

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL



Tesis para optar el Título de INGENIERO CIVIL

“Análisis Dinámico de Estabilidad por Elementos Finitos de los
Taludes de la Costa Verde en el Distrito de Miraflores”

Pablo Urrutia Varese
Octubre 2008

Debido a la alta actividad sísmica de la costa peruana, a la magnitud de los eventos sísmicos que se presentan y especialmente a las nuevas herramientas disponibles, los análisis dinámicos vienen cobrando mayor importancia en los diseños y análisis de estructuras en general.

La presente tesis evalúa dinámicamente la estabilidad de los taludes de la Costa Verde en el distrito de Miraflores por el método de elementos finitos, al modelar secciones críticas de estos taludes en el programa GeoStudio 2004 (mediante sus aplicaciones QUAKE/W y SLOPE/W) y someterlos a la acción de cuatro sismos. Los sismos seleccionados, los mayores eventos de los años 1966, 1970, 1974 y 2006 cerca al lugar de análisis, fueron ingresados a GeoStudio 2004 en forma de registros de aceleraciones y tras ser aplicados al modelo numérico creado, fueron utilizados para determinar las resistencias post-sísmicas y las deformaciones permanentes en las secciones evaluadas. Estos resultados permitieron obtener un entendimiento general del comportamiento de los taludes durante y después del sismo, así como observar el efecto del mismo en la estabilidad de las estructuras analizadas.

Como complemento a esta tesis se realizó un manual sobre el análisis dinámico de estabilidad de taludes por elementos finitos con GeoStudio 2004 (incluido en los anexos).

Análisis Dinámico de Estabilidad por Elementos Finitos de los Taludes de la Costa Verde en el Distrito de Miraflores

Contenido

1	INTRODUCCIÓN	5
1.1	Objetivo	6
2	ACERCAMIENTO TEÓRICO.....	7
2.1	Análisis por elementos finitos.....	7
2.2	Análisis dinámico de estabilidad de taludes con GeoStudio 2004.....	8
2.3	Propiedades de los materiales.....	9
2.3.1	Propiedades relacionadas a la rigidez de los materiales	10
2.3.2	Modelos constitutivos	12
2.3.3	Propiedades de los materiales: no-lineal vs. lineal-equivalente.....	13
3	SISMICIDAD	14
3.1	Sismos seleccionados para los análisis.....	19
4	MODELOS DE LOS TALUDES EN GEOSTUDIO 2004.....	23
4.1	Taludes de la Costa Verde en el distrito de Miraflores	23
4.2	Geometría de los modelos	24
4.3	Características de la superficie freática en los modelos	26
4.4	Parámetros geotécnicos de los materiales	26
4.5	Condiciones de frontera en QUAKE/W	30
4.6	Registros sísmicos.....	30
5	ANÁLISIS DINÁMICO DE ESTABILIDAD POR ELEMENTOS FINITOS	32
5.1	Análisis estático inicial con QUAKE/W.....	32
5.2	Análisis dinámico con QUAKE/W.....	34
5.3	Análisis dinámico de estabilidad por elementos finitos	34
6	RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS	35
6.1	Factores de seguridad durante el sismo	37
6.2	Deformación permanente.....	45
7	COMENTARIOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	46
8	REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA	49

Tablas

Tabla 3-1	Características generales de la zona de subducción del Perú y norte de Chile ...	15
Tabla 3-2	Datos de los eventos sísmicos seleccionados para los análisis dinámicos	21
Tabla 4-1	Resultados de análisis de estabilidad estática en Secciones 2, 8, A y B.....	25
Tabla 4-2	Parámetros geotécnicos usados en análisis de estabilidad	26
Tabla 4-3	Parámetros geotécnicos usados en análisis estáticos iniciales	27
Tabla 4-4	Parámetros geotécnicos usados en los análisis dinámicos	28
Tabla 4-5	Eventos sísmicos seleccionados.....	31
Tabla 5-1	Resultados de análisis de estabilidad estática en Secciones A y B.....	32

Figuras

Figura 3-1 Mapa de riesgo sísmico del Perú 16

Figura 3-2 Mapa de densidad sísmica del Perú 17

Figura 3-3 Epicentros de terremotos dentro del área de Lima, mayores a 6 Mw, entre 1900 y 1995 18

Figura 3-4 Epicentros de terremotos dentro del área de Lima, mayores a 8 Mw, entre 1450 y 1995 19

Figura 3-5 Ubicación de los sismos seleccionados para los análisis dinámicos 22

Figura 4-1 Modelo de la Sección A 24

Figura 4-2 Modelo de la Sección B 25

Figura 4-3 Función de reducción de G para grava mal graduada 29

Figura 4-4 Función de módulo de amortiguamiento para grava mal graduada 29

Figura 5-1 Esfuerzos verticales totales estáticos iniciales en la Sección A (unidades en MPa) 33

Figura 5-2 Esfuerzos verticales totales estáticos iniciales en la Sección B (unidades en MPa) 33

Figura 6-1 Superficie de falla que atraviesa al talud en toda su longitud (Sección A, superficie de falla #57) 35

Figura 6-2 Superficie de falla que abarca aproximadamente la mitad del talud (Sección A, superficie de falla #86) 36

Figura 6-3 Superficie de falla que atraviesa al talud en toda su longitud (Sección B, superficie de falla #56) 36

Figura 6-4 Superficie de falla que abarca aproximadamente la mitad del talud (Sección B, superficie de falla #39) 37

Figura 6-5 Resultados de Factor de Seguridad vs. Tiempo para la superficie de falla #57 de la Sección A, bajo el efecto del sismo del 17 de Octubre de 1966 37

Figura 6-6 Resultados de Factor de Seguridad vs. Tiempo para la superficie de falla #86 de la Sección A, bajo el efecto del sismo del 17 de Octubre de 1966 38

Figura 6-7 Resultados de Factor de Seguridad vs. Tiempo para la superficie de falla #57 de la Sección A, bajo el efecto del sismo del 31 de Mayo de 1970 38

Figura 6-8 Resultados de Factor de Seguridad vs. Tiempo para la superficie de falla #86 de la Sección A, bajo el efecto del sismo del 31 de Mayo de 1970 39

Figura 6-9 Resultados de Factor de Seguridad vs. Tiempo para la superficie de falla #57 de la Sección A, bajo el efecto del sismo del 3 de Octubre de 1974 39

Figura 6-10 Resultados de Factor de Seguridad vs. Tiempo para la superficie de falla #86 de la Sección A, bajo el efecto del sismo del 3 de Octubre de 1974 40

Figura 6-11 Resultados de Factor de Seguridad vs. Tiempo para la superficie de falla #57 de la Sección A, bajo el efecto del sismo del 20 de Octubre de 2006 40

Figura 6-12 Resultados de Factor de Seguridad vs. Tiempo para la superficie de falla #86 de la Sección A, bajo el efecto del sismo del 20 de Octubre de 2006 41

Figura 6-13 Resultados de Factor de Seguridad vs. Tiempo para la superficie de falla #56 de la Sección B, bajo el efecto del sismo del 17 de Octubre de 1966 41

Figura 6-14 Resultados de Factor de Seguridad vs. Tiempo para la superficie de falla #39 de la Sección B, bajo el efecto del sismo del 17 de Octubre de 1966 42

Figura 6-15 Resultados de Factor de Seguridad vs. Tiempo para la superficie de falla #56 de la Sección B, bajo el efecto del sismo del 31 de Mayo de 1970 42

Figura 6-16 Resultados de Factor de Seguridad vs. Tiempo para la superficie de falla #39 de la Sección B, bajo el efecto del sismo del 31 de Mayo de 1970 43

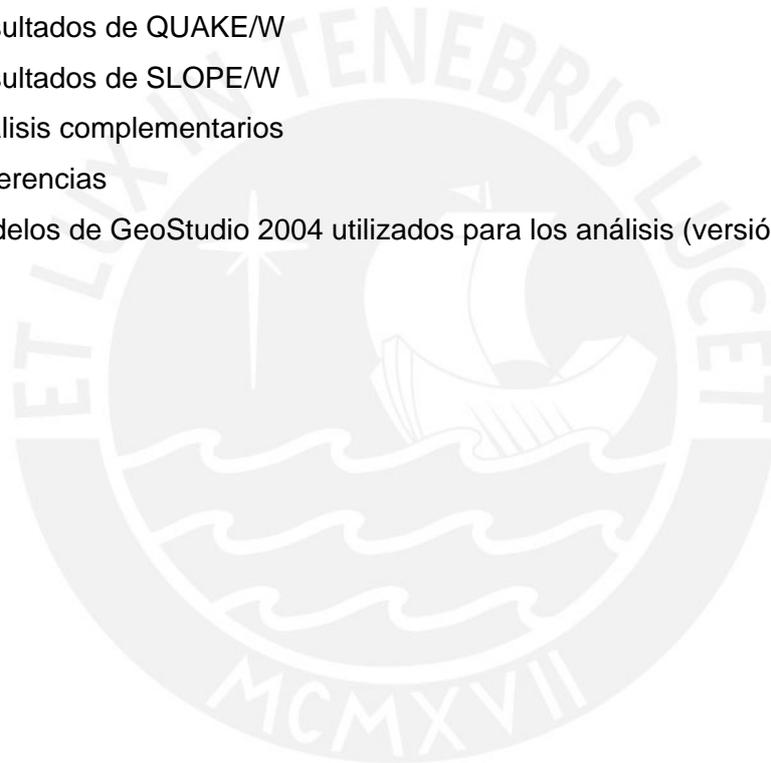
Figura 6-17 Resultados de Factor de Seguridad vs. Tiempo para la superficie de falla #56 de la Sección B, bajo el efecto del sismo del 3 de Octubre de 1974 43

Figura 6-18 Resultados de Factor de Seguridad vs. Tiempo para la superficie de falla #39 de la Sección B, bajo el efecto del sismo del 3 de Octubre de 1974 44

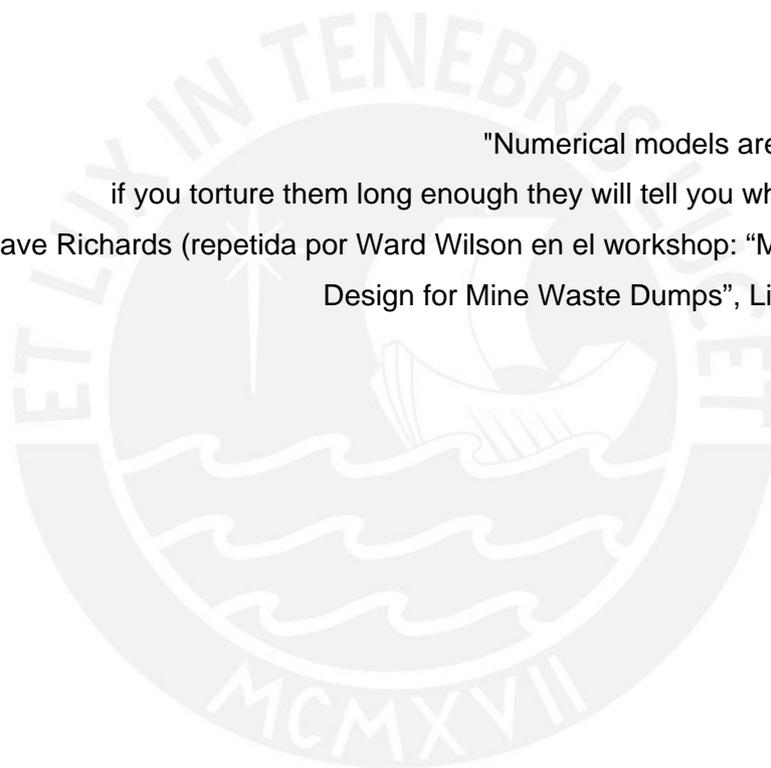
Figura 6-19 Resultados de Factor de Seguridad vs. Tiempo para la superficie de falla #56 de la Sección B, bajo el efecto del sismo del 20 de Octubre de 2006..... 44
Figura 6-20 Resultados de Factor de Seguridad vs. Tiempo para la superficie de falla #39 de la Sección B, bajo el efecto del sismo del 20 de Octubre de 2006..... 45

Anexos

- Anexo 1: Manual de Análisis Dinámico de Estabilidad de Taludes por Elementos Finitos utilizando QUAKE/W y SLOPE/W
- Anexo 2: Registros sísmicos de aceleraciones utilizados en los análisis
- Anexo 3: Ubicación de las secciones analizadas en los taludes de la Costa Verde
- Anexo 4: Resultados de QUAKE/W
- Anexo 5: Resultados de SLOPE/W
- Anexo 6: Análisis complementarios
- Anexo 7: Referencias
- Anexo 8: Modelos de GeoStudio 2004 utilizados para los análisis (versión digital)



"Numerical models are like captured spies,
if you torture them long enough they will tell you what you want to hear"
frase de Dave Richards (repetida por Ward Wilson en el workshop: "Mine Closure – Cover
Design for Mine Waste Dumps", Lima, diciembre 2006)



1 INTRODUCCIÓN

Los taludes elegidos para los análisis dinámicos de estabilidad de esta tesis son los ubicados en la Costa Verde, en el distrito de Miraflores. Tesis anteriores han evaluado estática y pseudo-estáticamente la estabilidad de estos taludes con métodos de equilibrio límite. Como se explica en la sección 2.0 Acercamiento Teórico, las formulaciones de los métodos de equilibrio límite no siempre permiten obtener distribuciones de esfuerzos realistas a lo largo de una superficie de falla, por lo que los factores de seguridad que se obtienen suelen ser conservadores. Un análisis dinámico de estabilidad de taludes por elementos finitos permite representar mejor los esfuerzos generados como resultado de la aplicación de un sismo, además de incluir en los análisis otros factores, como exceso de presión de poros, resistencias post-sísmicas y posibles zonas de licuefacción. De esta forma se toman en consideración elementos dejados de lado por los métodos de equilibrio límite, que pueden afectar la estabilidad de la estructura analizada. Los resultados que se obtienen deberían permitir mejor un entendimiento general del comportamiento de la estructura y su estabilidad durante y después del sismo.

Para la realización de los análisis dinámicos de esta tesis se utilizó el programa de cómputo GeoStudio 2004 v6.20. GeoStudio 2004 es un conjunto de aplicaciones para el modelamiento geotécnico y geoambiental, de las cuales se utilizó las siguientes para el análisis dinámico de estabilidad de taludes por elementos finitos:

- SLOPE/W: Programa geotécnico de análisis de estabilidad de taludes para calcular el factor de seguridad en taludes de tierra y roca.
- QUAKE/W: Programa geotécnico de elementos finitos para el análisis dinámico de estructuras de suelo, sujetas a terremotos u otros impactos similares.

Los análisis dinámicos se realizaron creando modelos numéricos en GeoStudio 2004 de las secciones críticas de los taludes a analizar. A estos modelos se les aplicó, en QUAKE/W, los registros sísmicos seleccionados para los análisis, calculando de esta manera los esfuerzos post-sismo en la estructura. Estos esfuerzos fueron ingresados luego a la aplicación SLOPE/W, donde se calculó la estabilidad de diferentes superficies de falla por el método de elementos finitos.

La topografía del terreno, la geometría del subsuelo, los parámetros geotécnicos estáticos de los materiales y las condiciones inferidas del agua subterránea, empleadas para desarrollar los modelos de los análisis dinámicos, fueron obtenidos de la tesis sobre

“Estabilidad de Taludes en la Costa Verde, Distrito de Miraflores”, realizada por Alonso Vargas.

