

9 Amenazas Sísmicas

9.1 INTRODUCCION

Los movimientos sísmicos pueden activar deslizamientos de tierra. En el caso de un sismo existe el triple efecto de aumento de esfuerzo cortante, disminución de resistencia por aumento de la presión de poros y deformación asociados con la onda sísmica; pudiéndose llegar a la falla al cortante y hasta la licuación, en el caso de suelos granulares saturados.

Los factores que deben tenerse en cuenta para el análisis de taludes y laderas expuestos a eventos sísmicos son los siguientes:

- El valor de las fuerzas sísmicas aplicadas sobre las masas de suelo potencialmente deslizables.
- La disminución de la resistencia debida a las cargas vibratorias, las cuales inducen deformaciones cíclicas, esta resistencia puede disminuirse en más del 50% en suelos sensitivos y en la mayoría de los casos, la disminución de resistencia puede llegar a un 20% durante el sismo (Makdisi y Seed, 1978).
- El aumento de presión de poros especialmente, en suelos limosos y arenas finas, en los cuales se puede producir una disminución de resistencia tal que produzca el fenómeno de licuación.
- El aumento de fuerza sísmica generado por la amplificación en los mantos de suelos blandos.
- La posibilidad de ocurrencia de fenómenos de resonancia relacionados con la similitud entre la frecuencia natural de vibración del talud y la del evento sísmico.
- La magnitud de las deformaciones en la masa de suelo.

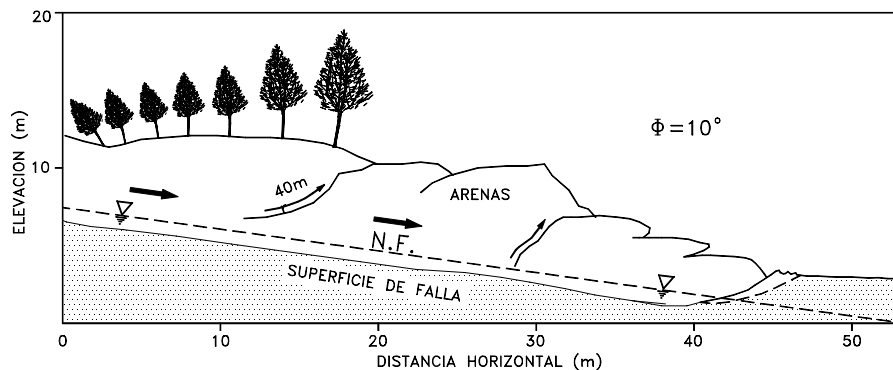


Figura 9.1 Deslizamiento de Takarazuka en el Japón activado por un sismo.

Las situaciones adquieren un alto grado de criticidad cuando se combinan altas susceptibilidades, debidas a factores topográficos, geológicos, climáticos y sísmicos. Un caso ocurrido fue el de la avalancha de Páez en Colombia en 1994, en la cual un sismo de magnitud 6.4, ocurrió justo en una temporada de intensas lluvias, encontrándose los suelos residuales saturados e intensamente meteorizados en un área de fuertes pendientes topográficas y se produjo el deslizamiento total de áreas muy grandes.

9.2 SISMICIDAD

Cuando se produce la fractura de la roca en una zona de falla geológica, la energía liberada es radiada en todas las direcciones. La fuente del movimiento o zona de liberación de energía no es generalmente, un punto sino una línea o un área comúnmente alargada en la dirección de la falla. Los sismos que generalmente producen un mayor daño son los sismos relativamente superficiales.

El área de superficie inmediatamente encima del área de liberación de energía se le denomina epicentro o área epicentral.

La gran mayoría de los grandes deslizamientos y agrietamientos del suelo de gran magnitud corresponden al área epicentral y van disminuyendo a medida que el punto considerado se aleja del área epicentral y la intensidad del sismo disminuye.

Existen dos parámetros importantes para designar el tamaño y la fuerza de un sismo que son la magnitud y la intensidad.

Magnitud

La magnitud es una medida cuantitativa e instrumental del tamaño del evento, relacionada con la energía sísmica liberada durante el proceso de ruptura en la falla. La magnitud es una constante única que se asigna a un sismo dado y es independiente del sitio de observación.

Richter definió la magnitud de sismos locales como: El logaritmo en base 10 de la máxima amplitud de la onda sísmica, expresada en milésimas de milímetro (micrones), registrada en un sismómetro estandar a una distancia de 100 kilómetros del epicentro del evento.

Tabla 9.1 Posibilidad de deslizamientos causados por sismos (Keefer, 1984)

Magnitud del sismo	Tipo de deslizamiento producido
4.0	Caídos de roca, deslizamientos de roca, caídos de suelo y alteración de masas de suelo.
4.5	Deslizamiento de translación, rotación y bloques de suelo.
5.0	Flujos de suelo, esparcimientos laterales, deslizamientos subacuáticos.
6.0	Avalanchas de roca.
6.5	Avalanchas de suelo

Intensidad

La intensidad sísmica es un concepto que se aplica a la identificación del grado de destrucción o efectos locales de un terremoto.

La intensidad, que es una medida relativa de la fuerza sísmica en un punto determinado, depende de la magnitud del sismo, la profundidad de la zona de liberación de energía, de las características físicas locales del sitio y la distancia del sitio al área epicentral. Existen fórmulas para relacionar la magnitud y la intensidad como la propuesta por Gutenberg y Richter (1954):

$$\text{Magnitud} = 1 + \frac{2}{3} \text{Intensidad}$$

Esta fórmula, no tiene en cuenta la profundidad de los temblores pero muestra que existe una relación entre las dos formas de medir los sismos.

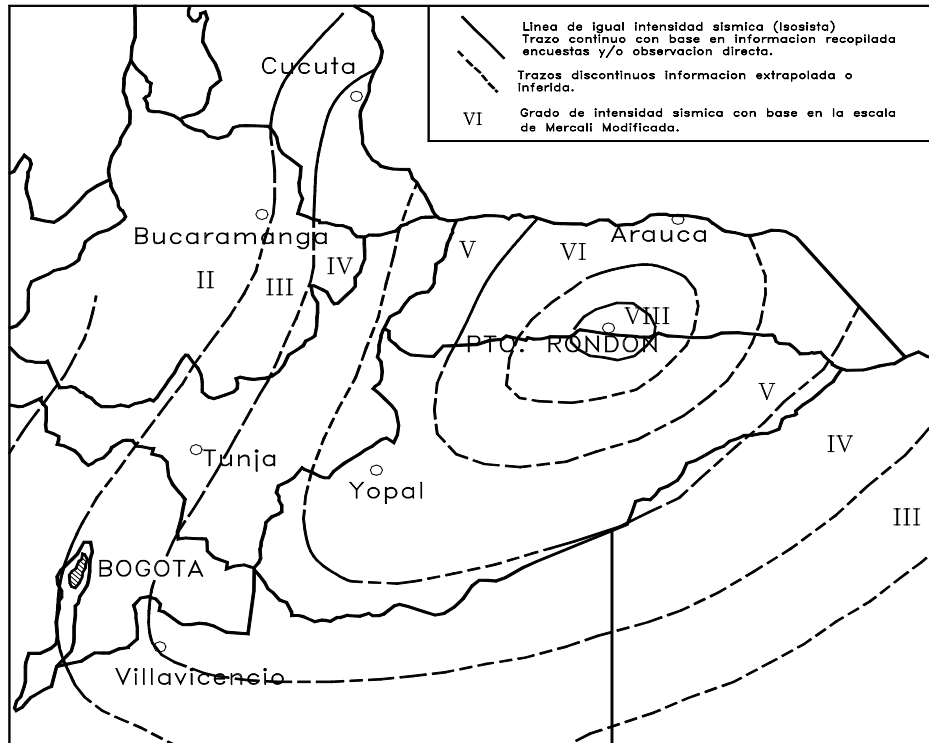


Figura 9.2 Mapa de Isosistas del Sismo de Puerto Rondón Colombia 1993 (Romero y otros 1994)

La ocurrencia de un deslizamiento relacionado con un sismo depende de la intensidad del sismo y de otros factores topográficos geológicos e Hidrogeológicos.

El efecto de un evento sísmico conduce en ocasiones a la desestabilización de un talud. Es evidente que la incidencia de casos de inestabilidad aumenta con la magnitud del sismo, especialmente, cuando la magnitud del sismo es de seis o mayor y la fuente de liberación de energía es poco profunda, caso en el cual la posibilidad de fallas por licuación aumenta.

Tabla 9.2 Escala de intensidad Mercalli Modificada

Grado	Descripción
I	No es sentido por las personas, registrado por los instrumentos sismográficos.
II	Sentido solo por pocas personas en reposo, especialmente en los pisos superiores, objetos suspendidos pueden oscilar.
III	Sentido en el interior de las edificaciones, especialmente en pisos superiores, pero muchos pueden no reconocerlo como temblor, vibración semejante a la producida por el paso de un vehículo liviano, objetos suspendidos oscilan.
IV	Objetos suspendidos oscilan visiblemente, vibración semejante a la producida por el paso de un vehículo pesado, vehículos estacionados se bambolean, cristalería y vidrios suenan, puertas y paredes de madera crujen.
V	Sentido aún en el exterior de los edificios, permite estimar la dirección de las ondas, personas dormidas se despiertan, el contenido líquido de recipientes y tanques es perturbado y se puede derramar, objetos inestables son desplazados, las puertas giran y se abren o cierran, relojes de péndulo se paran.
VI	Sentido por todas las personas, muchos sufren pánico y corren hacia el exterior, se tiene dificultad en caminar establemente, vidrios y vajillas se quiebran, libros y objetos son lanzados de los anaqueles y estantes, los muebles son desplazados o volcados, el revoque y enlucido de mortero de baja calidad y mampostería tipo D se fisuran, campanas pequeñas tañen.
VII	Se tiene dificultad en mantenerse parado, percibido por los conductores de vehículos en marcha, muebles se rompen, daños y colapso de mampostería tipo D, algunas grietas en mampostería tipo C, las chimeneas se fracturan a nivel de techo, caída del revoque de mortero, tejas, cornisas y parapetos sin anclajes, algunas grietas en mampostería de calidad media, campanas grandes tañen, ondas en embalses y depósitos de agua.
VIII	La conducción de vehículos se dificulta, daños de consideración y colapso parcial de mampostería tipo C, algún daño a mampostería tipo B, ningún daño en mampostería tipo A, caída del revoque de mortero y de algunas paredes de mampostería, caída de chimeneas de fábricas, monumentos y tanques elevados, algunas ramas de árboles se quiebran, cambio en el flujo o temperatura de pozos, grietas en terreno húmedo y en taludes inclinados.
IX	Pánico general, construcciones de mampostería tipo D totalmente destruidas, daño severo y aún colapso de mampostería tipo C, daño de consideración en mampostería tipo B, daño a fundaciones, daños y colapso de estructuras aporricadas, daños de embalses y depósitos de agua, ruptura de tubería enterrada, grietas significativas visibles en el terreno.
X	La mayoría de las construcciones de mampostería y a base de pórticos destruidas, algunas construcciones de madera de buena calidad dañadas, puentes destruidos, daño severo a represas, diques y terraplenes, grandes deslizamientos de tierra, el agua se rebasa en los bordes de ríos, lagos y embalses, rieles de ferrocarril deformados ligeramente.
XI	Los rieles de ferrocarril deformados severamente, ruptura de tuberías enterradas que quedan fuera de servicio
XII	Destrucción total, grandes masas de roca desplazadas, las líneas de visión óptica distorsionadas, objetos lanzados al aire.

La mayoría de los grandes deslizamientos están relacionados con eventos sísmicos de gran magnitud en el cinturón Circun Pacífico de gran magnitud y foco poco profundo.

La ocurrencia de una falla en materiales secos por acción de un sismo es particularmente grave en taludes de gran altura por el aumento de esfuerzos en el pie y la falla a tensión en la mitad superior del talud. Es común que después de un sismo fuerte aparezcan grietas de tensión en taludes de gran altura.

La dificultad que se presenta es la carencia de sistemas que permitan incorporar el análisis sísmico a los métodos matemáticos de análisis de taludes aplicables a suelos residuales.

