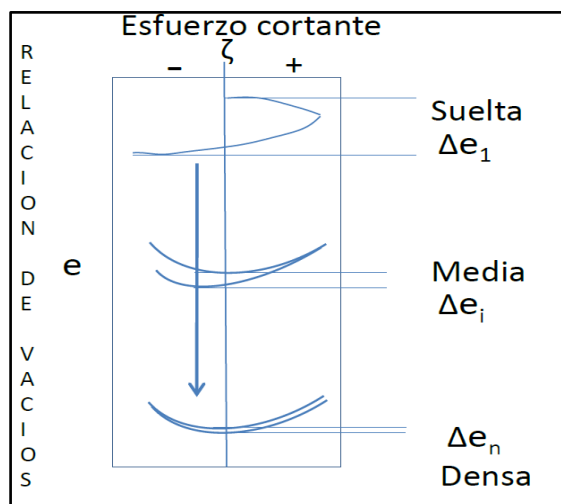
$$\begin{aligned}
 s &= 1.6374 \times PI^{-0.802} \times OCR^{-0.417} \\
 r &= 0.7911 \times PI^{-0.113} \times OCR^{-0.147} \\
 A &= \begin{cases} 7.6451 & \text{for } OCR < 1.1 \\ 15.641 \times OCR^{-0.242} & \text{for } OCR \geq 1.1 \end{cases} \\
 B &= \begin{cases} -14.714 & \text{for } OCR < 1.1 \\ -33.691 \times OCR^{-0.33} & \text{for } OCR \geq 1.1 \end{cases} \\
 C &= \begin{cases} 6.38 & \text{for } OCR < 1.1 \\ 21.45 \times OCR^{-0.468} & \text{for } OCR \geq 1.1 \end{cases} \\
 D &= \begin{cases} 0.6922 & \text{for } OCR < 1.1 \\ -3.4708 \times OCR^{-0.857} & \text{for } OCR \geq 1.1 \end{cases}
 \end{aligned}$$

A2-3 – Correlaciones Propuestas por Carlton (2014) citadas por (Hashash, Youssef M. A, 2017).

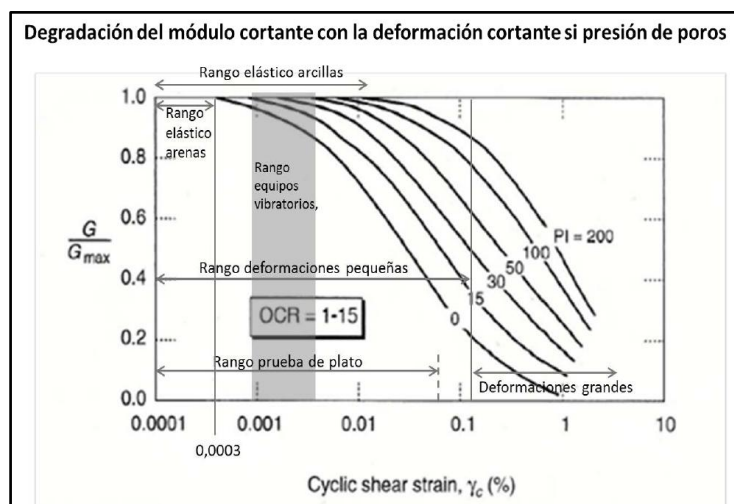
Apéndice 3

Cuando la arena está saturada y la carga es muy rápida en contraste con la capacidad de drenar del suelo, esta disminución del volumen durante los esfuerzos, se encuentra con unos vacíos llenos de agua, y al ser el agua incompresible, los granos del suelo empujan el agua hasta que se alcance una presión en el líquido y lleve a su reacomodo o drenaje. Cuando la arena está lo suficientemente densa ocurre un aumento del volumen durante la aplicación de la carga hasta que esta se retira vuelve al reposo y finalmente teniendo una reducción en el volumen del suelo. Véase Fig. A3-1.

Si continuamos el proceso de carga observaremos la densificación de las arenas hasta el punto que ya está en su máximo empaquetamiento, no obstante de seguir sometiénola a esfuerzos cortantes con cada incremento del mismo los granos tendrán como única opción de respuesta a tal esfuerzo el cabalgamiento uno sobre otro, por lo cual se produce la expansión del volumen de la arena. Esa expansión se origina como ya la arena cuenta con su máximo empaquetamiento no puede responder de otra manera hasta que cese la aplicación de la carga hasta el nuevo reacomodo de las partículas lo que da como resultado el nuevo volumen. Mientras mayor sean los ciclos de carga se tendrá a un mayor empaquetamiento hasta que alcance el límite permisible para dicha arena.



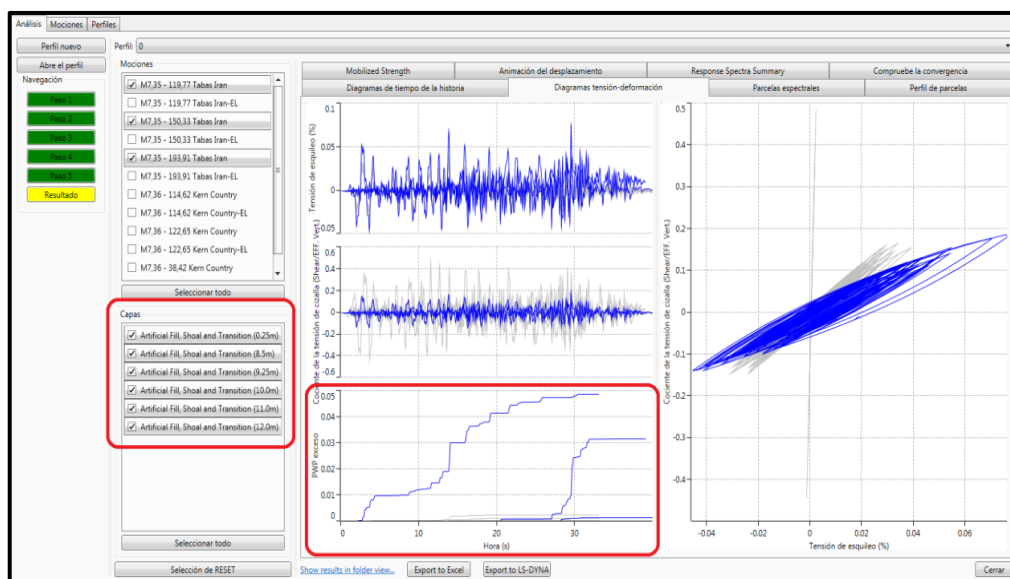
A3-1 - Esfuerzo cortante vs relación de vacíos,
(Echezuria H., 2018).