Los datos sísmicos empleados en los análisis de esta tesis incluyen eventos de los años 1966, 1970, 1974 y 2006, cerca al lugar del análisis, los cuales fueron obtenidos de la página web del CISMID (los tres primeros) y de la Pontificia Universidad Católica del Perú (el último).

Como complemento a esta tesis se realizó un manual sobre el análisis dinámico de estabilidad de taludes por elementos finitos con GeoStudio 2004 (incluido en los anexos). En este documento se explica el procedimiento seguido para analizar dinámicamente los taludes de esta tesis y profundiza temas relacionados a conceptos y uso del programa.

1.1 Objetivo

El objetivo de la presente tesis fue realizar un análisis dinámico de estabilidad de los taludes de la Costa Verde en el distrito de Miraflores por el método de elementos finitos, para lo cual se utilizó el programa GeoStudio 2004 v6.20.

El objetivo de un análisis dinámico de estabilidad de taludes por elementos finitos es determinar los excesos de presión de poros, las resistencias post-sísmicas, la deformación permanente y las posibles zonas de licuefacción desarrolladas en la estructura analizada, como resultado de la aplicación de uno o varios sismos de diseño. Los resultados que se obtengan permitirán un entendimiento general del comportamiento de las estructuras durante y después del sismo, así como observar el efecto del mismo en la estabilidad de las estructuras.

2 ACERCAMIENTO TEÓRICO

La información presentada en este capítulo fue obtenida del manual de GeoStudio 2004 "Modeling with QUAKE/W: An Engineering Methodology" (John Krahn, 2004) y del libro "Geotechnical Earthquake Engineering", de Steven Kramer (1996).

Un análisis convencional de estabilidad de taludes consiste en calcular el factor de seguridad de determinadas superficies de falla utilizando formulaciones de equilibrio límite, las cuales buscan un equilibrio de fuerzas y/o momentos en una superficie de falla dividida en rebanadas.

La distribución de esfuerzos obtenida de las formulaciones de equilibrio límite no es necesariamente representativa de lo que ocurre en la realidad, ya que éstas dan fuerzas y esfuerzos que apuntan a proveer un equilibrio de fuerzas en cada rebanada y hacen que el factor de seguridad sea igual para cada una de éstas. Esto implica que no siempre es posible obtener distribuciones de esfuerzos realistas a lo largo de una superficie de falla o dentro de una potencial masa deslizante.

Para sobreponerse a esta limitación se debe agregar una relación de esfuerzo-deformación al análisis de estabilidad, de tal forma que se satisfaga la necesidad de compatibilidad en los desplazamientos y se obtenga una distribución de esfuerzos más realista. Una forma de incluir la relación esfuerzo-deformación es primero establecer la distribución de esfuerzos usando un análisis de elementos finitos, para luego usar los esfuerzos en el análisis de estabilidad.

2.1 Análisis por elementos finitos

En general, un análisis por elementos finitos consiste en dividir un problema (un medio continuo) en una serie de subdominios denominados elementos finitos, donde cada uno de estos elementos está definido a su vez por una serie de puntos llamados nodos. Un nodo puede pertenecer a uno o más elementos finitos y su función es describir la distribución de incógnitas dentro del elemento y conectar o unir todos los elementos dentro de un dominio, así como asegurar la compatibilidad de éstos. Al conjunto de nodos y elementos se le conoce como malla de elementos finitos.

Una vez dividido el problema se realizan ecuaciones de equilibrio, compatibilidad y relaciones constitutivas a cada elemento y se construye un sistema de ecuaciones. El sistema de ecuaciones puede ser resuelto utilizando álgebra lineal o algún método no lineal.

El número de ecuaciones del sistema será proporcional al número de nodos, ya que son éstos los que contienen las incógnitas.

Con el sistema de ecuaciones resuelto se tiene el comportamiento de cada elemento y se puede reconstruir el comportamiento del problema como un todo.

2.2 Análisis dinámico de estabilidad de taludes con GeoStudio 2004

Un análisis de elementos finitos se basa en tres aspectos fundamentales, la discretización de los elementos, la definición de las propiedades de los materiales y la asignación de condiciones de frontera. La discretización se encarga de definir la geometría, áreas y volúmenes, además de construir la malla de elementos finitos. Las propiedades de los materiales son las que describen los diferentes tipos de suelo o roca en el modelo, definiendo, en el caso de QUAKE/W, los parámetros de rigidez y presión de poros de cada uno; y en SLOPE/W, las utilizadas para simular la resistencia al corte del material de acuerdo al modelo de resistencia utilizado, como el de Mohr-Coulomb por ejemplo. Finalmente, las condiciones de frontera se encargan de dar al problema un marco de referencia, a partir del cual se resolverán los sistemas de ecuaciones creados en la malla de elementos finitos.

En QUAKE/W, una vez construido el modelo numérico, se procede a aplicar un registro sísmico de aceleraciones al problema. La acción del sismo es analizada cada cierto intervalo de tiempo, llamado *time step* en la aplicación, obteniéndose así resultados parciales que afectan las propiedades de los materiales. Con estas nuevas propiedades de los materiales se analiza el modelo en el siguiente *time step* y así sucesivamente hasta que termina el registro sísmico.

La malla de elementos finitos responderá al movimiento dependiendo del registro sísmico utilizado para el análisis, de la geometría del modelo, del marco de referencia que se le haya dado al problema y de las propiedades de los materiales que componen el modelo, de tal manera que se calculen las distribuciones de esfuerzos y los excesos de presión de poros durante y después del movimiento. Esta información es luego utilizada para calcular el factor de seguridad de las diferentes superficies de falla definidas.

El procedimiento, en resumen, que realiza GeoStudio 2004 para el análisis dinámico de la estabilidad de un talud por elementos finitos es el siguiente:

- En la aplicación QUAKE/W se calcula los esfuerzos actuantes en la estructura antes de la acción del sismo. Estos esfuerzos se originan a causa del peso de los

- materiales y el programa los obtiene a partir de un análisis estático inicial, el cual será usado como punto de partida para realizar el análisis dinámico.
- Aún en QUAKE/W, se aplica el movimiento sísmico a la estructura a través de un registro sísmico de aceleraciones ingresado previamente. El registro sísmico debe estar dividido en una serie de intervalos, llamados *time steps*. En cada uno de estos *time steps* es que QUAKE/W calcula las distribuciones de esfuerzos y los excesos de presión de poros, modificando, al final del *time step*, las propiedades de los materiales en respuesta a las deformaciones por esfuerzo de corte cíclico ocurridas. Estas propiedades modificadas son luego utilizadas como punto de partida para el siguiente intervalo.
 - Una vez obtenidos los resultados de QUAKE/W (esfuerzos generados durante el sismo), se integran éstos con un análisis de estabilidad en SLOPE/W por el método de elementos finitos.
 - Se definen las superficies de falla que se desean analizar (para lo cual SLOPE/W ofrece una variedad de formas) y se evalúa la estabilidad de estas considerando los esfuerzos importados de QUAKE/W.

2.3 Propiedades de los materiales

Las propiedades de los materiales utilizadas para los análisis de esta tesis se pueden dividir en dos: las utilizadas en QUAKE/W y las utilizadas en SLOPE/W.

Las propiedades utilizadas en QUAKE/W son las relacionadas a la rigidez (módulo de corte, módulo de amortiguamiento y módulo de Poisson). El programa permite incluir además propiedades relacionadas a la presión de poros, pero al no existir napa freática en los modelos analizados en esta tesis, estas propiedades no fueron tomadas en cuenta.

Las propiedades utilizadas en SLOPE/W son las relacionadas al modelo de resistencia de Mohr-Coulomb (peso específico del material, ángulo de fricción interna y cohesión), utilizado para simular las características de resistencia al corte de los materiales. Estas propiedades son las mismas que las que se utilizan en un análisis convencional por equilibrio límite.

A continuación se profundizará en las propiedades utilizadas en QUAKE/W, ya que son éstas las que hacen la diferencia entre un análisis dinámico de estabilidad por elementos finitos y un análisis de estabilidad por equilibrio límite.

2.3.1 Propiedades relacionadas a la rigidez de los materiales

Dentro de las propiedades relacionadas a la rigidez del suelo se encuentran el módulo de corte del material (G) y la capacidad del material para disipar la energía asociada a las ondas sísmicas (amortiguamiento). En ambos casos se debe especificar un valor máximo y una función de reducción o aumento, debido a que ambas propiedades irán variando conforme avance el sismo.

Función de reducción de G

Para incluir en los análisis el efecto de ablandamiento que sufren los materiales en respuesta a deformaciones por esfuerzo de corte cíclico, se define una función de reducción de G (G/G_{max}) la cual depende de la presión efectiva de confinamiento y del índice de plasticidad del material. El procedimiento que utiliza QUAKE/W para estimar la función de reducción de G es el desarrollado por Ishibashi y Zhang (1993). Este procedimiento se resume en el manual del programa (Modeling with QUAKE/W: An Engineering Methodology), en el cual se define G/G_{max} como:

$$\frac{G}{G_{max}} = K(\gamma, PI)(\sigma'_m)^{m(\gamma, PI) - m_o}$$

donde:

σ'_m : Promedio de esfuerzos efectivos

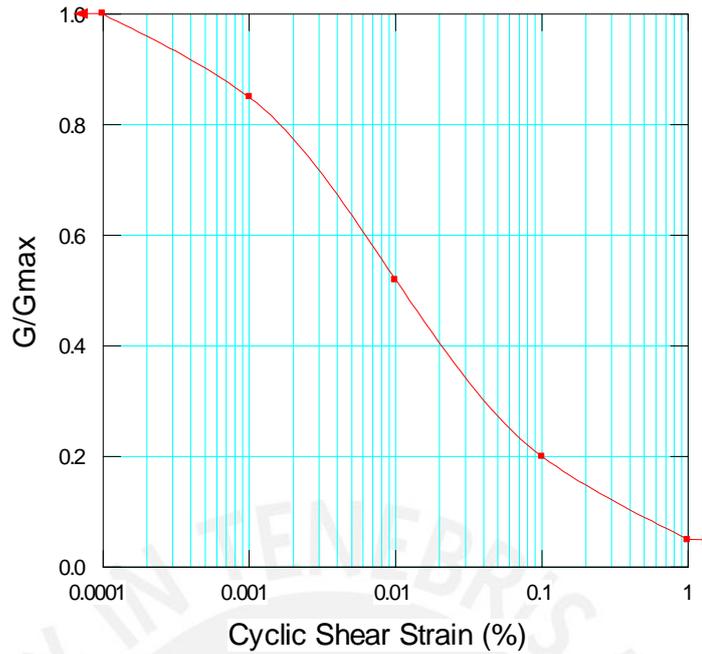
γ : Deformación por esfuerzo cortante cíclico

PI: Índice de plasticidad del material

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

$$m(\gamma, PI) - m_o = 0.272 \left\{ 1 - \tanh \left[\ln \left(\frac{0.000556}{\gamma} \right)^{0.4} \right] \right\} \exp(-0.0145 PI^{1.3})$$

y se obtiene una curva de la forma:



QUAKE/W permite también ingresar directamente los puntos de la curva G/G_{max} , como se hizo en el caso de esta tesis, los cuales pueden ser estimados a partir de estudios realizados para diferentes materiales.

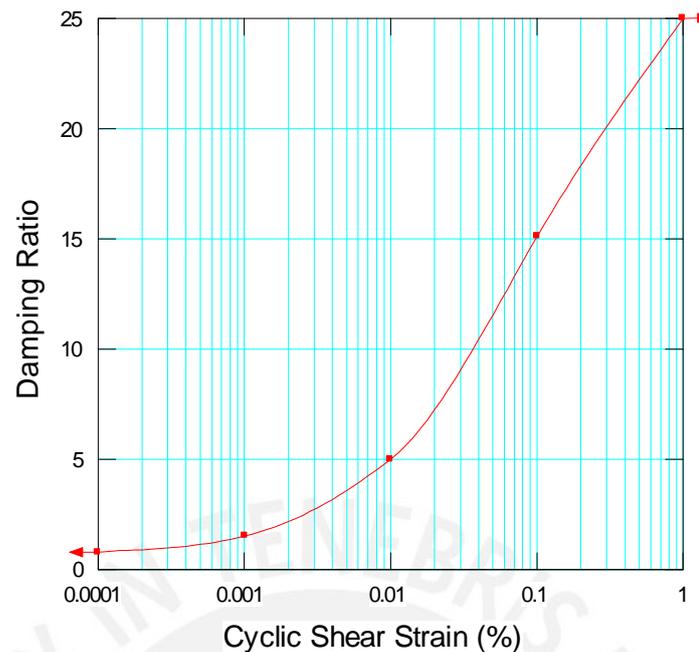
Función de amortiguamiento

Sucede algo similar con el amortiguamiento, ya que el suelo aumenta su capacidad de disipar la energía del sismo a medida que va siendo deformado cíclicamente, por lo que es necesario una función que permita reflejar estos cambios.

El procedimiento que utiliza QUAKE/W para estimar la función de reducción de amortiguamiento se deriva del método desarrollado por Ishibashi y Zhang (1993) para el cálculo de G/G_{max} . El manual del programa (Modeling with QUAKE/W: An Engineering Methodology) define la relación de amortiguamiento (ξ) a partir de los valores de G/G_{max} , como se muestra en la expresión:

$$\xi = 0.333 \frac{1 + \exp(-0.0145PI^{1.3})}{2} \left[0.586 \left(\frac{G}{G_{max}} \right)^2 - 1.547 \frac{G}{G_{max}} + 1 \right]$$

para luego obtener una curva de la forma:



QUAKE/W permite también ingresar directamente los puntos de la curva amortiguamiento, como se hizo en el caso de esta tesis, los cuales pueden ser estimados a partir de estudios realizados para diferentes materiales.

2.3.2 Modelos constitutivos

Respecto a los modelos constitutivos, QUAKE/W reconoce dos tipos de relaciones esfuerzo vs. deformación: el modelo lineal-elástico y el modelo lineal-equivalente. Éstos pueden ser asignados a cada material independientemente.

- *Modelo lineal-elástico:* En este caso se asume un comportamiento lineal de los esfuerzos respecto a las deformaciones, lo que no resulta muy útil para representar condiciones de campo pues esta relación lineal no existe en la realidad. Aún así se trata de una herramienta bastante práctica para aprender, probar y verificar.

$$\sigma = E \times \varepsilon$$

- *Modelo lineal-equivalente:* En este caso, la rigidez del suelo (ya sea E ó G) se modifica en respuesta a las deformaciones computadas. Lo que hace el programa es iniciar un análisis con un valor de E (ó G) dado, para irlo modificando según lo indiquen las funciones especificadas.

2.3.3 Propiedades de los materiales: no-lineal vs. lineal-equivalente

Las propiedades de los materiales que se ven afectadas a causa de la acción de un sismo son la relación esfuerzo-deformación y el exceso de presión de poros. Idealmente, el cambio en éstos captura el verdadero comportamiento no lineal del suelo.

Un análisis no-lineal considera los cambios en ambos, mientras que un análisis lineal-equivalente (el que utiliza QUAKE/W) solo toma en cuenta las variaciones en la relación esfuerzo-deformación entre los *time steps*, y calcula la variación en el exceso de presión de poros una vez terminado el análisis dinámico. Esta diferencia juega un papel muy importante, pues el conocer los cambios en la presión de poros durante el análisis dinámico permitiría realizar los cálculos en términos de esfuerzos efectivos, lo que es más representativo de las condiciones en campo. Además, la acumulación de presión de poros puede tener un efecto importante en la atenuación de las ondas sísmicas, más aún cuando el material se acerca a su estado de licuación. A pesar de esto, los parámetros del suelo requeridos para los primeros no son tan bien conocidos y son mucho más difíciles de establecer, por lo que actualmente los análisis no-lineales resultan ser mucho más complicados que los análisis lineales-equivalentes, y dependiendo de las condiciones del problema, podrían resultar ser mucho menos prácticos.

