

**UTILIZACIÓN DEL PROGRAMA QUAKE/W PARA  
EL MODELAMIENTO DE SUELOS DE CIMENTACIÓN SOMETIDOS A SISMOS.**

**CARLOS ARTURO MORALES CÁRDENAS**

**MANUEL ALFREDO RINCÓN CALDERÓN**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2013**

**UTILIZACIÓN DEL PROGRAMA QUAKE/W PARA  
EL MODELAMIENTO DE SUELOS DE CIMENTACIÓN SOMETIDOS A SISMOS.**

**CARLOS ARTURO MORALES CÁRDENAS**

**MANUEL ALFREDO RINCÓN CALDERÓN**

**Proyecto de grado para optar al título de  
Ingeniero Civil**

**Director:**

**ING. WILFREDO DEL TORO RODRÍGUEZ**

**ING. CIVIL M. Sc.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2013**

## **AGRADECIMIENTOS**

Se agradece a la Universidad Industrial de Santander por ser nuestra alma mater y brindarnos la oportunidad de cumplir nuestros sueños, al profesor Wilfredo Del Toro Rodríguez, profesor de la Universidad Industrial de Santander y director de nuestro proyecto de grado por su gran dedicación y compromiso en la elaboración de este artículo, de igual manera al profesor Jairo Gamboa por su colaboración incondicional y disposición al brindarnos sus conocimientos.

***Los autores.***

A mis padres, Nancy Cárdenas y Carlos Arturo Morales, quienes han sido mi soporte y mi apoyo a lo largo de mi vida, quienes han luchado incansablemente por mi bienestar; a mi novia, Tania Ortiz, quien me ha acompañado en los últimos años, y me ha brindado todo de ella.

***Carlos Morales***

A Dios por permitirme estar vivo, tener la salud y fortaleza para cumplir mis metas, a mi familia, madre, hermanos y demás, por su apoyo incondicional y comprensión, a mi padre que desde el cielo me cuida y a ti Claudia Mendoza, por ser incondicional en todo momento, por ese apoyo en la realización de este artículo, pero lo más importante por ese cariño y amor que me brindas.

***Manuel Rincón***

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
1 INTRODUCCIÓN .....	15
2 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO .....	17
2.1 TÍTULO DEL PROYECTO .....	17
2.2 RESPONSABLES .....	17
2.3 PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA .....	17
2.4 OBJETIVOS .....	18
2.4.1 Objetivo General .....	18
2.4.2 Objetivos Específicos .....	18
2.5 METODOLOGÍA .....	19
3 MARCO TEÓRICO .....	19
4 QUAKE/W .....	19
4.1 MATERIALES Y SUS PROPIEDADES .....	20
4.2 MODELOS DE COMPORTAMIENTO .....	21
4.2.1 Modelo Lineal Elástico .....	21
4.2.2 Modelo Lineal Equivalente .....	21
4.3 MÓDULO DE CORTE G .....	22
4.4 FUNCIÓN DE REDUCCIÓN G .....	24
4.5 FUNCIÓN RELACIÓN DE AMORTIGUAMIENTO .....	25
4.6 TENSIÓN CÍCLICA EQUIVALENTE .....	27
4.7 EXCESO DE LA PRESIÓN DE POROS .....	28
4.8 FUNCIÓN NÚMERO DE CICLOS .....	31
5 MODELAMIENTO EN QUAKE/W .....	33
6 MODELO EJEMPLO .....	39
6.1 SISMOS DE ANÁLISIS .....	41
6.2 ANÁLISIS LINEAL ELÁSTICO .....	44
6.3 ANÁLISIS LINEAL EQUIVALENTE .....	49
7 CONCLUSIONES .....	57
BIBLIOGRAFÍA .....	59
ANEXOS .....	60

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
FIGURA 1. FUNCIÓN TÍPICA DE GMAX PARA SUELOS COHESIVOS.....	24
FIGURA 2.FUNCIÓN FACTOR DE AMORTIGUAMIENTO.....	26
FIGURA 3.HISTORIA DEL ESFUERZO CORTANTE HORIZONTAL CON EL TIEMPO EN UN SISMO.....	27
FIGURA 4. ESFUERZO DE CORTE CÍCLICO EQUIVALENTE.....	28
FIGURA 5. NÚMERO DE CICLOS EQUIVALENTES VS MAGNITUD DEL SISMO.....	29
FIGURA 6. GRAFICA EN QUAKE/W. N/NL VS RU.....	30
FIGURA 7. FUNCIÓN NÚMERO DE CICLOS.....	31
FIGURA 8. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS CÍCLICAS EN SACRAMENTO SAND RIVER. ....	32
FIGURA 9. VENTANA KEYIN MATERIALS.....	35
FIGURA 10. ASIGNACIÓN DE MATERIALES Y CONDICIONES DE FRONTERA ANÁLISIS ESTÁTICO.....	36
FIGURA 11. ASIGNACIÓN DE MATERIALES Y CONDICIONES DE FRONTERA ANÁLISIS DINÁMICO.....	37
FIGURA 12. DRAW CONTOURS.....	38
FIGURA 13. CONTOURS EN QUAKE/W.....	39
FIGURA 14. INGRESO DEL SISMO EN QUAKE/W.....	42
FIGURA 15. ACELEROGRAMA DEL SISMO DE ARMENIA ESCALADO A ESCALA REAL EN QUAKE/W.....	43
FIGURA 16. PERFIL DEL SUELO EJEMPLO EN QUAKE/W.....	43
FIGURA 17. ACELERACIONES EN X SUPERFICIE.....	45
FIGURA 18. ACELERACIONES EN X BASE ROCOSA.....	46
FIGURA 19. ACELERACIONES EN X CON LA PROFUNDIDAD BAJO LA ZAPATA A LO LARGO DE TODO EL SISMO.....	46
FIGURA 20. ACELERACIONES EN X CON LA PROFUNDIDAD BAJO LA ZAPATA, APROXIMADAMENTE EN EL MOMENTO PICO DEL SISMO (7.8 S).....	47
FIGURA 21. ESPECTRO DE ACELERACIONES EN X EN LA BASE ROCOSA Y EN LA SUPERFICIE.....	47
FIGURA 22. ESPECTRO DE VELOCIDADES EN X EN LA BASE ROCOSA Y EN LA SUPERFICIE.....	48
FIGURA 23. DESPLAZAMIENTOS HORIZONTALES RELATIVOS A LO LARGO DE TODO EL SISMO, RESPECTO DEL EJE CENTRAL DE LA ZAPATA.....	48
FIGURA 24. ACELERACIONES EN X SUPERFICIE.....	50
FIGURA 25. ACELERACIONES EN X BASE ROCOSA.....	51
FIGURA 26. ACELERACIONES EN X CON LA PROFUNDIDAD BAJO LA ZAPATA A LO LARGO DE TODO EL SISMO.....	51
FIGURA 27. ACELERACIONES EN X CON LA PROFUNDIDAD, BAJO LA ZAPATA APROXIMADAMENTE EN EL MOMENTO PICO DEL SISMO (7.8 S).....	52
FIGURA 28. ESPECTRO DE ACELERACIONES EN X EN LA BASE ROCOSA Y EN LA SUPERFICIE.....	52

FIGURA 29. ESPECTRO DE VELOCIDADES EN X EN LA BASE ROCOSA Y EN LA SUPERFICIE.....	53
FIGURA 30. DESPLAZAMIENTOS HORIZONTALES RELATIVOS A LO LARGO DE TODO EL SISMO, RESPECTO DEL EJE CENTRAL DE LA ZAPATA.....	53
FIGURA 31. LICUEFACCIÓN DEL SUELO BAJO LA ZAPATA. ....	54
FIGURA 32. LICUEFACCIÓN DEL SUELO BAJO LA ZAPATA .....	55
FIGURA 33. CURVA DE HISTÉRESIS DEFORMACIÓN DE CORTE $\tau$ -TENSIÓN DE CORTE T. ....	68
FIGURA 34. VARIACIÓN DE LA RELACIÓN DE ESFUERZOS CÍCLICOS (REC) CON EL ENSAYO DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR PARA DIFERENTES VALORES DE MAGNITUD M .....	72
FIGURA 35. VARIACIÓN DE LA RELACIÓN DE ESFUERZOS CÍCLICOS (REC) CON EL ENSAYO DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR PARA CONTENIDO DE FINOS DIVERSOS (M=7.5).....	73
FIGURA 36. RELACIÓN ENTRE LA MAGNITUD DEL SISMO Y LA DISTANCIA EPICENTRAL DONDE SE HA PRESENTADO HISTÓRICAMENTE LA LICUACIÓN.....	73
FIGURA 37. CURVA $\Sigma'_o$ VS. Z MATERIAL 1.....	74
FIGURA 38. CURVA $\Sigma'_o$ VS. Z MATERIAL 2. ....	75
FIGURA 39. CURVA $\Sigma'_o$ VS. Z MATERIAL 3. ....	75
FIGURA 40. ACELEROGRAMA SISMO DE JAPÓN .....	78
FIGURA 41. ACELEROGRAMA SISMO DE CHINA .....	78
FIGURA 42. ACELEROGRAMA SISMO DE CALIFORNIA.....	79
FIGURA 43. ACELEROGRAMA SISMO DE ARMENIA.....	79

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
TABLA 1. DATOS DE LOS MATERIALES. ....	41
TABLA 2. DATOS DE LOS SISMOS. ....	42
TABLA 3. RESULTADO ANÁLISIS LINEAL ELÁSTICO. ....	45
TABLA 4. RESULTADOS DEL ANÁLISIS LINEAL EQUIVALENTE. ....	50
TABLA 5. ESCALA SISMOLÓGICA DE RICHTER. ....	64
TABLA 6. ESCALA SISMOLÓGICA DE MERCALLI. ....	65
TABLA 7. RELACIÓN DEL NÚMERO DE CICLOS CON LA MAGNITUD DEL MOVIMIENTO SÍSMICO. ....	72
TABLA 8. MÉTODO DE ÁLVARO GONZALES. ....	74
TABLA 9. RESUMEN DE LOS RESULTADOS DEL MÉTODO DE ÁLVARO GONZALES. ....	76

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
ANEXO A. MARCO TEÓRICO .....	61
ANEXO B. TABLAS DE LAS PROPIEDADES DE LOS SUELOS. ....	74
ANEXO C. ENSAYO DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR (SPT).....	77
ANEXO D. ACELEROGRAMAS SISMOS. ....	78

## RESUMEN

### TÍTULO

**UTILIZACIÓN DEL PROGRAMA QUAKE/W PARA EL MODELAMIENTO DE SUELOS DE CIMENTACIÓN SOMETIDOS A SISMOS \***

### AUTORES

Carlos Arturo Morales Cárdenas  
Manuel Alfredo Rincón Calderón \*\*

### PALABRAS CLAVES

Sismología, suelos, propiedades dinámicas, modelamiento, QUAKE/W, sismos.

### DESCRIPCIÓN

El presente artículo se enfoca en el uso del programa QUAKE/W para el modelamiento de suelos de cimentaciones superficiales (zapatas) que son afectados por sismos.

Se abordan temas teóricos que son necesarios para la comprensión y el manejo del programa, tales como sismología, respuesta de los suelos ante eventos sísmicos, efectos locales o de sitio, propiedades dinámicas del suelo que afectan su respuesta sísmica, tales como el módulo de corte,  $G$ , el factor de amortiguamiento,  $\xi$ , módulo de Poisson,  $\nu$ , peso unitario del material,  $\gamma$ , el ángulo de fricción, la fuerza de cohesión que existe entre las partículas que lo conforman, entre otros parámetros, y se tiene en cuenta la función de reducción del módulo de corte.

Los autores hacen uso del software QUAKE/W, siendo el manejo de este el tema central del proyecto de grado que se desarrolla mediante una investigación detallada del manejo del programa QUAKE/W y se recopila la información necesaria para el modelamiento en éste; además se realiza un ejemplo de cómo se modela en QUAKE/W, describiéndose el ingreso de los parámetros, datos de salida, interpretación de los resultados, etc. Se comenta sobre la determinación de algunos de estos parámetros de entrada con ecuaciones propuestas por científicos y otros autores. Se presenta en sí un ejercicio didáctico que muestra el uso del programa y la interpretación de algunos resultados ofrecidos.

---

\* Trabajo de grado. Modalidad De Investigación.

\*\* Facultad de Ingenierías Físico – Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Wilfredo del Toro Rodríguez.

## SUMMARY

### TITLE:

**UTILIZATION THE PROGRAM QUAKE / W FOR THE MODELING OF FOUNDATION SOILS UNDER EARTHQUAKE \***

### AUTHORS

Carlos Arturo Morales Cárdenas  
Manuel Alfredo Rincón Calderón \*\*

### KEYWORDS

Seismology, soils, dynamic properties, modeling, QUAKE / W, earthquakes.

### DESCRIPTION

This article is focused on using the program QUAKE / W for the modeling of shallow foundations floors (footings) that are affected by earthquakes.

Deal with some theoretical issues that are necessary for the understanding and management of the program, such as seismology, soil response to seismic events, local effects or site, dynamic soil properties that affect their response, such as the shear modulus,  $G$ , the damping factor,  $\xi$ , Poisson's module,  $\nu$ , unit weight of the material,  $\gamma$ , the angle of friction, the cohesive force between the particles that make up, among others parameters, and taking into account the role of shear modulus reduction.

The authors make use of the software QUAKE / W, with the handling of this central theme graduation project which is developed through a detailed research program management QUAKE / W and collects the necessary information for modeling in this, also performs an example of how modeling in QUAKE / W, describing the input parameters, output data, interpretation of results, etc. It is said about the determination of some of these input parameters with equations proposed by scientists and others. It presents a didactic exercise program showing the use and interpretation of some results offered.

---

\* Degree work. Research mode.

\*\* Faculty of Physical-Mechanic Engineering's. School of Civil Engineering. Director: Engineer Wilfredo del Toro Rodríguez

## 1 INTRODUCCIÓN

Desde la antigüedad el ser humano se ha visto afectado por una serie de fenómenos naturales y antrópicos, tales como incendios forestales, inundaciones, tsunamis, terremotos, actividad volcánica, etc., que han afectado en gran magnitud a la sociedad y su entorno.

Un caso específico son los terremotos, los cuales se caracterizan por ser una de las catástrofes naturales más devastadoras e impredecibles, que en tiempos históricos difícilmente podían ser estudiados y analizados por el ser humano, pero gracias a los avances tecnológicos modernos y a personas interesadas en éstos fenómenos la ciencia ha podido desarrollar estudios con resultados más precisos, siendo de gran ayuda para la sociedad.

Durante un sismo, a causa del movimiento de las placas tectónicas se libera energía de deformación acumulada de forma brusca y acelerada, que se transforma en dos tipos de ondas sísmicas, las internas o de cuerpo y las que se propagan por la superficie (ondas de superficie).

Dependiendo del tipo de suelo, ya sean blandos o rígidos, las consecuencias del sismo varían en la zona afectada, siendo una de éstas el fenómeno de licuación, que ocurre principalmente en suelos granulares sueltos saturados con un drenaje pobre, que debido al movimiento se genera un exceso en la presión de agua en los poros, provocando que el esfuerzo efectivo se reduzca y el suelo sufra un cambio de estado sólido a líquido. Otros fenómenos que pueden producirse en terrenos afectados por un sismo son deslizamientos, roturas del terreno y caídas de rocas.

En la actualidad existen herramientas informáticas que permiten un modelamiento de la respuesta del suelo ante fenómenos dinámicos, una de éstas es el software

GHOSTUDIO-QUAKE/W que se emplea para el análisis dinámico de estructuras sometidas a sismos, siendo el uso del QUAKE/W el tema central del proyecto de grado que se desarrolla en 4 (cuatro) fases: la fase 1 (uno) donde por parte de los autores se realiza una investigación detallada del manejo del programa QUAKE/W y se recopila la información necesaria para el modelamiento en éste; en la fase 2 (dos) se realiza el modelo del terreno y el fenómeno dinámico en el programa; la fase 3 (tres) consta del análisis de los resultados o datos de salida del QUAKE/W y en la fase 4 (cuatro) se plasman las conclusiones y experiencias del manejo del programa.

Con el desarrollo del presente proyecto se pretende dar a conocer la información básica necesaria para el manejo del programa, qué parámetros son necesarios en el modelamiento de suelos de cimentación superficial sometidos a fenómenos dinámicos, cómo se determinan estos, un análisis detallado de los resultados y se concluye haciendo énfasis en la experiencia en el manejo y potencialidad del programa QUAKE/W.

## **2 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO**

### **2.1 TÍTULO DEL PROYECTO**

UTILIZACIÓN DEL PROGRAMA QUAKE/W PARA EL MODELAMIENTO DE SUELOS DE CIMENTACIÓN SOMETIDOS A SISMOS.

### **2.2 RESPONSABLES**

CARLOS ARTURO MORALES CÁRDENAS.

MANUEL ALFREDO RINCÓN CALDERÓN.

### **2.3 PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA**

En esta investigación se desea responder la pregunta: ¿Cuál es el potencial del programa QUAKE/W en el modelamiento de suelos de cimentación sometidos a sismos?

Al plantearse esta pregunta, se busca determinar y analizar el comportamiento frente a un sismo de suelos finos y granulares que hacen parte del suelo de una cimentación superficial utilizando el programa QUAKE/W, ya que por ser flexibles tienden a ampliar el espectro del movimiento sísmico y le transmiten fuerzas externas a la cimentación, viéndose ésta afectada.