A3-2 - Degradación del modulo cortante con la deformación cortante al desarrollarse la presión de poros, (Matasovic, Vucetic. 1991)

Apéndice 4

Dentro de la interfaz del DEEPSOIL podemos activar el desarrollo de presión de poros y el esfuerzo que el mismo género, en los estratos licuables, observamos al seleccionar los estratos desde 8.5 a 12 metros el grafico de PWP, (Pore Water Pressure) demuestra el desarrollo en todos los estratos en función del tiempo. Con esto podemos ver cómo se desarrolla la misma en cada estrato e identificar cual es el que tiene el mayor desarrollo.



A4-1 - DEEPSOIL - Diagramas Tensión Deformación - Desarrollo de presión de poros.

Apéndice 5

Tablas de datos utilizados en este Trabajo, iniciando con los datos técnicos de cada intervalo de magnitud, posteriormente se presentan los resultados de los análisis de la intensidad del sector fuerte de acelerograma para cada estrato de estudio, resaltando en amarillo los registros que superan el 80% de desarrollo de presión de poros y en gris con números rojos los que superen los límites para la licuación.

#	Dist(Km)	Mw	sismo	año	#	Dist(Km)	Mw	sismo	año
1	0.7400	5.30	"Izmir_ Turkey"	1977	28	10.5600	5.50	Fruili, Italy-03	1976
2	4.3300	5.20	"Managua_ Nicaragua-02"	1972	29	13.2500	5.20	Almiros, Greece	1980
3	5.5700	5.34	"Dursunbey_ Turkey"	1979	30	12.3700	5.60	Mt.Lewis	1986
4	7.2800	5.00	"Central Calif-02"	1960	31	3.7600	5.50	New Zealand	1984
5	9.9900	5.14	"Hollister-03"	1974	32	3.4300	5.50	Baja California	1987
6	10.0300	5.42	"Livermore-02"	1980	33	24.6900	5.60	Umbria-03, Italy	1984
7	12.2400	5.19	"Anza (Horse Canyon)-01"	1980	34	22.8300	5.60	Sicilia-Orientale, Italy	1990
8	15.2800	5.90	"Westmorland"	1981	35	86.1300	5.60	L'Aquila,Italy	2009
9	17.3200	5.01	"Imperial Valley-07"	1979	36	185.7600	5.60	L'Aquila,Italy	2009
10	19.4600	5.74	"Coyote Lake"	1979	37	12.7500	5.70	Mammoth Lake-04	1980
11	21.0300	5.10	"Borah Peak_ ID-02"	1983	38	68.0200	5.70	Trinidad OffShore	1983
12	23.9200	5.80	"Livermore-01"	1980	39	41.5400	5.80	Taiwan SMART1(33)	1985
13	25.1100	5.30	"Central Calif-01"	1954	40	23.3800	5.77	Chalfant	1986
14	28.7300	5.20	"Northern Calif-07"	1975	41	3.7100	5.80	San Salvador	1986
15	29.5800	5.80	"Lazio-Abruzzo_ Italy"	1984	42	21.4900	5.80	Nothwest China-04	1997
16	31.4300	5.90	"Norcia_ Italy"	1979	43	79.3500	5.70	Guld of California	2001
17	33.1300	5.00	"Yountville"	2000	44	118.6700	5.70	Guld of California	2001
18	36.3000	5.28	"Northridge-06"	1994	45	31.4300	5.90	Norcia, Italy	1979
19	37.1100	5.20	"Northern Calif-06"	1967	46	4.5300	5.99	Whittier Narrows-01	1987
20	38.3300	5.90	"Chi-Chi_ Taiwan-02"	1999	47	21.7900	5.82	Bishop (Rnd val)	1984
					48	12.4800	5.90	Double Springs	1994
21	9.7400	5.28	San Francisco	1957	49	10.9900	5.91	Fruili, Italy-02	1976
22	1.1000	5.09	Coalinga-02	1983	50	23.7500	5.92	Santa Barbara	1978
23	5.5600	5.18	coalinga-04	1983	51	41.7500	5.94	Mammoth lake-06	1980
24	18.3900	5.33	Lytle Creek	1970	52	25.8100	5.99	Whittier Narrows-01	1987
25	90.2500	5.33	Lytle Creek	1970	53	22.2300	5.93	Northridge-04	1994
26	52.7300	5.50	Northwest calif-01	1938	54	43.3000	5.93	Northridge-04	1994
27	103.2300	5.33	Lytle Creek	1970	55	52.4000	5.93	Northridge-04	1994

A5-1.1 - Base de datos Magnitud 5.00 - 5.99 - Incidencia de Presión de poro, selección de registros a analizar.