Por otro lado, a pesar de que los análisis lineales-equivalentes no toman en cuenta los cambios en la presión de poros durante el análisis dinámico, aún así representan adecuadamente lo que ocurre en la realidad y resultan ser una herramienta muy útil para predecir el comportamiento de estructuras de suelos ante la acción de sismos, sobretodo si se analizan los resultados obtenidos a la luz de las limitaciones de las formulaciones.

3 SISMICIDAD

El Perú se encuentra ubicado en la costa oeste de Sudamérica, la cual a su vez se encuentra ubicada en el cinturón del pacífico, el cinturón sísmico de mayor actividad en el mundo (Nishenko, 1989 – de Karakouzian, Candia, Wyman, Watkins y Hudyma, 1997).

La liberación de energía, producto de la actividad volcánica o del movimiento de las placas tectónicas, es la causa por la que se producen la mayor parte de los terremotos. Los sismos interplacas, también conocidos como sismos de subducción, se originan a causa del hundimiento de la corteza oceánica por debajo de la corteza continental y ocurren en la unión de dos placas. En el caso de la costa oeste de Sudamérica es la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana la que domina los movimientos sísmicos de la región.

“Los terremotos en el Perú muestran una variación en su profundidad de acuerdo a la distancia epicentral tierra adentro, sobre la zona de subducción. De esta forma los terremotos superficiales ocurren cerca de la zona de subducción, los de profundidad media en la zona de los andes y los terremotos más profundos ocurren en la amazonía.” (Nur y Ben-Avraham, 1981 – de Karakouzian, Candia, Wyman, Watkins y Hudyma, 1997).

Algunos datos interesantes, reunidos por Crouse, Vyas y Schell (1988) del trabajo de otros autores acerca de las características generales de la zona de subducción del Perú y el norte de Chile, se presentan a continuación en la Tabla 3-1 (obtenido de Karakouzian, Candia, Wyman, Watkins y Hudyma, 1997).

Tabla 3-1
Características generales de la zona de subducción del Perú y norte de Chile
(obtenido de Karakouzian, Candia, Wyman, Watkins y Hudyma, 1997)

Edad de origen de la placa subducida	Eoceno – Oligoceno
Ratio de convergencia	8 - 9.5 cm/año
Buzamiento del contacto entre las placas	15°, buzando hacia el este
Buzamiento bajo la placa subducida	25° - 40°
Ancho del contacto con la costa	120 – 700 km
Ángulo de convergencia	Casi perpendicular
Máxima profundidad de subducción	650 km
Máximo terremoto histórico	Ms = 8.4 (mayo de 1940)

Existen otros aspectos que complican el mecanismo de liberación sísmica así como los efectos de los terremotos en la región de subducción (por ejemplo la presencia de actividad volcánica o fallas), pero estos aspectos escapan a los alcances de esta tesis por lo que no se profundizará en el tema.

Según Gutenberg y Richter la ocurrencia de sismos superficiales en la costa de Lima, mayores a 6.5 grados en la escala de Richter, es mayor que en otras regiones activas. (Gutenberg y Richter, 1949 - de Karakouzian, Candia, Wyman, Watkins y Hudyma, 1997). Además, de acuerdo a la base de datos del United States Geological Survey (USGS), en los últimos 50 años, dentro una distancia epicentral de 500 km del sitio de análisis, ocurrieron 44 sismos con magnitudes mayores o iguales a 6 y más de 500 sismos con magnitudes mayores o iguales a 5.

Debido a la alta actividad sísmica de la zona y a la magnitud de los eventos sísmicos que se presentan, los análisis dinámicos van cobrando cada vez mayor importancia en los diseños y análisis de estructuras en general.

Para mostrar algunos de los conceptos antes mencionados se presentan a continuación cuatro figuras (Figura 3-1 a Figura 3-4), obtenidas de la página web del USGS y de Karakouzian, Candia, Wyman, Watkins y Hudyma (1997), donde se muestra la alta sismicidad de la costa del Perú y la distribución de sismos a lo largo de ésta.

Si se desea profundizar en el tema, el “Catálogo Sísmico del Perú (1500-1982)” realizado por Espinosa y otros (1985), tiene gran cantidad de información al respecto, como bases de datos de magnitudes de sismos, entre otras cosas.

Figura 3-1
Mapa de riesgo sísmico del Perú
 Aceleración pico del terreno (m^2/s) con 10% de excedencia en 50 años
 (fuente página web USGS: <http://earthquake.usgs.gov/regional/world/peru/gshap.php>)

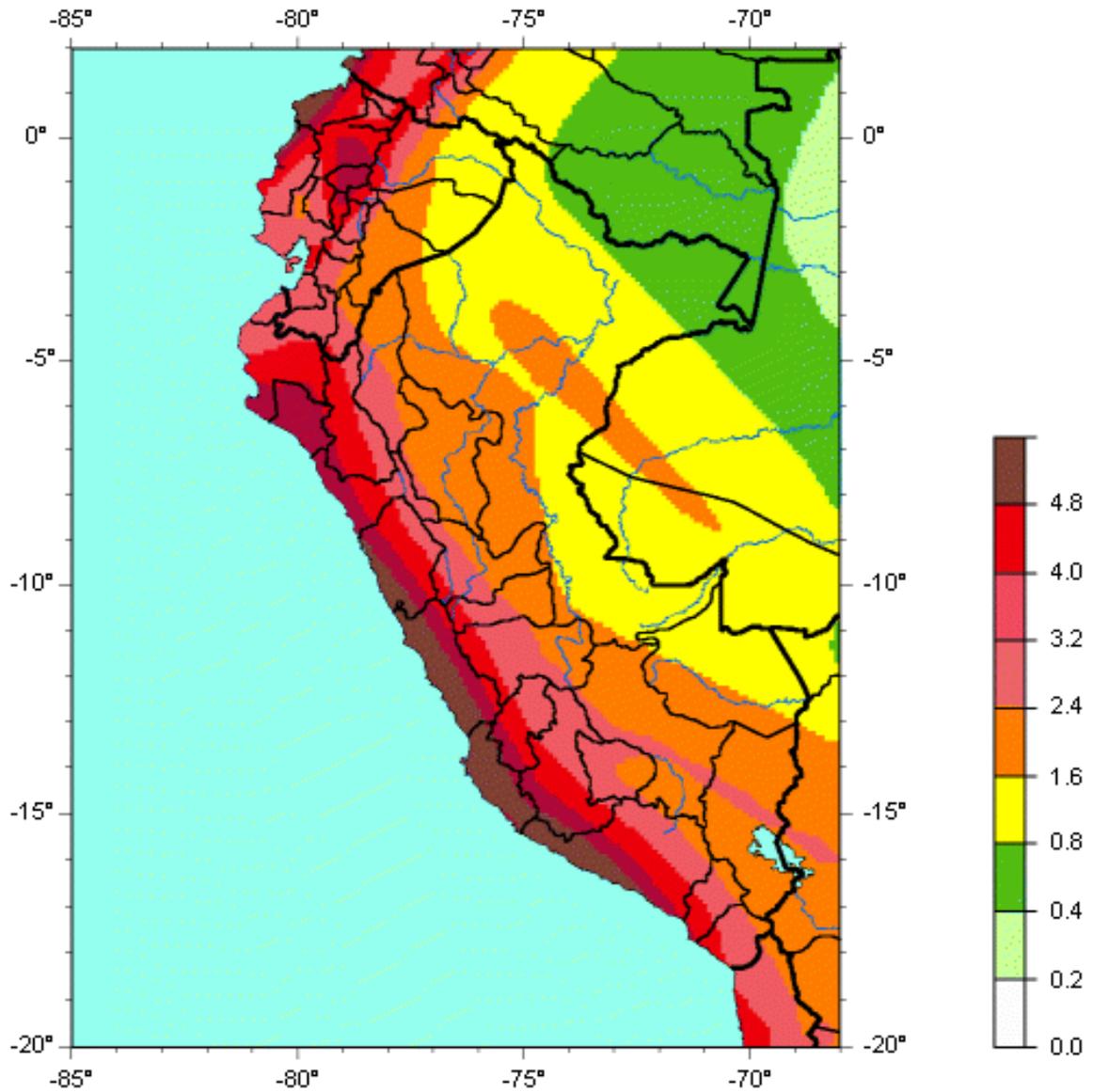
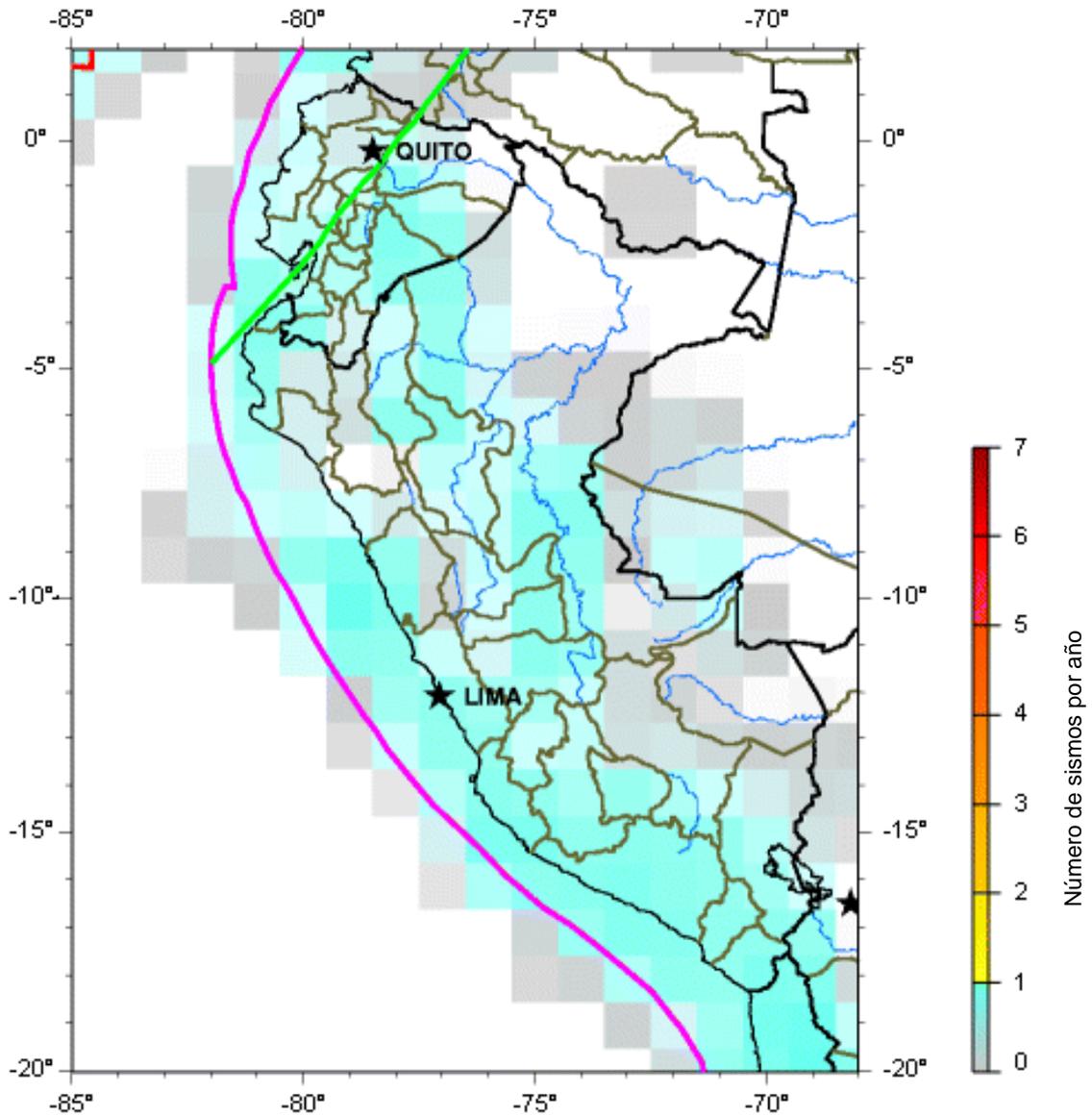


Figura 3-2
Mapa de densidad sísmica del Perú
 Número de sismos por año, de magnitud 5 o mayor, a todas las profundidades
 (fuente página web USGS: <http://earthquake.usgs.gov/regional/world/peru/density.php>)



Límites tectónicos mayores:
 ■ Zona de subducción
 ■ Fallas de transformación

Figura 3-3
Epicentros de terremotos dentro del área de Lima, mayores a 6 Mw, entre 1900 y 1995
 (fuente: National Geophysical Data Center, Boulder, Colorado;
 obtenida de: Karakouzian, Candia, Wyman,
 Watkins y Hudyma, 1997 – Figura 16, página 78)