En conclusión, con nuestro trabajo de grado queremos evaluar cómo es el modelamiento de suelos de cimentación con el QUAKE/W, y según los resultados, determinar el comportamiento del suelo frente a un movimiento sísmico, y analizar cómo se distribuyen los esfuerzos bajo la cimentación.

En el marco internacional el estudio de los suelos frente a sismos es muy común, ya que estos fenómenos son impredecibles y pueden traer consecuencias

devastadoras para la sociedad en general.

En Colombia es muy importante tener el mayor conocimiento sobre el tema ya que se encuentra en una zona de amenaza sísmica alta, y por ende se tiene que dar espacio a la investigación y estudio del comportamiento de los suelos bajo movimientos telúricos.

## **2.4 OBJETIVOS**

### **2.4.1 Objetivo General**

Estudiar la potencialidad del programa QUAKE/W en el modelamiento de suelos de cimentación superficial sometidos a diferentes cargas sísmicas.

### **2.4.2 Objetivos Específicos**

- ✓ Determinar la información necesaria para el modelamiento en el programa, como son parámetros de los suelos, condiciones sísmicas, tipos de sismos, condiciones de frontera, etc.
- ✓ Realizar modelos teniendo en cuenta diferentes tipos de suelos y condiciones sísmicas.
- ✓ Analizar los resultados de los modelamientos realizados y las conclusiones respecto de la experiencia del uso del programa.

## 2.5 METODOLOGÍA

En primera instancia realizar un estudio del uso del programa QUAKE/W, estableciendo los parámetros a utilizar tales como las propiedades de los suelos y el tipo de cimentación; definir un modelo dinámico donde se especificaron diferentes condiciones sísmicas; ingresar los datos al programa para así resolver el modelo planteado; interpretar los resultados o datos de salida; concluir como fue la experiencia del uso del programa. Por último elaborar el documento donde se expresan los resultados de la investigación realizada y se plasman las memorias del modelamiento realizado.

## 3 MARCO TEÓRICO

Para comprender y analizar los resultados que QUAKE/W genera, es necesario tener un conocimiento sobre sismología, suelos y su respuesta sísmica, etc., estos temas se abordan en el ANEXO A.

## 4 QUAKE/W

QUAKE/W es una herramienta informática de gran alcance que permite realizar modelos y análisis dinámicos de suelos que son afectados por movimientos vibratorios repentinos, ya sean sismos, explosiones con dinamita, hincado de pilotes, etc.

QUAKE/W es parte del paquete de Geostudio y es, por consiguiente, totalmente integrado con los otros componentes, tales como SLOPE/W, SEEP/W, SIGMA/W, etc. La integración de QUAKE/W con los otros productos de Geostudio, amplifica en gran medida el tipo y la variedad de problemas que pueden ser analizados.

Este programa permite solucionar analíticamente los principales problemas relacionados con la respuesta de estructuras de suelos sometidos a cargas sísmicas, tales como los movimientos relativos, las fuerzas de inercia que se producen durante el sismo, la generación de un exceso en las presiones de agua en los poros, la reducción de la resistencia al esfuerzo cortante a medida que aumentan las deformaciones, etc.; pero no todos se pueden resolver en un solo análisis, ni mucho menos es posible abordar todos los temas en la versión actual<sup>1</sup>.

#### 4.1 MATERIALES Y SUS PROPIEDADES

Los parámetros principales que se necesitan para realizar un análisis dinámico son el módulo de rigidez del suelo o módulo de corte y el factor de amortiguamiento o la capacidad que tiene el terreno de disipar la energía que se genera por el impacto del sismo.

El programa permite ingresar parámetros como el módulo de corte y el factor de amortiguamiento como constante o función, según el tipo de modelamiento. Estas dos propiedades dinámicas se relacionan entre sí por medio de ecuaciones que se mostrarán más adelante.

Además de estos dos parámetros, otros datos de entrada para modelar en QUAKE/W son la presión de poros y su relación con los movimientos y deformaciones cíclicas, relación de Poisson, peso unitario de cada estrato del suelo, coeficientes de corrección,  $K_a$  y  $K_s$ , entre otros.

---

<sup>1</sup> KRAHN, John. Dynamic Modeling with QUAKE/W An Engineering Methodology. 4ta. ed. Canadá: GEO-SLOPE International Ltd., 2.009. p. 2.

## 4.2 MODELOS DE COMPORTAMIENTO

En QUAKE/W se tiene la posibilidad de analizar suelos por medio de diferentes tipos de modelos donde se relacionan los esfuerzos y las deformaciones, dos de ellos son:

### 4.2.1 Modelo Lineal Elástico

Es un modelo simple y conservador, en el cual los esfuerzos actúan de forma lineal con la deformación, donde la pendiente de la recta es el módulo de Young,  $E$ , según la ley de Hooke:

$$\sigma = E\epsilon \quad \text{Ecuación 1}$$

Cabe mencionar que en algunas investigaciones se estimó que los niveles de esfuerzos cortantes y confinamiento inicial influyen en el potencial de licuefacción de suelos, por esta razón QUAKE/W tiene en cuenta los factores  $K_a$  y  $K_s$ . Pero definir y utilizar en campo estos valores es muy difícil y complejo. Los usuarios del programa que conozcan la manera de aplicar estas correcciones pueden hacerlo, pero deben estudiar una publicación de Youd e Idriss del 2.001<sup>2</sup>.

### 4.2.2 Modelo Lineal Equivalente

Este modelo es paralelo al lineal equivalente, con la diferencia que el módulo de corte,  $G$ , varía con las deformaciones cíclicas.

El programa lo que hace es iniciar un análisis dinámico de la rigidez del suelo, luego realiza iteraciones, modificando el valor del módulo cortante,  $G$ , de acuerdo

---

<sup>2</sup> KRAHN, John. Dynamic Modeling with QUAKE/W An Engineering Methodology. 4ta. ed. Canadá: GEO-SLOPE International Ltd., 2.009. p. 79.

con una función de reducción especificada. Este proceso iterativo continúa hasta que las modificaciones requeridas de  $G$ , están dentro de una tolerancia especificada (convergencia).

Los principales parámetros usados en este modelo son el peso unitario,  $\gamma$ , módulo de Poisson,  $\nu$ , la cohesión,  $c$ , el ángulo de fricción,  $\Phi$ , factor de amortiguamiento,  $\xi$ , funciones  $K_a$  y  $K_s$ , función número de ciclos y el módulo de corte o cizallamiento,  $G_{max}$  y la función  $G$  reducción que denota la variación del  $G$  con el movimiento<sup>3</sup>.

### 4.3 MÓDULO DE CORTE G

El módulo de corte  $G$ , se define como la resistencia al esfuerzo cortante que tiene un suelo, y es de vital importancia determinarlo al momento de realizar estudios y análisis de suelos ante fenómenos dinámicos.

El módulo de corte  $G$  se puede especificar como constante para los modelos mencionados anteriormente.

En QUAKE/W éste módulo se especifica como  $G_{max}$ , y se estima que a pequeñas deformaciones, el módulo de corte alcanza su valor máximo, para esto se define  $G_{max}$  como una función de las deformaciones cíclicas.

QUAKE/W tiene algunas funciones de ejemplo, las cuales se pueden utilizar de una manera responsable por parte del usuario, ya que sólo se ofrecen para el aprendizaje del manejo del programa, pero para realizar un estudio real, es de vital importancia asegurarse que las funciones utilizadas y que van a ingresarse en el

---

<sup>3</sup> KRAHN, John. Dynamic Modeling with QUAKE/W An Engineering Methodology. 4ta. ed. Canadá: GEO-SLOPE International Ltd., 2.009. p. 81.

programa, representen los datos y las condiciones verdaderas de un sitio en particular<sup>4</sup>.

Los suelos granulares y cohesivos tienen funciones de ejemplo en QUAKE/W, éstas se muestran a continuación:

- ✓ Suelos granulares

$$G_{max} = K * \sqrt{\sigma'_{vm}} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde  $\sigma'_{vm}$  es el esfuerzo octaédrico y K es un coeficiente que se determina según el tipo de suelo estudiado:

- Arena suelta .....30
- Arena densa media.....50
- Arena densa.....70
- Grava suelta.....80
- Grava densa media.....130
- Gravas.....180<sup>5</sup>

- ✓ Suelos cohesivos

$$G_{max} = 625 \left( \frac{1}{(0.3+0.7e^2)} \right) (OCR)^k \sqrt{P_a \sigma'_{vm}} \quad \text{Ecuación 3}$$

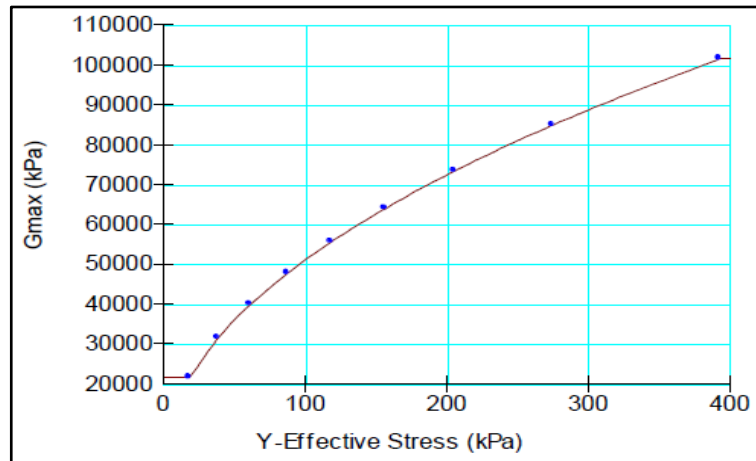
Donde e es la relación de vacíos, OCR la relación de sobre consolidación del suelo y k es un exponente que se relaciona con el índice de plasticidad, IP:

$$k = \frac{IP^k}{50} \quad \text{Ecuación 4}$$

Una gráfica ejemplo que genera QUAKE/W tomando valores de OCR=20, e=1, IP=10, Ko=0.5 a una profundidad de 20 m, es la siguiente:

<sup>4</sup> KRAHN, John. Dynamic Modeling with QUAKE/W An Engineering Methodology. 4ta. ed. Canadá: GEO-SLOPE International Ltd., 2.009. p. 81.

<sup>5</sup> KRAHN, John. Dynamic Modeling with QUAKE/W An Engineering Methodology. 4ta. ed. Canadá: GEO-SLOPE International Ltd., 2.009. p. 88.

**Figura 1.** Función típica de  $G_{max}$  para suelos cohesivos.

Fuente: KRAHN, John. Dynamic Modeling with QUAKE/W An Engineering Methodology. 4ta. ed. Canadá: GEO-SLOPE International Ltd., 2.009. p. 89.

#### 4.4 FUNCIÓN DE REDUCCIÓN G

Esta función se define como la variación de la resistencia máxima al corte,  $G_{max}$ , a medida que aumenta las deformaciones generadas por los esfuerzos cortantes. En cada una de las iteraciones, se calculan nuevos valores del módulo de corte  $G$ , a partir de la deformación por esfuerzo cortante y la función del valor de  $G_{max}$  calculados conjuntamente.

La curva de reducción del módulo cortante se puede determinar por medio de varias propuestas, entre ellas la de Seed e Idriss (1.970), que proponen curvas de la proporción  $G/G_{max}$  en función de diversos valores de deformación cortante para suelos arenosos; otra es la de Vucetic y Dobry (1.991), donde los autores plantean las curvas de reducción del módulo de corte en función del índice de plasticidad. Ishibashi y Zhang (1.993) desarrollaron, a comparación de los autores mencionados, una fórmula para estimar la razón  $G/G_{max}$ , donde las variables principales son el índice de plasticidad,  $IP$ , y la presión de confinamiento, la cual se presenta a continuación:

$$G/G_{max} = K \gamma, IP \sigma' m^{m(\gamma, IP) - m_0} \quad \text{Ecuación 5}$$

$$K \gamma, IP = 0.5 \left\{ 1 + \tanh \left[ \ln \left( \frac{0.000102 + n IP}{\gamma} \right)^{0.492} \right] \right\} \quad \text{Ecuación 6}$$

$$m \gamma, IP - m_0 =$$

$$0.272 \left\{ 1 - \tanh \left[ \ln \left( \frac{0.000556}{\gamma} \right) \right] \right\} \exp - 0.0145 IP^{1.3} \quad \text{Ecuación 7}$$

$n (IP)= 0$	$IP=0$
$n (IP)=3.37 \times 10^{-6} IP^{1.404}$	$0 < IP < 15$
$n (IP)=7.00 \times 10^{-7} IP^{1.976}$	$15 < IP < 70$
$n (IP)=2.70 \times 10^{-5} IP^{1.115}$	$IP > 70$

Las unidades de esfuerzo son KPa.

#### 4.5 FUNCIÓN RELACIÓN DE AMORTIGUAMIENTO

Al igual que  $G_{max}$ , el coeficiente de amortiguamiento en QUAKE/W se puede especificar como constante o una función.

Si se utiliza como una función, esta depende de la deformación por esfuerzos cortantes. De igual forma que para la función de reducción de  $G$ , Ishibashi y Zang en 1993 desarrollaron una expresión donde se puede estimar la función de factor de amortiguamiento. Las variables de la fórmula son el índice de plasticidad,  $IP$ , el módulo de corte,  $G$ , la relación  $G/G_{max}$  y la presión de confinamiento de forma indirecta <sup>6</sup>

<sup>6</sup> KRAMER, Steven. Geotechnical Earthquake Engineering. United States of America: University of Washington: Prentice Hall, 1996. p. 259.

La expresión es la siguiente:

$$\xi = A * B \quad \text{Ecuación 8}$$

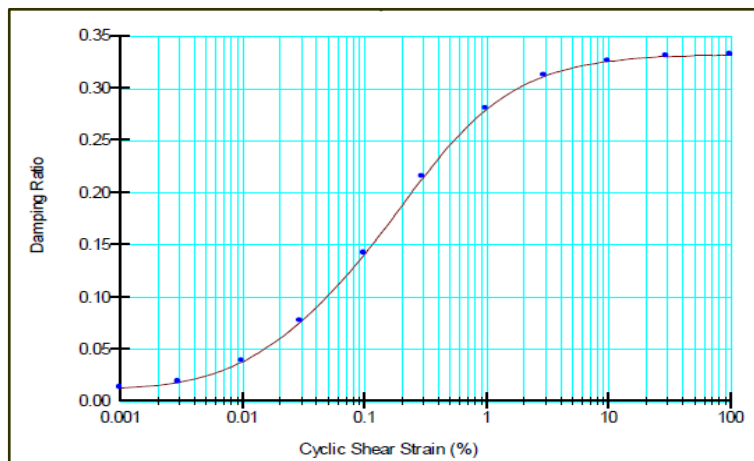
$$A = 0.333 \left( \frac{1 + \exp -0.0145 IP^{1.3}}{2} \right) \quad \text{Ecuación 9}$$

$$B = \left[ 0.586 \left( \frac{G}{G_{max}} \right)^2 - 1.547 \left( \frac{G}{G_{max}} \right) + 1 \right] \quad \text{Ecuación 10}$$

La relación G/Gmax de la formula se determina de la misma manera que la función de reducción de G, entonces el factor de amortiguamiento se calcula con el mismo índice de plasticidad, IP, establecido para un rango estimado de deformaciones angulares por cortante cíclico.

Las unidades de esfuerzo son KPa.

**Figura 2.** Función Factor de amortiguamiento.

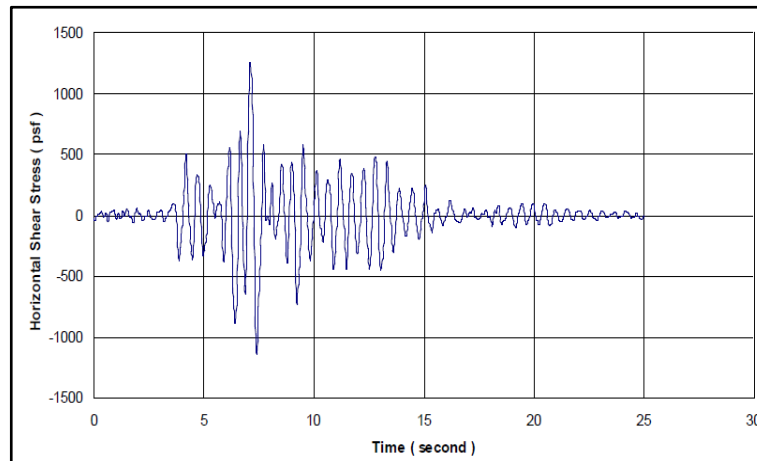


Fuente: KRAHN, John. Dynamic Modeling with QUAKE/W An Engineering Methodology. 4ta. ed. Canadá: GEO-SLOPE International Ltd., 2.009. p. 92.

#### 4.6 TENSIÓN CÍCLICA EQUIVALENTE.

Un sismo es muy variable y actúa de forma irregular, generando esfuerzos de corte muy variables e irregulares en el suelo. Un ejemplo de cómo varían los esfuerzos de corte se muestra en la figura 3.

**Figura 3.** Historia del esfuerzo cortante horizontal con el tiempo en un sismo.



Fuente: KRAHN, John. Dynamic Modeling with QUAKE/W An Engineering Methodology. 4ta. ed. Canadá: GEO-SLOPE International Ltd., 2.009. p. 93.

Pero las pruebas de laboratorio, usualmente se realizan aplicando repetidamente ciclos de tensiones uniformes, por lo cual es la base de la comprensión del comportamiento del suelo bajo cargas dinámicas.