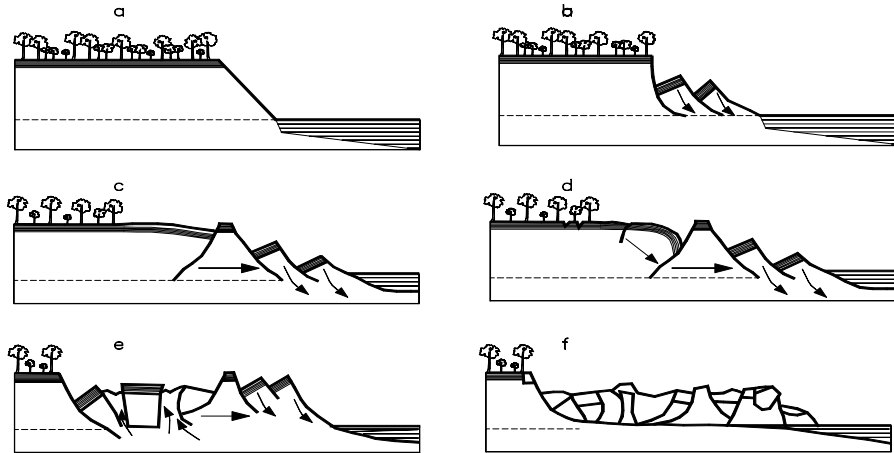


Figura 9.3 Deslizamiento por acción de un sismo en Alaska -1964.

Aceleración pico

La aceleración producida por un sismo, la cual está relacionada con la intensidad del movimiento en un determinado sitio es el parámetro más comúnmente utilizado para el análisis sísmico de taludes.

La aceleración máxima horizontal es el valor absoluto de la aceleración horizontal obtenida de un acelerograma, tomando la suma de dos componentes ortogonales. Las aceleraciones verticales han recibido una atención menor que las horizontales debido a que se supone que su efecto sobre las estructuras es menor. Generalmente, se asume que la aceleración pico vertical es los dos tercios de la aceleración pico horizontal; sin embargo, en sitios muy cercanos al epicentro las aceleraciones verticales adquieren valores mayores y en sitios muy alejados, valores mucho menores.

Los movimientos con picos altos de aceleración no son necesariamente más destructivos que aquellos con picos menores, debido a que el tiempo de ocurrencia del sismo interviene en forma importante en el comportamiento tanto de las estructuras como de los suelos.

Tabla 9.3 Aceleración máxima y duración de sismos (Housner, 1970)

Magnitud (M)	Duración (segundos)	Aceleración máxima (%g)
5.0	2	9
5.5	6	15
6.0	12	22
6.5	18	29
7.0	24	37
7.5	30	45
8.0	34	50
8.5	37	50

Otros parámetros del movimiento sísmico

Existen otros parámetros importantes que se utilizan con frecuencia en el análisis sísmico, ellos son:

- a. Velocidad pico
- b. Desplazamiento pico
- c. Periodo predominante de vibración
- d. Longitud de onda
- e. Espectro respuesta

Se sugiere el estudio de estos factores en un texto de ingeniería sísmica, como el de Kramer (1996).

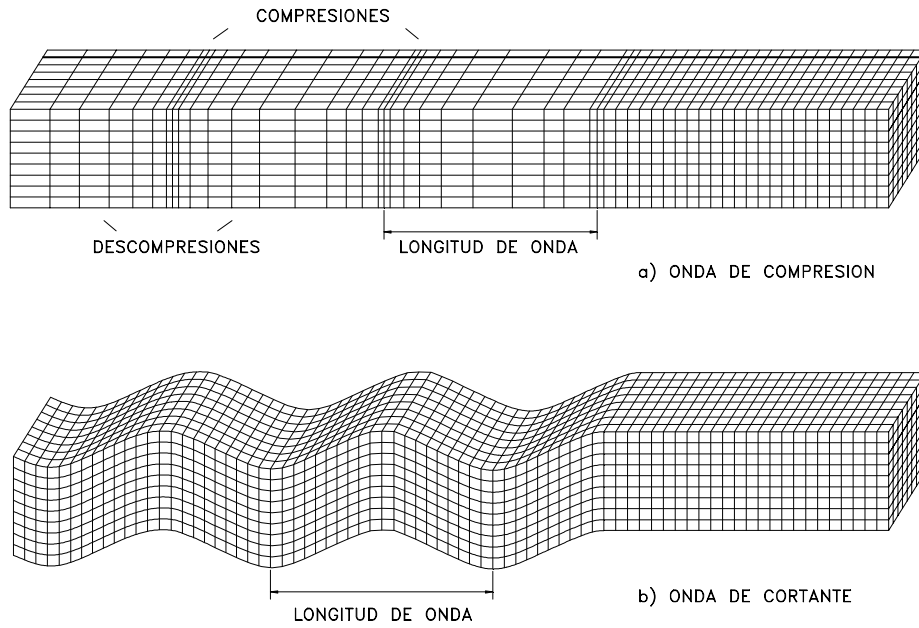


Figura 9.4 Ondas de cuerpo.

9.3 CARACTERISTICAS DE LAS ONDAS SISMICAS

Cuando ocurre un sismo se producen diferentes tipos de onda:

a. Ondas de compresión

Conocidas como ondas P, consisten en movimientos repetidos de compresión y enrarecimiento; son análogas a las ondas de sonido, en el cual la partícula se mueve en la misma dirección del movimiento de la onda.

b. Ondas de cortante

Conocidas como Ondas S o ondas secundarias, producen deformaciones de cortante a medida que se mueven dentro del suelo o la roca. El movimiento de las partículas individuales es normal a la dirección del movimiento.

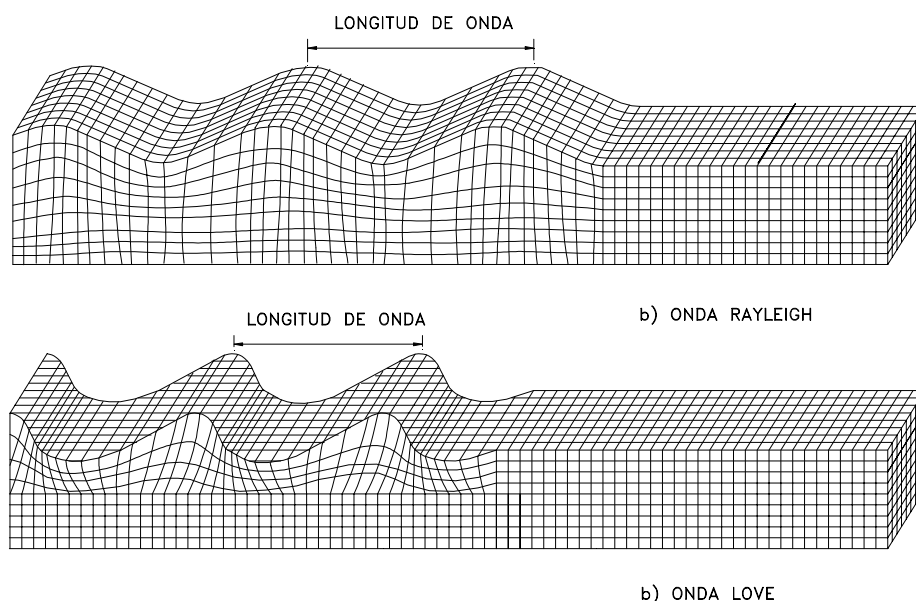


Figura 9.5 Ondas Superficiales.

c. Ondas Rayleigh

Son ondas que se forman en la superficie por interacción entre las ondas P y las ondas S verticales. Son similares a las que se producen en el agua cuando se lanza una piedra.

d. Ondas love

Son un resultado de la interacción de las ondas S horizontales con las capas superficiales de terreno. Las ondas Love no tienen componente vertical.

9.4 ANALISIS DE AMENAZA SISMICA

El análisis de amenaza sísmica incluye la predicción cuantitativa de la intensidad del sismo en un sitio en particular. Las amenazas pueden analizarse determinísticamente o probabilísticamente.

El primer paso en el análisis es la identificación y evaluación de las fuentes de sismos y para ello se utilizan las evidencias geológicas, la actividad de las fallas, las evidencias tectónicas y la sismicidad histórica e instrumental.

La teoría de placas tectónicas es la base de los análisis sísmico-geológicos o Paleosismología. La actividad de las fallas es un elemento muy importante para determinar si una falla representa una amenaza sísmica y es corriente diferenciar las fallas activas de las inactivas.

La sismicidad histórica permite confirmar la ocurrencia de sismos en el pasado y estimar la distribución geográfica de intensidad; sin embargo la sismicidad instrumental es la herramienta más útil para el análisis de amenaza sísmica.

En la actualidad existen instrumentos en la mayoría de las zonas sísmicas del mundo que permiten determinar las características y localización de prácticamente todos los eventos sísmicos que ocurren.

9.5 SUSCEPTIBILIDAD SISMICA

Algunos materiales son susceptibles a fallar por acción de un evento sísmico. Para el análisis de la susceptibilidad sísmica se deben tener en cuenta los siguientes factores:

1. Subsistencia sísmica

La subsistencia sísmica es una de las más importantes propiedades dinámicas del loess; Esto se debe principalmente al gran volumen de poros y a la poca cementación de la estructura de estos materiales depositados por el viento. La presencia de macroporos, de tamaño varias veces mayor a la de la partícula (hasta varios cientos de veces) (Yang D.B. – Zhengzhong Z.,1996). Generalmente, la cementación entre partículas es pobre y predominan las partículas de cuarzo.

La susceptibilidad a la subsistencia sísmica puede analizarse realizando un ensayo de consolidación dinámica, en un equipo de compresión triaxial dinámica. Cuando el esfuerzo dinámico alcanza el esfuerzo dinámico crítico (CDS) la estructura del suelo colapsa.

2. Fragilidad

Algunos materiales relativamente duros tienden a desmoronarse en un evento sísmico debido generalmente, a la fragilidad del sistema de discontinuidades. Esta situación es común en suelos residuales fracturados pero poco meteorizados. Una situación similar ocurre en materiales cementados muy porosos como la piedra Pómez, en la cual la presencia de grandes poros facilita la deformación interna por acción de los esfuerzos sísmicos y se produce la falla de la cementación interna de las partículas.

Un caso muy común de falla en eventos sísmicos corresponde a los taludes de fuerte pendiente en suelos granulares no muy cimentados. Se puede mencionar las fallas en la región de San Francisco (Plant y Griggs, 1990), y en cenizas volcánicas cementadas en el Japón (Yamanouchi, 1977). Generalmente, estas fallas ocurren a tensión produciéndose grandes grietas, las cuales producen deslizamientos de tierra.

Las grietas de tensión aparecen entre 15 y 30 metros detrás de la corona en taludes hasta de 100 metros de altura. O'Rourke y Crespo (1988) describen deslizamientos similares en formaciones volcánicas del sur de Colombia y de Ecuador.

Estudios dinámicos realizados por Ashford y Sitar (1994) muestran una reducción entre el 85 y el 90% de la resistencia estática simple en el caso de carga cíclica.

3. Licuabilidad

Es la facilidad con que un suelo puede perder toda su resistencia al cortante y comportarse como un líquido. Esta susceptibilidad es propia de los limos o arenas no cementados saturados que se encuentran a poca profundidad. Los rellenos aún compactados son materiales muy susceptibles a licuación.

Para determinar la susceptibilidad de un suelo a licuación existen varios criterios (Kramer, 1996):

a. Criterio geológico

Los depósitos de suelo que son susceptibles a licuación son los materiales uniformes granulares sueltos tales como depósitos fluviales, coluviales y eólicos saturados. La licuación se ha observado en abanicos aluviales, playas y otros depósitos de semigravedad.

La susceptibilidad a la licuación de depósitos antiguos es generalmente menor que la de los depósitos nuevos. Suelos del Holoceno son más susceptibles que los suelos del Pleistoceno.

La licuación solamente ocurre en suelos saturados, por lo tanto la profundidad del nivel de agua influye en la susceptibilidad a la licuación. La licuación es más común en los suelos donde el nivel freático se encuentra subsuperficial. Los rellenos o depósitos hechos por el hombre en estado suelto son muy susceptibles a la licuación.

b. Criterio composicional

La forma, tamaño y gradación de las partículas influye en la susceptibilidad a la licuación. La plasticidad tiene un mayor efecto que el tamaño de granos, los suelos no plásticos son muy susceptibles a la licuación, especialmente los limos y las arenas finas. Algunas arcillas también son susceptibles a la licuación de acuerdo al criterio de Wang (1979). Las arcillas susceptibles a licuación generalmente tienen las siguientes propiedades:

Fracción menor que 0.005 mm \leq 15%

Límite líquido \leq 35%

Contenido de agua \geq 0.9 LL

Índice de liquidez \leq 0.75.