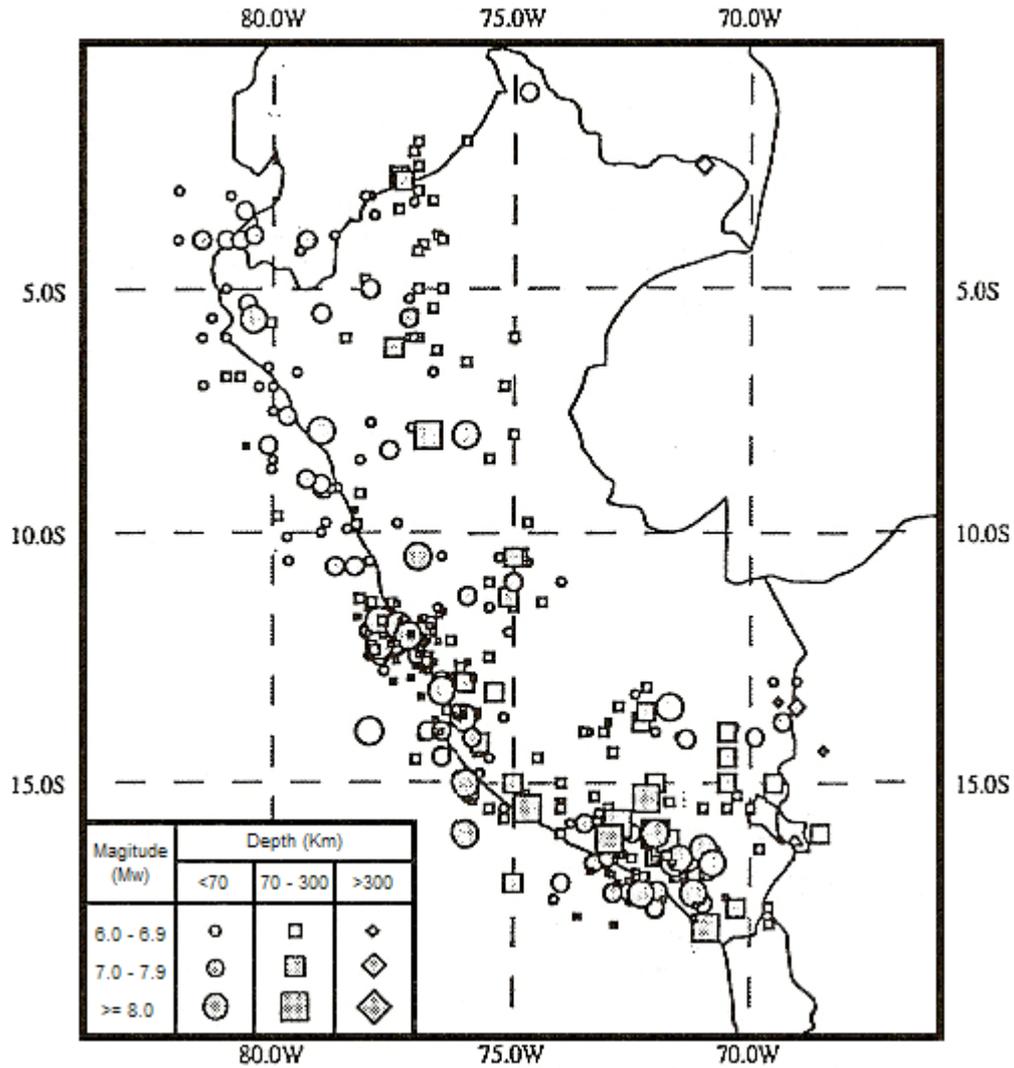
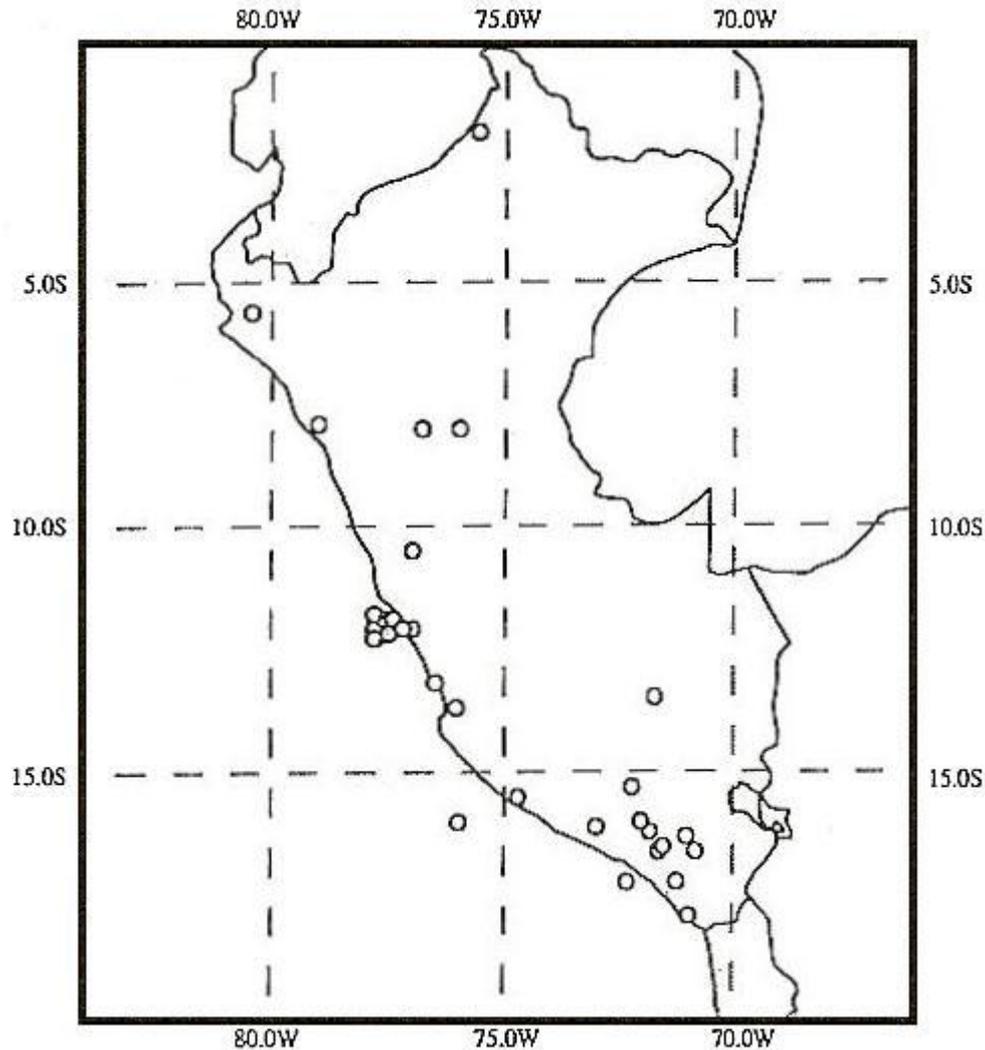


Figura 3-4
Epicentros de terremotos dentro del área de Lima, mayores a 8 Mw, entre 1450 y 1995
(fuente: National Geophysical Data Center, Boulder, Colorado;
obtenida de: Karakouzian, Candia, Wyman,
Watkins y Hudyma, 1997 – Figura 15, página 77)



3.1 Sismos seleccionados para los análisis

Los tres aspectos más importantes que se buscaron para seleccionar los sismos de la presente tesis fueron: la distancia del epicentro a la zona de interés, la magnitud del evento y la duración de los registros de aceleraciones. Los sismos elegidos bajo estos criterios fueron: el terremoto del 17 de Octubre de 1966, el del 31 de Mayo de 1970 y el del 3 de Octubre de 1974. Además, al contar la Pontificia Universidad Católica del Perú con el registro aceleraciones del sismo del 20 de Octubre del 2006, se optó por incluir éste dentro de los sismos para el análisis, de tal manera que se contara con un evento reciente.

La Tabla 3-2 muestra algunos datos de los eventos sísmicos seleccionados para los análisis de esta tesis, cuyos registros sísmicos (datos de aceleración) fueron tomados, en forma electrónica, en la página web de CISMID y de los registros de la PUCP. Los gráficos y datos de los registros de aceleraciones se pueden encontrar en el Anexo 2.

La Figura 3-5, obtenida de la versión gratuita del programa Google Earth, indica las ubicaciones de los eventos seleccionados.



Tabla 3-2
Datos de los eventos sísmicos seleccionados para los análisis dinámicos

Fecha de sismo	Lugar	Magnitud	Distancia a taludes (km)	Profundidad focal (km)	Duración aprox. (s)	Aceleración pico E-W (g)	Aceleración pico N-S (g)	Aceleración pico U-D (g)
17 de Octubre de 1966	Lima	6.4*	230	37	67.00	0.18	0.27	0.10
31 de Mayo de 1970	Chimbote	7.9**	365	71	45.16	0.11	0.10	0.07
3 de Octubre de 1974	Lima	8.1**	80	21	97.96	0.20	0.18	0.10
20 de Octubre de 2006	Pisco	6.7**	150	-	42.14	0.015***	0.021***	0.014

* mb = Magnitud de onda de cuerpo

** Mw = Magnitud de momento

*** En el caso del sismo del 2006, la dirección E-W se refiere al registro transversal y la N-S al longitudinal

Figura 3-5
Ubicación de los sismos seleccionados para los análisis dinámicos
 (fuente: de Google Earth 4.0.2722)



4 MODELOS DE LOS TALUDES EN GEOSTUDIO 2004

Como se mencionó anteriormente, la información referente a los taludes (topografía, parámetros geotécnicos estáticos de los materiales y condiciones inferidas del agua subterránea) y los modelos utilizados para la presente tesis, se basaron en la tesis sobre “Estabilidad de Taludes en la Costa Verde, Distrito de Miraflores”, realizada por Alonso Vargas. De los modelos utilizados en la tesis antes mencionada se eligieron dos secciones para ser modificadas y analizadas dinámicamente. Las secciones finalmente elegidas fueron la Sección 2 y la Sección 8, llamadas para los propósitos de los análisis dinámicos de esta tesis Sección A y Sección B, respectivamente. Estas secciones fueron elegidas debido a que son las que presentan un menor factor de seguridad pseudo-estático y por lo tanto se las considera críticas. En el Anexo 3 se presenta una figura donde se indica la ubicación de las secciones analizadas en los taludes de la Costa Verde, mientras que en el Anexo 6-A se presenta una figura de cada una de las secciones elegidas, antes y después de ser modificadas.

4.1 Taludes de la Costa Verde en el distrito de Miraflores

“El área del litoral de la ciudad de Lima está delimitado por acantilados de hasta 70 metros de altura. El material fluvio-aluvial, sobre el que se encuentra cimentada la mayor parte de la ciudad, ha sido erosionado por el mar desde el período cuaternario en adelante dando forma a los acantilados, los cuales consisten en taludes con una pendiente variable entre 50° y 90° ” (Karakouzian, Candia, Wyman, Watkins y Hudyma, 1997).

Los taludes de la Costa Verde en el distrito de Miraflores se encuentran entre los distritos de Barranco y San Isidro, tienen una longitud aproximada de 4.5 km, una elevación promedio de 45 m y una máxima de 65 m. Están conformados el material conglomerado de Lima, compuesto por grava arenosa mal graduada (GP), densa a muy densa, subredondeada, color gris, con bolones de hasta 20 cm. En ciertas zonas se presentan lentes de limo o arcilla. Este material tiene una muy buena resistencia al corte debido a la cementación de carbonato de calcio existente en la matriz de finos. (Karakouzian, Candia, Wyman, Watkins y Hudyma, 1997).

4.2 Geometría de los modelos

Algunos aspectos geométricos de los modelos originales de las secciones 2 y 8 fueron modificados para dar forma a las secciones A y B. Ese cambio fue necesario para generar una malla de elementos finitos más sencilla y evitar dificultades numéricas en los cálculos.

Las Figuras 4-1 y 4-2 muestran la geometría de los modelos de las condiciones iniciales (antes de un evento sísmico) de las secciones A y B, respectivamente.

Figura 4-1
Modelo de la Sección A

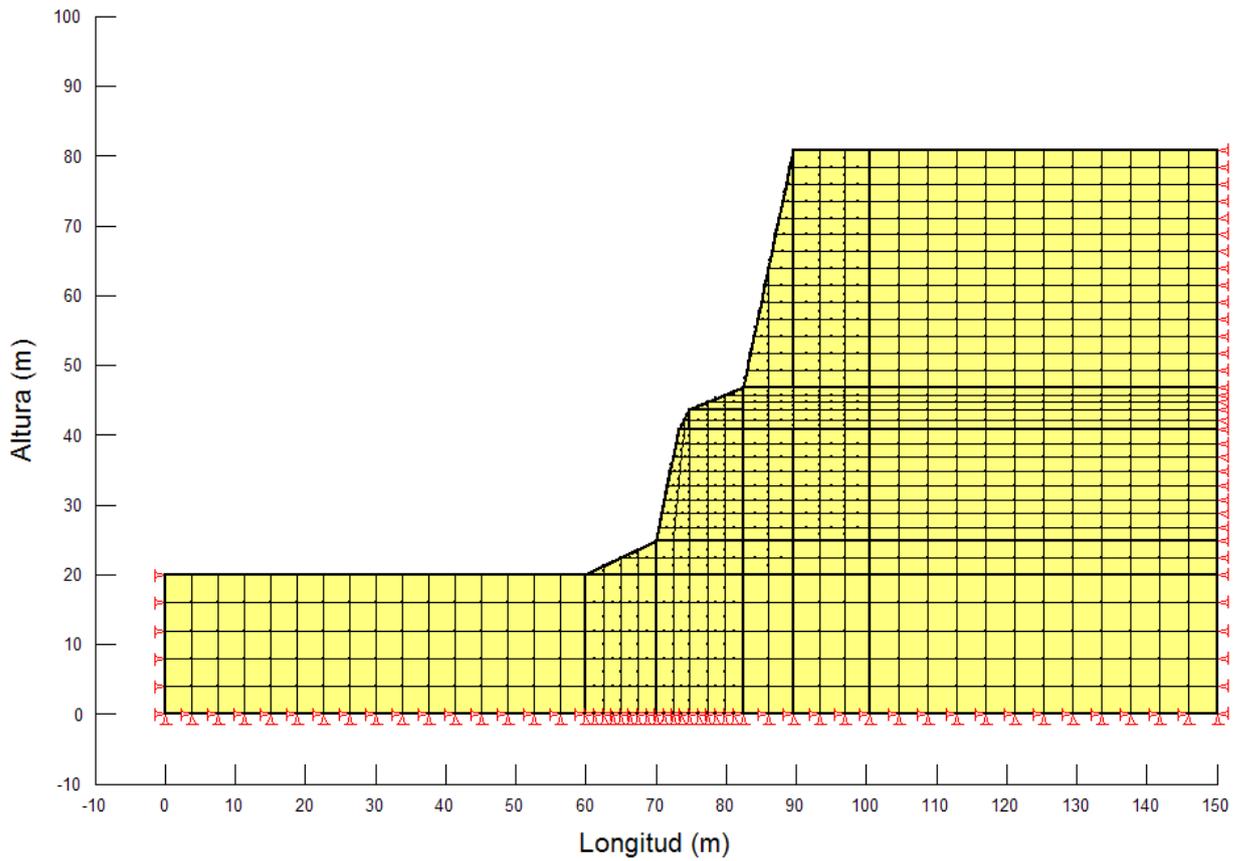
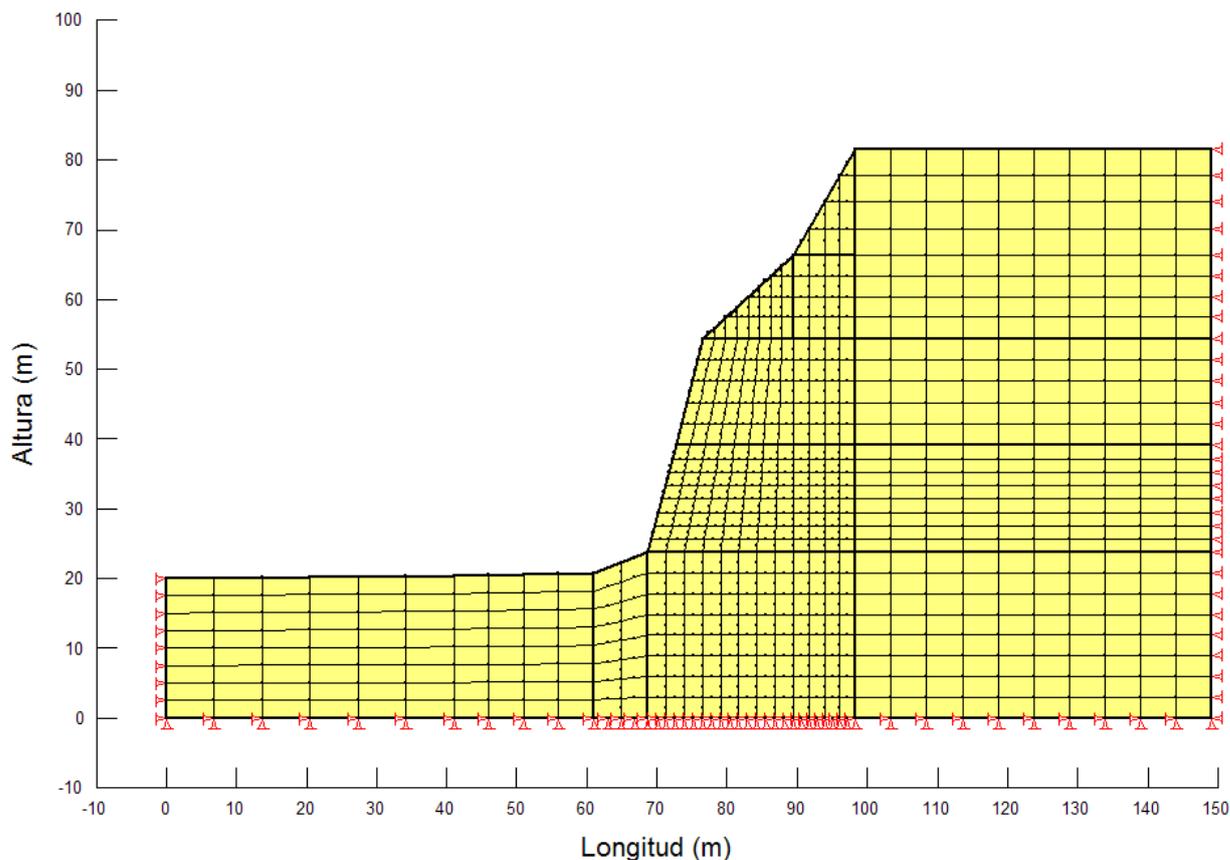


Figura 4-2
Modelo de la Sección B



Para confirmar la validez de los nuevos modelos se realizó un análisis estático de estabilidad de los mismos, con la topografía simplificada. Como se muestra en la Tabla 4-1, los resultados son muy similares entre los modelos originales (secciones 2 y 8) y los nuevos (secciones A y B), existiendo una diferencia de solo 1%.