#	Dist(Km)	Mw	sismo	año	#	Dist(Km)	Mw	sismo	año
1	2,070	6,00	"Helena_ Montana-01"	1935	40	2,09	6,00	Helena Montana-02	1935
2	3,510	6,24	"Managua_ Nicaragua-01"	1972	41	4,48	6,06	Mammoth Lakes-01	1980
3	6,070	6,33	"Victoria_ México"	1980	42	38,22	6,06	N. Palm springs	1986
4	8,540	6,53	"Imperial Valley-06"	1979	43	51,91	6,06	N. Palm springs	1986
5	10,270	6,60	"Corinth_ Greece"	1981	44	22,96	6,06	N. Palm springs	1986
6	12,560	6,06	"Mammoth Lakes-01"	1980	45	32,84	6,10	Griva, Greece	1990
7	13,340	6,90	"Irpina_ Italy-01"	1980	46	37,00	6,05	northridge - 02	1994
8	17,640	6,19	"Parkfield"	1966	47	9,98	6,10	Northwest china-03	1997
9	23,230	6,19	"Morgan Hill"	1984	48	112,48	6,00	Parkfield - 02, CA	2004
10	25,880	6,54	"Superstition Hills-02"	1987	49	68,38	6,00	Parkfield - 02, CA	2004
11	26,720	6,50	"Northern Calif-03"	1954	50	28,69	6,20	Irpina, Italy-02	1980
12	28,110	6,36	"Coalinga-01"	1983	51	51,68	6,19	Morgan Hill	1984
13	31,690	6,90	"Kobe_ Japan"	1995	52	14,83	6,19	Morgan Hill	1984
14	33,320	6,50	"Friuli_ Italy-01"	1976	53	21,55	6,19	Chalfant Valley-02	1986
15	34,920	6,19	"Chalfant Valley-02"	1986	54	6,44	6,19	Chalfant Valley-02	1986
16	39,520	6,46	"Big Bear-01"	1992	55	63,53	6,20	Georgia, USSR	1991
17	42,300	6,61	"Tottori_ Japan"	2000	56	88,27	6,20	chi-chi, Taiwan-03	1999
18	44,520	6,40	"Northern Calif-01"	1941	57	127,43	6,20	chi-chi, Taiwan-03	1999
19	45,120	6,63	"Borrego Mtn"	1968	58	42,05	6,30	chi-chi, Taiwan-06	1999
20	47,160	6,60	"Bam_ Irán"	2003	59	56,84	6,30	chi-chi, Taiwan-06	1999
21	55,200	6,61	"San Fernando"	1971	60	37,92	6,36	Coalinga-01	1983
22	56,880	6,50	"Borrego"	1942	61	250,31	6,40	Dinar,Turkey	1995
23	58,480	6,32	"Taiwán SMART1(40)"	1986	62	43,13	6,40	Dinar,Turkey	1995
24	59,640	6,20	"Chi-Chi_ Taiwan-03"	1999	63	55,66	6,40	Kozani,Greece-01	1995
25	61,130	6,00	"Parkfield-02_ CA"	2004	64	14,13	6,40	Kozani,Greece-01	1995
26	63,560	6,63	"Niigata_ Japan"	2004	65	40,87	6,46	Big bear-01	1992
27	65,670	6,70	"Ierissos_ Greece"	1983	66	102,05	6,50	Friuli, Italy-01	1976
28	69,510	6,52	"San Simeón_ CA"	2003	67	96,52	6,50	Taiwán samrt (25)	1983
29	71,700	6,06	"N. Palm Springs"	1986	68	232,84	6,52	San Simeón, CA	2003
30	73,350	6,00	"Southern Calif"	1986	69	48,07	6,52	San Simeón, CA	2003
31	75,640	6,69	"Northridge-01"	1986	70	23,85	6,54	Superstition Hills-02	1987
32	79,590	6,88	"Borah Peak_ ID-01"	1986	71	16,09	6,60	New zealand-02	1987
33	82,760	6,30	"Chi-Chi_ Taiwan-06"	1986	72	35,66	6,69	northridge-01	1994
34	85,800	6,40	"Dinar_ Turkey"	1986	73	2,48	6,76	Nahanni, Canadá	1985
35	88,000	6,80	"Chuetsu-oki_ Japan"	1986	74	23,99	6,77	Spitak, Armenia	1988
36	90,530	6,90	"Iwate_ Japan"	1986	75	3,92	6,80	Gazli, USSR	2007
37	91,150	6,60	"Northwest Calif-02"	1986	76	28,97	6,80	Chuetsu-oki, japan	2007
38	91,340	6,20	"Christchurch_ New Zealand"	1986	77	74,16	6,93	Loma Prieta	1989
39	94,890	6,30	"L'Aquila_ Italy"	1986	78	41,71	6,93	Loma Prieta	1989
					79	8,65	6,93	Loma Prieta	1989
					80	12,15	6,93	Loma Prieta	1989

A5-1.2 - Base de datos Magnitud 6.00 - 6.99 - Incidencia de Presión de poro, selección de registros a analizar