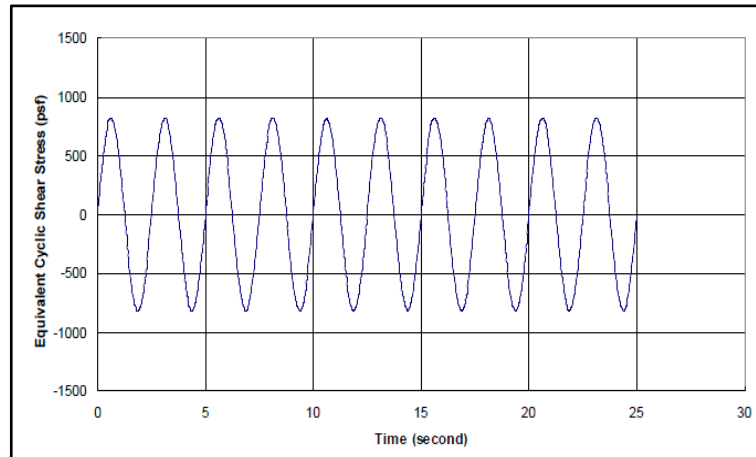
Con base en la investigación de Seed (1975), el método más viable consiste en establecer la amplitud cíclica de cizalla uniforme al 65% del esfuerzo cortante pico en el histograma de cizallamiento, la ecuación es la siguiente:

$$\tau_{ciclo} = 0.65\tau_{pico} \quad \text{Ecuación 11}^7$$

<sup>7</sup> KRAMER, Steven. Geotechnical Earthquake Engineering. United States of America: University of Washington: Prentice Hall, 1996. p. 370.

Al aplicar este método, la variación del esfuerzo de corte con el tiempo mostrada en la figura 3 se vuelve uniforme, como se muestra en la figura 4:

**Figura 4.** Esfuerzo de corte cíclico equivalente.



Fuente: KRAHN, John. Dynamic Modeling with QUAKE/W An Engineering Methodology. 4ta. ed. Canadá: GEO-SLOPE International Ltd., 2.009. p. 95.

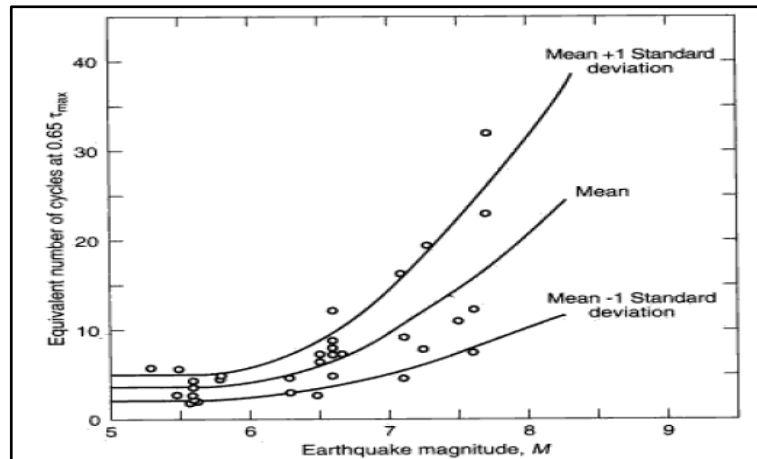
#### 4.7 EXCESO DE LA PRESIÓN DE POROS

Un número determinado de ciclos de esfuerzos de corte a una amplitud dada podría generar licuación del suelo. Este concepto es asociado con el modelo de suelo lineal equivalente.

Las presiones de poros generados durante un sismo son función de la cantidad equivalente de ciclos uniformes,  $N$ , y el número de ciclos,  $N_L$ , que es el número de ciclos necesarios para que se presente licuefacción en el suelo.

El valor  $N$  se determina a partir de la magnitud del sismo, como se muestra en la figura 5:

**Figura 5.** Número de ciclos equivalentes vs Magnitud del sismo.



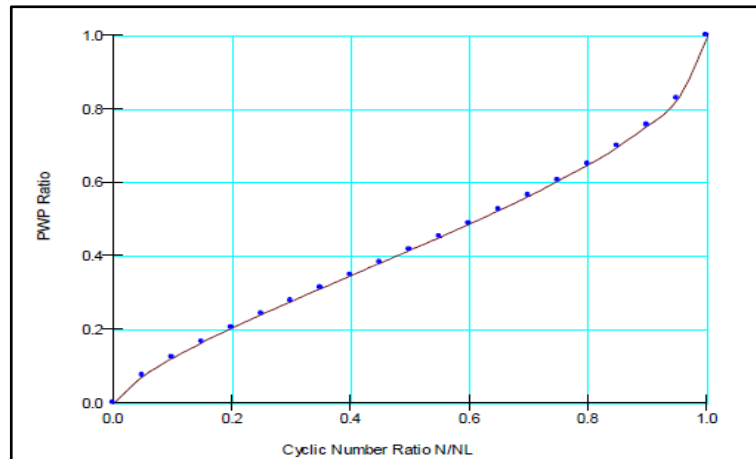
Fuente: KRAMER, Steven. Geotechnical Earthquake Engineering. United States of America: University of Washington: Prentice Hall, 1996. p. 370.

NL se determina a partir de una función número de ciclos especificada en la siguiente sección. La razón  $N/NL$  se relaciona con un parámetro  $ru$  presión de poro como lo determinaron los investigadores Lee y Albaisa (1974) y De Alba (1975) a través de una función de la relación de presión de poro <sup>8</sup>.

$$ru = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \left\{ \text{sen}^{-1} \left[ 2 \left( \frac{N}{NL} \right)^{1/\alpha} - 1 \right] \right\} \quad \text{Ecuación 12}$$

<sup>8</sup> KRAMER, Steven. Geotechnical Earthquake Engineering. United States of America: University of Washington: Prentice Hall, 1996. p. 376.

**Figura 6.** Grafica en QUAKE/W. N/NL vs ru.



Fuente: KRAHN, John. Dynamic Modeling with QUAKE/W An Engineering Methodology. 4ta. ed. Canadá: GEO-SLOPE International Ltd., 2.009. p. 97.

La figura 6 representa una función que QUAKE/W ofrece como ejemplo, estableciendo  $\alpha$  igual a 0.7 en la ecuación 1. Una vez calculados los puntos a partir de la ecuación 1, estos se pueden ajustar de acuerdo a los datos del modelo.

En el momento que se determina N y NL, QUAKE/W ingresa a la función de presión de poro para obtener el correspondiente ru (ecuación 1), luego calcula la presión de poro a partir de:

$$u = rux\sigma'_3 \text{ (estático)} \quad \text{Ecuación 13}$$

Es de suma importancia tener en cuenta que la tensión efectiva estática de confinamiento es la que se utiliza en los cálculos de la presión de poros. Esto

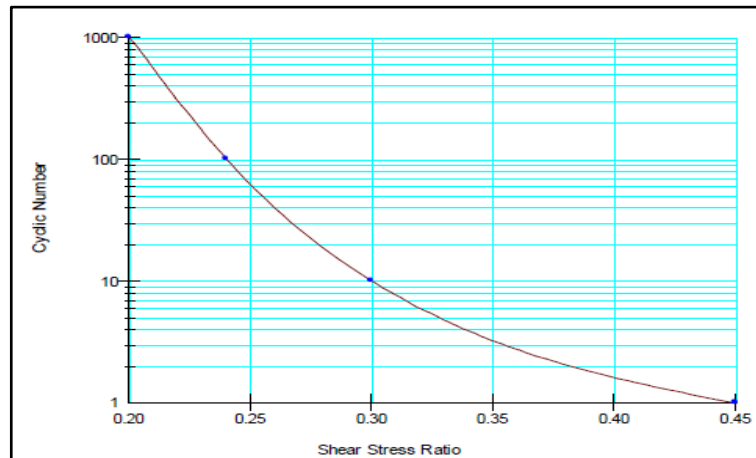
implica que cuando  $r_u$  asume un valor de 1, la tensión efectiva,  $\sigma'_3$ , es igual a cero, estado en el que se considera que el suelo ha sufrido licuefacción<sup>9</sup>.

Este es solo un método para definir la licuefacción; QUAKE/W tiene otra alternativa que utiliza el concepto de superficie de colapso y resistencia en estado estacionario, alternativa que se omite en este artículo.

#### 4.8 FUNCIÓN NÚMERO DE CICLOS

Una función típica que ofrece QUAKE/W es la que se presenta en la figura 7:

**Figura 7.** Función número de ciclos.



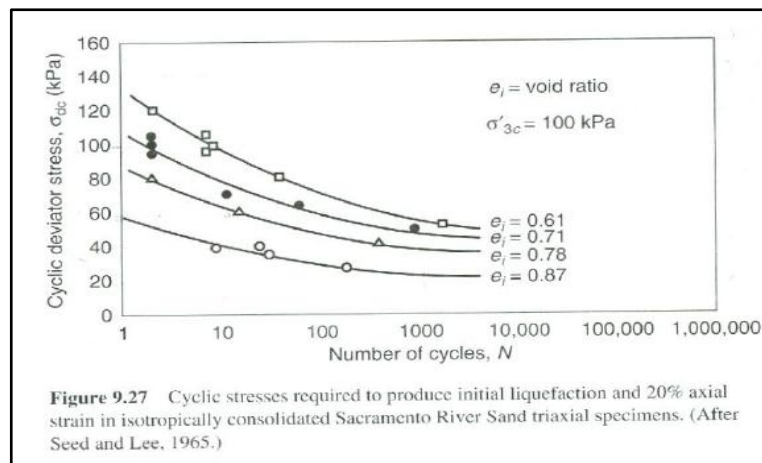
Fuente: KRAHN, John. Dynamic Modeling with QUAKE/W An Engineering Methodology. 4ta. ed. Canadá: GEO-SLOPE International Ltd., 2.009. p. 98.

Los investigadores Seed y Lee (1965) realizaron pruebas cíclicas en Sacramento Sand River, donde una síntesis de sus resultados se presentan en la figura 8, siendo estos datos utilizados para crear cuatro funciones de ejemplo para el programa. Estas funciones se denominan: arena suelta, arena media suelta, arena media densa y arena.

<sup>9</sup> KRAHN, John. Dynamic Modeling with QUAKE/W An Engineering Methodology. 4ta. ed. Canadá: GEO-SLOPE International Ltd., 2.009. p. 97.

De igual manera que con todas la funciones de ejemplo que ofrece QUAKE/W, las funciones nombradas anteriormente únicamente se proporcionan como una guía pedagógica para el usuario. Estas funciones no son confiables para análisis de proyectos reales.

**Figura 8.** Resultados de las pruebas cíclicas en Sacramento Sand River.



Fuente: KRAMER, Steven. Geotechnical Earthquake Engineering. United States of America: University of Washington: Prentice Hall, 1996. p. 375.

Una aplicación interesante de QUAKE/W es el trabajo en conjunto con los demás programas del paquete de Geostudio, un caso específico es el de SIGMA/W, que se puede utilizar para llevar a cabo los análisis del esfuerzo y la deformación de las estructuras. SIGMA / W puede realizar un análisis de la deformación elástica lineal simple o un análisis muy sofisticado, no lineal elastoplástico eficaz de la tensión.

Al trabajar juntos estos dos programas se pueden determinar las deformaciones por el movimiento, pero cabe aclarar que QUAKE/W en su análisis dinámico permite estimar la generación de excesos en la presión de poros, mas no determinar la deformación. La deformación se puede modelar con SIGMA/W. Los análisis de las presas San Fernando se describen con ejemplos detallados en

QUAKE/W, que demuestran que el enfoque SIGMA/W junto con el QUAKE/W genera resultados eficaces en la investigación de la deformación post-terremoto, que podría estar asociada con la licuefacción a pesar de que no es un enfoque completamente riguroso<sup>10</sup>.

## 5 MODELAMIENTO EN QUAKE/W

El modelamiento en QUAKE/W depende de una serie de pasos a seguir para su correcto funcionamiento y un posterior análisis de los resultados que el programa ofrece.

En este artículo se darán unas instrucciones generales para el uso del programa y se realizara un ejemplo de aplicación.

Para elaborar un modelo, primero se abre Geostudio y luego se escoge New, después escogemos la opción QUAKE/W, aparece una ventana donde se le asigna nombre al archivo, es fundamental en este paso indicar en Analysis Type, la opción Initial Static, lo que quiere decir que primero se realiza un análisis estático en el programa, para después copiar los resultados del mismo y generar un análisis dinámico.

Durante este paso también se determinan las condiciones iniciales PWP, las cuales pueden ser importadas desde otro análisis; ya sea de QUAKE/W (Parent Analysis), de otra aplicación del paquete Geostudio (other Geostudio Analysis) o ingresar las condiciones propias del problema. Además en KEYIN ANALYSES del estudio dinámico se debe ingresar el sismo, para hacerlo se debe oprimir sobre la pestaña time, y luego sobre la opción Keyin Horiz. Earthquake Record, donde simplemente se copian los datos desde una hoja de Excel por ejemplo, de tiempo

---

<sup>10</sup> KRAHN, John. Dynamic Modeling with QUAKE/W An Engineering Methodology. 4ta. ed. Canadá: GEO-SLOPE International Ltd., 2.009. p. 9-10.

y aceleración, y se pegan en Earthquake Records (Modified). El sismo ingresado también se puede escalar a gusto del usuario. Se cierra esta ventana y aparece en la pantalla el área de trabajo.

Se define el tamaño de la página, unidades, la escala, los ejes y la grilla, luego aparecen los ejes en el área de trabajo, y se procede a dibujar el problema; cabe recordar que se trata de un modelo, y la estratigrafía y perfil del suelo se convierten en líneas rectas, simplificando la geometría real, ya que un modelo numérico no puede y no debe incluir todos los detalles que existen en el campo. Si se intenta incluir todos los detalles lo más exactos posible, el modelo puede ser tan complejo que sería muy difícil y a veces imposible interpretar o incluso obtener resultados<sup>11</sup>. Después de dibujar el problema, se definen las regiones, para ingresarle los diferentes tipos de materiales que conforman el estrato del suelo. En la opción KEYIN, se ingresan todos los parámetros a analizar, tipos de materiales, vigas y barras estructurales, condiciones de frontera, las funciones de las propiedades del suelo, los fenómenos dinámicos, etc.

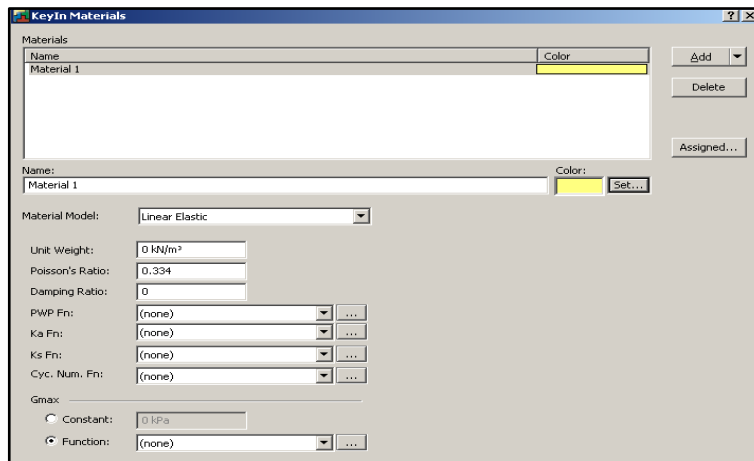
Un paso importante para el programa es el ingreso de los parámetros del suelo, tales como peso unitario, módulo de Poisson, factor de amortiguamiento, al igual que las funciones PWP,  $K_a$ ,  $K_s$  y Cyclic Number, para las cuales QUAKE/W tiene curvas de ejemplo, que solo se recomiendan usar de manera didáctica; para tener resultados más verídicos, se pueden editar los puntos de estas curvas, utilizando datos que se obtienen gracias a los resultados de ensayos previos en el sitio donde se realiza el estudio, y , además de los mencionados, en QUAKE/W se debe especificar el módulo de corte, ya sea como constante o función, esta última tiene en cuenta si es un suelo granular o cohesivo, y depende de características tales como: si se trata de un suelo granular, se debe especificar como arena o grava, al igual si son sueltas o densas; la profundidad del estrato, un coeficiente

---

<sup>11</sup> KRAHN, John. Dynamic Modeling with QUAKE/W An Engineering Methodology. 4ta. ed. Canadá: GEO-SLOPE International Ltd., 2.009. p. 28.

K, que se especificó en la sección 4.3, y el coeficiente de fricción  $K(o)$ ; si se trata de suelos cohesivos, se especifica la profundidad, el OCR, la relación de vacíos, el índice de plasticidad y el coeficiente de fricción  $K(o)$ , con estos datos se puede generar la curva del comportamiento del  $G_{max}$  a medida que aumenta los esfuerzos efectivos en el estrato. Como se mencionó anteriormente QUAKE/W tiene varios tipos de análisis, uno de ellos es el análisis Equivalente Lineal, donde se tiene en cuenta la variación del módulo  $G_{max}$  a medida que aumentan las deformaciones generadas por los esfuerzos cortantes, y para que los resultados de los análisis sean lo más exactos posibles, se debe procurar tener los datos necesarios para generar la curva de esta variación. Un ensayo para determinar esta información es el ensayo dinámico triaxial cíclico, normalizado bajo la ASTM 3999. El mecanismo de este ensayo es aplicar esfuerzos de corte a una muestra de suelo, simulando con aproximación las condiciones del sitio.