Tabla 4-1
Resultados de análisis de estabilidad estática en Secciones 2, 8, A y B

Secciones	FS estático (método de Spencer)
Sección 2	1.58
Sección 8	1.64
Sección A	1.60
Sección B	1.66

4.3 Características de la superficie freática en los modelos

Al no conocerse la existencia de napa freática en las secciones de los taludes de la Costa Verde analizados, no se modeló ésta en el programa.

4.4 Parámetros geotécnicos de los materiales

El peso unitario y los parámetros geotécnicos de resistencia de la grava, empleados para los análisis de estabilidad de taludes en SLOPE/W, se presentan en la Tabla 4-2 y fueron tomados de la tesis de Alonso Vargas. En dicha tesis se realizó un *back analysis* con la finalidad de obtener los valores de ángulo de fricción y cohesión que permitieran a las diferentes secciones analizadas (10 diferentes secciones del talud de la costa verde en el distrito de miraflores) estar en “equilibrio límite”, es decir tener un $FS=1$ tanto estática como pseudo-estáticamente. El *back analysis* se llevó a cabo realizando análisis de estabilidad con formulaciones de equilibrio límite.

Tabla 4-2
Parámetros geotécnicos usados en análisis de estabilidad

Material	Propiedades	
Grava mal graduada (GP)	Peso Unitario γ_b (kN/m ³)	22.85
	Ángulo de Fricción Φ' (°)	60
	Cohesión c' (kPa)	68.65

Para los análisis en QUAKE/W, tanto estáticos iniciales como dinámicos, los valores de ν (módulo de Poisson) y D (módulo de amortiguación) fueron obtenidos de Hunt (1986) y Repetto, Arango y Seed (1980), respectivamente. La Tabla 4-3 presenta los parámetros empleados para los análisis estáticos iniciales en QUAKE/W.

Tabla 4-3
Parámetros geotécnicos usados en análisis estáticos iniciales

Material	Propiedades	
Grava mal graduada (GP)	Módulo de Corte G (kPa)	500,000
	Módulo de Poisson	0.35
	Módulo de Amortiguamiento (kPa)	0.05

Cabe resaltar que el valor de G (módulo de corte) no influye significativamente en las presiones calculadas durante los análisis estáticos iniciales, por lo que se recomienda usar un mismo valor, cualquiera que sea, para todos los materiales y así evitar complicaciones numéricas que podría tener el programa al momento de resolver el modelo. En este caso, al tratarse de un solo material, se utilizó un valor asumido de 500,000 kPa.

En el caso de los parámetros geotécnicos usados para los análisis dinámicos, se mantuvo los valores de módulo de Poisson y el módulo de Amortiguamiento utilizados en los análisis estáticos iniciales, pero se cambió el valor del módulo de corte para tener una relación que lo describa en función a la profundidad. Para esto de todas formas fue necesario ingresar al programa el valor máximo del módulo de corte del material, el cual fue estimado a partir de los estudios realizados por Seed, Wong, Idriss y Tokimatsu (1984). La función que QUAKE/W utiliza para describir el módulo de corte en función a la profundidad es la siguiente:

$$G = K_G (\sigma'_m)^n$$

donde,

K_G : Valor máximo del módulo de corte

σ'_m : Promedio de esfuerzos efectivos (obtenido directamente del análisis de esfuerzos inicial)

n: Valor que describe el cambio en el módulo de corte en función del esfuerzo de confinamiento (rango entre 0 y 1, asumido como 0.5 para los efectos de esta tesis)

La Tabla 4-4 presenta los parámetros dinámicos de la grava para los análisis dinámicos en QUAKE/W.

Tabla 4-4
Parámetros geotécnicos usados en los análisis dinámicos

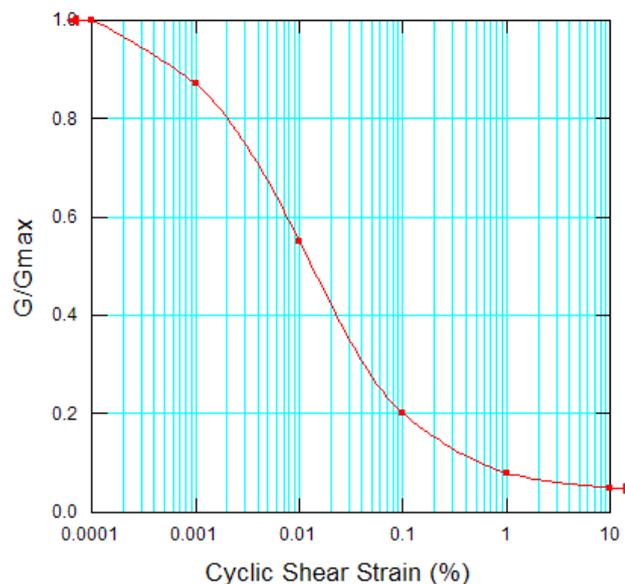
Material	Propiedades	
Grava mal graduada (GP)	K_G	33,000
	G_{min} (kPa)	100
	N	0.5
	Módulo de Poisson	0.35
	Módulo de Amortiguamiento	0.05

Adicionalmente a las propiedades presentadas en la Tabla 4-4, fue necesario definir la función de reducción de G y la función del módulo de amortiguamiento para los análisis dinámicos. Ambas funciones fueron estimadas a partir de los estudios realizados por Seed, Wong, Idriss y Tokimatsu (1984).

Función de reducción de G

Como se mencionó anteriormente, la función de de reducción de G (G/G_{max}) es utilizada para incluir en los análisis el efecto de ablandamiento que sufren los materiales en respuesta a deformaciones por esfuerzo de corte cíclico. La Figura 4-3 presenta la función de reducción de G utilizada para los análisis dinámicos de esta tesis.

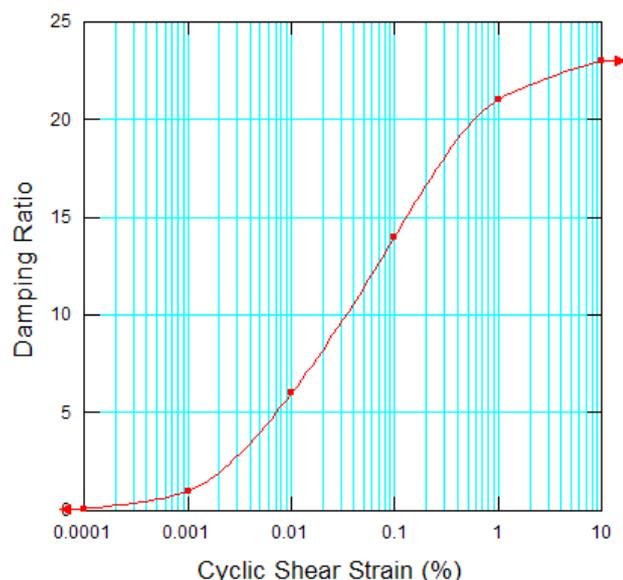
Figura 4-3
Función de reducción de G para grava mal graduada



Función de módulo de amortiguamiento

Esta función intenta reflejar la variación en el módulo de amortiguamiento del material para diferentes deformaciones. La Figura 4-4 presenta la función de módulo de amortiguamiento utilizada para los análisis dinámicos de esta tesis.

Figura 4-4
Función de módulo de amortiguamiento para grava mal graduada



4.5 Condiciones de frontera en QUAKE/W

Como se detalla en el Manual de Análisis Dinámico de Estabilidad de Taludes por Elementos Finitos Utilizando QUAKE/W y SLOPE/W (Anexo 1), las condiciones de frontera de desplazamiento nodal (restricción de desplazamiento en ciertos nodos) restringen el movimiento según lo requiera el tipo de análisis realizado, ya sea estático inicial o dinámico. A continuación se describe cada una de las condiciones de frontera utilizadas:

Condiciones de frontera en análisis estático inicial

- Restricción del movimiento horizontal en los nodos de las caras laterales del modelo.
- Restricción del movimiento horizontal y vertical de los nodos en el extremo inferior del modelo.

Condiciones de frontera en análisis dinámico

- Restricción del movimiento vertical en los nodos en las caras laterales del modelo.

- Restricción del movimiento horizontal y vertical de los nodos en el extremo inferior del modelo.

4.6 Registros sísmicos

Como se mencionó en la sección 3.2, los registros sísmicos elegidos fueron modificados para realizar los análisis dinámicos de estabilidad de taludes. Esto se debió a que los registros sísmicos suelen tener una “cabeza” y una “cola”, de duración variable, cuya inclusión no mejora los resultados de los análisis dinámicos pero si aumentan considerablemente el tiempo que le toma al programa resolver los modelos numéricos.

En el caso de los tres primeros sismos (Octubre de 1966, Mayo de 1970 y Octubre de 1974), la duración de los registros fue recortada para centrar el análisis en la zona de mayor interés de los mismos, así como para reducir el peso de los archivos generados durante el análisis y hacerlos más manejables. De este forma, al sismo de Octubre de 1966 se le cortaron los últimos 12 s, al de Mayo de 1970 los últimos 10.16 s y al de Octubre de 1974 los últimos 32.96 s.

En el caso del sismo del 20 de Octubre del 2006, además de recortar su duración (los primeros 5 s), se escaló el registro de aceleraciones para aumentar su aceleración máxima debido a la reducida magnitud del evento.

La Tabla 4-5 muestra un resumen con los valores máximos de aceleración utilizados tanto para la componente horizontal como vertical de los registros sísmicos, así como la duración de interés de los mismos.

Tabla 4-5
Eventos sísmicos seleccionados

Fecha del sismo	Aceleración pico horizontal (g)	Aceleración pico vertical (g)	Duración de interés (seg)
17 de Octubre de 1966	0.27	0.10	55.00
31 de Mayo de 1970	0.11	0.07	35.00
3 de Octubre de 1974	0.20	0.10	65.00
20 de Octubre de 2006	0.26	0.10	37.14

El intervalo de tiempo entre los *time steps* generados para los análisis dinámicos con QUAKE/W fue de 0.02 segundos (es decir, cada 0.02 segundos se tomó información del registro sísmico para los análisis dinámicos). Este valor es el recomendado por “Modeling with QUAKE/W: An Engineering Methodology” y el criterio para su elección se profundiza en

“Importance of Time Step Discretization for Nonlinear Dynamic Finite Element Análisis” (S.K. Haigh, B. Ghosh, S.P.G. Madabhushi, 2005). Los resultados de los *time steps* múltiples de 10, además del primero y el último, fueron guardados para evaluar luego con éstos la estabilidad de los modelos en SLOPE/W.



5 ANÁLISIS DINÁMICO DE ESTABILIDAD POR ELEMENTOS FINITOS

A continuación se resume el procedimiento utilizado para realizar los análisis de esta tesis. Para mayor información sobre cuales son todos los pasos que se deben llevar a cabo y como se utiliza el programa GeoStudio 2004 para este propósito, referirse a las secciones 3.0 y 4.0 del Manual de Análisis Dinámico de Estabilidad de Taludes por Elementos Finitos Utilizando QUAKE/W y SLOPE/W (Anexo 1).

5.1 Análisis estático inicial con QUAKE/W

El primer paso para determinar los esfuerzos generados a causa del sismo en el modelo, es obtener los esfuerzos iniciales estáticos generados a causa del peso de la estructura.

Las Figuras 5-1 y 5-2 presentan los esfuerzos estáticos iniciales (esfuerzos totales verticales en MPa) en las secciones A y B. Una forma rápida de comprobar estos resultados iniciales es multiplicar el peso específico del material por la profundidad a la cual se desea obtener el esfuerzo estático inicial. Esta comprobación no se puede aplicar en el pie del talud y en general donde haya cambios bruscos de pendiente, ya que ahí se generan concentraciones de esfuerzos de corte. Otra forma de comprobar que los esfuerzos estáticos iniciales hallados sean correctos, es realizar un análisis estático de estabilidad con algún método de equilibrio límite (Morgenstern-Price o Spencer, por ejemplo) y comparar los FS de fallas determinadas con los FS de las mismas fallas, en un análisis estático de estabilidad por elementos finitos. Los FS deberían ser similares, tendiendo los FS del análisis por elementos finitos a ser un poco mayores.

La Tabla 5-1 presenta los resultados de los análisis de estabilidad estáticos realizados para comprobar los esfuerzos estáticos iniciales obtenidos. Las figuras de las superficies de falla analizadas y de los resultados obtenidos a partir de éstos análisis se presentan en el Anexo 6-B.