Las gravas también son susceptibles a la licuación, aunque en menor proporción que las arenas.

La susceptibilidad a la licuación también es influenciada por la gradación. Los suelos bien gradados son generalmente, menos susceptibles que los suelos pobremente gradados.

Los suelos de partículas redondeadas son más susceptibles que los suelos con granos angulares.

c. Criterio de estado

La susceptibilidad a la licuación depende del estado en que se encuentre el material, esfuerzos, densidad, relación de vacíos.

La licuación puede ocurrir en una masa de suelo o puede ocurrir a lo largo de una superficie o línea de falla en las cuales los esfuerzos de cortante son el factor preponderante. En el primer caso, la licuación tiene como resultado un cambio de volumen o asentamiento y en el segundo, se produce un deslizamiento o falla al cortante.

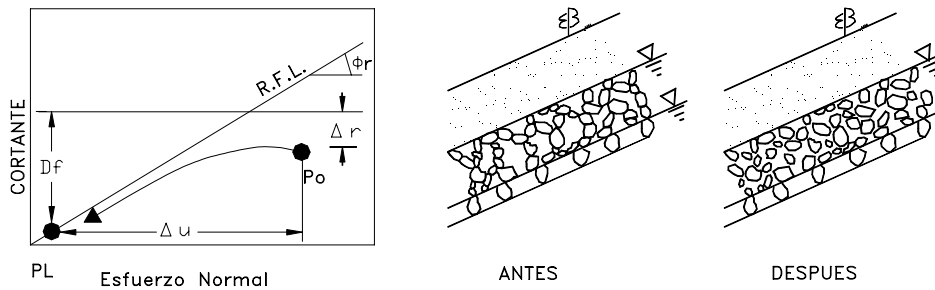
La licuación sobre una superficie de falla fue analizada por Sassa (1996)(Figura 9.6). Esta licuación es causada por la destrucción de la estructura a lo largo de la superficie de falla.

4. Dilatancia

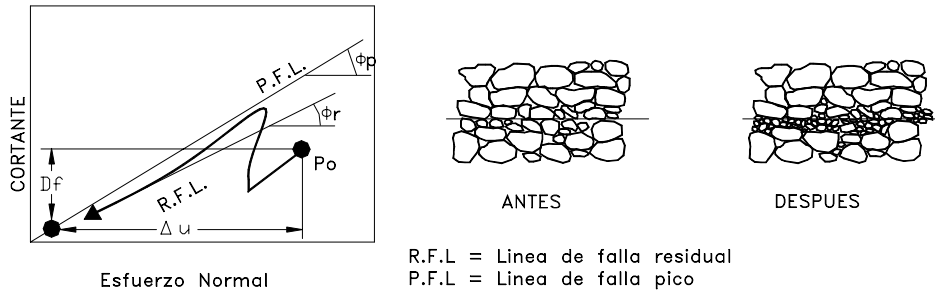
La deformación asociada con un esfuerzo sísmico es muy importante en suelos granulares y en los enrocados de grandes presas. Se observa en presas de enrocado que la aceleración en la parte superior del terraplén es varias veces mayor que la aceleración en su base y en ocasiones excede el coeficiente sísmico de diseño. Lo que ocurre en estos casos es que el conjunto de partículas gruesas que conforman el enrocado es generalmente, muy resistente a la deformación y aunque se presenta un estado crítico de aceleración, la deformación generada no alcanza a producir la falla del terraplén.

Se han realizado ensayos dinámicos hasta la falla de modelos de taludes en forma de terraplén suelos granulares y se ha observado que el terraplén empieza a fallar con una dilatancia visible (Konagai K. – Matsushima T. 1996). La aceleración que produce la falla al cortante de una superficie depende de la frecuencia de la excitación sísmica y del tamaño de los granos y la falla no ocurre hasta que se ha generado una dilatancia considerable.

A. LICUACION DE LA MASA DEL SUELO



B. LICUACION DE LA SUPERFICIE DE FALLA



R.F.L = Línea de falla residual
P.F.L = Línea de falla pico

Figura 9.6 Trayectoria de esfuerzos y diagrama de la licuación de una masa de suelo (A) y la licuación a lo largo de una superficie de falla(B) (Sassa, 1996).

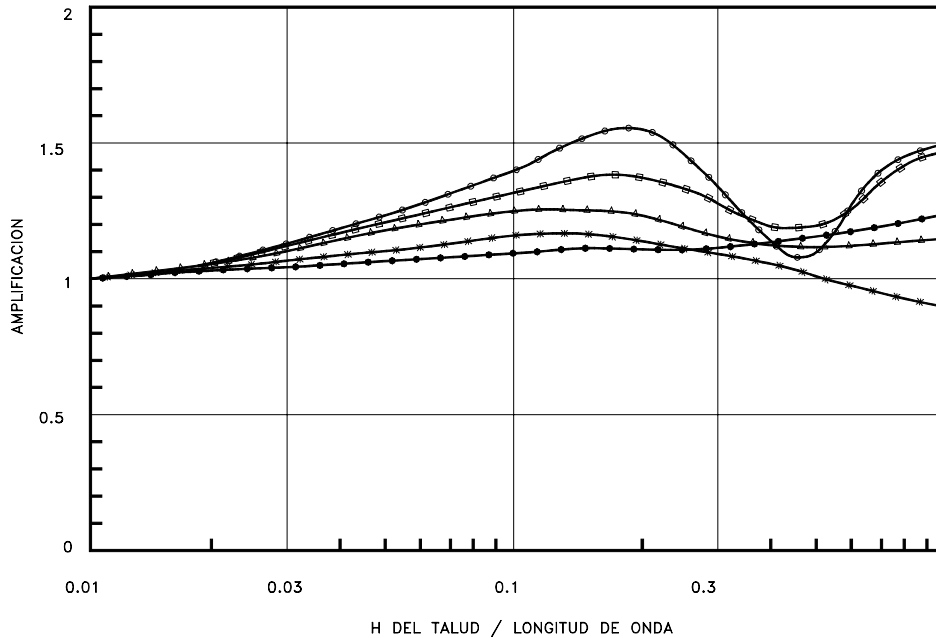


Figura 9.7 Amplificación de onda sísmica en un talud y su relación con la altura del talud y la longitud de onda (Ashford y Sitar 1997).

5. Amplificación por Efecto Topográfico

Los efectos aparentes de amplificación topográfica fueron observados por Celebi (1987) en el sismo de Chile de 1985 de magnitud 7.8, notándose amplificaciones espectrales hasta de 10 en taludes de 20 metros de altura.

Boore (1972) realizó estudios numéricos de la respuesta sísmica de los taludes de gran altura y concluyó que el movimiento en el talud consistía en tres fases: una onda directa, una onda reflejada, y una onda difractada. El resultado mostró que había una amplificación importante en la parte alta del talud y que a lo largo de los lados del talud podría ocurrir amplificación y atenuación dependiendo en la geometría del talud y la frecuencia del movimiento. La amplificación tenía un valor hasta del 100% y disminuía con el ángulo del talud y la longitud de onda.

Sitar y Clough (1983) encontraron que las aceleraciones tienden a amplificarse en la cercanía de la cara del talud y la amplificación topográfica varía entre 40 y 76%. La mayor amplificación ocurre en la cresta del talud cuando la frecuencia del sismo está cercana a la frecuencia natural de la topografía.

Sitar (1997) menciona un caso en Santa Mónica donde las aceleraciones amplificadas llegaron a obtener valores de 0.93g. de aceleración horizontal y 0.25g. de aceleración vertical, los cuales produjeron deslizamientos importantes. Estas fallas ocurrieron en depósitos de edad Cuaternario de arena pobremente cementada, en taludes de 40 a 60 metros de altura y pendientes de 45° a 60°. Las fallas más severas ocurrieron generalmente, hasta una distancia de 50 metros de la cresta de los taludes, cantidad

aproximadamente igual a la altura de los mismos y, la mayoría de las fallas ocurrieron hasta 100 metros arriba de la cresta. Este ejemplo de amplificación demuestra el gran efecto que tiene la topografía sobre el comportamiento sísmico de los suelos.

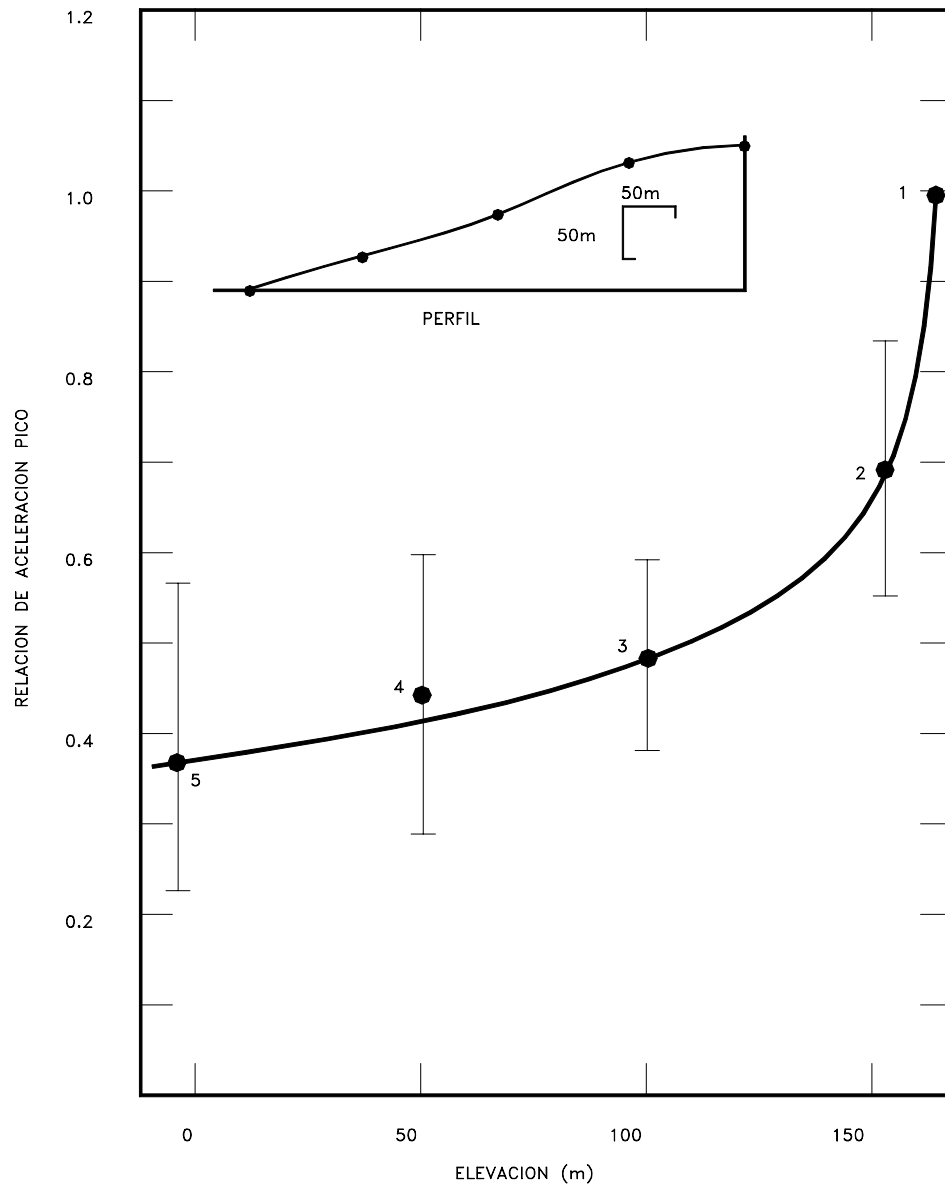


Figura 9.8 Aceleraciones pico normalizadas (Barras de valores medios) medidas en un talud el el Japón (Jibson, 1987).

Ashford (1997) concluyó que el efecto de un talud fuerte sobre la respuesta sísmica puede ser normalizado como una función de la relación entre la altura del talud y la longitud de la onda (λ). Considerando, el efecto del ángulo del talud es aparente que la amplificación tiende a aumentar en taludes de más de 60° y disminuye con el ángulo de inclinación.