**Figura 9.** Ventana KEYIN Materials.



Fuente: Autores

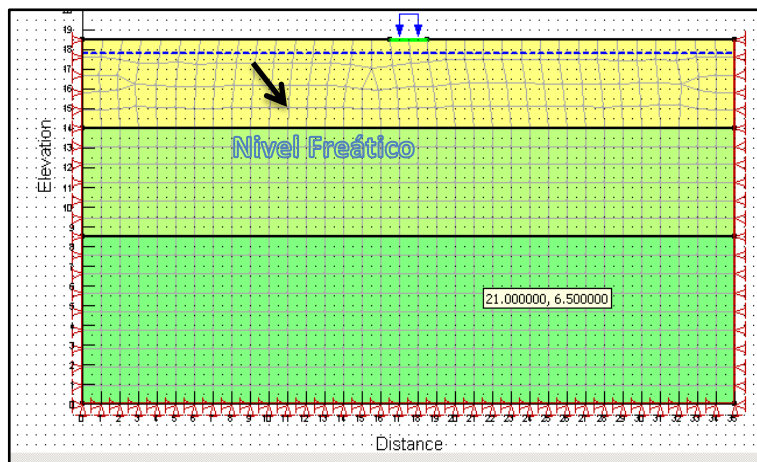
Luego de definir las propiedades de los suelos, se asigna el material de cada región creada previamente.

Después de esto se deben determinar las condiciones de frontera, que son las restricciones que se colocan en los bordes del espacio estudiado, ya que lo

dibujado en QUAKE/W solo es una pequeña porción de un gran volumen de terreno. Además se pueden especificar cargas puntuales o distribuidas como condiciones de frontera. Hay que tener en cuenta que para realizar el análisis estático, se restringen movimientos únicamente en la dirección horizontal en los bordes laterales y en la base del espacio se restringe en ambas direcciones, horizontal y vertical, ya que QUAKE/W asume esto como el límite de un estrato rocoso, queriendo decir que lo que hay debajo de estas restricciones (en ambas direcciones en la base del espacio) es roca dura. Para un análisis dinámico, las restricciones laterales se hacen en el sentido vertical, permitiendo el movimiento horizontal del suelo, la base del espacio se restringe de igual manera que en el análisis estático.

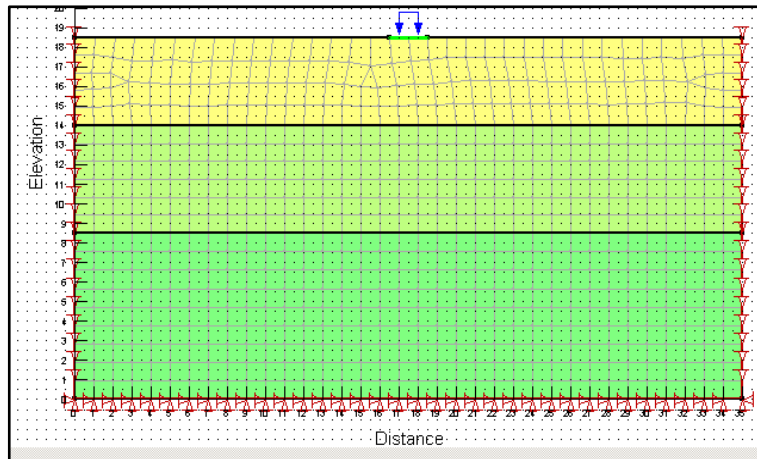
En el análisis estático es importante definir la línea de aguas o nivel freático.

**Figura 10.** Asignación de materiales y condiciones de frontera análisis estático.



Fuente: Autores


**Figura 11.** Asignación de materiales y condiciones de frontera análisis dinámico.




Fuente: Autores


En QUAKE/W se subdivide el perfil total del suelo mediante un mallado, esto se debe a que los métodos de elementos finitos numéricos se basan en el concepto de subdividir un medio continuo en pequeñas partes, que describen el comportamiento del medio continuo como un todo. Las piezas se conocen como elementos finitos<sup>12</sup>. En el programa se pueden encontrar varios tipos de mallado, estos son: mallas rectangulares o triangulares.


Posteriormente se define dónde irán las cargas externas, tales como vigas, zapatas, presas de tierra, etc. Las cargas se definen en condiciones de frontera como se mencionó anteriormente.

Después de realizar todos estos pasos se procede a revisar si no existen errores en el modelo, mediante la opción Verify/Optimize. 

Luego se procede a solucionar el problema, pulsando sobre el icono Solve Analyses. 

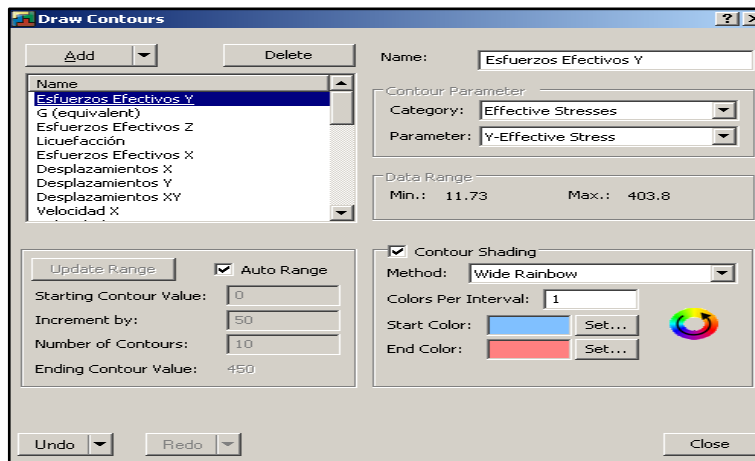
<sup>12</sup> KRAHN, John. Dynamic Modeling with QUAKE/W An Engineering Methodology. 4ta. ed. Canadá: GEO-SLOPE International Ltd., 2.009. p. 39.

Finalizada la solución de los análisis, QUAKE/W genera una gran cantidad de graficas donde se muestran las variaciones en los valores de los resultados, estas graficas se llaman contornos y se muestran al oprimir sobre el icono. 


Las imágenes de los contornos las produce el usuario del programa de acuerdo a la información que necesite ver oprimiendo la opción Draw Contours 

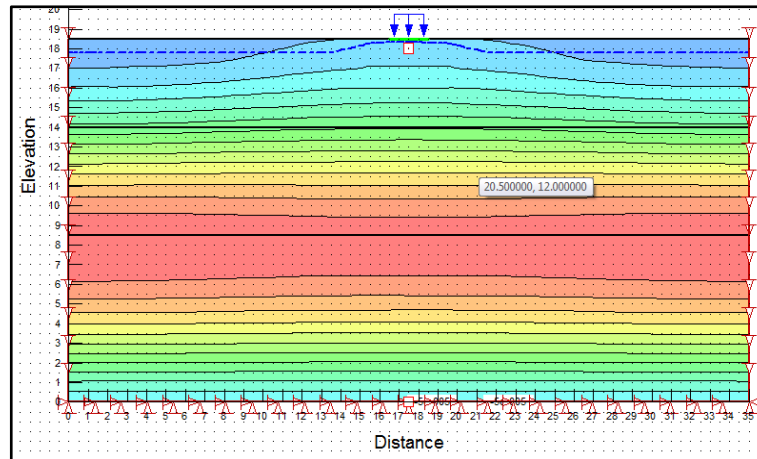
El programa genera contornos de esfuerzos totales, esfuerzos efectivos, aceleraciones, velocidades, presión de poros, licuefacción, esfuerzos cortantes, deformaciones, propiedades de los materiales (factor de amortiguamiento, Gmax, etc.) etc.

**Figura 12.** Draw Contours.



Fuente: Autores

Además de generar diferentes contornos, QUAKE/W permite ver valores de los resultados a través de Draw Contours Labels. 

**Figura 13.** Contours en QUAKE/W.

Fuente: Autores

QUAKE/W también permite generar graficas de variables en comparación con los parámetros específicos en cualquier momento del fenómeno dinámico. Estas variables son esfuerzos totales, esfuerzos efectivos, aceleraciones, velocidades, presión de poros, licuefacción, esfuerzos cortantes, deformaciones, propiedades de los materiales, etc., en función de la distancia, tiempo, desplazamientos, deformaciones, etc.

Estos son los pasos generales para realizar un modelo en QUAKE/W, aunque el programa permite realizar una infinidad de análisis, el presente artículo solo hace énfasis en el modelamiento de una zapata sobre un perfil del suelo, que es sometido a un sismo, que es escalado a diversas proporciones de la gravedad.

## 6 MODELO EJEMPLO

El siguiente ejemplo se realizó a modo de enseñanza y para mostrar cómo trabaja el programa.

Las especificaciones son las siguientes:

El perfil del suelo del ejemplo es el resultado de un sondeo con SPT (siglas en inglés) real, donde el suelo se subdividió en tres capas, cada una con su respectivo número de golpes, en los resultados del ensayo no se muestran el peso unitario de cada estrato, así que se hizo uso del programa Dynamic Probing, donde por medio del número de golpes de cada capa de suelo y de su profundidad, el programa genera los pesos unitarios de cada estrato.

En el ejemplo se trabajó con suelos arenosos saturados, donde el nivel freático se ubicó justo debajo de la zapata, la cual tiene dimensiones de 2x1m, base y profundidad respectivamente, con una carga por unidad de área de 200 KN/m<sup>2</sup>. Se utilizaron suelos arenosos saturados debido a que estos presentan mayores problemas en al momento de presentarse un sismo.

Hay que hacer referencia a que para elaborar un modelo y posteriormente un análisis lo más exacto posible, se necesitan extraer varias muestras de suelos y realizarles los respectivos ensayos, que en si son muy costosos y complejos, para poder determinar sus propiedades y así ingresarlos al programa para obtener unos resultados coherentes. Por este motivo, los autores del presente artículo, para poder crear un modelo donde se muestren los aspectos más importantes del programa, se vieron en la necesidad de asumir varias propiedades del suelo, y recurrir a las funciones y graficas que QUAKE/W ofrece.

A continuación se muestran los datos de los suelos:

**Tabla 1.** Datos de los materiales.

Datos de los materiales							
ESTRATO	PROFUNDIDAD (m)	N	TIPO	PESO UNITARIO (Ton/m <sup>3</sup> )	$\Phi$	K(o)	$\sigma_3'$ Kpa
1	4,5	10	ML	1,73	25,66	0,57	538
2	10,5	17	SM	1,91	28,64	0,53	643
3	18,5	34	SM	2,07	30	0,5	800

Fuente: Autores.

## 6.1 SISMOS DE ANÁLISIS

Para el análisis del ejemplo, se consideró el sismo de la ciudad de Armenia ocurrido el 25 de enero de 1.999, [(M.sub.W) = 6.2<sup>13</sup>, con una profundidad de tan solo 16 Km, sus consecuencias fueron devastadoras.

Además del sismo de Armenia, se realizaron modelos con otros tres (3) sismos, y se generaron gráficas de resultados de licuefacción para cada uno y así poder observar un contraste entre cada resultado, estos sismos son:

- ✓ Sismo de California: ocurrido el 1 de enero de 1.987 con una magnitud de 5.9<sup>14</sup>.
- ✓ Sismo de Japón: ocurrido el 9 de junio de 1.976, tuvo una magnitud de 6.2.

<sup>13</sup> Sismo de Armenia 1.999, El sismo de Armenia del 25 de enero de 1999. Un análisis tele sísmico de ondas de cuerpo, observaciones de campo y aspectos sismo tectónicos Consultado el 15 de abril de 2013.

Disponible en: [http://www.colombiaparatodos.net/noticias-colombia\\_para\\_todos-articulo-el\\_sismo\\_de\\_armenia\\_del\\_25\\_de\\_enero\\_de\\_1999\\_un\\_analisis\\_teleismatico\\_de\\_ondas\\_de\\_cuerpo\\_observaciones\\_de\\_campo\\_y\\_aspectos\\_sismotectnicos-seccion-politica.htm](http://www.colombiaparatodos.net/noticias-colombia_para_todos-articulo-el_sismo_de_armenia_del_25_de_enero_de_1999_un_analisis_teleismatico_de_ondas_de_cuerpo_observaciones_de_campo_y_aspectos_sismotectnicos-seccion-politica.htm)

<sup>14</sup> Terremoto de California 1.987. Terremotos históricos. Disponible en: [http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/states/events/1987\\_10\\_01.php](http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/states/events/1987_10_01.php)

- ✓ Sismo de China: ocurrido el 1 de abril de 1.970 con una magnitud de 5.6<sup>15</sup>.

Los acelerogramas de cada sismo se presentan en el ANEXO D.

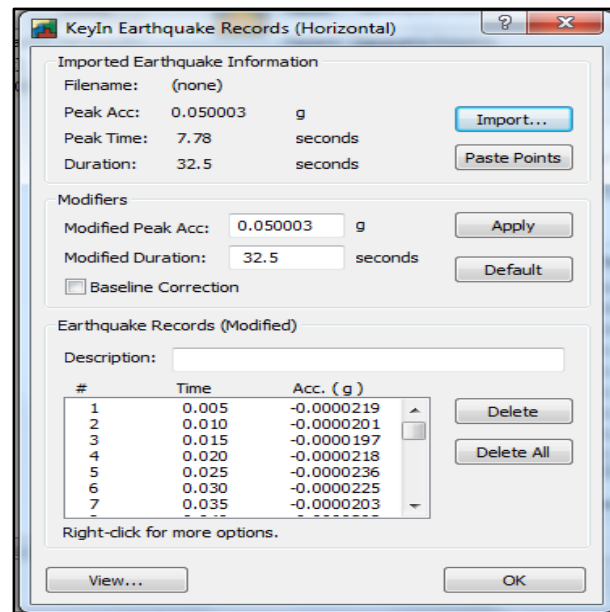
A continuación se presentan algunas propiedades de los sismos:

**Tabla 2.** Datos de los sismos.

	ARMENIA	CALIFORNIA	CHINA	JAPÓN
Pico real de aceleración	0.05 G	0.1239 G	0.219 G	0.1935 G
Tiempo de máx. aceleración	7.78 s	3.73 s	4.34 s	7.22 s

Fuente: Autores.

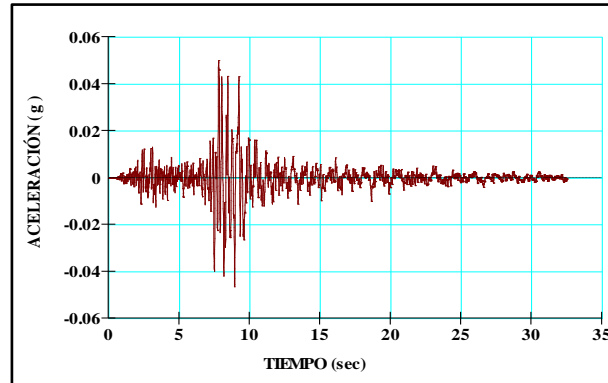
**Figura 14.** Ingreso del sismo en QUAKE/W.



Fuente: Autores.

<sup>15</sup> Terremoto en China 1.970. Earthquakes with 1,000 or More Deaths since 1900. Disponible en: [http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/world/world\\_deaths.php](http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/world/world_deaths.php)

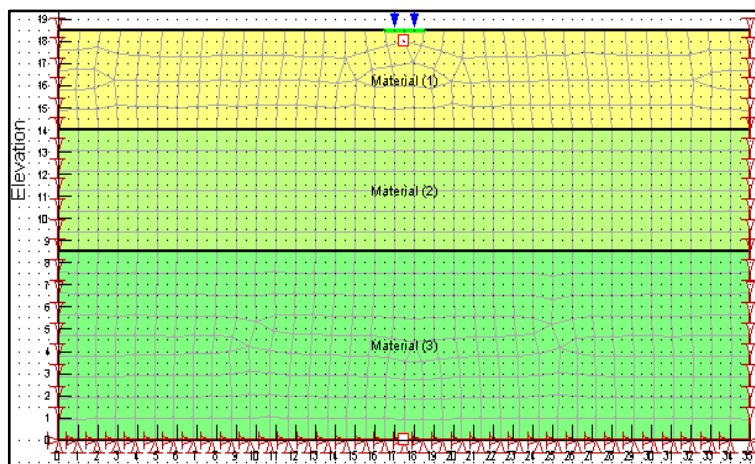
**Figura 15.** Acelerograma del sismo de Armenia escalado a escala real en QUAKE/W.



Fuente: Autores.

QUAKE/W permite escalar la aceleración pico, para el diseño de estructuras sismo resistentes se debe determinar  $A_a$  (coeficiente que representa la aceleración horizontal pico efectiva para diseño)<sup>16</sup>, que se estipulan en la NSR-10, comenzando desde 0.05 g hasta 0.5 g, aumentando de a 0.05 g.

**Figura 16.** Perfil del suelo ejemplo en QUAKE/W.



Fuente: Autores.

<sup>16</sup> REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE NSR-10. Título A. Requisitos Generales de Diseño y Construcción Sismo Resistente. Capítulo 2 p. A-13.

Se realizaron dos tipos de análisis, lineal elástico y lineal equivalente, para observar las diferencias entre ambos.

## 6.2 ANÁLISIS LINEAL ELÁSTICO

En el análisis lineal elástico se ingresan las propiedades de cada material, haciendo uso de los datos de la **tabla 1**. El programa ofrece funciones de ejemplo para el usuario, los autores de este artículo asumieron las funciones PWP y Gmax, para poder completar el modelo y así generar los resultados, ya que como se mencionó anteriormente, únicamente se cuenta con un ensayo SPT y los resultados suministrados por este no son suficientes para generar las curvas que pide el programa.

Se crearon dos puntos de control (History Points), uno justo debajo de la zapata y otra en la base rocosa, para generar graficas de los diferentes resultados que da el programa.