Tabla 5-1
Resultados de análisis de estabilidad estática en Secciones A y B

Secciones	FS estático (método de Spencer)	FS estático (método de elementos finitos)
Sección A	1.60	1.68
Sección B	1.66	1.77

Figura 5-1
Esfuerzos verticales totales estáticos iniciales en la Sección A
(unidades en MPa)

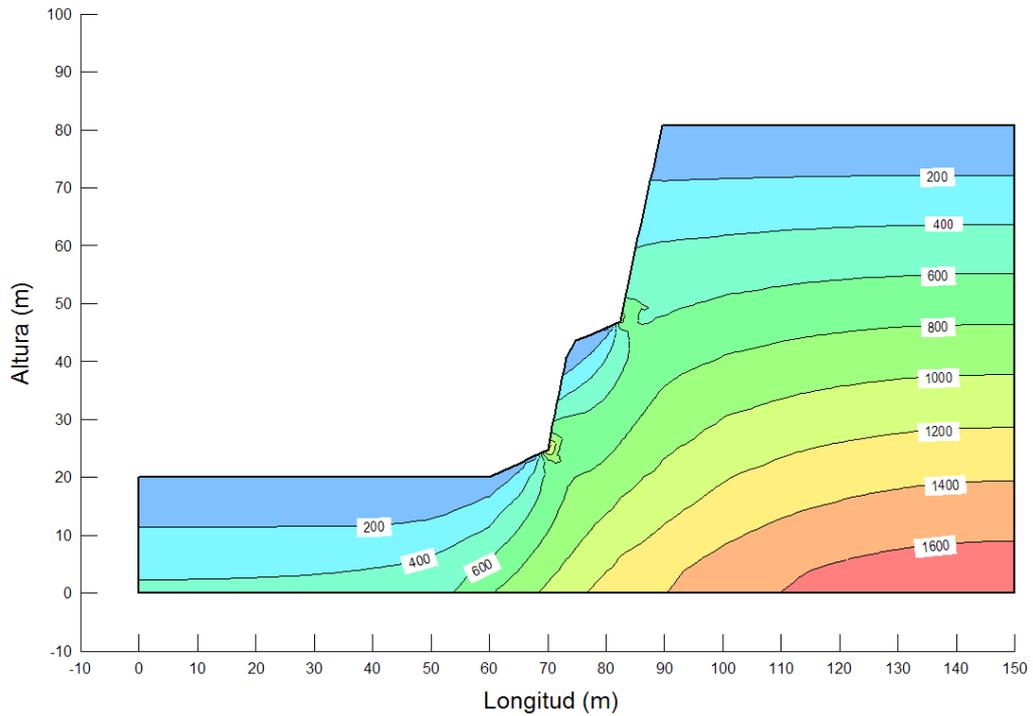
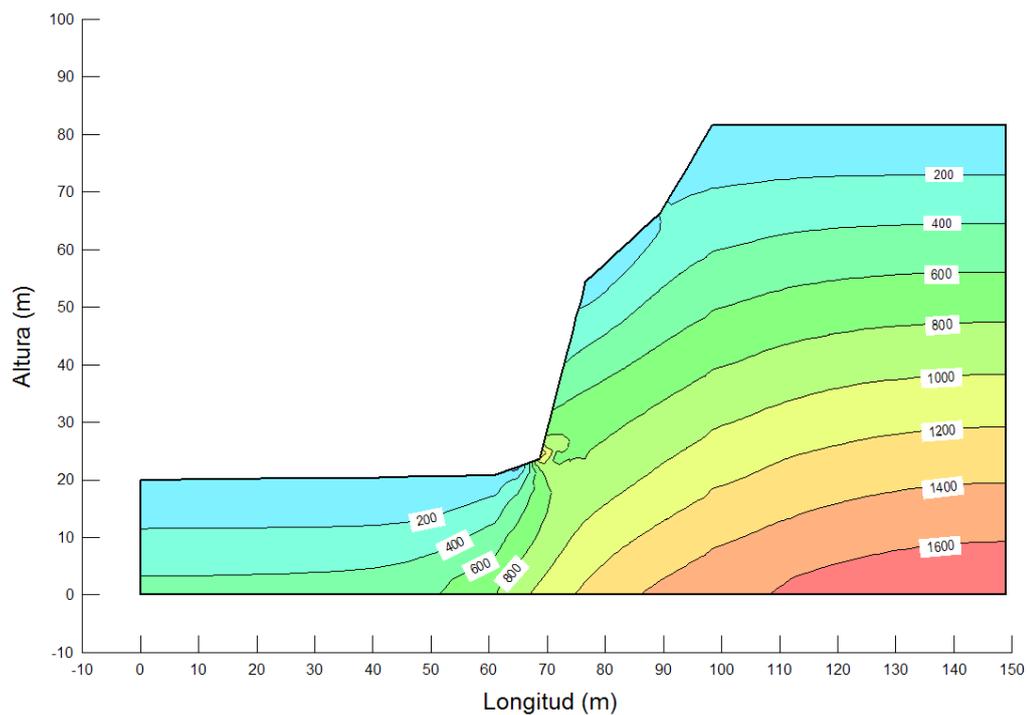


Figura 5-2
Esfuerzos verticales totales estáticos iniciales en la Sección B
(unidades en MPa)



5.2 Análisis dinámico con QUAKE/W

Con los esfuerzos estáticos iniciales calculados se aplicó el sismo al modelo a través de los registros sísmicos (tanto horizontal como vertical) de aceleraciones. De esta forma se generaron distribuciones de esfuerzos en la estructura para cada *time step* del registro aplicado. QUAKE/W permite graficar la aceleración (velocidad, desplazamiento, etc.) de ciertos nodos seleccionados previamente (nodos históricos) a través del tiempo. De esta forma se pudo comprobar que la convergencia de la iteración realizada para resolver el modelo fuera buena, ya que nodos históricos en una misma línea vertical en el modelo deberían tener gráficas de aceleraciones vs. tiempo similares (magnitudes diferentes pero forma de las gráficas similares).

QUAKE/W permite además determinar posibles zonas de licuefacción en el modelo, pero al no existir napa freática en los mismos, este escenario no fue tomado en cuenta en los análisis realizados.

5.3 Análisis dinámico de estabilidad por elementos finitos

Para realizar los análisis de estabilidad por elementos finitos en SLOPE/W, se incluyó en dicha aplicación la distribución de esfuerzos generados en el modelo a causa de la acción vertical y horizontal del sismo, obtenidos en QUAKE/W. Una vez hecho esto se evaluó el FS de 216 superficies de falla (definidas con la opción Entry and Exit) para encontrar las más críticas.

6 RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS

Son dos los tipos de resultados los que se pueden obtener de SLOPE/W al final del análisis dinámico de estabilidad de taludes por elementos finitos: la variación del factor de seguridad durante el sismo y la deformación permanente que sufrirá la estructura, ambos para cada una de las superficies de falla analizadas. De las 216 superficies de falla generadas en los modelos se eligió dos, consideradas críticas, para analizar la variación del factor de seguridad y la deformación en la falla. Los criterios para seleccionar las superficies de falla críticas fueron: la falla que presente los menores factores de seguridad a lo largo de todo el sismo y la forma de la superficie de falla (se buscó una falla que atravesase al talud en toda su altura y otra que abarcara aproximadamente la mitad del talud). Las Figuras 6-1 a la 6-4 muestran las dos superficies de falla seleccionadas en las secciones A y B.

Figura 6-1
Superficie de falla que atraviesa al talud en toda su longitud
(Sección A, superficie de falla #57)

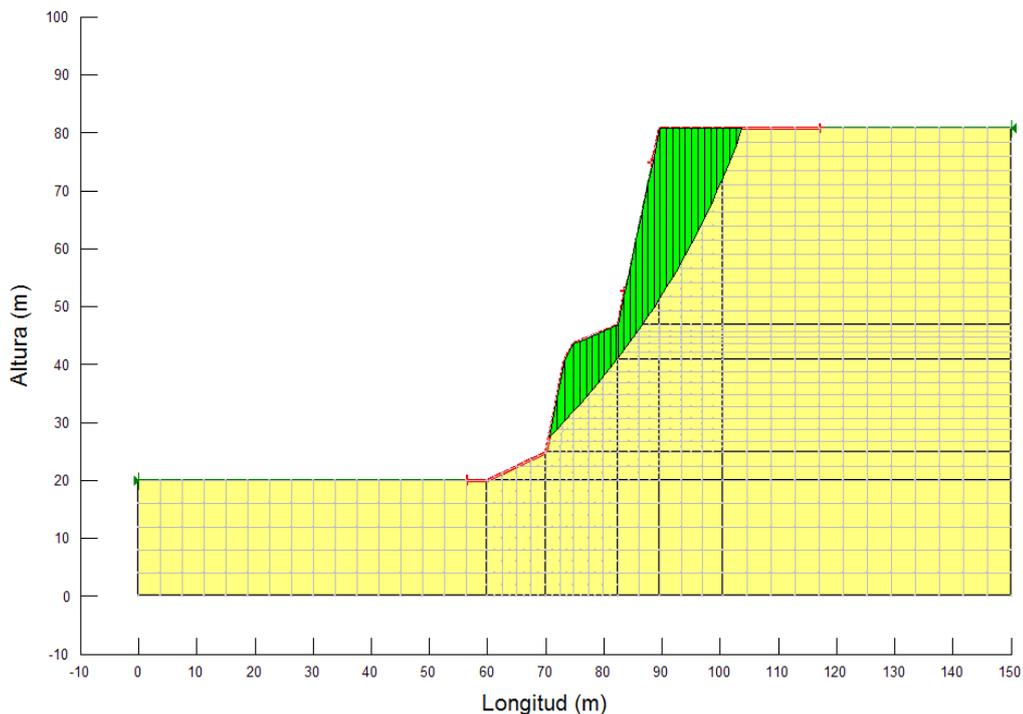


Figura 6-2
Superficie de falla que abarca aproximadamente la mitad del talud
(Sección A, superficie de falla #86)

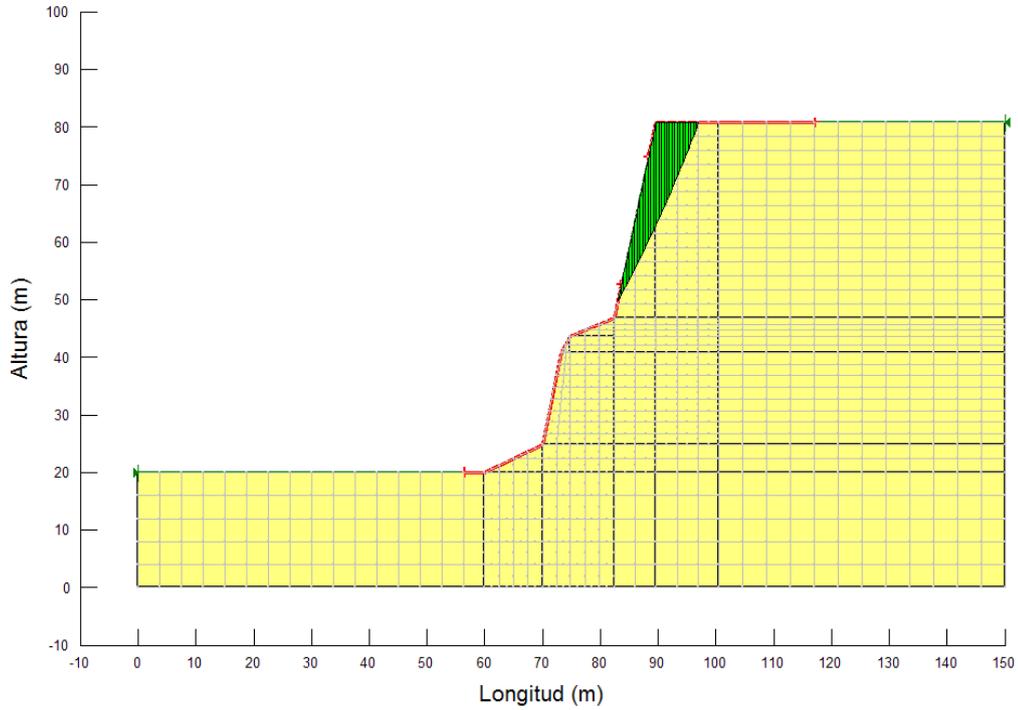


Figura 6-3
Superficie de falla que atraviesa al talud en toda su longitud
(Sección B, superficie de falla #56)

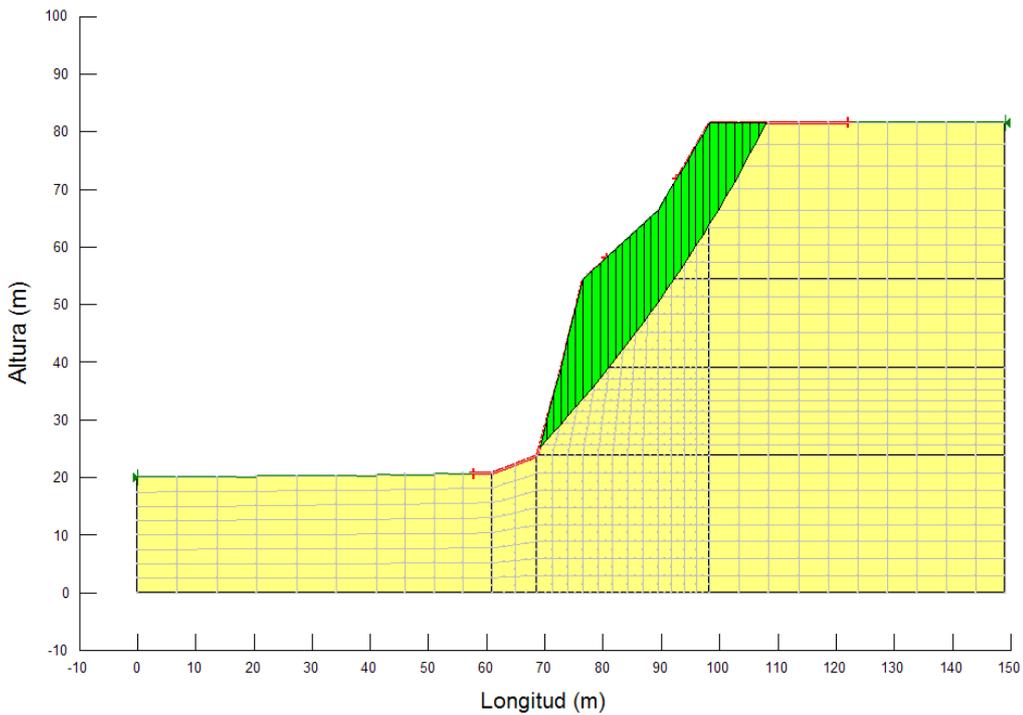
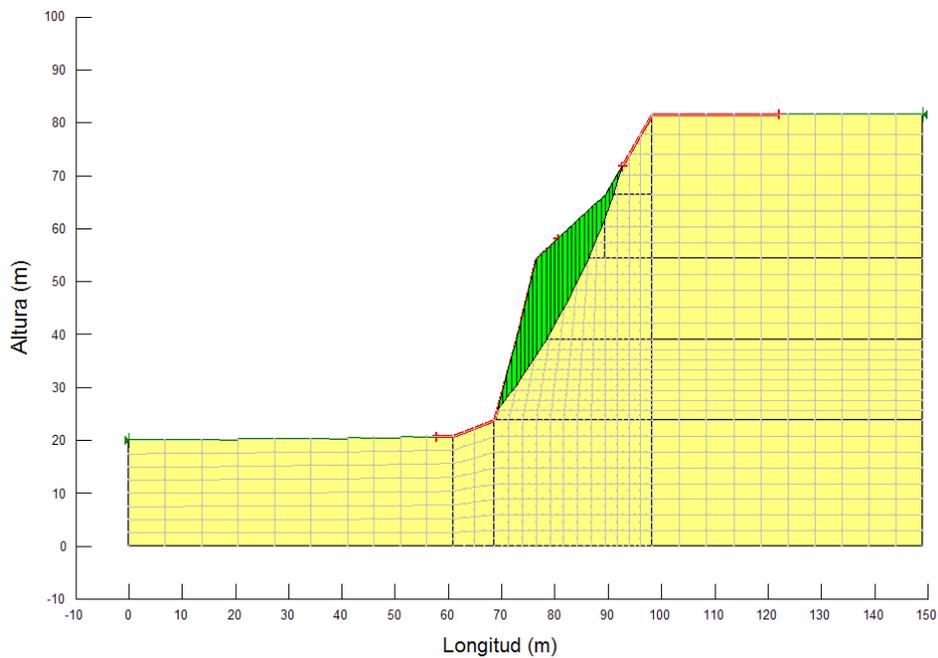


Figura 6-4
Superficie de falla que abarca aproximadamente la mitad del talud
(Sección B, superficie de falla #39)



6.1 Factores de seguridad durante el sismo

A continuación se presentan las gráficas de la variación del factor de seguridad para las superficies de falla consideradas críticas y para las dos secciones analizadas, bajo el efecto de las componentes horizontal y vertical de cada uno de los cuatro sismos.