6. Comportamiento de Rellenos en caso de sismos

Los rellenos son materiales muy susceptibles a sufrir daño en el caso de sismos. La mayoría de los estudios sobre el comportamiento de rellenos han sido dirigidos a presas de tierra, y muy pocos estudios al comportamiento de rellenos sobre laderas, y específicamente McClure (1973) encontró que ocurre mucho mayor cantidad de fallas en suelos de relleno que en taludes naturales. Algunos de los rellenos más susceptibles son los rellenos de suelos residuales compactados, tales como el granito meteorizado, materiales en los cuales se produjeron fallas catastróficas en el sismo de Kobe (Sassa, 1996).

Los principales problemas de los rellenos asociados con sismos son los siguientes:

- a. Agrietamiento cosísmico, debido a la falta de resistencia a la tensión
- b. Asentamientos por baja densidad.
- c. Mayor susceptibilidad a la licuación que los suelos naturales.

Los rellenos son muy susceptibles a agrietarse en el momento de un sismo o a deformarse vertical y horizontalmente sufriendo asentamientos diferenciales. Los rellenos de tierra armada resisten en mejor forma los movimientos sísmicos que los rellenos comunes.

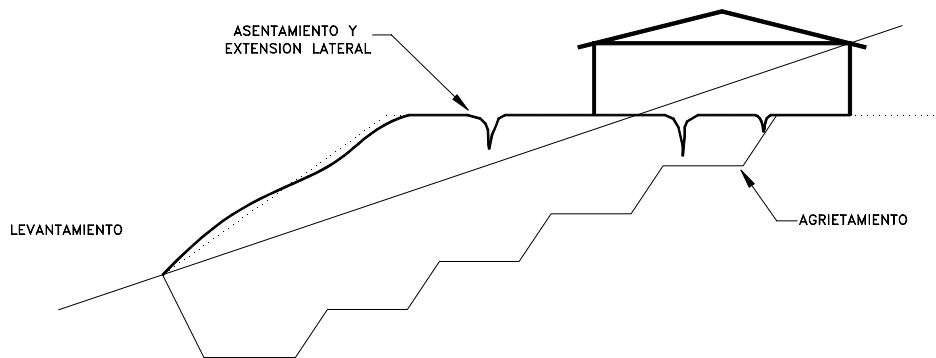


Figura 9.9 Falla típica de un relleno en el caso de un sismo (Stewart, 1995).

Tabla 9.4 Relación histórica de algunos deslizamientos activados por sismos y volcanes

Sitio del sismo	Fecha	Magnitud Richter	Materiales	Características de los deslizamientos	Vidas humanas
China Kanding-Louiding	1786			Deslizamiento gigantesco que produjo el desborde de una presa y como resultado una gran inundación.	100.000
Italia Calabria	1786			Los deslizamientos formaron cerca de 250 lagos.	50.000
Rusia Tadzhiik	1911	7.4	Roca	Deslizamiento de roca que destruyó el pueblo de Usoy y afectó al río Murgab en una longitud de 65 Kms.	54
Indonesia Java	1919	volcán	Materiales volcánicos	Se produjeron flujos de lodo caliente que cubrieron un área de 185 km ² , destruyendo 104 poblaciones.	5.110
China Gansu Province	Diciembre 16 1920	8.5	Loess	Un número no determinado de deslizamientos en un área de 67100 Km ² .	230.000
China Deixi	1933	7.5		Se produjeron deslizamientos de gran magnitud y falló una presa de 255 metros de alto en el río Min.	6.800 por deslizamientos y 2.500 al fallar una presa
Rusia Tadzhiik	1949	7.5	Roca (granitos)	Empezó como un deslizamiento de rocas y se transformó en una inmensa avalancha de loess y residuos de granito.	20.000
Perú Monte Huascaran	Enero 1962	7.75	Residuales	Avalancha.	4.000 a 5.000
EE.UU. Alaska	1964	9.4	Arenas	Un gran deslizamiento relacionado con procesos de licuación destruyó parcialmente las ciudades Anchorage, Valdez, Whittier, Seward.	
Perú Monte Huascaran	Mayo 31 1970	7.7	Residuales	Avalancha de detritos que sepultó el pueblo de Yungay y Ranrahirca y un número grande de deslizamientos en un área de 30.000 Km ² .	40.000
Guatemala	Febrero 4 1976	7.5	Depósitos de piedra pómez y sus suelos residuales	Más de 10.000 caídos y deslizamientos de residuos de taludes casi verticales. El movimiento sísmico rompe la cohesión o cementación de materiales duros pero frágiles.	
Washington Mount St. Helen	Mayo 18 1980	Volcán	Roca	Deslizamiento de 2.8 Km ² de roca y residuos destruyó nueve puentes. El deshielo del nevado produjo flujos de lodo. Este es el mayor deslizamiento de la historia conocido (Schuster, 1996) 2.8 x 10 ⁹ m ³ .	10
Colombia Nevado del Ruiz	Noviembre 13 1985	Volcán	Volcánicos	Una avalancha o flujo de lodo en el valle del río Lagunillas, producto del deshielo del nevado del Ruiz destruyó la ciudad de Armero.	23.000
Nueva Guinea	1986	7.1	Residuos de roca	Una avalancha formó una presa de 210 metros de altura y un lago de 50 millones de m ³ . al fallar la presa produjo un flujo – avalancha de 100 metros de espesor de residuos saturados.	
Ecuador	Marzo 5 1987	6.9	Residuales	Varios miles de deslizamientos de roca suelo y lodo que destruyeron casi 70 kilómetros de un oleoducto y varias carreteras.	1.000

Sitio del sismo	Fecha	Magnitud Richter	Materiales	Características de los deslizamientos	Vidas humanas
California Superstition Hills	Noviembre 12 1987	6.6	Arenas y Limos	Licuación de arenas y limos. Se midieron presiones de poro excesivas que empezaron a desarrollarse cuando la aceleración alcanzó 0.21g a los 13.6 segundos de iniciado el sismo.	
California Loma Prieta	Octubre 17 1989	7.1		2.000 a 4.000 deslizamientos de roca suelo y residuos y algunos casos de licuación que produjeron flujos.	
Colombia Páez	Junio 6 1994	6.4	Residuales saturados por lluvias previas	Más de 3000 deslizamientos en taludes de fuerte pendiente cubiertos por bosques afectaron un área de 5500 Km ² , en la cuenca del río Páez y Produjeron una gigantesca avalancha de lodo por el cauce del río, la cual destruyó varios poblados.	1971
Japón Kobe	Enero 1995	7.2	Residuales de granito	630 deslizamientos de más de 30 metros de largo localizados hasta una distancia de 10 kilómetros de la falla activa	5500 muertos por el sismo la mayoría no relacionados con deslizamientos
Nikawa (Japón Kobe)	Enero 1995	7.2	Relleno con suelos residuales de granito	Destruyó 11 casas. El volumen del deslizamiento fue de 120.000 m ³ .	34 muertos

9.6 AMPLIACION DE LA ONDA EN EL SITIO

La importancia de la respuesta de la onda en cada sitio ha sido demostrada en los sismos de los últimos años. Los resultados de esos estudios han servido para desarrollar recomendaciones de clasificaciones y espectro de diseño para utilización en los códigos. Seed y Bray (1997) recomiendan una tabla de clasificación de sitio para tener en cuenta en el análisis sísmico. De acuerdo con la clasificación del sitio, hay una amplificación de la onda de la roca al suelo. Para la clase de sitio A no existe amplificación y para las clases de sitio E y F la amplificación es muy grande.

Seed y Bray (1997) sugieren evaluar el nivel de respuesta de diseño para un sitio determinado en 3 pasos. Primero, determinar la aceleración que ocurriría si el sitio fuera roca competente (sitio A), basándose en la sismicidad regional. Luego, modificar la aceleración obtenida por un factor de amplificación que depende de las características del sitio. Finalmente, se determina el espectro respuesta para este valor de aceleración.

9.7 LICUACION

Los fenómenos de licuación consisten en la pérdida rápida de resistencia al esfuerzo cortante, temporal o definitiva. Tal pérdida conduce al colapso a cualquier estructura vial edificada sobre o hecha de un material que entra en licuación.

Tabla 9.5 Sistema de clasificación de sitio para sismos Seed y Bray (1997)

Clase	Condición	Descripción	Características
(A ₀)	A ₀	Roca muy dura	$V_s > 5000$ pies / seg. En los 50 pies + sub-superficiales
A	A ₁	Roca competente con muy poco o ningún suelo	2500 pies / seg. $\leq V_s \leq 5000$ pies / seg. Y espesor del suelo + roca meteorizada < 40 pies con $V_s > 800$ pies / seg.
AB	AB ₁	Roca blanda fracturada o meteorizada	$V_s \leq 800$ pies / seg. 40 pies $\leq H$ suelo + roca meteorizada ≤ 150 pies
	AB ₂	Suelo delgado duro sobre roca o roca meteorizada	
B	B ₁	Suelos principalmente no cohesivos profundos	No hay arcilla blanda H suelo cohesivo $< 0.2H$ suelo no cohesivo
	B ₂	Suelos duros cohesivos poco profundos o mezclas de suelos no cohesivos con suelos duros cohesivos	$V_s > 500$ pies /seg. H de suelos ≤ 200 pies
C	C ₁	Suelos duros cohesivos poco profundos o mezclas de suelos no cohesivos con suelos duros cohesivos y pequeñas capas de arcilla blanda	Igual a B ₂ excepto 0 pies $< H$ arcilla blanda ≤ 10 pies
	C ₂	Suelos principalmente no cohesivos muy profundos	Igual a B ₁ excepto Espesor de suelo > 300 pies
	C ₃	Suelos cohesivos duros profundos o mezclas de suelos no cohesivos con suelos duros cohesivos sin arcilla blanda	H suelo > 200 pies $V_s > 500$ pies /seg.
	C ₄	Suelos cohesivos blandos sometidos a niveles pequeños a moderados de vibración	10 pies $\leq H$ arcilla blanda ≤ 100 pies $A_{\max.roca} \leq 0.25$ g
D	D ₁	Suelos cohesivos blandos sometidos a niveles medios a fuertes de excitación	10 pies $\leq H$ arcilla blanda ≤ 100 pies 0.25 g $< A_{\max.roca} \leq 0.45$ g o 0.25 g $< A_{\max.roca} \leq 0.55$ g y $M \leq 7.25$
(E) ⁶	E ₁	Suelos blandos cohesivos muy profundos	H arcilla blanda > 100 pies
	E ₂	Suelos blandos cohesivos y excitaciones muy fuertes	H arcilla blanda > 10 pies y/o $A_{\max.roca} > 0.55$ g o $A_{\max.roca} > 0.45$ g y $M > 7.25$
	E ₃	Arcillas de muy alta plasticidad	H arcilla > 30 pies con IP $> 75\%$ y $V_s < 800$ pies / seg.
(F) ⁷	F ₁	Suelos altamente orgánicos o turbas	$H > 20$ pies
	F ₂	Sitios susceptibles de sufrir fallas del terreno debido a licuefacción u otros modos de inestabilidad general	

Las dos causas a que puede atribuirse esa pérdida de resistencia son:

1. Incremento de los esfuerzos cortantes actuantes y aumento correspondiente de presión de poro.

2. Desarrollo rápido de elevadas presiones en el agua intersticial, quizás como consecuencia de un sismo, una explosión, etc.

Esta segunda causa se asocia a un colapso estructural rápido del suelo cuyos vacíos, saturados de agua, tienden a reducirse, desarrollándose presiones en aquella.

La licuación ha producido las fallas más dramáticas y espectaculares, debido a la magnitud de la masa de suelo que se pone en juego al producirse este fenómeno, el cual puede cubrir áreas muy extensas.

Los suelos susceptibles a la licuación son las arenas sueltas (en éstas la deformación tiende a compactar la estructura, transmitiéndose al agua las presiones que generan el fenómeno), uniformes, finas (en ellas se reduce su permeabilidad, impidiendo la disipación de presiones en el agua) y saturadas; los depósitos de limos no plásticos sueltos son particularmente peligrosos.

Los suelos granulares más susceptibles a la licuación son los finos, de estructura suelta, saturados. Estas características describen a las arenas finas y uniformes y a los suelos finos no plásticos o sus mezclas.

Las arenas sueltas con $d_{10} \cong 0.1$ mm. y coeficiente de uniformidad $C_u < 5$ y los limos con índice de plasticidad menor que 6 son los materiales más peligrosos, tanto formando parte del cuerpo del terraplén, como en un terreno de cimentación o en un talud natural.