#	Dist(Km)	Mw	sismo	año	#	Dist(Km)	Mw	sismo	año
1	1,79	7,35	"Tabas_ Irán"	1978	38	150,33	7,35	"Tabas_ Irán"	1978
2	3,62	7,51	"Kocaeli_ Turkey"	1999	39	158,77	7,00	"Darfield_ New Zealand"	2010
3	10,96	7,62	"Chi-Chi_ Taiwán"	1999	40	161,62	7,62	"Chi-Chi_ Taiwán"	1999
4	15,97	7,01	"Cape Mendocino"	1992	41	164,66	7,90	"Denali_ Alaska"	2002
5	19,74	7,28	"Landers"	1992	42	165,00	7,20	"El Mayor-Cucapah_ México"	2010
6	23,59	7,10	"Montenegro_ Yugoslavia"	1979	43	175,65	7,28	"Landers"	1992
7	26,46	7,54	"St Elias_ Alaska"	1979	44	180,24	7,51	"Kocaeli_ Turkey"	1999
8	30,75	7,20	"El Mayor-Cucapah_ México"	2010	45	188,19	7,00	"Darfield_ New Zealand"	2010
9	34,61	7,68	"Sitka_ Alaska"	1972	46	190,05	7,28	"Landers"	1992
10	38,42	7,36	"Kern County"	1952	47	193,91	7,35	"Tabas_ Irán"	1978
11	43,29	7,20	"Gulf of Aqaba"	1995					
12	50,78	7,21	"Caldiran_ Turkey"	1976	48	24,55	7,00	Darfield, New Zealand	2010
13	53,02	7,90	"Denali_ Alaska"	2002	49	8,49	7,01	Cape Mendocino	1992
14	55,82	7,30	"Taiwán SMART1(45)"	1986	50	72,88	7,13	Héctor Mine	1999
15	57,37	7,00	"Darfield_ New Zealand"	2010	51	96,91	7,13	Héctor Mine	1999
16	60,43	7,51	"Kocaeli_ Turkey"	1999	52	45,16	7,14	Duzce, Turkey	1999
17	65,88	7,10	"Montenegro_ Yugoslavia"	1979	53	76,06	7,20	Trinidad	1980
18	69,21	7,28	"Landers"	1992	54	23,62	7,28	Landers	1992
19	72,44	7,20	"El Mayor-Cucapah_ México"	2010	55	41,43	7,28	Landers	1992
20	77,06	7,62	"Chi-Chi_ Taiwán"	1999	56	56,01	7,30	Taiwán SMART1	1986
21	80,00	7,54	"St Elias_ Alaska"	1979	57	81,3	7,36	Kern Country	1952
22	82,20	7,62	"Chi-Chi_ Taiwán"	1999	58	49,97	7,37	Manjil, Irán	1990
23	89,76	7,35	"Tabas_ Irán"	1978	59	75,58	7,37	Manjil, Irán	1990
24	93,70	7,00	"Darfield_ New Zealand"	2010	60	12,55	7,37	Manjil, Irán	1990
25	97,09	7,20	"El Mayor-Cucapah_ México"	2010	61	63,96	7,37	Manjil, Irán	1990
26	103,14	7,10	"Montenegro_ Yugoslavia"	1979	62	174,55	7,37	Manjil, Irán	1990
27	110,23	7,00	"Darfield_ New Zealand"	2010	63	68,09	7,51	Kocaeli, Turkey	1999
28	114,62	7,36	"Kern County"	1952	64	10,56	7,51	Kocaeli, Turkey	1999
29	118,40	7,20	"El Mayor-Cucapah_ México"	2010	65	53,34	7,51	Kocaeli, Turkey	1999
30	119,77	7,35	"Tabas_ Irán"	1978	66	7,57	7,51	Kocaeli, Turkey	1999
31	122,65	7,36	"Kern County"	1952	67	30,73	7,51	Kocaeli, Turkey	1999
32	126,03	7,51	"Kocaeli_ Turkey"	1999	68	24,96	7,62	Chi-chi,Taiwan	1999
33	135,00	7,62	"Chi-Chi_ Taiwán"	1999	69	47,32	7,62	Chi-chi,Taiwan	1999
34	137,25	7,28	"Landers"	1992	70	49,94	7,90	Denali, Alaska	2002
35	139,11	7,90	"Denali_ Alaska"	2002	71	126,39	7,90	Denali, Alaska	2002
36	141,37	7,51	"Kocaeli_ Turkey"	1999					
37	146,89	7,28	"Landers"	1992					

A5-1.3 - Base de datos Magnitud 7.00 - 7.99 - Incidencia de Presión de poro, selección de registros a analizar.

Registro		Ism (cm4/s3)					No Lineal Ruptura		Tsm (Seg)				Ae Promedio	
Dist (Km)	Mw	Superficie No Lineal (PWP)	Superficie Lineal (EL)	Quiebre No Lineal	Origen dato	PWP (%)	ASM	ASM 2	Superficie No Lineal	Superficie Lineal(EL)	Quiebre No Lineal	Origen dato	Superficie	Quiebre
0.74	5.30	12077	14847	10722	16912	0.25	172.58	29782.76	0.69	0.32	0.36	0.41	0.33	0.45
4.33	5.20	25791	54511	54247	23081	0.83	110.22	12149.29	2.53	2.83	4.47	4.82	0.35	0.44
5.57	5.34	15857	21603	11652	11583	0.41	81.83	6696.31	1.77	1.85	1.74	1.93	0.34	0.34
15.28	5.90	21617	22985	10600	10238	0.13	47.39	2245.86	6.93	6.76	4.72	6.28	0.30	0.27
17.32	5.01	11604	14629	5014	4024	0.46	42.51	1806.69	2.09	2.11	2.78	2.19	0.29	0.25
19.46	5.74	22396	24330	10409	2458	0.49	33.09	1095.11	9.96	9.54	9.51	3.46	0.24	0.16
23.92	5.80	21869	24332	16932	10537	0.95	70.62	4987.25	3.52	3.52	3.52	3.52	0.34	0.36
5.56	5.18	28142	36745	35202	35375	0.86	124.26	15439.34	2.35	2.33	2.28	2.17	0.53	0.69
12.37	5.60	25444	28777	17510	4655	0.76	64.61	4174.01	4.58	4.47	4.20	2.85	0.30	0.25
3.43	5.50	29828	102125	146444	195282	0.95	210.98	44511.81	2.52	2.27	3.29	2.77	0.42	1.04
22.83	5.60	13988	17708	10968	11769	0.44	210.98	44511.81	1.89	2.27	1.92	2.30	0.38	0.50
12.75	5.70	22519	43848	41759	21781	0.84	90.98	8277.36	2.51	3.68	5.05	3.30	0.35	0.45
68.02	5.70	13718	16872	4461	5527	0.24	36.36	1321.69	3.73	4.14	3.38	3.09	0.31	0.22
23.38	5.77	21661	25432	15454	4865	0.94	64.24	4126.66	3.83	3.80	3.75	3.56	0.29	0.26
3.71	5.80	55521	159024	73111	60138	0.95	141.05	19894.24	6.94	4.87	3.68	4.34	0.39	0.53
21.49	5.80	25879	30085	18393	11799	0.70	53.53	2865.03	6.32	6.10	6.42	7.48	0.32	0.30
4.53	5.99	24123	62419	63587	48504	0.95	153.75	23638.26	2.06	3.21	2.69	2.45	0.45	0.73
12.48	5.90	25167	28194	14538	3770	0.35	49.02	2403.02	6.33	6.02	6.05	5.05	0.25	0.18
10.99	5.91	30708	38743	21881	6244	0.95	62.34	3886.52	5.63	5.94	5.63	3.57	0.29	0.25
22.23	5.93	22540	27903	8736	6786	0.28	37.30	1391.04	8.18	8.34	6.28	6.00	0.28	0.19