Los análisis elaborados se hicieron con el sismo de Armenia a escala real, 0.05g, y se desarrollaron varios resultados, algunos de ellos son:

Aceleraciones en la base, aceleraciones en la superficie, espectros de respuesta de aceleraciones, espectros de respuesta de velocidades.

Los resultados de licuefacción se muestran para cuatro (4) sismos, a escala real, ellos son:

- ✓ Sismo de Armenia.
- ✓ Sismo de Japón.
- ✓ Sismo de China.
- ✓ Sismo de California.

Los resultados de los análisis realizados en QUAKE/W se hicieron con un factor de amortiguamiento del 5 %.

**Tabla 3.** Resultado análisis lineal elástico.

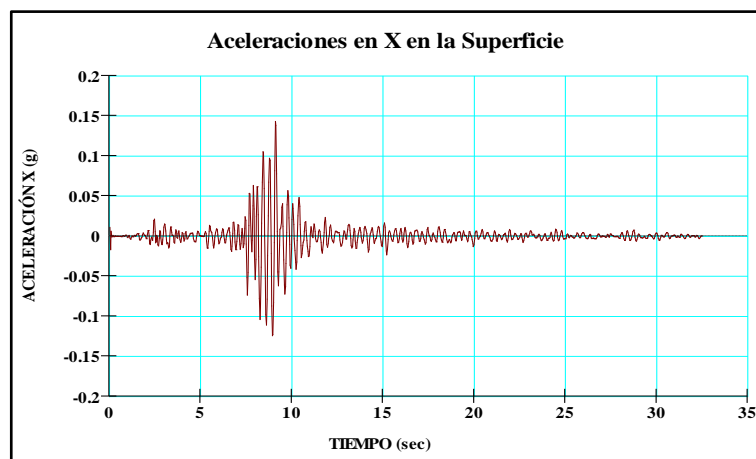
SISMO	ACELERACIONES PICO			
	BASE ROCOSA	SUPERFICIE	DELTA Δ	AMPLIFICACIÓN
ARMENIA	0.05	0.14	0.09	286%
CALIFORNIA	0.13	0.41	0.28	315%
CHINA	0.22	0.67	0.45	305%
JAPÓN	0.19	0.35	0.16	185%

Fuente: Autores.

Como se puede observar en la **tabla 3**, existe una amplificación de la aceleración en la superficie del terreno, demostrando que los suelos sueltos que se encuentran allí, tienden a amplificar el impacto del sismo.

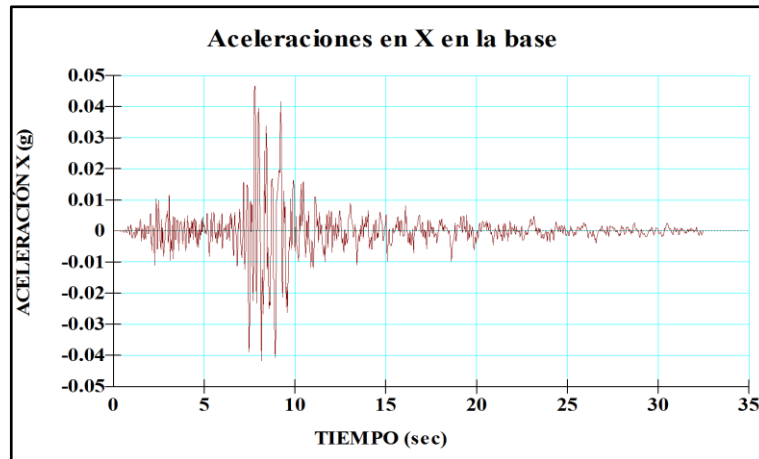
A continuación se muestran las gráficas de los resultados.

**Figura 17.** Aceleraciones en X Superficie.



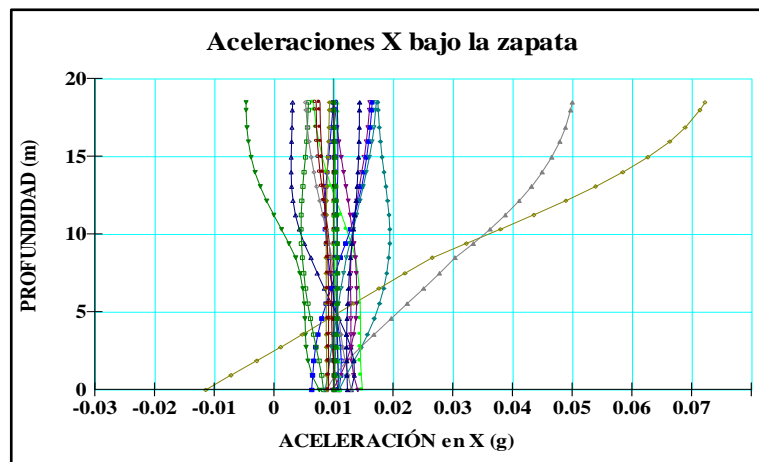
Fuente: Autores

**Figura 18.** Aceleraciones en X Base rocosa.



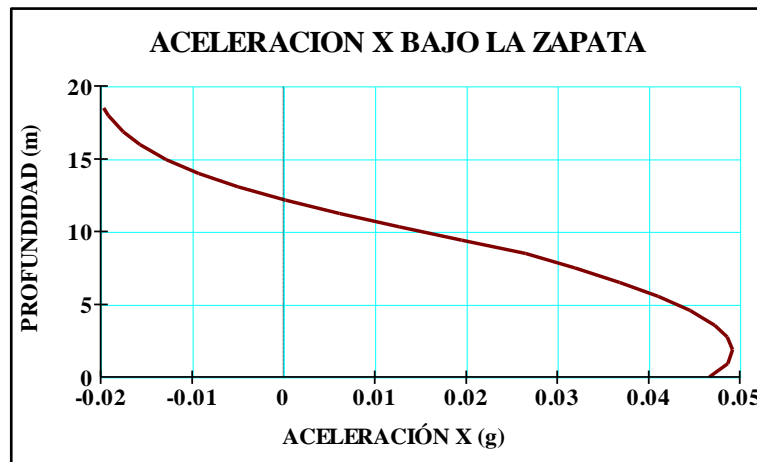
Fuente: Autores

**Figura 19.** Aceleraciones en X con la profundidad bajo la zapata a lo largo de todo el sismo.



Fuente: Autores

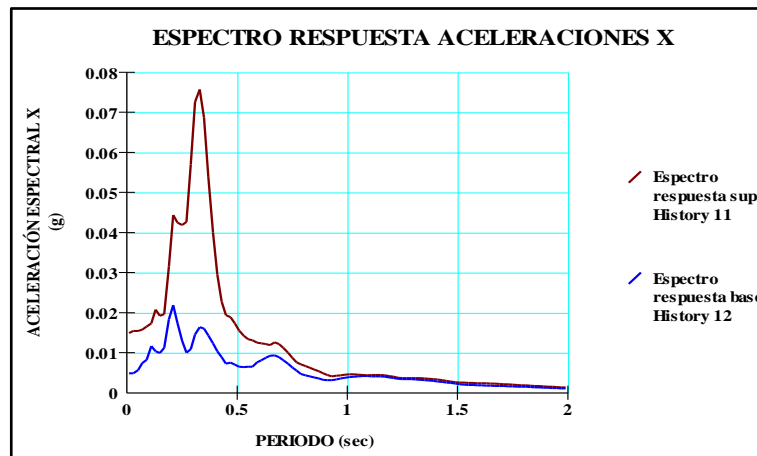
**Figura 20.** Aceleraciones en X con la profundidad bajo la zapata, aproximadamente en el momento pico del sismo (7.8 s).



Fuente: Autores

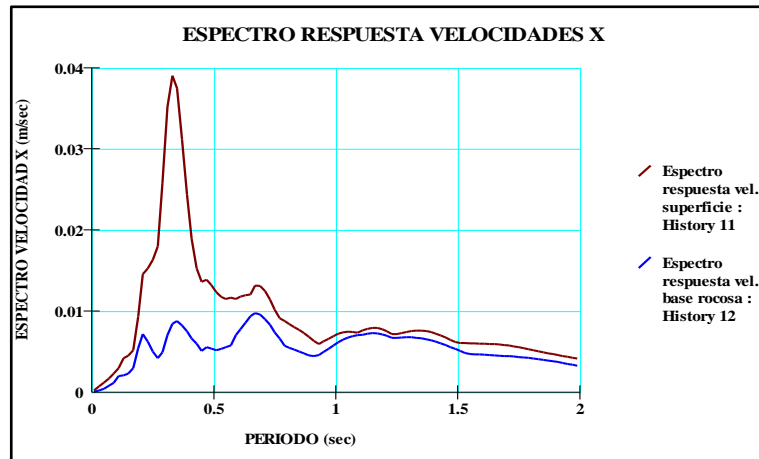
En la figura 20 se observa como a medida que las ondas sísmicas suben y cambian de un material duro a uno blando, se presenta una atenuación de la aceleración en X en el material duro, caso contrario sucede cuando entra a un material blando, donde sufre una amplificación de la aceleración.

**Figura 21.** Espectro de aceleraciones en x en la base rocosa y en la superficie.



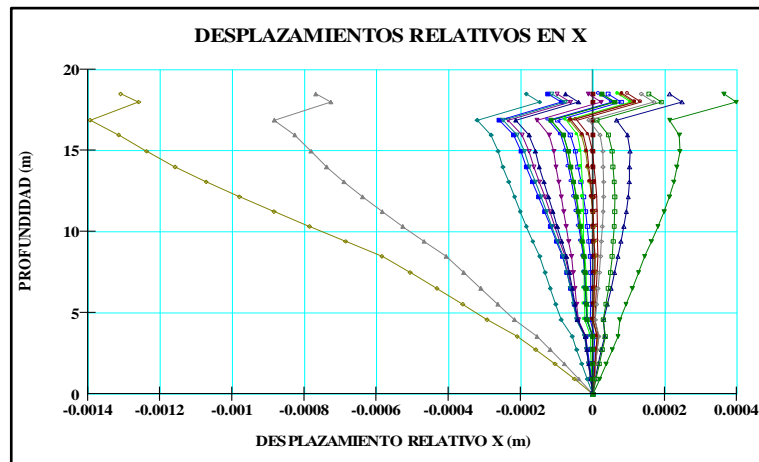
Fuente: Autores

**Figura 22.** Espectro de velocidades en x en la base rocosa y en la superficie.



Fuente: Autores

**Figura 23.** Desplazamientos horizontales relativos a lo largo de todo el sismo, respecto del eje central de la zapata.



Fuente: Autores

Los resultados obtenidos según el análisis lineal elástico permiten observar que las aceleraciones en la base rocosa corresponden a las definidas en el acelerograma, y las aceleraciones en la parte de arriba del perfil son superiores, debido a que la superficie está conformada por suelos más blandos. Asimismo se observan coherencias entre la gráfica del espectro de aceleraciones, donde su

mayor valor está en la superficie, con la gráfica de aceleraciones en X en la superficie y en la base rocosa. Los resultados observados en la figura 23 muestran que los desplazamientos horizontales aumentan desde la base rocosa hasta la superficie, resultados coherentes con la respuesta de aceleraciones y velocidades mostrada.

### 6.3 ANÁLISIS LINEAL EQUIVALENTE

Este análisis es similar al lineal elástico, con la diferencia que el  $G_{max}$  varia a lo largo del fenómeno sísmico y se genera una función de la reducción del módulo de corte llamada G reduction, función que ya se explicó en la sección 4.4. Para poder generar los puntos de la curva G reduction son necesarios ensayos dinámicos sobre muestras de los suelos estudiados; por este motivo los autores de este artículo asumen la función de ejemplo que QUAKE/W ofrece para poder completar el modelo y así generar los resultados.

Los datos de entrada de cada material son los mismos que se utilizaron en el análisis lineal elástico, pero se ingresó además la función G-reduction.

Al igual que en el análisis lineal elástico se crearon dos puntos de control (History Points), uno justo debajo de la zapata y otra en la base rocosa, para generar graficas de los diferentes resultados que da el programa.

Los análisis elaborados se hicieron con el sismo de Armenia a escala real, 0.050003g, y generaron varios resultados, algunos de ellos son:

Aceleraciones en la base, aceleraciones en la superficie, espectros de respuesta de aceleraciones, espectros de respuesta de velocidades.

Los resultados de licuefacción se muestran para los mismos sismos utilizados en el análisis lineal elástico.

**Tabla 4.** Resultados del Análisis Lineal Equivalente.

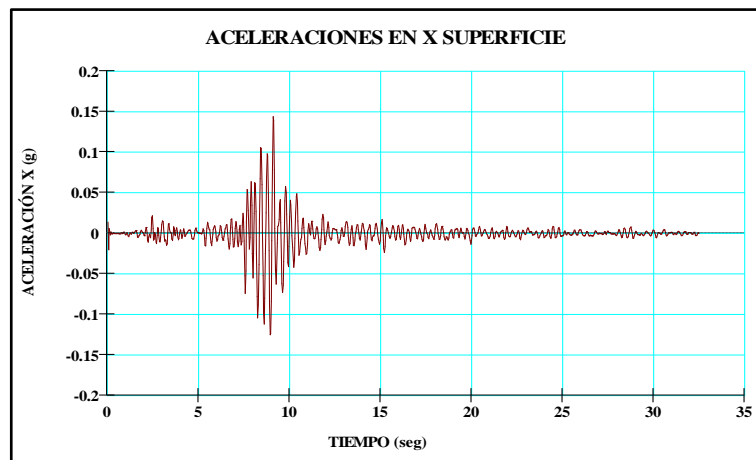
SISMO	ACELERACIONES PICO			
	BASE ROCOSA	SUPERFICIE	DELTA $\Delta$	AMPLIFICACIÓN
ARMENIA	0.05	0.15	0.1	300%
CALIFORNIA	0.13	0.37	0.24	284%
CHINA	0.22	0.67	0.45	305%
JAPÓN	0.19	0.36	0.17	189%

Fuente: Autores

Como se puede observar en la **tabla 4**, la tendencia se mantiene según los resultados de la **tabla 3**, demostrando de igual forma que los suelos blandos ubicados allí, tienden a amplificar el espectro del sismo.

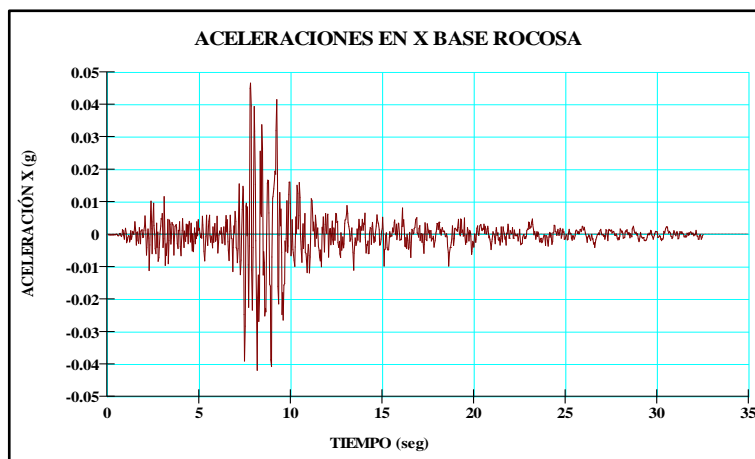
A continuación se muestran las gráficas de los resultados.

**Figura 24.** Aceleraciones en X Superficie.



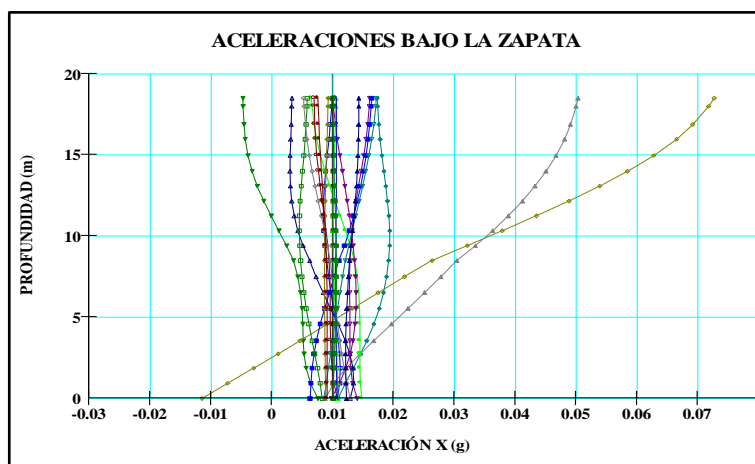
Fuente: Autores

**Figura 25.** Aceleraciones en X Base rocosa.



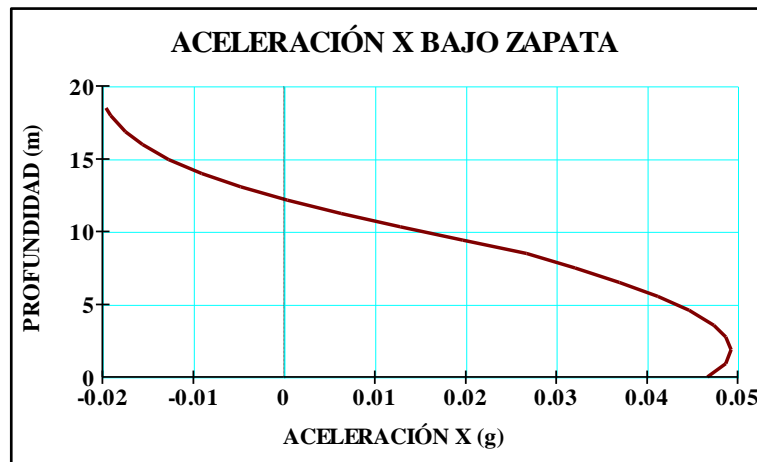
Fuente: Autores

**Figura 26.** Aceleraciones en X con la profundidad bajo la zapata a lo largo de todo el sismo.



Fuente: Autores

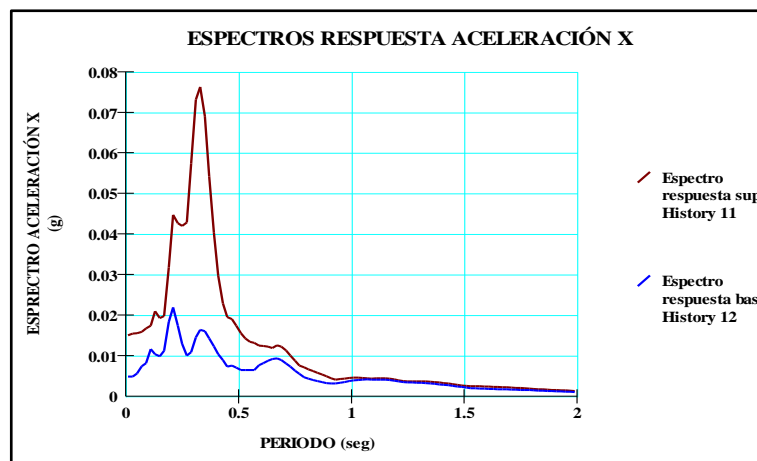
**Figura 27.** Aceleraciones en X con la profundidad, bajo la zapata aproximadamente en el momento pico del sismo (7.8 s).