En la práctica se pueden identificar los suelos licuables como los suelos granulares sueltos cuya resistencia a la penetración estándar es menor o igual a 5 golpes por pie.

En suelos tales como arenas saturadas relativamente sueltas, es posible que una sollicitación dinámica rápida, como la que puede presentarse durante un sismo, origine en el agua elevadas presiones que crecen a un ritmo mayor de lo que alcanzan a disiparse por la salida del agua de los poros de la estructura del material.

Al incrementarse las presiones del agua interior, se debilita el contacto entre los granos de la arena disminuyendo su resistencia al esfuerzo cortante hasta valores nulos o muy próximos a cero, en estas condiciones la masa de arena se comporta como un líquido, fluyendo bajo la acción de las cargas que provocan el fenómeno.

Las fallas por licuación en arcillas se han reportado siempre asociadas a arcillas (rápidas) marinas emergidas por la recuperación isostática de los Continentes y lavadas con posterioridad, con lenta substitución del agua salada originalmente contenida en sus poros por agua dulce, lo que provoca intercambios catiónicos (pérdida de iones de sodio) que propician variación de la resistencia al esfuerzo cortante y gran aumento en su sensibilidad.

Esta menor resistencia conduce a un menor factor de seguridad en los taludes que se forman en estos suelos, que fallan sin causa aparente. En la falla, la arcilla se remodela hasta llegar a la condición de un líquido, estado que se conserva de manera perdurable, pues la falta de iones en el agua impide la reestructuración.

La licuación ha ocurrido frecuentemente en arcillas saturadas muy sensibles y en arenas finas sueltas, sobre todo en condición saturada y el fenómeno ha sido muy bien estudiado y existe abundante literatura en mecánica de suelos sobre este tema.

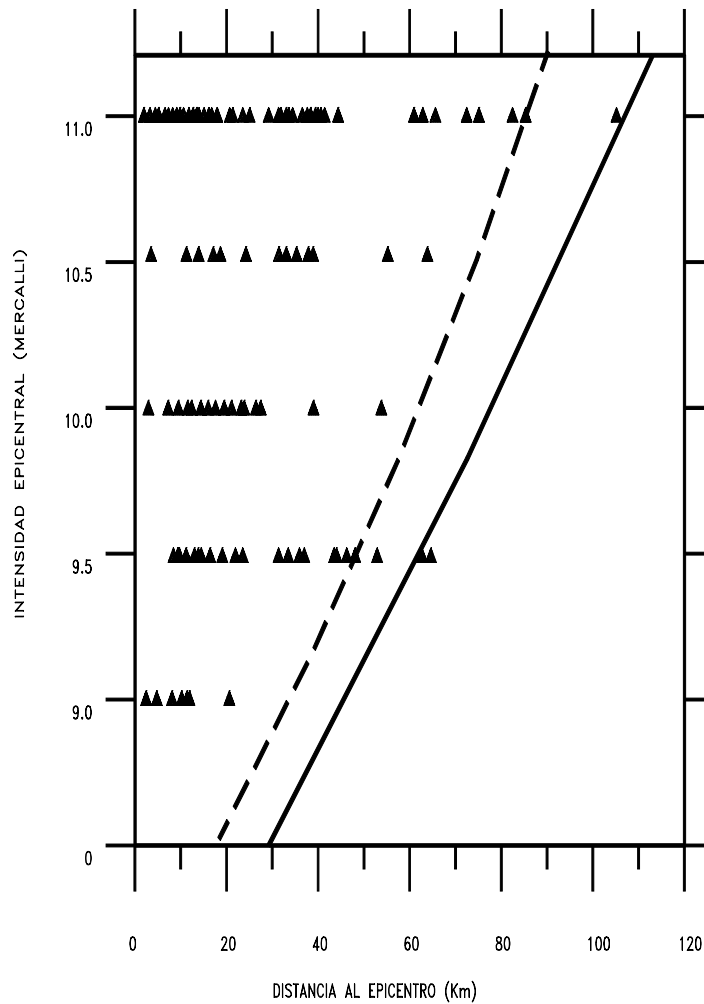


Figura. 9.10 Distancia máxima al epicentro de sitios de licuefacción para diferentes intensidades epicentrales. (Romeo y Delfino, 1996).

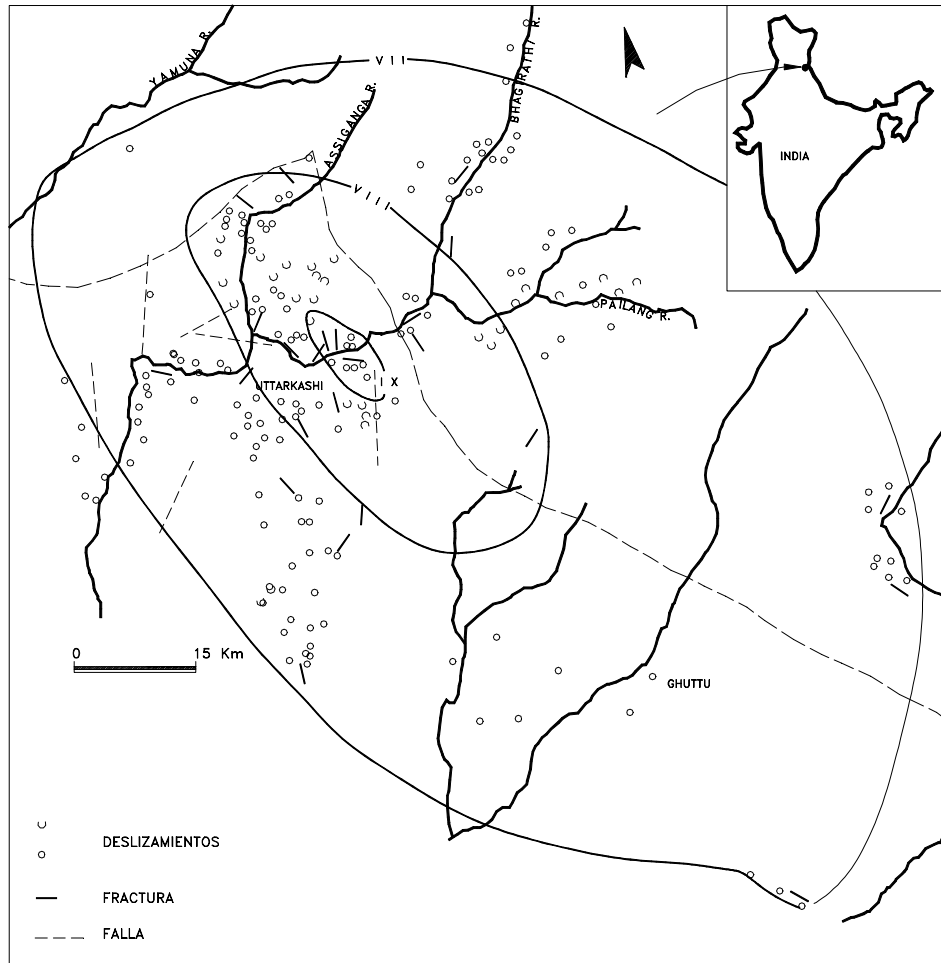


Figura. 9.11 Localización de deslizamientos cósmicos en el mapa isosísmico del terremoto de Uttarkashi (Pande- 1996).

9.8 CARACTERÍSTICAS DE LOS DESLIZAMIENTOS COSISMICOS

El conocimiento de las situaciones en las cuales se produjeron deslizamientos de tierra activados por eventos sísmicos, ha servido de guía un tanto empírica para poder predecir la ocurrencia de deslizamientos. Es lógico esperar que la actividad de deslizamiento disminuya al aumentar la distancia al epicentro y existe una distancia a partir de la cual no ocurren deslizamientos de determinado tamaño.

La cinemática, geometría y evolución de los fenómenos de deslizamiento dependen principalmente de la litología, estructura y condiciones de saturación de los suelos o rocas, así como de la intensidad del evento sísmico.

Un trabajo realizado por Keefer (1984) muestra que para la producción de cierto tipo de deslizamientos se requiere una gran magnitud del sismo (tabla 9.6).

Tabla 9.6 Estimativos de la magnitud necesaria para que un sismo produzca deslizamientos de tierra (Adaptado de Keefer-1984)

Magnitud	Tipo de movimiento
4.0	Caídas de roca, caídas de suelo, fracturación cosísmica
4.5	Deslizamientos de suelo o bloques de suelo
5.0	Deslizamientos de roca, bloques de roca, esparcimientos laterales, flujos de suelo y deslizamientos submarinos
6.0	Avalanchas de roca
6.5	Avalanchas de suelo.

Las deformaciones tienden a ser fracturas de fragilidad en rocas duras y deformaciones plásticas en rocas blandas y suelos. Las formaciones rocosas se caracterizan principalmente, por los caídos y avalanchas de roca y las rocas muy fracturadas o meteorizadas por los flujos o avalanchas de residuos de roca.

Los suelos generalmente, generan deslizamientos de rotación o traslación y flujos de suelo o lodo saturado. Las rocas y los suelos cohesivos pueden presentar fracturación o agrietamientos de tensión. Los suelos granulares saturados pueden presentar flujos por licuación. Los deslizamientos son generalmente poco profundos pero cubren áreas relativamente grandes.

La frecuencia y distribución de los deslizamientos cosísmicos está relacionada con el mapa de líneas isosísmicas, siendo más frecuentes y de mayor magnitud en los sectores de mayor intensidad sísmica y menos frecuentes en las áreas de intensidad sísmica baja.

La dirección de los deslizamientos puede tener una tendencia hacia la dirección más fuerte del sismo, la cual es generalmente normal a la dirección de la falla que produce el movimiento sísmico (Sassa – Fukuoka 1995).

Después de ocurrido el sismo se continúa presentando deslizamientos aislados de materiales que fallan en un proceso más lento.

Clasificación de los deslizamientos cosísmicos

Sassa (1996), presentó una clasificación de tipos de deslizamientos causados por el sismo de Kobe de 1995 en la forma siguiente:

1. Deslizamientos rápidos
2. Deslizamientos lentos
3. Fracturación cosísmica

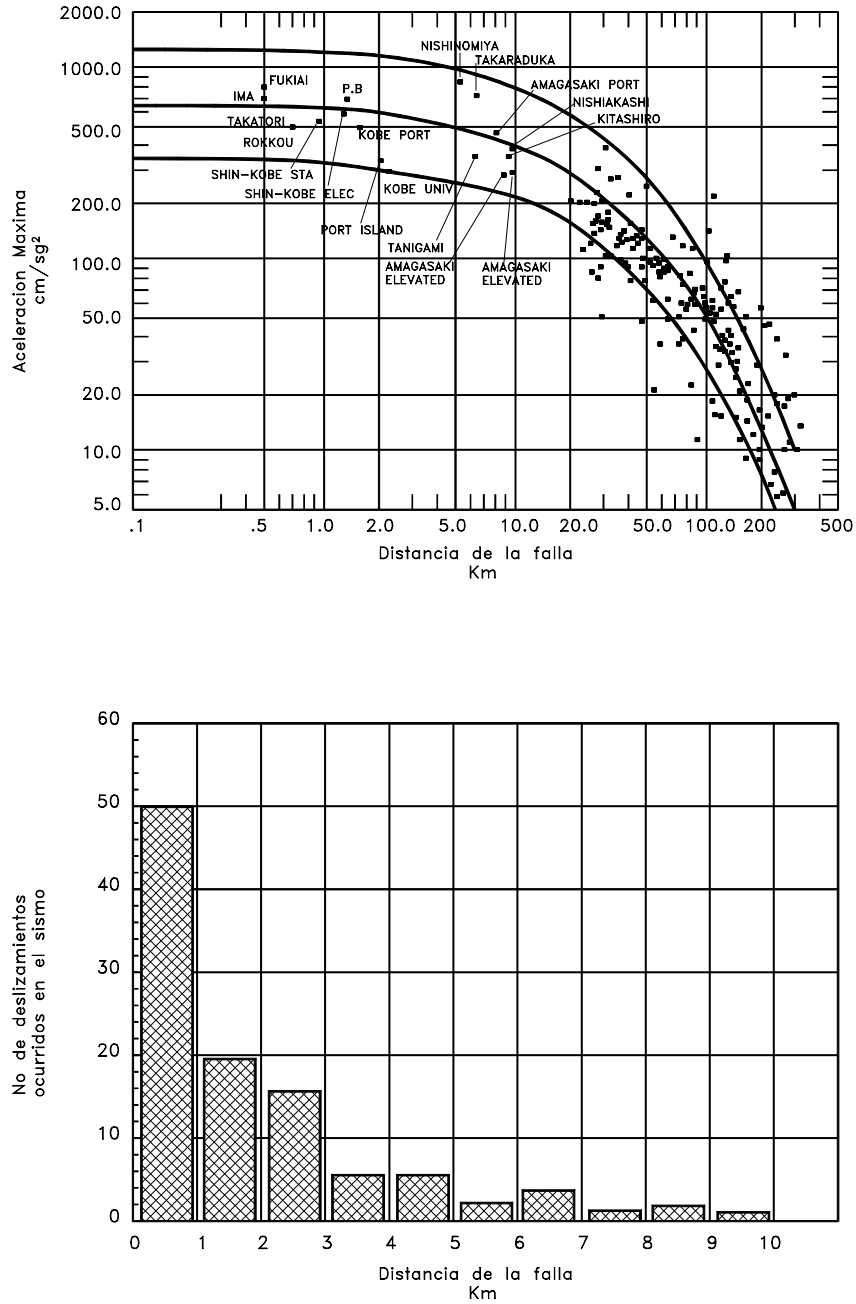


Figura 9.12 Aceleraciones y deslizamientos cosísmicos a diferentes distancias de una falla activa en el terremoto de Kobe- Japón, 1995 (Fukuoka-Irikura, 1996).