A5-2.1 - Resultados de Análisis - Sismos de magnitud 5.00 a 5.99 que desarrollaron Presión de Poros.

#	Registro		Ism (Cm4/s3)				PWP (%)	No Lineal Quiebre		Tsm (Seg)				Ae Promedio	
	Dist (Km)	Mw	Superficie No Lineal (PWP)	Superficie Lineal (EL)	Quiebre No Lineal	Origen dato		ASM	ASM 2	Superficie No Lineal	Superficie Lineal(EL)	Quiebre No Lineal	Origen dato	Superficie	Quiebre
1	2.070	6.00	13858.83	15851.55	10060.28	5686.56	0.38	64.08	4106.24	2.43	2.71	2.45	1.98	0.29	0.25
2	3.510	6.24	23017.68	117902.19	159960.57	113898.74	0.88	173.89	30238.29	4.64	7.25	5.29	7.75	0.40	0.80
4	8.540	6.53	34079.33	77355.04	64149.24	24882.47	0.80	76.31	5823.81	2.13	10.78	11.02	11.00	0.41	0.46
5	10.270	6.60	29823.53	84707.86	111388.28	40099.01	0.95	111.87	12515.54	5.60	7.45	8.90	5.85	0.35	0.58
6	12.560	6.06	43078.45	76298.46	83114.66	66769.43	0.95	113.65	12916.03	8.76	6.98	6.44	8.00	0.37	0.60
7	13.340	6.90	34139.43	85495.16	150272.47	35994.68	0.95	98.73	9748.08	5.19	9.96	15.42	14.74	0.33	0.50
9	23.230	6.19	19579.94	20106.85	11973.44	5108.25	0.73	44.67	1995.57	5.20	5.16	6.00	5.18	0.28	0.22
10	25.880	6.54	26970.79	63690.18	69290.87	18618.72	0.95	71.94	5174.82	5.06	11.32	13.39	10.88	0.28	0.39
11	26.720	6.50	88238.90	200691.78	90176.88	29847.32	0.95	111.03	12327.667	8.57	12.71	7.32	11.61	0.37	0.43
12	28.110	6.36	43567.59	304558.30	54715.01	84130.90	0.95	138.07	19064.46	4.80	5.89	2.87	6.43	0.35	0.45
13	31.690	6.90	34115.11	103565.33	149425.94	70967.84	0.95	115.71	13389.42	4.02	16.03	11.16	8.01	0.39	0.77
14	33.320	6.50	41942.89	42236.87	28703.96	7355.30	0.58	45.90	2106.71	15.39	10.85	13.63	13.53	0.25	0.19
16	39.520	6.46	24652.21	126598.92	110136.74	34297.61	0.95	105.16	11057.91	7.40	11.04	9.96	9.23	0.30	0.53
17	42.300	6.61	65633.22	92070.64	93794.47	132919.24	0.86	130.35	16991.75	5.67	5.53	5.52	5.24	0.59	0.75
19	45.120	6.63	35870.29	101620.54	81160.26	12915.25	0.95	55.71	3103.64	3.80	26.57	26.15	26.81	0.32	0.31
23	58.480	6.32	44404.98	137776.92	79953.72	15846.55	0.95	87.26	7614.64	6.27	13.27	10.50	9.32	0.36	0.44
26	63.560	6.63	31808.62	32251.75	17393.71	31021.09	0.56	59.95	3593.74	8.50	7.67	4.84	3.10	0.43	0.56
32	79.590	6.88	4069.78	4582.59	1725.90	1039.56	0.00	9.50	90.27	18.36	18.32	19.12	18.46	0.08	0.05
33	82.760	6.30	36855.92	36834.39	25278.86	5134.32	0.48	38.05	1447.95	17.66	17.34	17.46	10.31	0.23	0.19
43	4.48	6.06	30420.27	49591.25	55994.11	36789.97	0.79	74.85	5602.21	4.93	9.80	10.00	6.09	0.37	0.62
45	51.91	6.06	14350.72	17227.33	6374.07	2875.46	0.28	33.68	1134.18	5.56	5.43	5.62	2.37	0.26	0.16
47	32.84	6.10	24968.65	70411.49	34953.82	12277.90	0.91	57.86	3348.07	4.19	5.98	10.44	6.76	0.30	0.33
49	9.98	6.10	20293.65	18711.86	15296.85	42212.86	0.41	53.83	2897.13	6.76	6.98	5.28	4.18	0.30	0.33
56	6.44	6.19	29925.54	151528.45	175555.51	92743.61	0.95	135.83	18450.40	3.27	6.06	9.52	2.72	0.39	0.81
64	14.13	6.40	25760.47	29622.30	19898.53	14408.18	0.50	62.74	3936.40	6.17	6.20	5.06	4.46	0.33	0.45
65	40.87	6.46	34026.09	84194.48	53891.79	22311.49	0.81	66.31	4397.53	6.52	14.39	12.26	12.31	0.32	0.34
70	23.85	6.54	56854.95	110303.75	83614.24	34228.89	0.89	66.76	4457.05	21.74	24.00	18.76	19.38	0.32	0.35
71	16.09	6.60	22135.15	71950.71	64511.30	34974.75	0.95	107.72	11602.75	2.16	9.44	5.56	4.70	0.35	0.53
72	35.66	6.69	45851.04	48076.24	28961.80	9716.59	0.95	43.00	1849.41	15.87	16.12	15.66	12.24	0.29	0.25
73	2.48	6.76	26545.59	123670.97	156954.32	165840.75	0.95	142.36	20265.25	1.69	7.83	7.75	0.87	0.35	0.76
74	23.99	6.77	24954.17	56127.96	46788.90	11954.59	0.95	81.70	6674.59	1.56	3.42	7.01	3.70	0.36	0.40
75	3.92	6.80	24563.92	240434.19	262127.21	277032.23	0.95	200.80	40322.30	5.68	4.50	6.50	5.28	0.29	0.96
76	28.97	6.80	37374.49	148799.88	84285.40	13687.88	0.95	61.20	3746.02	9.42	26.03	22.50	15.89	0.28	0.26
77	74.16	6.93	29800.14	158656.65	108522.38	41784.48	0.95	128.28	16455.25	3.69	8.08	6.60	9.03	0.31	0.65
79	8.65	6.93	50435.97	325189.58	122416.30	202511.75	0.95	161.65	26129.41	3.72	6.96	4.69	6.18	0.42	0.60