Fuente: Autores

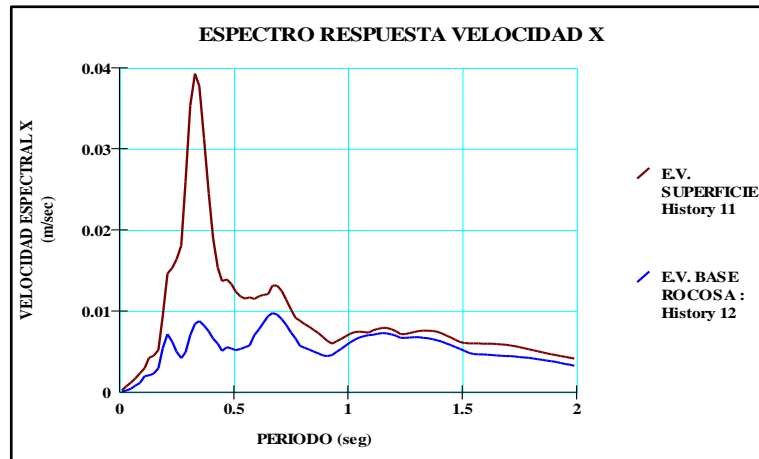
En la figura 27 se observa la misma tendencia de los resultados del análisis lineal elástico, corroborando que a medida que las ondas sísmicas suben y cambian de un material duro a uno blando, se presenta una atenuación de la aceleración en X en un material duro, caso contrario sucede cuando entra a un material blando, donde sufre una amplificación de la aceleración.

**Figura 28.** Espectro de aceleraciones en X en la base rocosa y en la superficie.



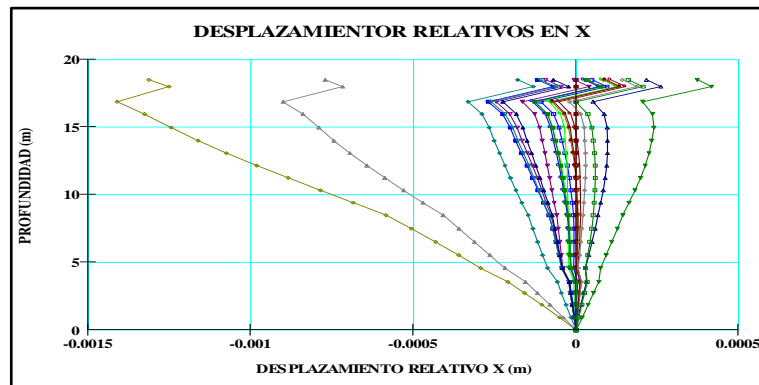
Fuente: Autores

**Figura 29.** Espectro de velocidades en X en la base rocosa y en la superficie.



Fuente: Autores

**Figura 30.** Desplazamientos horizontales relativos a lo largo de todo el sismo, respecto del eje central de la zapata.



Fuente: Autores

Los resultados generados según el análisis lineal equivalente permiten afirmar que la tendencia de los datos de salida del análisis lineal elástico se mantienen, pero con la diferencia que las aceleraciones, velocidades y desplazamientos en x crecen a medida que disminuye el módulo de corte. Las aceleraciones en la base rocosa corresponden a las observadas en el acelerograma, y las aceleraciones en la parte superior del perfil son mayores, el motivo de esto es la presencia de suelos blandos en la superficie. Asimismo se observa una aceleración máxima

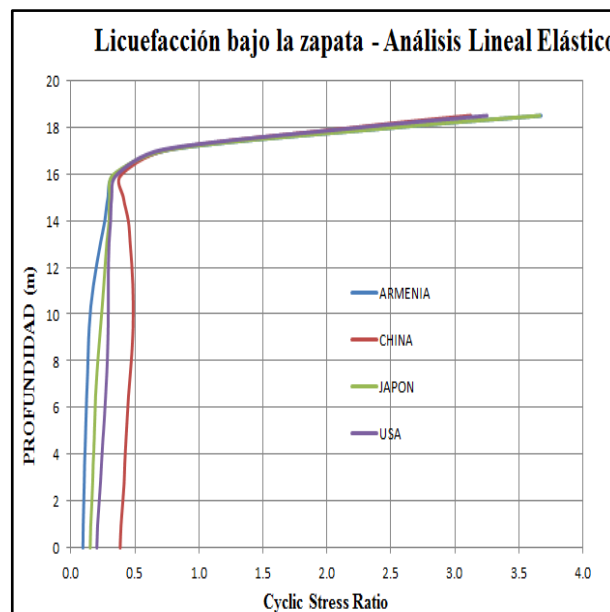
mayor para la superficie en la gráfica de espectro de aceleraciones, teniendo coherencia con los datos en las gráficas de aceleraciones en X. De igual manera sucede con el espectro de velocidades en X. Los resultados observados en la figura 30 muestra que los desplazamientos horizontales relativos aumentan desde la base rocosa hasta la superficie, resultados coherentes con la respuesta esperada.

Según los datos de salida generados por el programa QUAKE/W, se observa que los resultados de los análisis tienen coherencia con las respuestas esperadas, por lo tanto se puede afirmar que el programa genera resultados lógicos según la mecánica y dinámica de suelos.

A continuación se muestran las gráficas de licuefacción del suelo debajo de la zapata para los cuatro (4) sismos:

- ✓ Análisis Lineal Elástico

**Figura 31.** Licuefacción del suelo bajo la zapata.

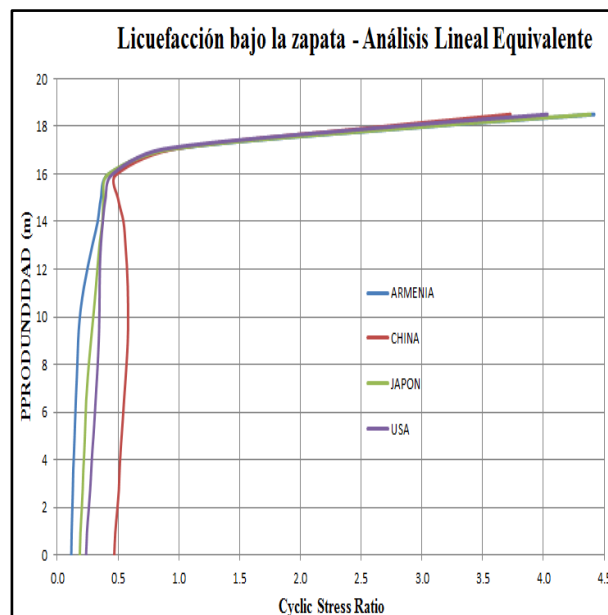


Fuente: Autores

En la figura 31 se observa que hay una tendencia de ocurrencia de licuefacción en el mismo lugar para los cuatro (4) sismos, aproximadamente 1.5 m por debajo de la superficie, el sismo de Japón tiene un valor máximo de CSR mayor que los otros sismos. Según la figura, para los sismos de Armenia, California y Japón, el comportamiento es similar en la zona no licuada, pero para el sismo de China, en esta zona los valores de CSR aumentan. Estos resultados son coherentes, ya que la zona de licuefacción está en la superficie, alrededor de la zapata, recordando que el nivel freático se ubicó justo debajo de la cimentación.

✓ Análisis Lineal Equivalente

**Figura 32.** Licuefacción del suelo bajo la zapata



Fuente: Autores.

En la figura 32 se puede observar que el valor de CSR aumenta para los cuatro (4) sismos comparado con el caso lineal elástico, pero la forma de la curva sigue la misma tendencia. Este aumento del valor de CSR se debe a que en el análisis lineal equivalente se tiene en cuenta la función de reducción del módulo de corte

máximo, G reduction, lo que hace que disminuya su valor a medida que sucede el fenómeno.

Se puede decir que el programa QUAKE/W generó resultados coherentes y esperados respecto al tema de licuefacción en los suelos, ya que se presentó en la capa de suelo más suelto ( $N_{SPT}=10$ ) y más confinada por la carga de la zapata.

## 7 CONCLUSIONES

- ✓ El programa QUAKE/W es una herramienta muy útil para modelar y estudiar el comportamiento de suelos ante fenómenos sísmicos, ya que los resultados generados por este son coherentes con las respuestas esperadas con base en la mecánica y dinámica de suelos.
- ✓ Para modelar en QUAKE/W es importante simplificar la geometría del perfil a estudiar, para un fácil manejo del programa y posterior análisis de los resultados.
- ✓ Es de vital importancia contar con datos lo más exactos posibles de las propiedades de los materiales, producto de ensayos previamente realizados. De igual manera con datos de los sismos a utilizar. Así QUAKE/W generará resultados más coherentes y verídicos.
- ✓ Los suelos sueltos que se encuentran cerca de la superficie tienden a amplificar los efectos del sismo. Este fenómeno podría ocasionarse cuando entran en resonancia las frecuencias del suelo y del movimiento sísmico. Por este motivo es de suma importancia identificar las frecuencias que predominan en el suelo de la zona a analizar y la cuantificación de la amplificación de los efectos del sismo, en sí, estudiar el efecto local o de sitio.
- ✓ El análisis Lineal Equivalente genera resultados más cercanos a la realidad que el análisis Lineal Elástico, ya que tiene en cuenta la variación del módulo de corte máximo,  $G_{max}$ . a medida que sucede el fenómeno sísmico.
- ✓ Los factores determinantes para que se presente licuefacción en los suelos, son que estos deben estar sueltos y saturados, y ser sometidos a

condiciones sísmicas. Al igual que estar bajo la acción de cargas estáticas, como por ejemplo las cargas que les transmite las cimentaciones de estructuras. Bajo estas condiciones, es muy probable que se presente licuefacción en el terreno, por este motivo es vital conocer el comportamiento de los suelos sueltos y saturados bajo cargas estáticas y que estén sometidos a sismos.

- ✓ Para que el manejo del programa QUAKE/W y comprensión de sus posteriores resultados sea sencillo, se deben tener conocimientos de sismología, suelos y su respuesta sísmica, además de contar con la mayor cantidad de datos y que estos sean lo más exactos posibles.

El presente artículo se enfocó en el manejo del programa QUAKE/W para suelos de cimentación sometidos a sismos, cabe recalcar que para el ejemplo realizado no se contaron con ensayos dinámicos y mucho menos con los datos reales del suelo analizado. Por este motivo se recomienda profundizar en el tema modelando casos en los cuales se les hayan aplicado los respectivos ensayos y así poder generar resultados que permitan calibrar una mejor manera la utilidad del programa.

## BIBLIOGRAFÍA

- BRAJA M. Das. Fundamentos de Ingeniería Geotécnica.
- JUAREZ BADILLO, Eulalio y RICO RODRIGUEZ, Alfonso. Mecánica de Suelos.
- KRAHN, John. Dynamic Modeling with QUAKE/W An Engineering Methodology. 4ta. ed. Canadá: GEO-SLOPE International Ltd., 2.009. p. 237.
- KRAMER, Steven. Geotechnical Earthquake Engineering. United States of America: University of Washington: Prentice Hall, 1996. p. 653.
- MUELA RODRIGUEZ, Ángel. Manual de mecánica de suelos y cimentaciones.
- TAYLOR, Donald. Principios Fundamentos de Mecánica de Suelos.

## RECURSOS ELECTRÓNICOS

- <http://www.listin.com.do/la-vida/2010/1/20/128738/El-suelo-despues-de-la-ocurrencia-de-un-sismo>
- <http://www.um.edu.ar/um/fau/estructura5-anterior/CIMENTACIONES.htm>

# ANEXOS

## ANEXO A. MARCO TEÓRICO

### SISMOLOGÍA

Para estudiar los terremotos es necesaria una ciencia especial, la Sismología, que es una rama de la Geofísica que se encarga de estudiar las causas que producen estos fenómenos, su descripción física (propagación, duración, velocidad, efectos, etc.), la relación que existe entre estos y la naturaleza de la zona donde se produce<sup>17</sup>.

En términos de Ingeniería, es importante definir y determinar las acciones que el fenómeno sísmico le genera a la estructura. Gracias a la Sismología, la Geofísica ha logrado aportes en la comprensión del comportamiento de las placas tectónicas, la estructura interna de La Tierra y en la predicción de terremotos.

#### Ondas Sísmicas

Cuando se presenta un terremoto éste transmite ondas que viajan por el interior de La Tierra, las cuales siguen caminos curvos debido a la variada densidad y composición de las capas internas terrestres. Este efecto se asemeja al de la refracción de ondas de luz. Este tipo de ondas es conocido como ondas internas, centrales o de cuerpos. Transmiten los temblores preliminares de un terremoto pero poseen poco poder destructivo. Las ondas de cuerpo son divididas en dos grupos: ondas primarias (P) y ondas secundarias (S).

Además de las ondas internas, existen y se propagan ondas por la superficie, las cuales se tardan más en llegar. Estas ondas provocan resonancia en edificios con

---

<sup>17</sup> Los terremotos: Historia, origen de los sismos, efectos y causas de terremotos. Consultado el 21 de febrero de 2013. Disponible en: <http://www.riie.com.ar/?a=28938.htm>

mayor facilidad que las ondas de cuerpo debido a su baja frecuencia y así causan efectos más devastadores. Existen dos tipos de ondas superficiales: ondas de Rayleigh y ondas Love<sup>18</sup>.

### **Ondas Primarias (P)**

Las ondas P son ondas longitudinales, esto significa que el suelo es alternadamente comprimido y dilatado en la dirección de la propagación. Su velocidad generalmente es de 1.73 veces la de las ondas S y pueden viajar a través de cualquier material<sup>19</sup>.

Velocidades en diferentes medios:

- ✓ Aire: 330 m/s.
- ✓ Agua: 1450 m/s.
- ✓ Granito: 5000 m/s.

### **Ondas Secundarias (s)**

Las ondas S son ondas transversales o de corte, causando que el suelo se desplace perpendicularmente a la dirección de la propagación, alternadamente hacia un lado y hacia el otro. Este tipo de ondas solamente pueden viajar a través de sólidos debido a que los líquidos no pueden soportar esfuerzos de corte. Su velocidad es inferior a la de las ondas P para cualquier material sólido, alrededor del 58% de éstas.

Generalmente la onda S tiene mayor amplitud que la onda P y se siente con mayor fuerza que ésta.

---

<sup>18</sup> Ondas sísmicas, Ondas Sísmicas. Consultado el 21 de febrero de 2013. Disponible en:  
[http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing\\_ond\\_1/trabajos\\_06\\_07/io3/public\\_html/Ondas/Ondas.htm](http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_06_07/io3/public_html/Ondas/Ondas.htm)

<sup>19</sup> Ondas sísmicas, Ondas Sísmicas. Consultado el 21 de febrero de 2013. Disponible en:  
[http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing\\_ond\\_1/trabajos\\_06\\_07/io3/public\\_html/Ondas/Ondas.htm](http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_06_07/io3/public_html/Ondas/Ondas.htm)

## Movimientos Sísmicos

Son fenómenos vibrátiles causados por la intensa liberación de energía que se genera al ocurrir fracturas en bloques rocosos y se propagan en forma de ondas en la corteza terrestre. Estos fenómenos son conocidos como temblores o terremotos, donde los primeros son de poca intensidad, y se caracterizan por no causar daños en grandes proporciones; por el contrario los segundos son ondas sísmicas con gran energía y generan daños parciales o totales en la zona afectada.

Si el sismo ocurre en la corteza oceánica, pueden generarse enormes olas que avanzan a grandes velocidades. A este fenómeno se le conoce como maremoto, siendo el fenómeno natural más destructivo que existe<sup>20</sup>.