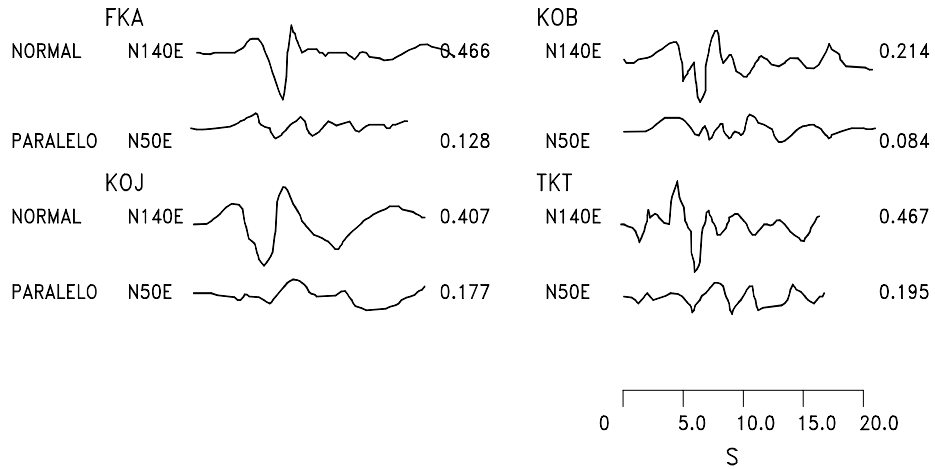


Figura 9.13 Desplazamiento grabado del sismo de Kobe-Japon en Direcciones normal y paralela a la falla (Irikura 1996).

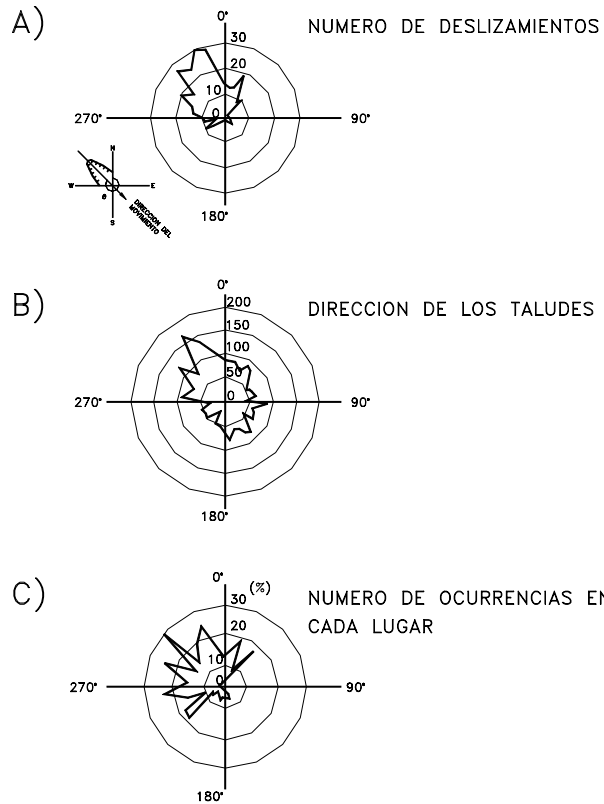


Figura 9.14 Dirección de los deslizamientos en las montañas Rokko. Este en el terremoto de Kobe en Japón (Okimura, 1995).

9.9 FRACTURACION COSISMICA

La fracturación o agrietamiento del suelo y de los macizos rocosos ocurren como un efecto directo de los esfuerzos inducidos por un sismo en áreas con diversas intensidades de la onda sísmica. Su ocurrencia se observa especialmente, en la corona de taludes de alta pendiente y en los escarpes semiverticales de terrazas cementadas erosionadas.

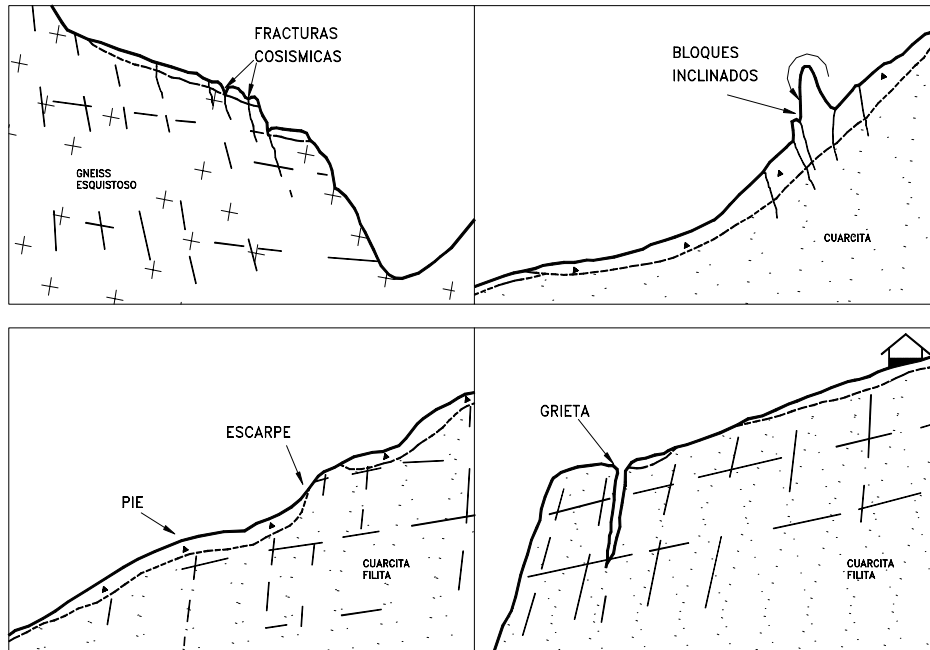


Figura. 9.15 Agrietamientos cosísmicos en La India (Pande 1996).

La magnitud de los agrietamientos depende de la cercanía al epicentro, de las características topográficas y de estructura geológica de la ladera afectada. Se han reportado agrietamientos de longitudes hasta de 100 metros y abertura hasta de 55 centímetros (Pande P. –Joshi K.C. –Narula P.L.,1996) en sitios cercanos al epicentro de un sismo de magnitud 6.6 en el Himalaya.

La orientación de las fisuras depende principalmente, de la geología y topografía y es independiente de las características del sismo. Generalmente, las fracturas son de tensión y el movimiento puede describirse como una inclinación con centro de giro profundo. Con frecuencia las fracturas producen deslizamientos o caídos de roca, suelo o residuos al poco tiempo después de ocurrido el sismo, especialmente en periodos de lluvias. La escorrentía se infiltra por las grietas produciendo presiones de poro y erosión en las fracturas.

Comportamiento de Taludes de gran altura en arenas cementadas

Las arenas cementadas en ocasiones presentan taludes de gran altura y pendiente fuerte las cuales son especialmente susceptibles a agrietamiento en el caso de sismos (Ashford y Sitar, 1994). En situaciones de presiones bajas de confinamiento en las superficies de los taludes las arenas cementadas producen un comportamiento frágil y una resistencia baja a la tensión. Como resultado se producen fácilmente grietas de tensión y su comportamiento puede ser devastador bajo cargas dinámicas. El problema es agravado por la amplificación de la aceleración en la cresta de los taludes. La amplificación topográfica puede ser hasta de un 76% (Sitar and Clough, 1983).

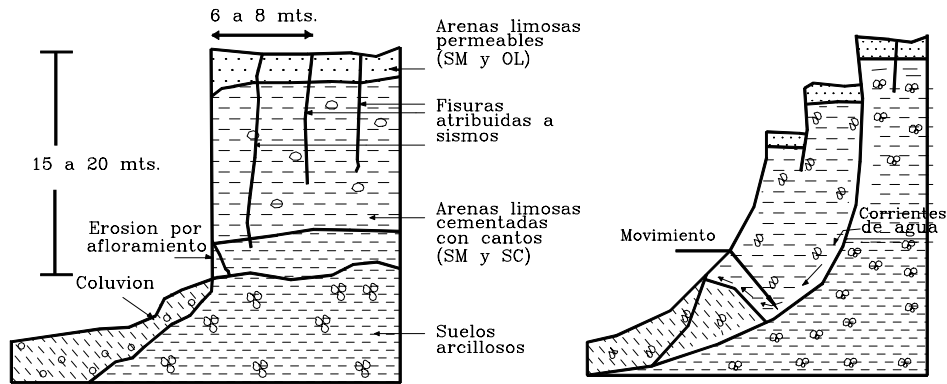


Figura 9.16 Falla por agrietamiento relacionado con eventos sísmicos en Bucaramanga-Colombia.

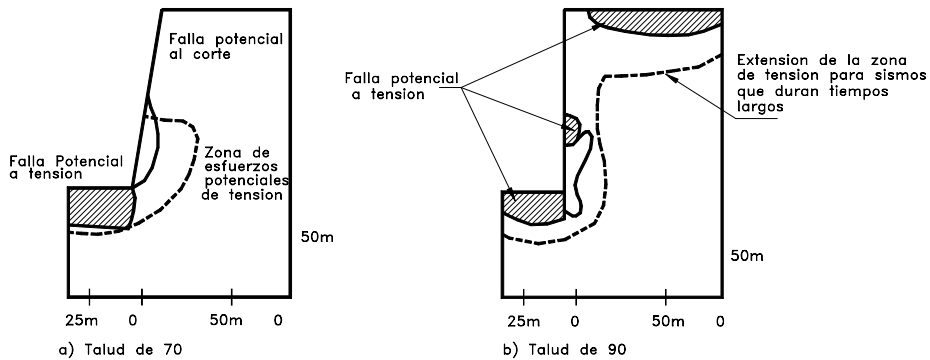


Figura 9.17 Zonas de concentración de esfuerzos en un sismo.

9.10 DESLIZAMIENTOS POR ACTIVIDAD VOLCANICA

Algunos de los más grandes deslizamientos ocurridos están relacionados con actividad volcánica.

Previamente a la erupción de un volcán se producen generalmente, sismos frecuentes de pequeña magnitud relacionados con el ascenso de masas de magma debajo del volcán

Los deslizamientos pueden estar relacionados físicamente con la erupción y coinciden con grandes explosiones en la cabeza del volcán. En las primeras etapas de la erupción se depositan flujos piroclásticos, los cuales forman nuevos domos o amplían alguno de los existentes, generándose deslizamientos en las faldas del volcán. El deposito de materiales aumenta las pendientes de los taludes y los deslizamientos pueden continuar por varios meses después de la erupción. En ocasiones la altura del domo disminuye debido a los deslizamientos y se produce el movimiento de grandes volúmenes de residuos que cubren varios kilómetros cuadrados de área.