A5-2.2 - Resultados de Análisis - Sismos de magnitud 6.00 a 6.99 que desarrollaron Presión de Poros.

#	Registro		Ism (cm4/s3)				PWP (%)	No Lineal Quiebre		Tsm (seg)				Ae Promedio	
	Dist (Km)	Mw	Superficie No Lineal (PWP)	Superficie Lineal (EL)	Quiebre No Lineal	Origen dato		ASM	ASM 2	Superficie No Lineal	Superficie Lineal(EL)	Quiebre No Lineal	Origen dato	Superficie	Quiebre
1	1.79	7.35	39542.00	408408.95	46668.13	516741.17	0.95	80.62	6499.74	1.98	18.30	7.18	5.76	0.37	0.49
2	3.62	7.51	30635.27	73551.48	125876.49	34104.09	0.95	102.65	10538.01	2.05	6.42	11.95	5.29	0.34	0.54
3	10.96	7.62	33543.64	129234.93	92517.60	34272.56	0.95	71.34	5088.98	8.02	16.18	18.18	5.45	0.38	0.54
4	15.97	7.01	45190.61	65798.60	48290.99	13004.87	0.95	53.17	2827.34	12.08	18.06	17.08	13.18	0.30	0.29
5	19.74	7.28	24882.89	156465.11	151149.80	116168.87	0.95	212.47	45143.60	2.43	6.19	3.35	6.77	0.37	0.73
6	23.59	7.10	27866.84	87418.32	80551.47	34388.80	0.94	98.04	9612.35	7.16	7.53	8.38	6.00	0.42	0.58
7	26.46	7.54	28214.00	298984.17	270363.53	50594.64	0.95	122.56	15020.20	2.77	16.21	18.00	16.78	0.28	0.49
8	30.75	7.20	38760.02	166778.79	223881.75	78798.30	0.95	107.55	11567.13	13.90	43.01	19.36	11.70	0.36	0.63
10	38.42	7.36	23313.17	97301.09	86646.18	29438.02	0.95	65.89	4340.99	3.67	20.33	19.96	19.39	0.28	0.39
11	43.29	7.20	30331.46	31196.00	16438.70	8833.47	0.27	29.54	872.54	14.70	14.75	18.84	14.07	0.23	0.18
14	55.82	7.30	37931.71	167373.07	143346.46	29332.35	0.95	99.84	9968.46	6.64	21.27	14.38	15.97	0.28	0.39
16	60.43	7.51	23182.94	110335.75	193770.82	28058.02	0.91	71.05	5047.43	2.19	25.15	38.39	38.54	0.28	0.39
18	69.21	7.28	54082.12	129639.65	100544.18	39247.52	0.95	64.32	4137.62	13.82	27.14	24.30	21.16	0.31	0.37
19	72.44	7.20	39140.85	44339.84	22960.20	18464.74	0.95	58.00	3364.13	10.02	10.32	6.83	8.49	0.34	0.30
20	77.06	7.62	33964.90	36574.77	22327.50	5438.71	0.34	40.73	1658.80	14.98	15.14	13.46	12.43	0.21	0.17
21	80.00	7.54	50248.41	51887.97	37426.09	13230.72	0.42	38.71	1498.84	24.91	24.76	24.97	25.55	0.23	0.18
22	82.20	7.62	38579.43	40997.07	26104.63	5800.02	0.23	35.45	1256.72	26.41	26.06	20.77	32.06	0.17	0.14
23	89.76	7.35	27093.15	28929.53	7652.30	6566.11	0.11	25.49	649.60	18.08	19.85	11.78	9.74	0.24	0.16
24	93.70	7.00	49274.87	60078.54	36668.55	9950.67	0.95	52.78	2785.31	15.43	16.65	13.17	16.16	0.24	0.21
28	114.62	7.36	29970.65	24661.45	11348.10	4590.76	0.26	29.64	878.34	25.50	17.39	12.92	18.28	0.20	0.15
31	122.65	7.36	32366.51	36171.00	25802.43	5603.77	0.27	31.85	1014.25	18.13	17.59	25.44	16.59	0.20	0.16
32	126.03	7.51	17408.31	16112.81	10601.14	4019.12	0.50	30.54	932.79	10.35	7.91	11.37	8.61	0.22	0.17
33	135.00	7.62	20078.94	23232.82	14714.00	2557.65	0.02	20.55	422.33	34.81	39.65	34.84	36.30	0.13	0.12
35	139.11	7.90	18314.12	37950.03	19049.74	9903.75	0.95	41.09	1688.06	3.43	10.86	11.29	12.67	0.29	0.22