Figura 6-5
Resultados de Factor de Seguridad vs. Tiempo para la superficie de falla #57 de la
Sección A, bajo el efecto del sismo del 17 de Octubre de 1966

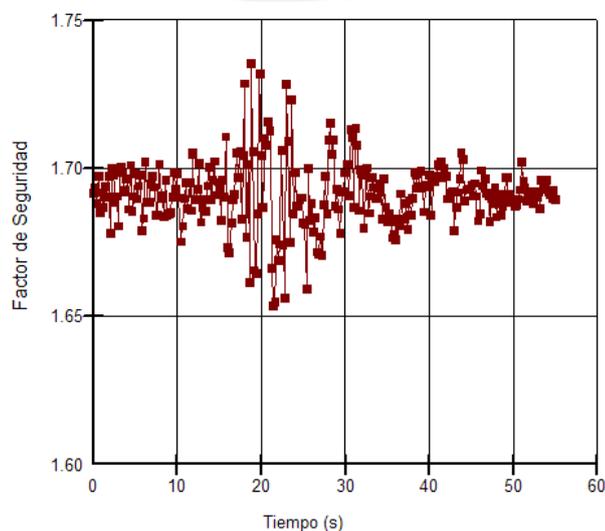


Figura 6-6
Resultados de Factor de Seguridad vs. Tiempo para la superficie de falla #86 de la Sección A, bajo el efecto del sismo del 17 de Octubre de 1966

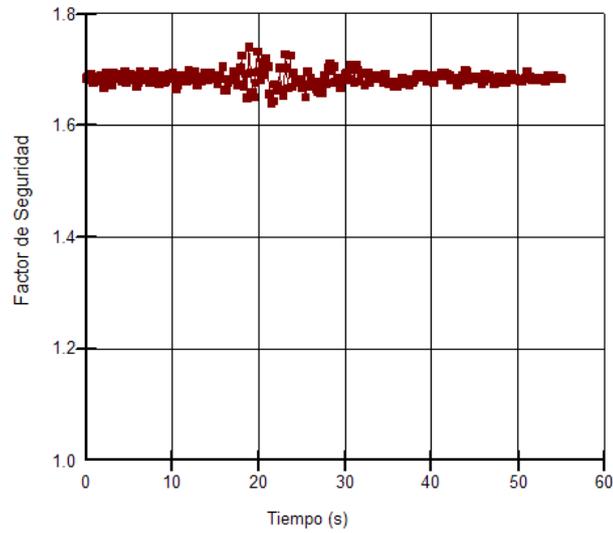


Figura 6-7
Resultados de Factor de Seguridad vs. Tiempo para la superficie de falla #57 de la Sección A, bajo el efecto del sismo del 31 de Mayo de 1970

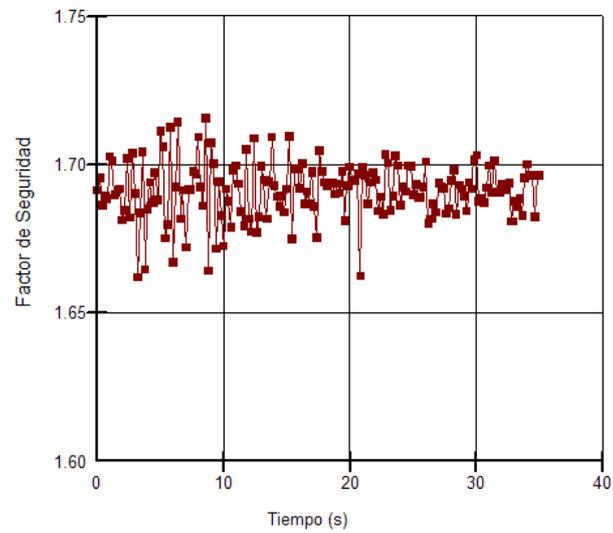


Figura 6-8
Resultados de Factor de Seguridad vs. Tiempo para la superficie de falla #86 de la Sección A, bajo el efecto del sismo del 31 de Mayo de 1970

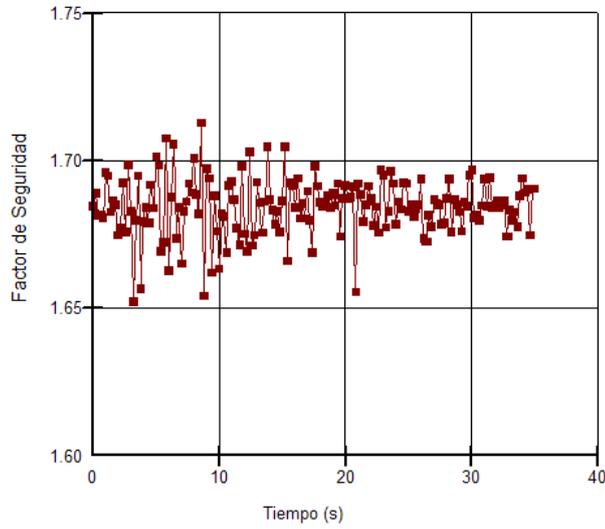


Figura 6-9
Resultados de Factor de Seguridad vs. Tiempo para la superficie de falla #57 de la Sección A, bajo el efecto del sismo del 3 de Octubre de 1974

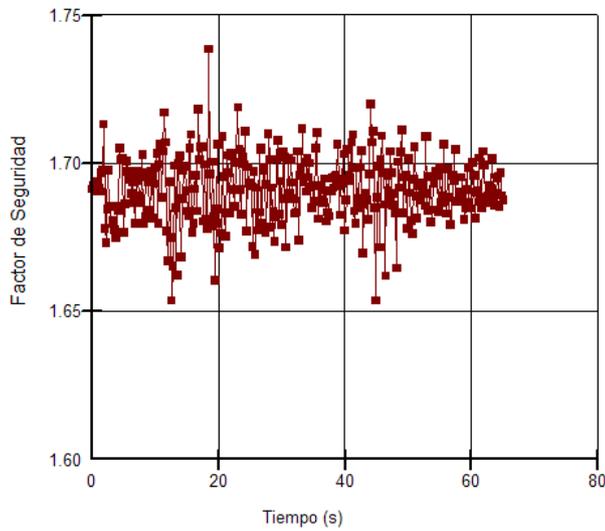


Figura 6-10
Resultados de Factor de Seguridad vs. Tiempo para la superficie de falla #86 de la Sección A, bajo el efecto del sismo del 3 de Octubre de 1974

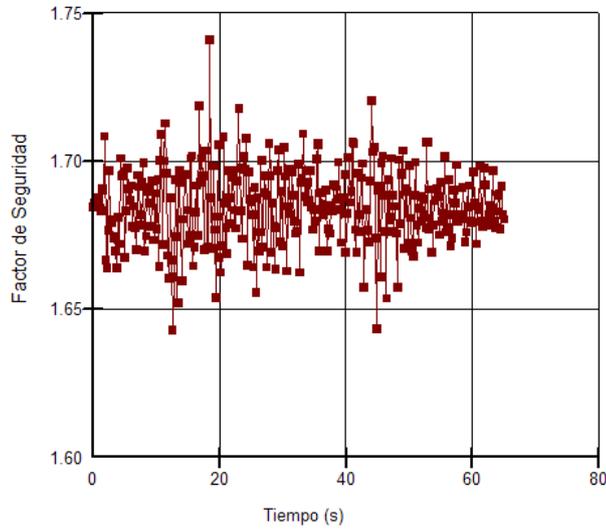


Figura 6-11
Resultados de Factor de Seguridad vs. Tiempo para la superficie de falla #57 de la Sección A, bajo el efecto del sismo del 20 de Octubre de 2006

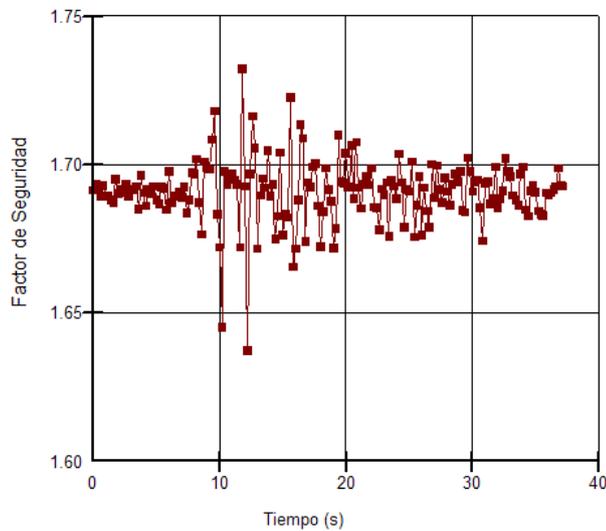


Figura 6-12
Resultados de Factor de Seguridad vs. Tiempo para la superficie de falla #86 de la Sección A, bajo el efecto del sismo del 20 de Octubre de 2006

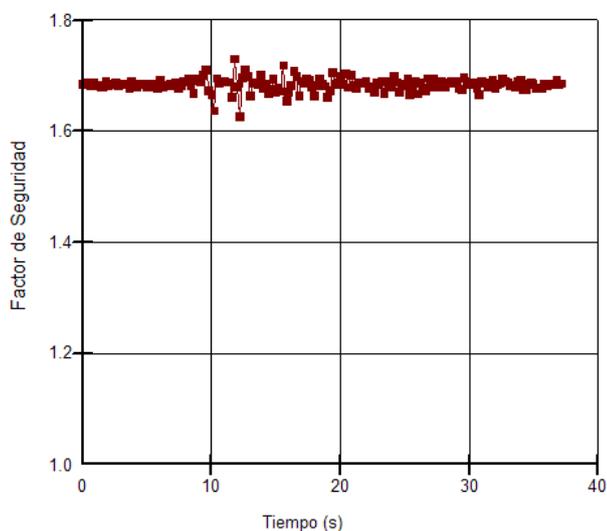


Figura 6-13
Resultados de Factor de Seguridad vs. Tiempo para la superficie de falla #56 de la Sección B, bajo el efecto del sismo del 17 de Octubre de 1966

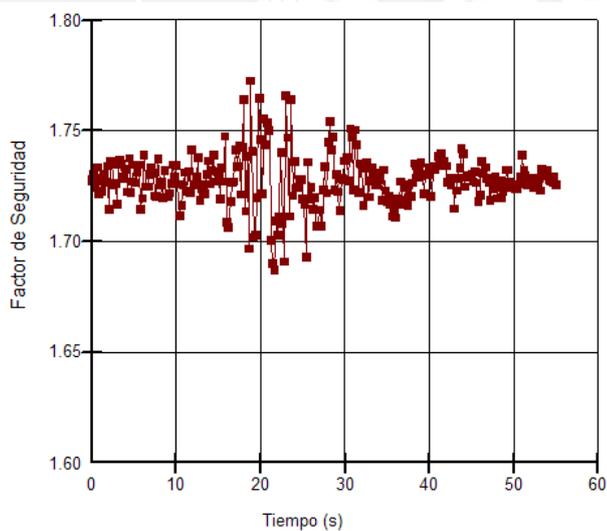


Figura 6-14
Resultados de Factor de Seguridad vs. Tiempo para la superficie de falla #39 de la Sección B, bajo el efecto del sismo del 17 de Octubre de 1966

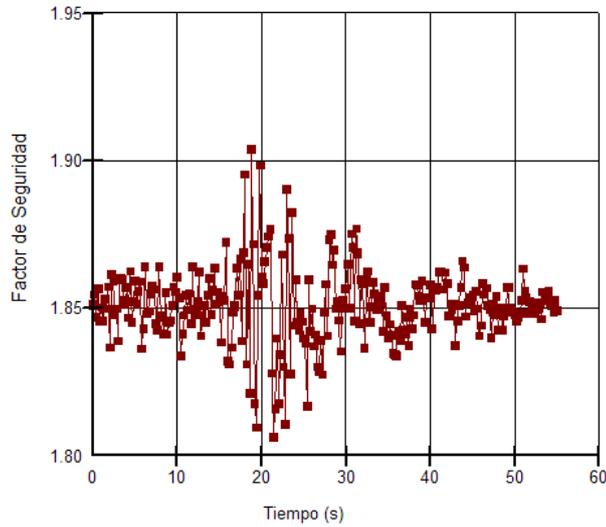


Figura 6-15
Resultados de Factor de Seguridad vs. Tiempo para la superficie de falla #56 de la Sección B, bajo el efecto del sismo del 31 de Mayo de 1970

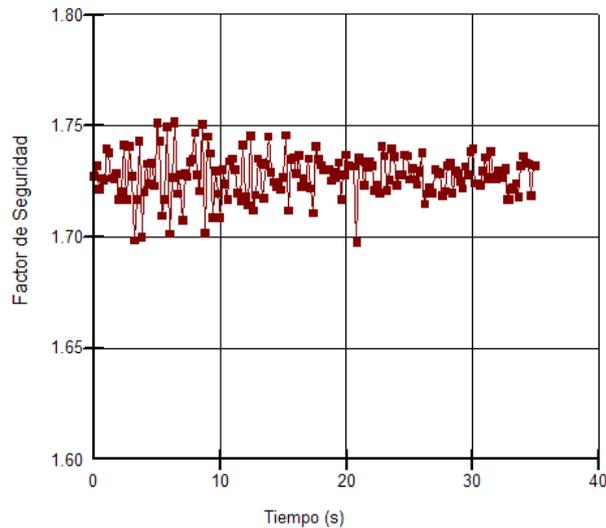


Figura 6-16
Resultados de Factor de Seguridad vs. Tiempo para la superficie de falla #39 de la Sección B, bajo el efecto del sismo del 31 de Mayo de 1970

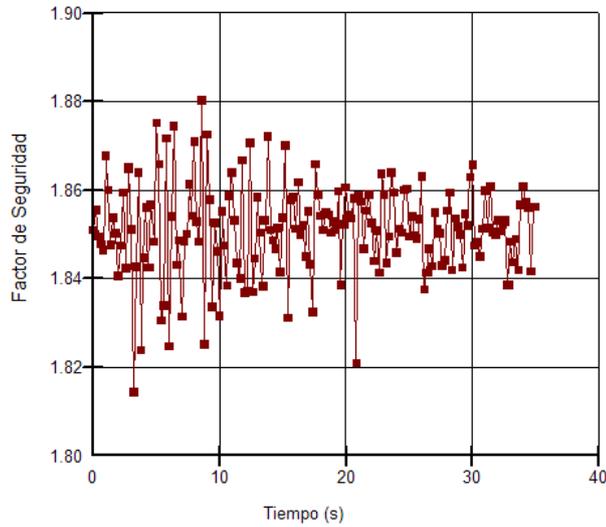


Figura 6-17
Resultados de Factor de Seguridad vs. Tiempo para la superficie de falla #56 de la Sección B, bajo el efecto del sismo del 3 de Octubre de 1974

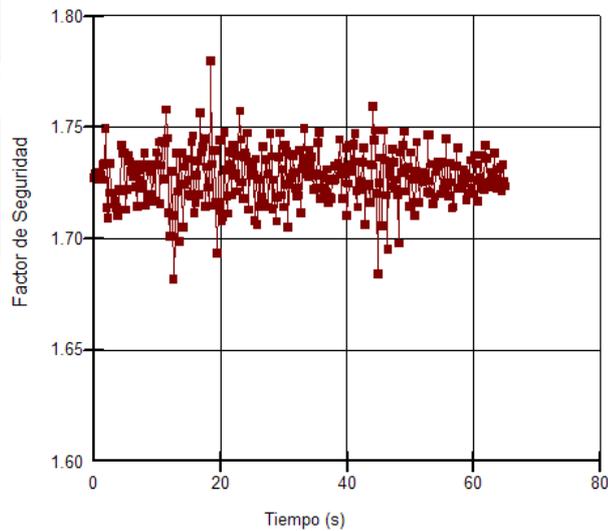


Figura 6-18
Resultados de Factor de Seguridad vs. Tiempo para la superficie de falla #39 de la Sección B, bajo el efecto del sismo del 3 de Octubre de 1974