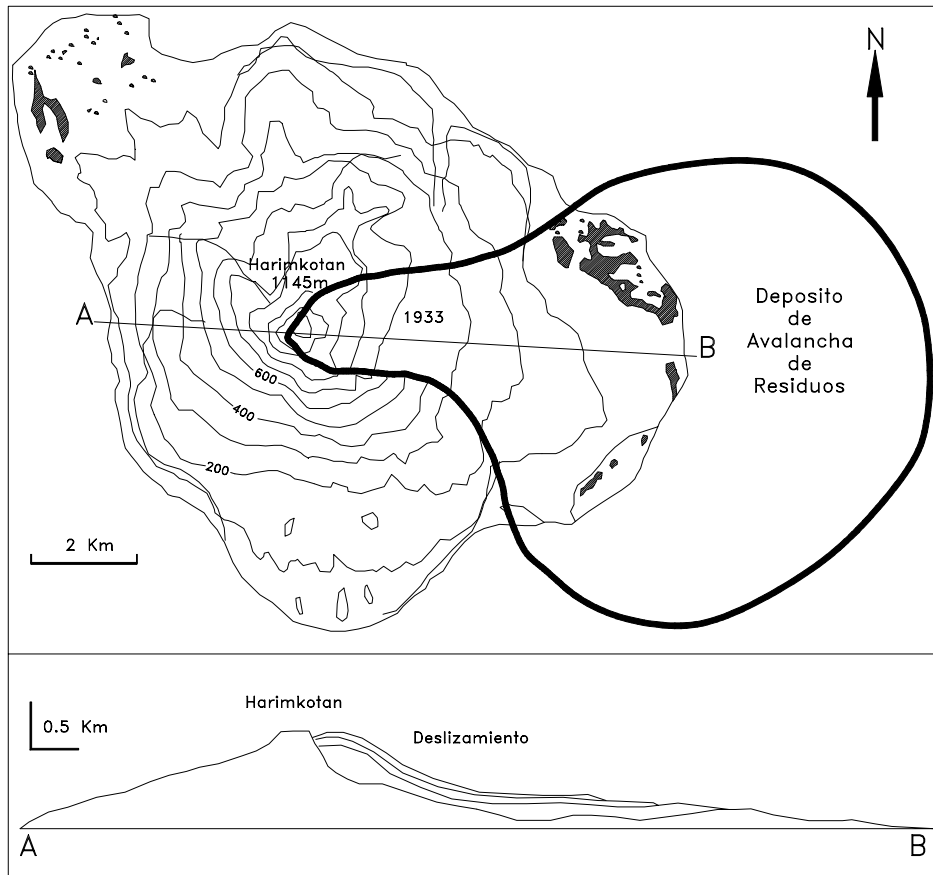


Figura 9.18 Deslizamiento en el volcán Harimkotan en Rusia (Belousov, 1996).

El problema más grave de deslizamientos ocurre en los volcanes-nevados. Al ocurrir erupciones sobre los glaciares o depósitos de nieve o hielo se produce la fusión del hielo o nieve por la alta temperatura de los materiales expulsados que pueden ser flujos piroclásticos, oleadas piroclásticas (“surges”), flujos de lava o caída de piroclastos. La erupción sobre glaciares puede generar flujos de lodo.

En todos los casos, para evaluar la cantidad de nieve y hielo que puede ser fundida por los materiales volcánicos, es de vital importancia establecer el área cubierta por la nieve y no el volumen de estos.

Esta situación fue comprobada durante el análisis de los flujos de lodo generados por la erupción del Nevado del Ruíz, en noviembre de 1985, por Pierson et al. (1990) y Thouret (1990) quienes determinaron que la mencionada erupción sólo fundió una capa delgada de los glaciares cubiertos por los productos eruptivos y que las más afectadas fueron la nieve fresca y parte de la nieve fresca recristalizada conocida como “firn”.

Otro dato aportado por Thouret (1990) es que no toda el agua resultante de la fusión de hielo, nieve y “firn” contribuyó a la formación de flujo de lodo sino que parte de ella, aproximadamente 50%, tuvo los siguientes destinos:

- 1) quedó incluida en avalanchas de nieve, sedimentos con nieve medio fundida y lodo que fluyó por fuera de los canales de los “lahares” o se incorporó a los depósitos húmedos de las oleadas (“surges”) piroclásticas;
- 2) fue incorporada en los productos de la explosión freática;
- 3) fue sublimada como vapor durante el paso de los flujos piroclásticos; o 4) se almacenó en cavidades dentro del hielo.

Los flujos de lodo pueden aumentar de tamaño y características a medida que avanzan ladera abajo llevando consigo nieve, hielo, agua, lodo y rocas que encuentra a su paso. Las paredes de los valles son socavadas y los materiales aluviales de los ríos y cañadas pueden ser incorporados al flujo.

9.11 ANALISIS SISMICO DE TALUDES

La predicción de deslizamientos producidos por sismos o análisis de estabilidad sísmica puede clasificarse en varios sistemas:

1. Análisis seudoestático

El método utiliza el mismo procedimiento general de cualesquiera de los métodos de equilibrio límite, con la diferencia de que se incluyen fuerzas seudoestáticas horizontales y verticales, debidas al evento sísmico. Estas fuerzas sísmicas se asumen, que son proporcionales al peso de la masa de deslizamiento potencial y de los coeficientes sísmicos k_h y k_v , expresada en términos de veces la aceleración g , producida por el sismo.

Generalmente, se recomienda analizar con carga sísmica seudoestática solamente la superficie más crítica identificada en el análisis estático. La mayoría de los análisis solamente tienen en cuenta la fuerza sísmica horizontal y k_v se asume igual a cero.

La magnitud del coeficiente sísmico debe simular la naturaleza de la fuerza del evento que depende de la intensidad o aceleración del sismo, duración del movimiento y

frecuencia. Para un análisis muy conservador se puede asumir que el coeficiente sísmico k_h es igual a la máxima aceleración pico esperada de un evento sísmico en el sitio. Sin embargo, este análisis conservador puede producir dificultades numéricas para k_h mayor que 0.4.

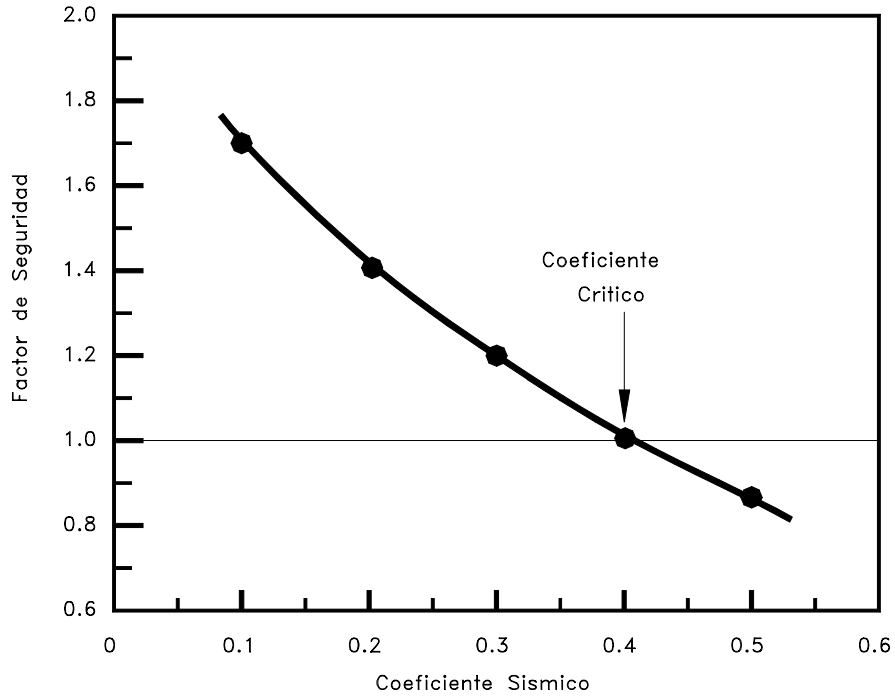


Figura 9.19 Variación del factor de seguridad con el coeficiente sísmico horizontal K_h .

Tabla 9.7 Coeficientes sísmicos para análisis seudoestático

k_h	F.S.	Observaciones
0.10g	> 1.0	Sismo importante. Cuerpo de ingenieros, 1982.
0.15g	> 1.0	Sismo de gran magnitud, Cuerpo de ingenieros, 1982.
0.15g a 0.25g	> 1.0	Japón
0.15g	> 1.15	Seed, 1979. Con una reducción de resistencia del 20%.
½ de la aceleración máxima	> 1.0	Hynes-Griffin y Franklin, 1984, y una reducción de resistencia del 20%.

Un procedimiento es el utilizar los coeficientes indicados en la tabla 9.7; Sin embargo, en ocasiones se realiza el análisis a la inversa haciendo una gráfica de coeficiente sísmico contra factor de seguridad, el cual permite determinar la magnitud de la amenaza para diversas aceleraciones de sismo.

En el cual se utiliza el método estático de análisis de estabilidad colocando una fuerza sísmica seudoestática adicional. Existen varias formas de plantear el problema de acuerdo al tipo de falla analizado y a los parámetros sísmicos utilizados.

a. Cálculo del factor de seguridad para una superficie de falla finita plana y fuerzas sísmicas horizontal y vertical (Kramer 1996).

Las magnitudes de las fuerzas pseudoestáticas son:

$$F_h = \frac{a_h W}{g} = k_h W$$

$$F_v = \frac{a_v W}{g} = k_v W$$

Donde:

F_h y F_v = Fuerzas pseudoestáticas horizontales y verticales

a_h y a_v = Aceleraciones máximas horizontales y verticales

k_h y k_v = Coeficientes pseudoestáticos

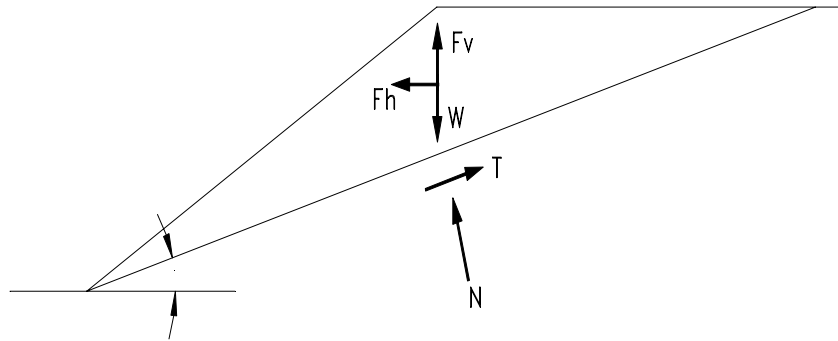


Figura 9.20 Análisis sísmico pseudoestático para una falla plana.

El factor de seguridad para una falla plana de longitud L es igual a:

$$F_s = \frac{\text{Fuerza resistente}}{\text{fuerza actuante}} = \frac{cl + [(W - F_v) \cos \alpha - F_h \sin \alpha] \tan \phi}{(W - F_v) \sin \alpha + F_h \cos \alpha}$$

Donde:

c = Cohesión

L = Longitud del plano de falla

α = Angulo de inclinación del talud

ϕ = Angulo de fricción

W = Peso de la masa deslizada.

b. Calculo de la aceleración máxima que produce una falla en un talud infinito

Es práctica corriente utilizar solamente un valor de aceleración máxima, sin diferenciar los valores de aceleración horizontal y vertical

Un procedimiento pseudoestático consiste en determinar la aceleración máxima necesaria para causar un deslizamiento durante un sismo. a_{\max} la cual está dada por la siguiente expresión para el caso de un talud infinito:

$$\frac{a_{max}}{g} = \left[\frac{c_d}{c} \left(F_s - \frac{\tan\phi}{\tan\alpha} \right) + \frac{\tan\phi}{\tan\alpha} - 1 \right] \div \left(\frac{1}{\tan\alpha} + \tan\phi \right)$$

Donde:

α = Angulo de inclinación del talud

ϕ = Angulo de fricción

c = Cohesión estática

c_d = Cohesión dinámica

g = Aceleración de la gravedad

$$F_s = \left(\frac{\tan\phi}{\tan\alpha} \right) + \frac{c}{\gamma H \cos\alpha \sin\alpha} \quad \text{Para el talud seco}$$

$$F_s = \frac{\gamma_b}{\gamma} \times \left(\frac{\tan\phi}{\tan\alpha} \right) + \frac{c}{\gamma H \cos\alpha \sin\alpha} \quad \text{Para talud saturado}$$

H = profundidad de la falla

γ = Peso unitario del suelo

γ_b = Peso unitario sumergido

c. Calculo del factor de seguridad para falla curva con un valor de a_{max}

Un procedimiento utilizado es presentado por Ishiara (1985). El factor de seguridad es calculado para diferentes valores de la aceleración máxima, de acuerdo a una fórmula modificada utilizando el procedimiento original de Janbú (1955), utilizando un procedimiento similar al que se presenta en el capítulo 4, dividiendo la masa deslizada en dovelas y realizando las respectivas sumatorias.