### Tipos de terremotos

- ✓ Terremotos tectónicos
- ✓ Terremoto volcánico
- ✓ Terremoto perimétrico
- ✓ Terremoto de colapso

## INTENSIDAD SÍSMICA

Uno de los mayores problemas para la medición de un terremoto es la dificultad inicial para coordinar los registros obtenidos por sismógrafos ubicados en diferentes puntos, de modo que no es inusual que las informaciones preliminares sean discordantes ya que fueron basadas en informes que registraron diferentes amplitudes de onda. Determinar el área total abarcada por el sismo puede tardar varias horas o días de análisis del movimiento mayor y de sus réplicas. La

---

<sup>20</sup> Movimientos sísmicos, Movimientos sísmicos. Consultado el 21 de febrero de 2013. Disponible en: [http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing\\_ond\\_1/trabajos\\_06\\_07/io3/public\\_html/Ondas/Ondas.htm](http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_06_07/io3/public_html/Ondas/Ondas.htm)

prontitud del diagnóstico es de importancia para activar los mecanismos de emergencia.

A cada terremoto se le asigna un valor de magnitud único, pero la evaluación se realiza, cuando no hay un número suficiente de estaciones, principalmente basada en registros que no fueron realizados forzosamente en el epicentro sino en puntos cercanos. De allí que se asigne distinto valor a cada localidad o ciudad e interpolando las cifras se consigue ubicar el epicentro.

Resulta más útil entonces catalogar cada terremoto según su energía intrínseca. Esta clasificación debe ser un número único para cada evento, y este número no debe verse afectado por las consecuencias causadas, que varían mucho de un lugar a otro<sup>21</sup>.

## Escalas Sismológicas

### ✓ Richter

**Tabla 5.** Escala sismológica de Richter

Magnitud en Escala Richter	Considerado	Efectos
Menor a 2.9	Micro terremoto	Generalmente no se siente pero es registrado.
3.0 – 3.9	Menor	A menudo se siente pero sólo causa daños menores.
4.0 – 4.9	Leve	Ocasiona daños ligeros a edificios.
5.0 – 5.9	Moderado	Pueden ocasionar daños severos en áreas pobladas.
6.0 – 6.9	Fuerte	Causa graves daños.
7.0 – 7.9	Mayor	Causa graves daños.
Mayor a 8.0	Potente	Destrucción total a comunidades cercanas.

Fuente: Autores

<sup>21</sup> Intensidad Sísmica, ¿Qué es un terremoto? Consultado el 21 de febrero de 2013. Disponible en: <http://www.angelfire.com/ri/chterymercalli/>

Aunque la escala de Richter no tiene límite superior los mayores choques conocidos han tenido magnitudes en el rango de 8.8 a 8.9. Recientemente otra escala llamada Escala de Magnitud de momento se ha creado para un estudio más preciso de grandes terremotos<sup>22</sup>.

✓ **Mercalli**

**Tabla 6.** Escala sismológica de Mercalli

<b>Escala de Mercalli</b>	<b>Considerado</b>	<b>Efectos</b>
<b>I</b>	Instrumental	No se siente, excepto en condiciones excepcionales
<b>II</b>	Menor – Débil	Sólo lo sienten las personas que están quietas. Sobre todo las que se encuentren en las plantas más altas.
<b>III</b>	Leve	Sentido por personas que se encontraban en el interior de edificios, sobre todo en plantas altas. Vibraciones.
<b>IV</b>	Moderado	Se siente en el interior de las viviendas y, por algunas personas, en la calle. Temblor de ventanas, vajilla, etc.
<b>V</b>	Casi fuerte	Casi lo sienten todas las personas. Algunos platos y ventanas se rompen. Incluso puede hacer caer objetos y detener relojes.
<b>VI</b>	Fuerte	Lo sienten todas las personas y salen al exterior, asustadas. Se rompen ventanas, vajillas, vasos. Incluso puede mover el mobiliario.
<b>VII</b>	Muy fuerte	Es difícil mantenerse en pie. Los muebles se rompen, los edificios menos fuertes sufren daños.
<b>VIII</b>	Destructor	Estructuras especiales sufren daños leves y muchas otras se derrumban. Colapso de paredes, tejados, estructuras. Desplazamiento de mobiliario
<b>IX</b>	Ruinoso	Pánico en general. Daños considerables en estructuras. Tuberías al descubierto. Muchos edificios sufren daños importantes y colapsos parciales
<b>X</b>	Desastroso	Se destruyen estructuras con base. Los raíles se mueven
<b>XI</b>	Muy desastroso	Pocas estructuras se quedan en pie. Destrucción de puentes y gran movimiento de raíles
<b>XII</b>	Catastrófico	Destrucción total. Los objetos salen disparados hacia el aire. El suelo se mueve haciendo "olas". Desprendimientos.

Fuente: Autores

<sup>22</sup> Escala de Richter, The Severity of and Earthquake. Consultado el 21 de febrero de 2013. Disponible en: <http://pubs.usgs.gov/gip/earthq4/severitygip.html>

## LOS SUELOS Y SU RESPUESTA SÍSMICA

El suelo es un factor muy importante al momento de estudiar las consecuencias de un sismo, conocer su respuesta frente a las cargas cíclicas es determinante a la hora de diseñar y construir estructuras. Las propiedades dinámicas del suelo son las que controlan en gran medida ésta respuesta. Los principales factores en el modelamiento de suelos ante eventos sísmicos son el módulo de corte,  $G$ , y el factor de amortiguamiento,  $\xi$ , estas propiedades se relacionan con otros parámetros del suelo, tales como la relación de vacíos, el peso unitario, etc.

### Propiedades dinámicas de los suelos

La dinámica de suelos es un área que estudia el comportamiento del suelo y sus propiedades bajo esfuerzos dinámicos generadas por diversas acciones como lo son: sismos, explosiones, vibración de maquinaria, procesos constructivos, explotación de bancos, tráfico vehicular, viento, etc.

La dinámica de suelos abarca los estudios tanto teóricos como prácticos del efecto de las fuerzas dinámicas sobre masas de suelo pero son complementados con demás áreas del conocimiento de la ingeniería civil como lo son la Dinámica del medio continuo, Dinámica Estructural y la Ingeniería Sísmica.

La rigidez del suelo y el amortiguamiento son las propiedades más importantes para el estudio de la respuesta en sitio, al momento de determinar la amplificación del movimiento en el suelo. Existen otras propiedades dinámicas como lo son el índice de Poisson, y la densidad que intervienen al momento de análisis pero estas no presentan mayor relevancia.

## Propiedades y módulos dinámicos

El movimiento brusco producido por un terremoto es una carga cíclica de manera rápida que en el suelo provoca comportamiento tenso deformacional no lineal como se puede observar en la figura 1 curva de histéresis deformación de corte y tensión de corte  $\tau$ .

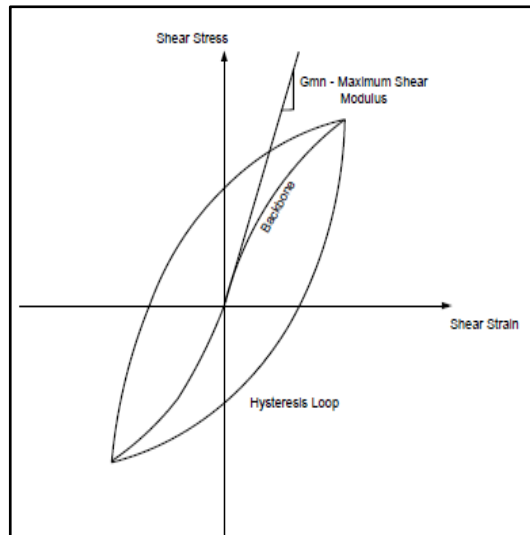
El módulo de corte  $G$  y la razón de amortiguamiento  $\xi$  son las propiedades dinámicas más importantes, siendo  $G$  una medida de dureza del material y la razón entre la tensión y la deformación de corte en un punto de la curva de la figura 1, es obtenida una vez se calcule la pendiente de la curva tensión-deformación y en función de dónde se evalúa está pendiente se distingue entre el módulo de corte tangente ( $G_{tan}$ ), secante ( $G_{sec}$ ) o máximo ( $G_{max}$ ).

( $G_{max}$ ). El módulo de corte máximo calculado como el valor de la pendiente de la recta tangente en el punto inicial de la curva.

( $G_{tan}$ ). El módulo de corte tangente que es el valor de la pendiente en un punto de la curva.

( $G_{sec}$ ). El módulo de corte secante que se calcula como la pendiente de la recta secante a la curva. El módulo de corte  $G$  está relacionado con el coeficiente de Poisson  $\nu$  y el módulo de Young  $E$ .

**Figura 33.** Curva de histéresis deformación de corte  $\gamma$ -tensión de corte  $\tau$ .



Fuente: KRAHN, John. Dynamic Modeling with QUAKE/W An Engineering Methodology. 4ta. ed. Canadá: GEO-SLOPE International Ltd., 2.009. p. 84.

Con el nombre de cizalladura se conoce la deformación producida en un cuerpo al aplicarle fuerzas tangenciales, de modo que su volumen permanece constante. La deformación del sólido se mide por su ángulo de cizalla  $G$ . De acuerdo con la ley de Hook:

$$\gamma = \frac{1}{G} \left( \frac{F}{S} \right) \quad \text{Ecuación 14.}$$

Donde ahora  $F$  es una fuerza tangencial y  $G$  recibe el nombre de módulo de rigidez del material. Este módulo está relacionado con el módulo de Young  $E$  y el coeficiente de Poisson  $\nu$  por la expresión<sup>23</sup>:

$$G = E/2(1 + \nu) \quad \text{Ecuación 15.}$$

La razón de amortiguamiento se define como la capacidad de un sistema o material para disipar energía y se calcula mediante la siguiente expresión:

<sup>23</sup> Cizalladura o Módulo de corte, Cizalladura y Módulo de Rigidez. Consultado el 4 de marzo de 2013. Disponible en: [http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/13739/1/06\\_ELASTICIDAD\\_BIB.pdf](http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/13739/1/06_ELASTICIDAD_BIB.pdf)

$$\xi = \frac{W_D}{4\pi W_S} = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{A_{\text{lazo}}}{G_{\text{sec}} \gamma_c^2} \right) \quad \text{Ecuación 16}$$

dónde:

$W_D$ : Energía disipada

$W_S$ : Energía de deformación máxima

$A_{\text{lazo}}$ : Área del lazo del ciclo de histéresis.

$\gamma$ : deformación.

### Respuesta sísmica de los suelos

La generación y procedencia de los daños que pueden ocurrir en las estructuras al momento de un terremoto, en cierto grado se deben a la respuesta del suelo frente a cargas cíclicas, produciendo una variación de la señal sísmica. Ésta variación es un aspecto importante en el diseño de estructuras sismo-resistentes, y se le conoce como el **efecto local o de emplazamiento**, que consiste en la amplificación fuerte de la señal sísmica, mayor duración de ésta y modificación de su frecuencia, que es causada por la topografía y las condiciones geológicas del terreno.

Grandes desastres generados por terremotos como el de Northrig, 1.994, Kobe, 1.995, El Salvador, 2.001 entre otros, han incentivado el estudio de la respuesta sísmica del suelo, estudio en el que se debe tener en cuenta las características de la señal sísmica, pero debido a que el fenómeno es complejo, en ocasiones los análisis se realizan simplificando y asumiendo únicamente algunas de sus características.

Los resultados obtenidos por estos estudios demuestran que los suelos blandos, que se encuentran cerca de la superficie del terreno, amplifican los efectos de los terremotos generando un aumento importante de los daños en las infraestructuras

que se cimientan sobre ellos, dado que se limitan los periodos de vibración (periodos altos) de estos materiales y concuerdan con el periodo de vibración de la estructura, esto significa que el periodo de la onda sísmica incidente está en resonancia con el periodo natural de la estructura o del subsuelo <sup>24</sup>. Las propiedades geotécnicas de los materiales geológicos, principalmente las dinámicas, son las que controlan la respuesta y dimensión de la amplificación de la señal sísmica, al igual que el espesor de los estratos y la profundidad del sustrato rocoso.

Los efectos del suelo se pueden determinar por métodos teóricos y empíricos. Los teóricos admiten un estudio de los diferentes parámetros del problema, aunque necesitan una descripción detallada de las capas del suelo que hacen parte del estrato, asimismo de las fuentes que generan los sismos, fuentes que usualmente son muy complejas y por consiguiente, se hace más difícil elaborar el modelo matemático de forma real, entre los que se encuentran los modelos unidimensionales, bidimensionales y tridimensionales.

Los métodos empíricos se fundamentan en registros históricos de sismos en el lugar a estudiar, por lo tanto se pueden determinar amplificaciones relativas y periodos dominantes de vibración, entre estos se describen la relación espectral estándar (SSR), los microtemblores y la técnica de Nakamura.

### **Efectos Inducidos**

Son fenómenos que ocurren o se generan durante o después de un terremoto, eventos como caídas de rocas, fallas de taludes, licuación, entre otros, son efectos inducidos.

---

<sup>24</sup> Efectos inducidos por los terremotos, Peligros geológicos. Consultado el 02 de marzo de 2013. Disponible en: <http://www.oas.org/dsd/publications/Unit/oea65s/ch16.htm>

## **Licuación de Suelos**

Este fenómeno se define como el cambio de estado sólido a líquido de un material granular debido al incremento de la presión de agua de poros, y es la causa más relevante de los daños a estructuras durante un terremoto, dado que el suelo varia su consistencia firme a viscosa semi-liquida, parecido a una arena movediza.

Los suelos arenosos sometidos a vibración son los más propensos a presentar licuación, aunque también se ha observado en suelos cohesivos, pero para estos se necesita de mayor energía para que se presente el fenómeno, gracias a que las fuerzas cohesivas de las partículas las mantiene en cierta forma unidas entre sí. Este fenómeno se presenta cuando se modifica la estructura de una arena suelta saturada a causa de la aplicación de cargas violentas, tales como terremotos, actividades relacionadas con la construcción (voladuras), etc., generando un aumento en la presión de agua en los poros, por lo que la fuerza de contacto entre las partículas del suelo se reduce, y este comienza a ablandarse y a perder resistencia. El suelo licuado además ejerce grandes presiones sobre muros de contención y destruye estructuras en la superficie del terreno.

Youd (1.978) propone tres tipos de falla del terreno a causa de la licuación de suelos:

- ✓ Desplazamiento Lateral
- ✓ Falla de Flujo
- ✓ Pérdida de la Capacidad Portante

### **Factores que ocasionan el fenómeno de licuación**

- ✓ Magnitud del movimiento.
- ✓ Duración del movimiento sísmico.

- ✓ Granulometría del suelo.
- ✓ Densidad relativa.
- ✓ Profundidad del nivel freático.

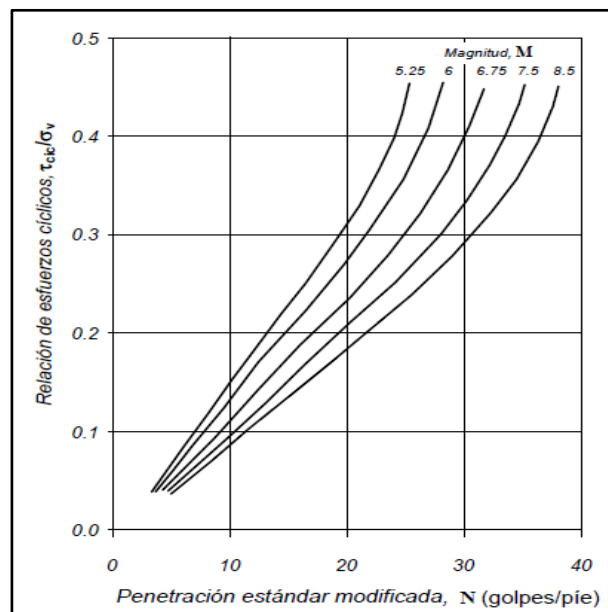
A continuación se muestran algunas consideraciones de la NORMA COLOMBIANA DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE NSR-98.

**Tabla 7.** Relación del número de ciclos con la magnitud del movimiento sísmico.

Magnitud	No. De Ciclos de Esfuerzo significativo (Neq)
5 1/4	2 - 3
6	5
6 3/4	10
7 1/2	15
8 1/2	26

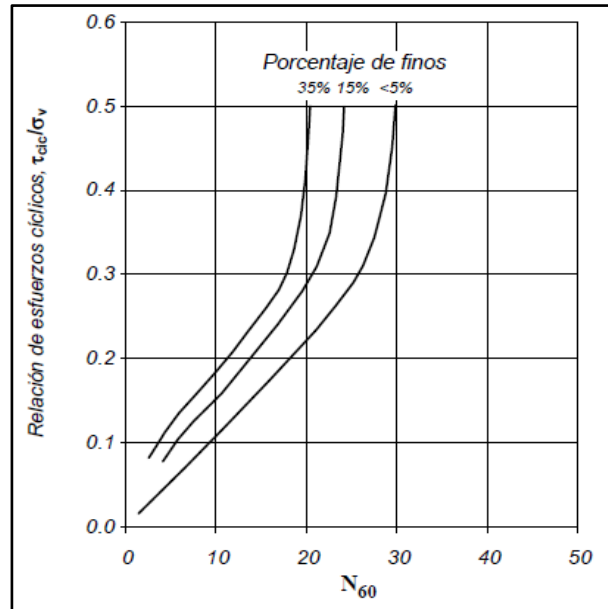
Fuente: REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE NSR-10. Título H. Requisitos Generales de Diseño y Construcción Sismo Resistente. Capítulo 5 p. A-33.