36	141.37	7.51	23019.29	37779.79	19149.01	7365.61	0.95	54.34	2952.82	3.12	5.78	6.49	6.45	0.28	0.23
37	146.89	7.28	57856.42	91726.82	60379.40	9752.17	0.95	59.28	3514.52	18.48	21.48	17.18	23.25	0.25	0.25
48	24.55	7.00	39039.99	182491.49	171666.53	59795.39	0.95	114.54	13119.34	9.91	14.82	13.09	11.04	0.29	0.58
49	8.49	7.01	88437.96	183730.95	134002.68	134002.68	0.95	110.57	12226.52	20.87	10.72	10.96	4.05	0.38	0.51
50	72.88	7.13	38605.58	46541.22	31019.46	2326.17	0.28	51.46	2647.84	11.76	10.94	11.72	6.52	0.22	0.17
53	76.06	7.20	24702.25	31391.16	24820.45	13637.95	0.92	55.15	3041.72	4.00	3.68	8.16	3.88	0.35	0.34
54	23.62	7.28	37181.69	178632.61	192017.69	37593.09	0.95	121.07	14657.84	8.04	8.20	13.10	6.12	0.36	0.54
57	81.3	7.36	29910.64	82663.07	74290.10	9763.97	0.84	71.09	5053.75	9.66	12.73	14.70	10.55	0.29	0.32
60	12.55	7.37	27708.90	158059.96	103277.05	222007.31	0.95	145.48	21163.33	4.78	12.30	4.88	8.80	0.41	0.72
64	10.56	7.51	24746.15	25043.75	22726.88	14764.52	0.29	60.13	3616.05	6.16	5.61	6.29	6.18	0.32	0.40
65	53.34	7.51	21801.33	119671.32	147585.43	37132.45	0.95	141.65	20066.00	3.25	8.37	7.36	6.40	0.33	0.55
66	7.57	7.51	30093.73	59347.27	83545.18	32441.24	0.88	102.32	10469.32	6.63	7.22	7.98	7.79	0.31	0.52
67	30.73	7.51	35794.33	133420.06	118841.10	20291.59	0.95	105.22	11070.43	4.94	10.91	10.74	10.83	0.33	0.44
68	24.96	7.62	41194.73	99961.92	80272.78	21198.86	0.90	61.10	3732.92	20.44	22.03	21.50	19.99	0.30	0.30
69	47.32	7.62	35807.48	210727.14	65316.69	65665.28	0.95	129.91	16877.70	4.05	7.22	3.87	4.94	0.37	0.63

A5-2.3 - Resultados de Análisis - Sismos de magnitud 7.00 a 7.99 que desarrollaron Presión de Poros.

Apéndice 6

Para el cálculo de los periodos fundamentales se debe considerar las velocidades de onda en los primeros 20 estratos licuables del perfil, junto con sus respectivos espesores y la profundidad donde se encuentren, para luego ir cambiando el estrato inferior de mayor espesor, con las velocidades propuestas en este trabajo, a modo de evaluar como el considerar el estrato con características fijas de arcilla, pero con distintas velocidades influye tanto en su periodo fundamental como en las consideraciones de presiones de poros. Se utilizaran las siguientes ecuaciones y se llevo a la hoja de cálculo indicada en la tabla **A6-1**. Donde se repetirá esta misma metodología para todas las demás velocidades.

Los resultados de esto se aprecian en la tabla 11 mostrada anteriormente en el apartado 4.6.

$$Vs \text{ Promedio} = \frac{H \text{ total}}{T_f} \dots\dots\dots (15)$$

Ecuación 15 -Vs promedio del perfil

$$T_o = \frac{4 \times H \text{ total}}{Vs \text{ Prom}} \dots\dots\dots (16)$$

Ecuación 16 -Periodo Fundamental

$$Tiempo \text{ de Transito onda} = \frac{\Delta H \text{ (estrato)}}{Vs \text{ (estrato)}} \dots\dots\dots (17)$$