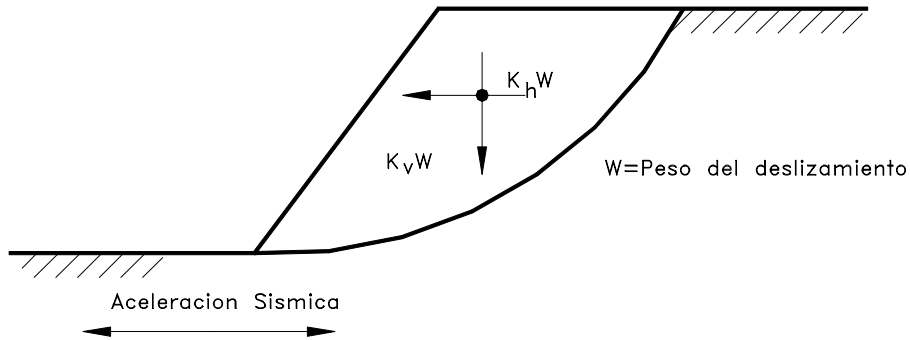


Figura 9.21 Análisis sísmico pseudoestático de equilibrio límite para una falla curva.

$$F_{sd} = \frac{\sum [w \tan\phi + c_d l \cos\alpha] \left[\cos^2 \alpha (1 + \tan\alpha \times \tan\phi \div F_d) \right]}{\sum \left[w \tan\alpha + \frac{a_{max}}{g} w \right]}$$

Determinación del valor de a_{max} para el análisis

La cuantificación de un valor de aceleración máxima para estabilidad de taludes debe tener en cuenta los siguientes criterios empíricos:

- a. Si la masa considerada para deslizamiento es rígida la aceleración inducida sobre la masa debe ser igual a la aceleración máxima esperada con sus respectivas amplificaciones por sitio y topografía.
- b. Si la masa de suelo no es rígida, como es el caso de la mayoría de situaciones y si se tiene en cuenta que la aceleración pico solo se presenta en períodos de tiempo muy pequeños no suficientes para producir una falla; se pueden utilizar valores entre 0.1 y 0.2g, dependiendo de la intensidad del sismo esperado. Marcuson(1981) recomienda utilizar valores entre 1/3 y 1/2 de la aceleración máxima esperada con las respectivas amplificaciones.

Limitaciones del método pseudoestático

El método pseudoestático presenta algunas inconsistencias para modelar el efecto real de un sismo sobre un talud. Algunas de estas limitaciones son las siguientes:

- a. No es confiable en suelos que generan presiones de poros altas
- b. No tiene en cuenta que algunos suelos presentan degradación de la resistencia hasta en un 15% debido a la onda sísmica.

2. Métodos de análisis de las deformaciones

En este análisis se tienen en cuenta las deformaciones inducidas por el evento sísmico. Si las fuerzas de inercia debidas al sismo y a la situación del talud (Estáticas + Dinámicas), superan las fuerzas resistentes disponibles, el factor de seguridad alcanza valores por debajo de 1.0 y la masa de suelo no está más en equilibrio y se produce una aceleración por el desbalance de fuerzas. Esta aceleración corresponde a una deformación a lo largo de la superficie de falla considerada.

El análisis de estas deformaciones se realiza por medio de una doble integración de la aceleración de exceso.

El problema del análisis dinámico consiste en su complejidad, la cual lo hace poco práctico para análisis rutinarios de estabilidad. Existen sin embargo, programas basados en elementos finitos, los cuales permiten trabajos de investigación detallados sobre las deformaciones y sus efectos.

Método del desplazamiento de Newmark

Este procedimiento extiende el análisis a la consideración de la historia de aceleraciones (Acelerogramas) de la masa de deslizamiento.

Este acelerograma se selecciona en tal forma que represente un modelo realístico de los movimientos del terreno esperados en el sitio y luego se compara con la aceleración límite para determinar los desplazamientos permanentes.

El método de Newmark asume que existe una bien definida superficie de falla, un material rígido y perfectamente plástico, una pérdida despreciable durante el sismo y la ocurrencia de deformaciones permanentes solamente si el esfuerzo dinámico supera la resistencia al cortante. Adicionalmente, se supone que el talud solo se deforma hacia abajo. El procedimiento requiere que previamente se determine el valor de la aceleración crítica k_y , utilizando métodos convencionales de equilibrio límite.

La principal dificultad de este método es la selección de un acelerograma apropiado que simule el movimiento del talud; sin embargo, una vez se ha seleccionado el acelerograma, se pueden calcular los desplazamientos permanentes por integración

doble de las partes del acelerograma que excede la aceleración límite para la superficie de falla crítica. Existen programas de computador para desarrollar esta doble integración (Abramson, 1996) (Houston, 1987).

Los desplazamientos permanentes representan el movimiento del centro de gravedad de la masa deslizada. Existen criterios encontrados sobre desplazamiento permanente tolerable, mientras algunos Autores como Wieczorek (1985), Keefer (1989) y Jibson (1993) utilizan límites permitidos entre 5 y 10 centímetros; Hynes-Griffin y Franklin (1984) sugieren que se pueden permitir desplazamientos hasta de cien centímetros para una presa de tierra bien construida. Debe tenerse en cuenta que los taludes construidos con materiales dúctiles, plásticos, pueden permitir desplazamientos mucho mayores que los taludes de materiales frágiles y sensitivos.

REFERENCIAS

- Abramson L.W., Lee T.S., Sharma S., Boyce G.M., (1996) "Slope stability and stabilization methods". Wiley-Interscience, p.628.
- Ashford S.A., Sitar N. (1994) "Seismic Response of Steep Natural Slopes, Report No. UCB/EERC-94/05 – University of California at Berkeley, 207p.
- Ashford S.A., Sitar N., Lysmer, J.N., Deng, N. (1997) "Topographic Effects on the Seismic Response of Steep Slopes", Bulletin of the Seismological society of America, 87(3).
- Belousov A., Belousova M.(1996) "Large scale landslides on active volcanoes in the 20th century –Examples from the Kurile-Kanchatka region(Russia)" Seventh international Conference on Landslides Trondheim Norway. Vol. 2, pp. 953-957.
- Boore, D.M. (1972) "A Note on the Effect of Simple Topography on Seismic SH Waves", Bulle, Seis. Soc. Am., 62(1) , pp. 275-284.
- Celebi, M. (1991) "Topographic and Geological Amplification: Case Studies and Engineering Implications", Structural Safety, 10 (1991), pp.199-217.
- Gutenberg, B., Richter, C.F. (1954) " Seismicity of the Earth" Associated Phenomena, Princeton University Press.
- Housner, G. W. (1970) "Strong ground motion en Earthquake engineering", R. Wiegel, editor, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Ingeominas-Carder (1994) "Mapa preliminar de amenaza volcánica potencial complejo de Domos Santa Isabel, cordillera central de Colombia". Revista de Ingeominas No. 3. pp. 1-28.
- Irikura, K (1996) "Strong ground motion of the Hyogoken-Nambu earthquake and the fault model. The Great Hanshin – Awaji Earthquake Disaster – for the Disaster Prevention Research". Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, pp81-98.
- Ishihara K.,(1985) "Stability of natural deposits during earthquakes". Proceedings of the eleventh international conference on soil mechanics and foundation engineering. San Francisco, pp.321-376.
- Keefer D.K. (1984) "Landslides caused by Earthquakes" Geological Society of America Bulletin, Vol. 95, pp. 406-421.
- Konagai K., Matsushima T. (1996) " Effect of dilation on the dynamic stability of artificial coarse granular slopes." Seventh international Conference on Landslides Trondheim Norway Vol 2. Pp. 983-988.
- Kramer S.L., (1996) "Geotechnical earthquake engineering". Prentice Hall. New Yersey, 653 p.
- Makdisi F.L., Seed H.B., (1978), "Simplified procedure for computing maximum acceleration and natural period for embankments, ". Report UCB/EERC-77/19, Eartquake engineering research center, University of California, Berkeley, California.
- Marcuson, W.F. (1981) "Moderator's report for session on Earth dams and stability of slopes under dynamic loads". Proceedings, International conference on recent advances in Geoechnical earthquake engineering and soil dynamics, St. Louis, Missouri, Vol. 3 p.1175.
- McClure, F.E. (1973). "Performance of Single family Dwellings in the San Fernando Earthquake of February 9, 1971". U.S. Dept. of Commerce, NOAA, May.
- O'Rourke, T.D., Crespo, E. (1988). "Geotechnical Properties of Cemented Volcanic Soil", J. Geotechnique. Engrg., ASCE, 114 (19),pp 1126-1147.

- Okimura, T. (1995). "Characteristics of slope failures in the Rokko mountains triggered by the Hyogoken-Nanbu earthquake". Research Report of landslides and slope failures triggered the Hyogoken-Nanbu earthquake, Japan Landslides Society, pp.1-15 (in Japanese).
- Pande P., Joshi K.C., Narula P.L.(1996) " Coseismic landslides and fractures induced by Uttarkarkash Earthquake (1991) Remedial measures and mitigation efforts" Seventh international Conference on Landslides Trondheim Norway Vol 2 .pp. 1019-1024.
- Pierson, T. (1990) "Perturbation and melting of snow and ice by the 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia, and consequent mobilization, flow and deposition of lahars. Jour. Volcanology and Geothermal Research, 41 (1-4): 17-66
- Plant, N., Griggs, G.B. (1990) "Coastal Landslides Caused by the October 17, 1989 Earthquake", California Geology, 43 (4) 75-84.
- Romero J.A., Martínez J.M., Avila G., Escallón J.O. (1994) "El sismo del 21 de julio de 1993, Puerto Rondón, llanos orientales de Colombia, Revista Ingeominas No. 4, pp. 15-34.
- Sassa, K. (1996) "Prediction of earthquake induced landslides" Proceedings of the Seventh International Symposium on landslides. Trondheim, pp. 115-132.
- Sassa, K., Fukuoka H., Scarascia G., Irikura K, Okimura T. (1995) "Landslides Triggered by the Hyogoken-Nanbu Earthquake" Landslide News No.9 Tokyo, pp 2-5 .
- Sassa, K., Fukuoka, Scarascia H., Mugnozsa, G.- Evans, S. (1996) "Earthquake-Induced-Land-slides: Distribution, Motion, mechanisms", in special Issue on Geotechnical Aspects of the January 17, 1995, Hyogoken – Nambu Earthquake, Soils and Foundations, Japanese Geotechnical society, Jan., pp. 53-64.
- Schuster, R.L. (1996) "The 25 most catastrophic landslides of the 20th century" Proceedings of the eighth International Conference and field trip on landslides. Granada-España, pp. 53-62.
- Seed, R.B., Bray, J.D., Chang, S.W. , Dickenson S.E. (1997) "Site-dependent seismic response including recent strong motion data" Seismic Behaviour of Ground and Geotechnical Structures, Seco e Pinto, Editor, Hamburgo, pp. 125-134.
- Sitar, N. , Clough, G.W. (1983) "Seismic Response of Steep Slopes in Cemented Soils", J. Geotechnique. Engrg., ASCE, 109(2) 210-227.
- Thouret, J.C. (1990). "Effects of the November 13, 1985 eruption on the snow pack and ice cap of Nevado del Ruiz volcano, Colombia. Jour. Volcanology and Geothermal Research, 41 (1-4): 177-201.
- Wang, W. (1979) "Some finding in soil liquefaction". Water conservancy and hydroelectric power scientific research institute, Beijing, China.
- Wieczorek G.F (1996) " Landslide triggering mechanisms". Landslides Investigation and Mitigation. Special Report 247. Transportation Research Board. Washington, pp. 76-90
- Yamanouchi T. (1977) "Tensile Stresses in Unsupported Slopes of a Pumice Soil", Proceedings, Ninth I.C.S.M.F.E., Tokyo, Vol. 3 418-419.
- Yang D.B. , Zhengzhong Z. (1996) " Investigation and analysis of seismic landslides in the loessal region of China' s Northwest" Seventh international Conference on Landslides Trondheim, Norway Vol 2. pp. 959-964.