**Figura 34.** Variación de la relación de esfuerzos cíclicos (REC) con el ensayo de penetración estándar para diferentes valores de magnitud M



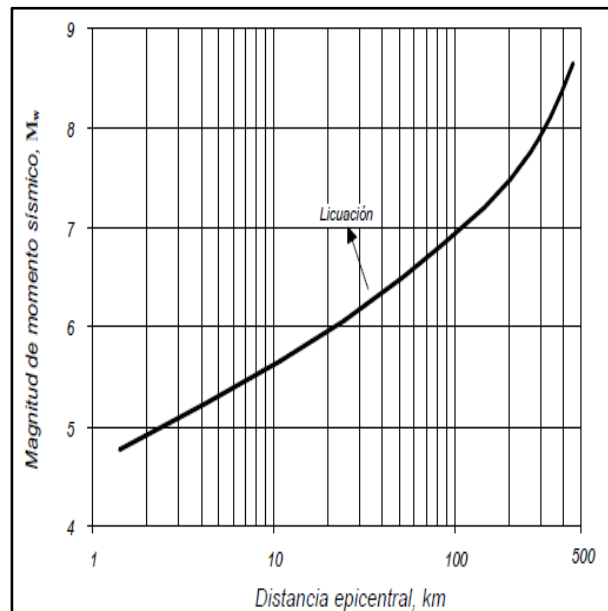
Fuente: REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE NSR-10. Título H. Requisitos Generales de Diseño y Construcción Sismo Resistente. Capítulo 5 p. A-34.

**Figura 35.** Variación de la relación de esfuerzos cíclicos (REC) con el ensayo de penetración estándar para contenido de finos diversos ( $M=7.5$ ).



Fuente: REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE NSR-10. Título H. Requisitos Generales de Diseño y Construcción Sismo Resistente. Capítulo 5 p. A-35.

**Figura 36.** Relación entre la magnitud del sismo y la distancia epicentral donde se ha presentado históricamente la licuación.



Fuente: REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE NSR-10. Título H. Requisitos Generales de Diseño y Construcción Sismo Resistente. Capítulo 5 p. A-35.

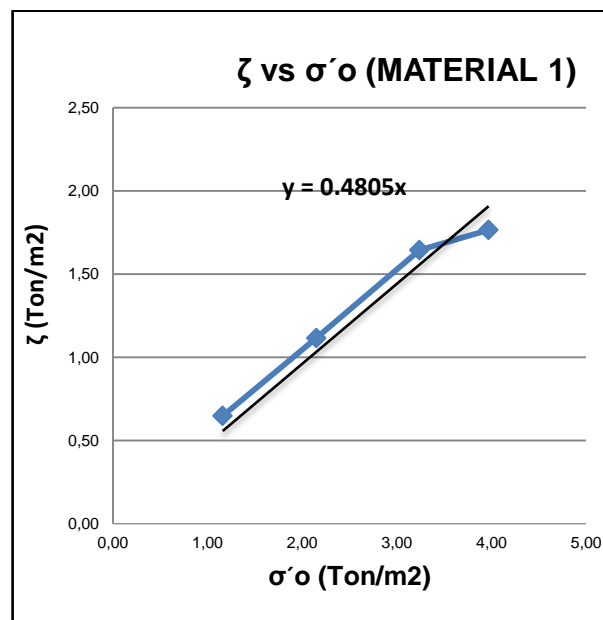
ANEXO B. TABLAS DE LAS PROPIEDADES DE LOS SUELOS.

Tabla 8. Método de Álvaro Gonzales.

Prof. (m) De	Prof. (m) A	Prof. (m)	Clasif.	Nf	$\gamma$ (Ton/m <sup>2</sup> )	$\sigma'_o$ (Ton/m <sup>2</sup> )	Rs	k	Cn calc	N45	$\Phi_{eq}$	$\Phi_{eq}$ Rad	$\zeta$	$c'$ (T/m <sup>2</sup> )	$\Phi'$
0.50	1.50	1.00	CL	12	1.73	1.16	0.116	1.41	1.79	16	29.20	0.51	0.65	0.00	25.66
2.00	2.50	2.25	CL	10	1.73	2.15	0.215	1.41	1.65	12	27.42	0.48	1.12		
3.50	4.00	3.75	CL	10	1.73	3.24	0.324	1.41	1.51	11	26.90	0.47	1.64		
4.50	5.00	4.75	SC	6	1.73	3.97	0.397	1.41	1.43	6	23.97	0.42	1.77	0.00	28.64
6.50	7.00	6.75	SM	17	1.91	6.65	0.665	1.41	1.20	15	28.84	0.50	3.66		
8.50	9.00	8.75	SM	18	1.91	8.47	0.847	1.41	1.08	15	28.52	0.50	4.60		
13.00	13.50	13.25	SM	31	2.07	14.68	1.468	0.92	0.81	19	30.35	0.53	8.59	0.00	29.98
13.50	14.00	13.75	SM	33	2.07	15.22	1.522	0.92	0.79	20	30.66	0.54	9.02		
14.50	15.00	14.75	SM	32	2.07	16.29	1.629	0.92	0.76	18	30.11	0.53	9.45		
16.50	17.00	16.75	SM	31	2.07	18.43	1.843	0.92	0.70	16	29.30	0.51	10.34		
18.50	19.00	18.75	SM	36	2.07	20.57	2.057	0.92	0.65	18	29.86	0.52	11.81		
Prof. (m)		Prof. (m)	Clasif.	Nf	$\gamma$ Ton/m <sup>2</sup>	$\sigma'_o$ (Ton/m <sup>2</sup> )	Rs	k	Cn calc	N45	$\Phi_{eq}$	$\Phi_{eq}$ Rad	$\zeta$	$c'$ (T/m <sup>2</sup> )	$\Phi'$

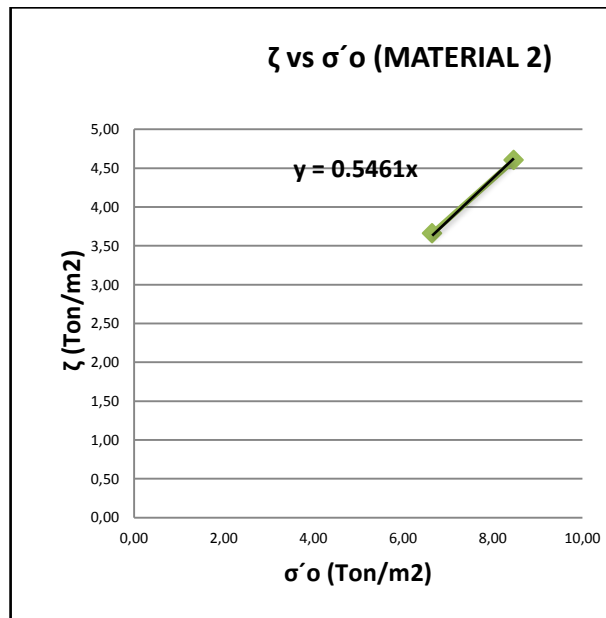
Fuente: Autores

Figura 37. Curva  $\sigma'_o$  vs.  $\zeta$  material 1



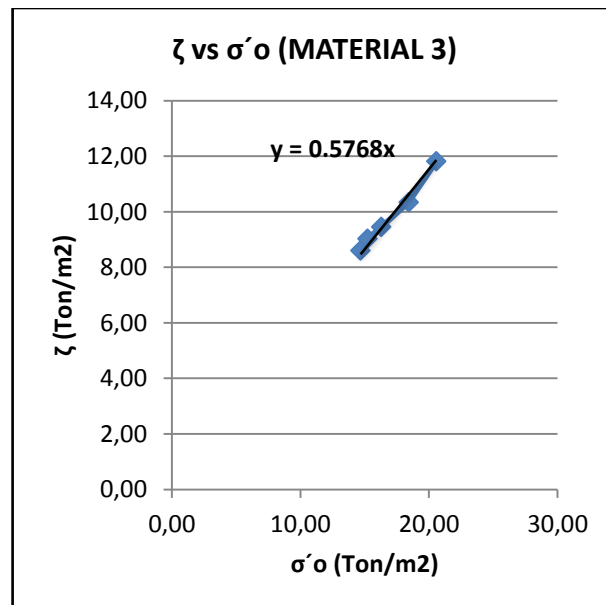
Fuente: Autores

Figura 38. Curva  $\sigma'_o$  vs.  $\zeta$  material 2.



Fuente: Autores.

Figura 39. Curva  $\sigma'_o$  vs.  $\zeta$  material 3.



Fuente: Autores.

**Tabla 9.** Resumen de los resultados del Método de Álvaro Gonzales.

<b>MATERIAL</b>	<b>m</b>	<b><math>\Phi</math></b>	<b>C Ton/m<sup>2</sup></b>
1	0.481	25.66	0.0
2	0.546	28.64	0.0
3	0.577	29.98	0.0

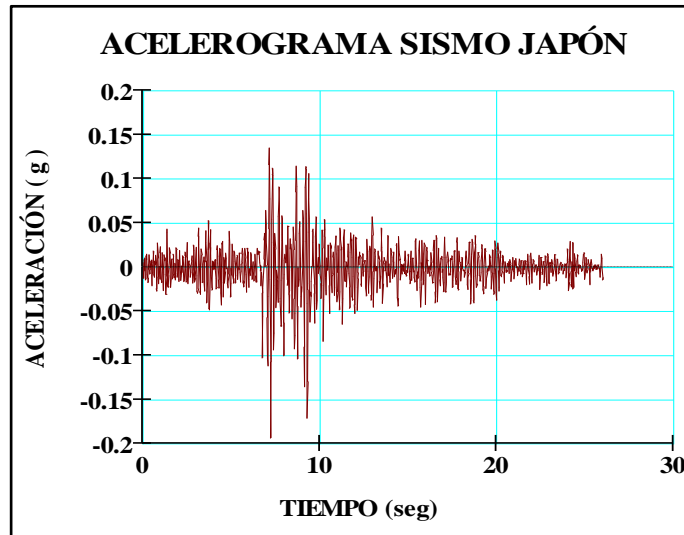
Fuente: Autores.

ANEXO C. ENSAYO DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR (SPT)

PROF. m	CLASIFICACION USCS	INDICE DE GRUPO	SIMBOLO	DESCRIPCION DEL MATERIAL	LIMITE ATTENBERG			GRADACION			γ g/cc	Resistencia kg/cm <sup>2</sup>		SPT				
					W <sub>L</sub> %	L.P. %	I.P. %	GRAVAS %	ARENAS %	FINOS %		IS kg/cm <sup>2</sup>	%	6"	12"	18"	N	
0.50																		
1.50	SM	A-4	0	ARENA LIMOSA DE GRANO FINO DE HUMEDAD ALTA, MEDIANAMENTE DENSO COLOR HABANO AMARILLENTO	18.5	N.L.	N.P.	0.0%	52.9%	47.1%	2.047			7	6	6	12	
2.00	ML	A-4	0	LIMO ALGO ARENOSO DE BAJA PLASTICIDAD DE HUMEDAD MEDIA-ALTA, CONSISTENCIA MEDIO FIRME COLOR HABANO	19.4	N.L.	N.P.	0.0%	18.8%	83.2%	2.047							
2.50																		
4.00	SM	A-2-4	0	ARENA LIMOSA DE GRANO FINO DE HUMEDAD ALTA, MEDIANAMENTE DENSO COLOR HABANO GRISACEO	19.4	N.L.	N.P.	0.0%	72.3%	28%								
5.00	ML	A-4	3	LIMO ARENOSO DE BAJA PLASTICIDAD DE HUMEDAD MEDIA-ALTA, CONSISTENCIA BLANDA COLOR GRIS CLARO CON VETAS DE OXIDACION	23.2	28.9	22.7	6.2	0.0%	30.5%	1.837							
7.00	ML	A-4	0	LIMO ARENOSO DE BAJA PLASTICIDAD DE HUMEDAD MODERADA, CONSISTENCIA FIRME COLOR GRIS CON VETAS HABANAS	17.4	N.L.	N.P.	0.0%	45.4%	55%								
9.00	SM	A-2-4	0	ARENA LIMOSA DE GRANO FINO DE HUMEDAD ALTA, MEDIANAMENTE DENSO COLOR GRIS CLARO	16.3	N.L.	N.P.	0.0%	72.1%	28%	1.889							
11.00	SM	A-2-4	0	ARENA LIMOSA DE GRANO MEDIO-GRUESO CON ALGUNAS GRAVAS DE TAMAÑOS MENORES DE HUMEDAD ALTA DENSO, COLOR GRIS CLARO	13.3	N.L.	N.P.	2.7%	81.37%	15.9%								
13.00																		
15.00	SP-SM	A-3	1	ARENA LIMOSA POBREMENTE GRADADA DE GRANO FINO DE HUMEDAD ALTA, DENSO COLOR GRIS CLARO	15.4	N.L.	N.P.	2.8%	88.45%	8.6%	2.010							
17.00	SM	A-4	0	ARENA LIMOSA DE GRANO GRUESO CON ALGUNAS GRAVAS DE HUMEDAD ALTA, DENSO COLOR HABANO GRISACEO	14.1	N.L.	N.P.	0.7%	69.85%	35.4%								
19.00																		
21.50	GP-GM	A-1-a	1	MATERIAL ALUVIAL EN MATRIZ LIMO ARENOSA, POBREMENTE GRADADA, CON TAMAÑOS DE 2" A 5" DE HUMEDAD BAJA, COMPACTO, COLOR GRIS OSCURO	1.4	N.L.	N.P.	75.7%	17.28%	7.0%	2.348							
24.00																		
26.50	SM	A-1-b	0	ARENA LIMOSA PRESENTA GRAVAS CON TAMAÑOS DE 1" A 3", DE HUMEDAD MODERADA, MUY DENSO COLOR GRIS OSCURO	9.9	N.L.	N.P.	38.7%	48.34%	13.0%								

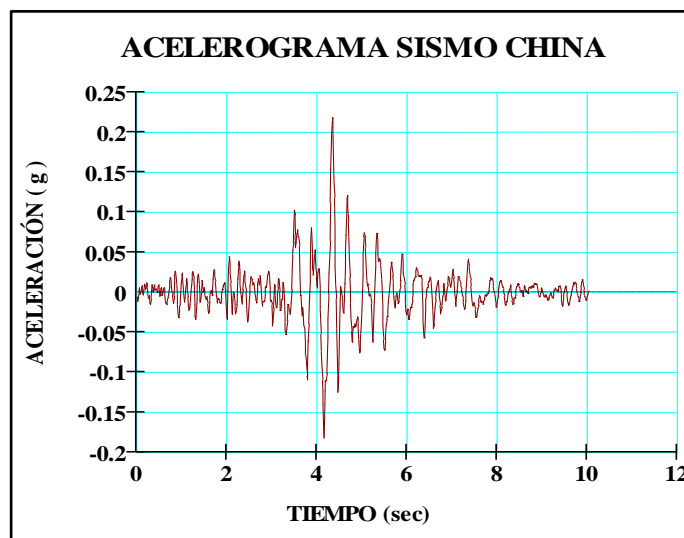
### ANEXO D. ACELEROGRAMAS SISMOS.

Figura 40. Acelerograma Sismo de Japón



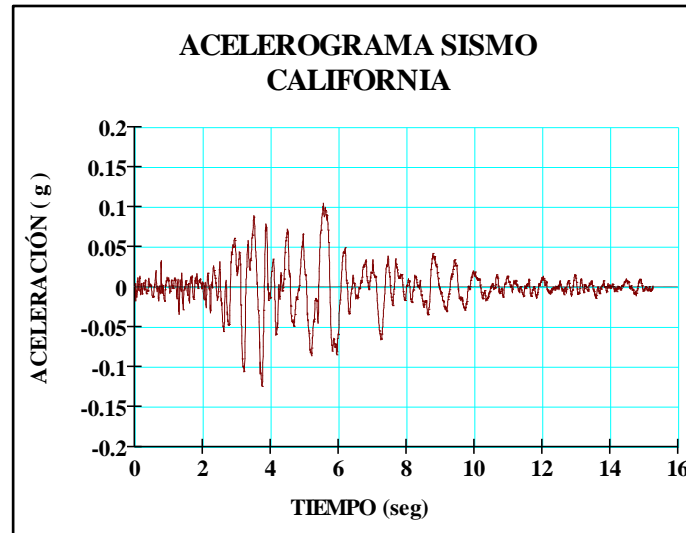
Fuente: Autores.

Figura 41. Acelerograma Sismo de China



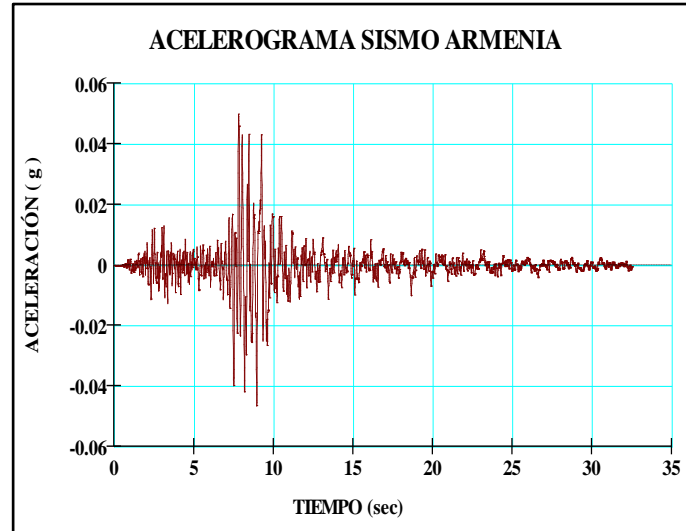
Fuente: Autores.

**Figura 42.** Acelerograma Sismo de California.



Fuente: Autores.

**Figura 43.** Acelerograma Sismo de Armenia.



Fuente: Autores.