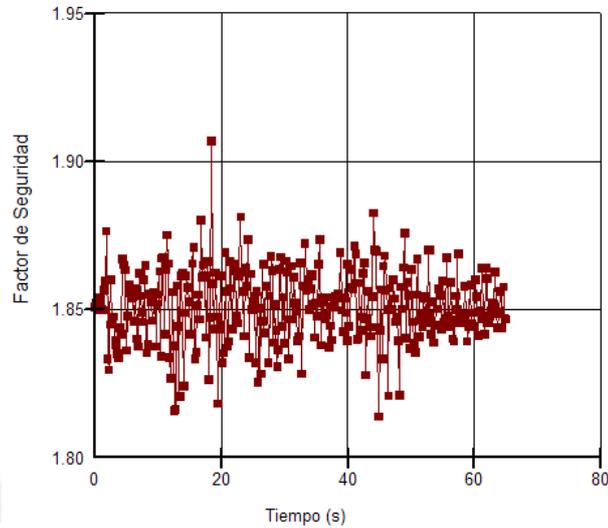


Figura 6-19
Resultados de Factor de Seguridad vs. Tiempo para la superficie de falla #56 de la Sección B, bajo el efecto del sismo del 20 de Octubre de 2006

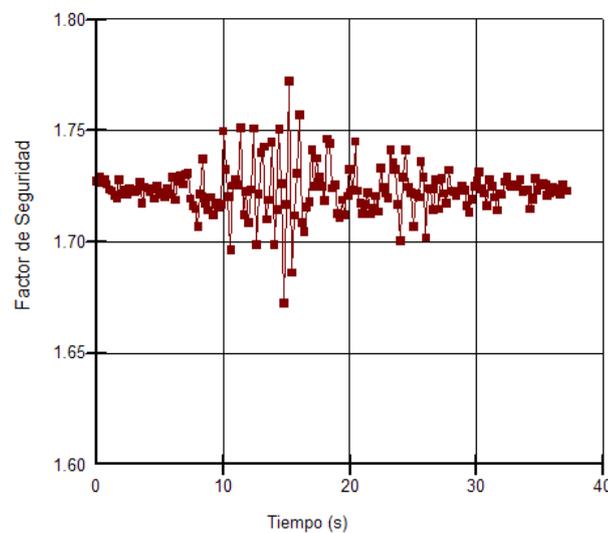
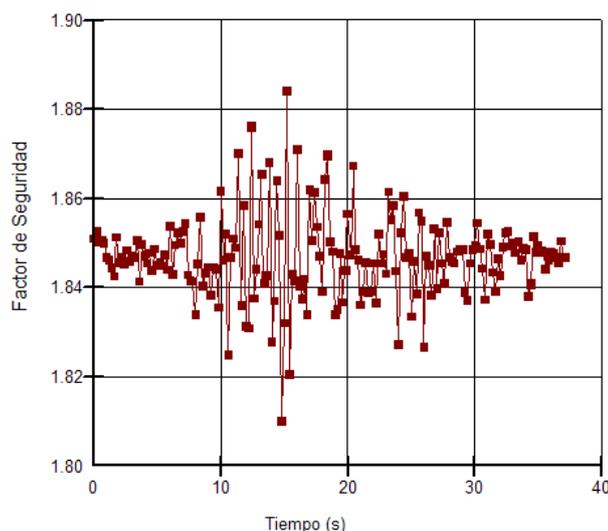


Figura 6-20
Resultados de Factor de Seguridad vs. Tiempo para la superficie de falla #39 de la Sección B, bajo el efecto del sismo del 20 de Octubre de 2006



6.2 Deformación permanente

El procedimiento que utiliza el programa para estimar las deformaciones permanentes se basa en los conceptos del análisis del bloque deslizante de Newmark. Este análisis es aplicable para terraplenes de enrocado, grava densa o materiales cuyas partículas no se debiliten en exceso durante el movimiento, ya que el factor desestabilizante deben ser las fuerzas de inercia y no el fractura de las partículas del material.

El procedimiento consiste en realizar un análisis de estabilidad en cada instante del sismo y calcular el factor de seguridad para diferentes superficies de falla. Los factores de seguridad menores a 1 implicarán un movimiento de la masa sobre la superficie de falla y por lo tanto habrá una pequeña deformación permanente en ese instante. La suma de cada pequeña deformación permanente durante el sismo da como resultado la máxima deformación permanente de la falla, al final del movimiento. La deformación calculada de esta manera será paralela a la falla que la origina.

En el caso de las secciones A y B analizadas en esta tesis, bajo el efecto de cada uno de los sismos de diseño, no existe deformación permanente en ninguna de las 216 fallas analizadas, pues en ningún momento del sismo el factor de seguridad fue menor a 1.

7 COMENTARIOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El aspecto más importante al momento de realizar un análisis dinámico de estabilidad de taludes es tener en cuenta que se está analizando un modelo numérico de la realidad. Los resultados que se obtengan serán tan buenos como el modelo del cual provienen, con todas las limitaciones y suposiciones del caso, y serán solo los resultados de un modelo numérico, no de la estructura real.

Debe existir un equilibrio entre la complejidad de cada uno de los aspectos de un modelo numérico. La complejidad del modelo debe estar en función de los resultados que se deseen obtener y de la confianza que se tenga en la información utilizada (propiedades de los materiales, posición de la napa freática, etc.).

Además, es muy fácil forzar al modelo a arrojar los resultados que uno espera obtener, ya sea modificando las propiedades de los materiales (muchas veces asumidas en base a bibliografía publicada), la geometría del modelo (complicándola o simplificándola excesivamente) o incluso asumiendo escenarios que no necesariamente son válidos para el análisis que se desea realizar. Es muy importante tener plena confianza en la información utilizada para la construcción del modelo numérico y en el modelo mismo, así como interpretar sus resultados de manera adecuada. En general, un modelo numérico no espera predecir con total exactitud lo que sucederá en la realidad, sino estimar el comportamiento de las estructuras analizadas y obtener resultados que permitan sacar conclusiones más precisas de lo que ocurre realmente en campo. En la medida de lo posible, es recomendable confirmar los resultados (el orden de magnitud y/o el sentido de los mismos por lo menos) con cálculos manuales sencillos.

De los resultados de los análisis dinámicos de estabilidad de taludes por elementos finitos realizados para esta tesis se puede concluir que:

- Los factores de seguridad en ningún momento del sismo caen por debajo de 1, por lo que se puede concluir que los taludes son estables bajo las condiciones analizadas, es decir, para los parámetros geotécnicos asumidos para los materiales, la geometría modelada y los registros sísmicos utilizados.
- Los factores de seguridad obtenidos por el método de elementos finitos con el análisis estático inicial concuerdan con los resultados del análisis de estabilidad estática convencional (método de Spencer). Si bien es cierto los primeros suelen ser un poco más altos que los segundos, esto se debe a que el método convencional

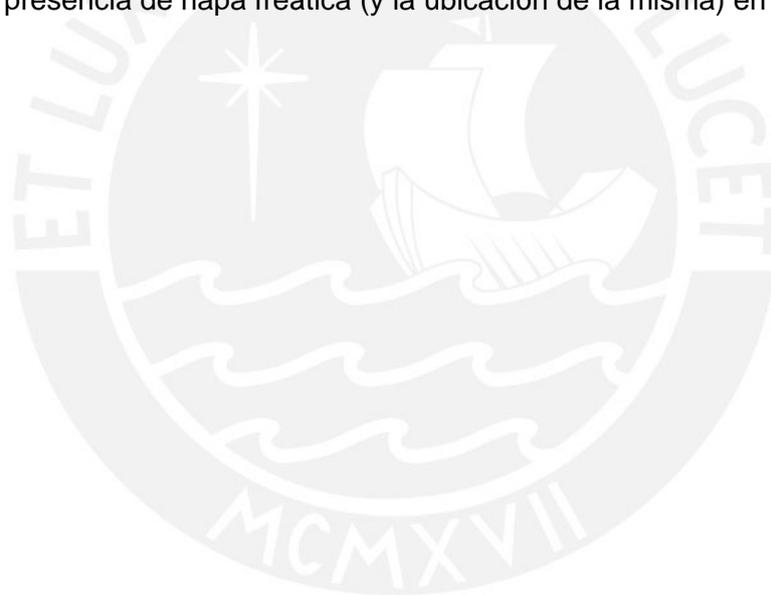
realiza sus formulaciones de manera conservadora. La diferencia entre los factores de seguridad radica en la concentración de esfuerzos de corte que ocurren en algunas zonas del talud (al pie y en general donde haya un cambio brusco de pendiente). Esta concentración de esfuerzos no se ve reflejada en los análisis convencionales y de ahí proviene la diferencia en los resultados. Esta diferencia variará dependiendo de la posición de la superficie de falla analizada respecto a las zonas de concentración de esfuerzos (mientras más lejos estén unas de otras, menor será la diferencia en los factores de seguridad).

- Los registros sísmicos que más logran reducir el factor de seguridad en los modelos son el del 17 de Octubre de 1966 y el sismo escalado del 6 de Octubre del 2006. Esto se explica debido a que los registros de estos eventos son los que tienen las mayores aceleraciones pico transversales (0.27g y 0.26 g, respectivamente), así como las mayores aceleraciones pico verticales (0.10g en ambos casos).
- Las deformaciones obtenidas en los análisis dinámicos se encuentran dentro de lo esperado, pues los taludes analizados pasaron, en la vida real, por los sismos utilizados para los análisis sin presentar deformaciones ni fallas considerables.
- Se puede concluir, a partir de los resultados obtenidos, que se necesitará de un sismo de mayor magnitud máxima para que los taludes analizados sufran una deformación considerable.
- La diferencia entre los factores de seguridad obtenidos en los análisis pseudo-estáticos de la tesis “Estabilidad de Taludes en la Costa Verde, Distrito de Miraflores” (FS críticos < 1 para una aceleración pico de 0.25g) y la variación de los factores de seguridad obtenidos en los análisis dinámicos de esta tesis (los FS nunca bajaron de 1.6), no puede llevar a una conclusión sobre la validez de uno u otro método. No existe un estudio que haya comparado alguna vez los resultados de un análisis pseudo-estático de estabilidad con los de un análisis dinámico de estabilidad por elementos finitos realizado con GeoStudio 2004, partiendo de que ambos tienen objetivos y formulaciones diferentes. Por este motivo no resulta válido comparar los resultados de los análisis pseudo-estáticos obtenido en la tesis “Estabilidad de Taludes en la Costa Verde, Distrito de Miraflores” con los de esta tesis.

A raíz de los diferentes modelos analizados se pudo comprobar que, debido a las formulaciones que utiliza SLOPE/W para el cálculo de las deformaciones permanentes, si se analiza dos estructuras similares (con iguales propiedades de los materiales, posición de la napa freática, ante un mismo registro sísmico pero con alturas diferentes), el programa arroja como resultado mayores deformaciones para estructuras más

pequeñas. Tras discutir largamente este tema con los desarrolladores del programa, se llegó a la conclusión de que los resultados se debían tomar de manera que indiquen el orden de magnitud de la deformación y no el valor exacto de ésta. Esto confirma que los resultados del análisis de un modelo numérico no deben ser tomados como irrefutables, sino que se les debe utilizar para obtener un entendimiento general del comportamiento de la estructura analizada y para sacar conclusiones más precisas que permitan interpretar mejor lo que sucede en la realidad.

Queda pendiente, para posteriores tesis, realizar un análisis de regresión (back analysis) con el método dinámico de estabilidad por elementos finitos para confirmar los valores de propiedades de los materiales obtenidos con métodos de equilibrio límite. Además, queda pendiente también analizar el efecto que tendrían lentes de material fino y el espesor de los mismos, en la estabilidad dinámica de los taludes, así como el efecto que tendría la presencia de napa freática (y la ubicación de la misma) en los taludes.



8 REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

- 1 *Alonso Vargas*, 2007. Tesis: Estabilidad de Taludes en la Costa Verde, Distrito de Miraflores. Asesor: Manuel Olcese. Pontificia Universidad Católica del Perú, Departamento de Ingeniería Civil. Lima, Perú.
- 2 Página web CISMID con registros sísmicos utilizados:
http://www.cismid-uni.org/redacis/b_usgs.php
- 3 *John Krahn*, 2004. Dynamic Modeling with QUAKE/W: An Engineering Methodology. First Edition, June 2004.
- 4 *John Krahn*, 2004. Stability Modeling with SLOPE/W: An Engineering Methodology. First Edition, June 2004.
- 5 *Steven L. Kramer*, 1996. Geotechnical Earthquake Engineering.
- 6 *Ishibashi y Zhang*, 1993. Unified Dynamic Shear Moduli and Damping Ratios of Sand and Clay. Soils and Foundations, Vol. 33, No. 1, pág 182-191.
- 7 Páginas web USGS (información capítulo 3.0 Sismicidad):
 - Página web principal:
<http://www.usgs.gov>
 - Sismo 17/10/1966:
http://earthquake.usgs.gov/regional/world/events/1966_10_17.php
 - Sismo 31/5/1970:
http://earthquake.usgs.gov/regional/world/events/1970_05_31.php
 - Terremotos del Perú:
<http://earthquake.usgs.gov/regional/world/peru/history.php>
 - Mapa de riesgo sísmico del Perú:
<http://earthquake.usgs.gov/regional/world/peru/gshap.php>
 - Mapa de densidad sísmica del Perú:
<http://earthquake.usgs.gov/regional/world/peru/density.php>
- 8 *Moses Karakouzian, Mario A. Candia, Richard V. Wyman, Mervyn D. Watkins y Nick Hudyma*, 1997. Geology of Lima, Peru. Environmental / Engineering Geoscience, Vol. III, No. 1, Spring 1997.
- 9 *C. B. Crouse, Y. K. Vyas y B. A. Schell*, 1988. Ground Motions from Subduction-zone Earthquakes. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 78, No. 1, pág. 1-25.
- 10 *A. Espinoza, L. Casaverde, J. Michel, J. Alva, J. Vargas-Newman*, 1985. Catálogo Sísmico de Perú (1500-1982). Instituto Geográfico Nacional - España, US Geological Survey, Universidad Católica del Perú, Universidad Nacional de Ingeniería.

- 11 *H.B. Seed, R.T. Wong, I.M. Idriss, and K. Tokimatsu*, 1984. Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils. Earthquake Engineering Research Center, University of California (Berkeley), Report No. UCB/EERC-84/14.
- 12 *Hunt, R.E.*, 1986. Geotechnical Engineering Analysis and Evaluation. McGraw-Hill Series in Geotechnical Engineering, McGraw-Hill, Inc. Valores de módulo de Poisson (Tabla 4.4, pág. 134).
- 13 *P. Repetto, I. Arango, H.B. Seed*, 1980. Influence of site characteristics on building damage during the October 3, 1974 Lima earthquake. Earthquake Engineering Research Center, University of California (Berkeley), Report No. UCB/EERC-80/14.
- 14 *S.K. Haigh, B. Ghosh, S.P.G. Madabhushi*, 2005. Importance of Time Step Discretization for Nonlinear Dynamic Finite Element Analysis.