Ecuación 17 -Tiempo de transito de ondas

V300					
Tipo capa	H capa	Prof	Vs	Delta H	tiempo seg
Tan Fine Sand	0.50	0.50	175.00	0.50	0.00286
	1.00	1.50	175.00	1.00	0.00571
	1.00	2.50	175.00	1.00	0.00571
	0.50	3.00	134.00	0.50	0.00373
	1.00	4.00	134.00	1.00	0.00746
	1.00	5.00	134.00	1.00	0.00746
Grey fine Sand	1.00	6.00	134.00	1.00	0.00746
	1.00	7.00	134.00	1.00	0.00746
	1.00	8.00	134.00	1.00	0.00746
	1.00	9.00	134.00	1.00	0.00746
	0.50	9.50	178.00	0.50	0.00281
	1.00	10.50	178.00	1.00	0.00562
	1.00	11.50	178.00	1.00	0.00562
	1.00	12.50	178.00	1.00	0.00562
	1.00	13.50	178.00	1.00	0.00562
	1.00	14.50	178.00	1.00	0.00562
	1.00	15.50	178.00	1.00	0.00562
Young Bay Mud	1.00	16.50	178.00	1.00	0.00562
	1.00	17.50	178.00	1.00	0.00562
	1.00	18.50	178.00	1.00	0.00562
	77.50	96.00	300.00	77.50	0.25833
H total	96.00			T f	0.3745
				Vprom	256.3436
				To	1.50

A6-1 - Calculo de Velocidad Promedio y Periodo Fundamental del perfil con una velocidad en el estrato inferior de 300 m/s.

Luego de esto se procede a evaluar estos registros con sus respectivas aceleraciones para cada variación de onda de corte por el método del CSR a modo de evaluar como este influye en el desarrollo de presión de poros, los resultados de este análisis se muestran en la tabla A6-2 a continuación, resaltando en amarillo los que superen la frontera de licuación.

				V100	V200	V300	V400	V500	V600
Dist(Km)	Mw	sismo	año	A Max (PSA)	A Max (PSA)	A Max (PSA)	A Max (PSA)	A Max (PSA)	A Max (PSA)
4.33	5.20	"Managua_ Nicaragua-02"	1972	0.25117	0.66060	0.95594	1.10350	1.33831	1.49265
1.79	7.35	"Tabas_ Irán"	1978	0.37405	1.17794	1.55082	1.89516	2.77677	3.14411
55.82	7.30	"Taiwan SMART1(45)"	1986	0.24925	0.67961	1.02622	1.31572	1.59537	1.63441
26.46	7.54	"St Elías_ Alaska"	1979	0.44959	1.01798	1.49526	1.39627	1.41431	1.27445
6.44	6.19	Chalfant Valley-02	1986	0.46028	1.25438	1.40356	1.25123	1.49151	1.82358
74.16	6.93	Loma Prieta	1989	0.37516	0.93738	1.47381	1.96340	1.97387	1.83234
3.71	5.80	San Salvador	1986	0.29349	1.15494	1.24212	1.33052	1.53711	1.37869
4.53	5.99	Whittier Narrows-01	1987	0.40959	1.13809	1.34586	1.68392	1.44095	1.40567
42.30	6.61	"Tottori_ Japan"	2000	0.57642	1.49119	2.06685	2.19112	2.63890	2.54355

		V100	V200	V300	V400	V500	V600
σ_v	σ_T	Tmax	Tmax	Tmax	Tmax	Tmax	Tmax
86.300	159.800	2.5264	6.6448	9.6156	11.0998	13.4617	15.0142
86.300	159.800	3.7624	11.8486	15.5994	19.0630	27.9309	31.6259
86.300	159.800	2.5071	6.8360	10.3226	13.2345	16.0474	16.4401
86.300	159.800	4.5223	10.2396	15.0405	14.0448	14.2262	12.8193
86.300	159.800	4.6298	12.6175	14.1181	12.5858	15.0028	18.3429
86.300	159.800	3.7737	9.4289	14.8247	19.7494	19.8547	18.4311
86.300	159.800	2.9522	11.6172	12.4942	13.3834	15.4614	13.8680
86.300	159.800	4.1200	11.4478	13.5377	16.9381	14.4941	14.1393
86.300	159.800	5.7981	14.9996	20.7899	22.0400	26.5441	25.5850

V100	V200	V300	V400	V500	V600		V100	V200	V300	V400	V500	V600	
CSR	CSR	CSR	CSR	CSR	CSR	Fc Cr	CSR FcCr	CSR FcCr	CSR FcCr	CSR FcCr	CSR FcCr	CSR FcCr	N1,60
0.0293	0.0770	0.1114	0.1286	0.1560	0.1740	1.24387	0.02354	0.0619	0.0896	0.1034	0.1254	0.1399	6
0.0436	0.1373	0.1808	0.2209	0.3236	0.3665	1.03683	0.04205	0.1324	0.1743	0.2130	0.3122	0.3534	6
0.0291	0.0792	0.1196	0.1534	0.1859	0.1905	1.04473	0.02781	0.0758	0.1145	0.1468	0.1780	0.1823	6
0.0524	0.1187	0.1743	0.1627	0.1648	0.1485	1.00782	0.05200	0.1177	0.1729	0.1615	0.1636	0.1474	6
0.0536	0.1462	0.1636	0.1458	0.1738	0.2125	1.25505	0.04275	0.1165	0.1303	0.1162	0.1385	0.1694	6
0.0437	0.1093	0.1718	0.2288	0.2301	0.2136	1.10694	0.03950	0.0987	0.1552	0.2067	0.2078	0.1929	6
0.0342	0.1346	0.1448	0.1551	0.1792	0.1607	1.34924	0.02535	0.0998	0.1073	0.1149	0.1328	0.1191	6
0.0477	0.1327	0.1569	0.1963	0.1680	0.1638	1.30173	0.03667	0.1019	0.1205	0.1508	0.1290	0.1259	6
0.0672	0.1738	0.2409	0.2554	0.3076	0.2965	1.16669	0.05759	0.1490	0.2065	0.2189	0.2636	0.2541	6

A6-2 – Tabla de resultados cambiando las velocidades de las ondas de corte en el estrato inferior por el CSR.