Estado actual del Conocimiento del proceso cíclico de licuefacción en suelos sujetos a solicitaciones sísmicas. Ejemplos de Casos.

POR:

Tupak Ernesto Obando Rivera

Ingeniero en Geología. Master y Doctorado en Geología, y Gestión Ambiental por la Universidad Internacional de Andalucía UNÍA (Huelva, España). Especialista en Deslizamientos Volcánico y No Volcánicos

2009

Introducción

En este documento se analizan criterios teóricos-cognoscitivos y conceptuales relevantes que se abordan en este documento incluido en la presente tesis doctoral basada en información procedente de literatura científica relacionada con la ingeniería de suelos. Se especifican temas, definiciones conceptuales y operacionales, modelos numéricos y gráficos, y otros hallazgos de mucho provecho para este trabajo investigativo. El documento sigue el orden de contenido a como trabajo original del Autor citado en la Bibliografía.

2.1.- Definición de licuación del suelo

Se considera conveniente revisar conceptos básicos, propuestos por varios escritores:

MET-ALARN (2005), se refiere con esta expresión a la facilidad o propensión del terreno a generar licuación del suelo. O bien, **González Vallejos (2002),** define este término como la posibilidad de que una zona quede afectada por un determinado proceso, expresada en diversos grados cualitativos y relativos. Depende de factores que controlan o condicionan la ocurrencia del proceso, que pueden ser intrínsecos a los propios materiales geológicos o externos.

González Vallejos (2002), define suelos licuables, aquellos suelos con contenido areno-limoso, en estado saturado, al experimentar esfuerzos cortantes anómalos y rápidos, permiten un aumento de las presiones intersticiales (por falta de drenaje), en que la resistencia al corte (**Foto 5**) desaparece y el material se comporta como líquido, dando lugar a movimientos verticales y horizontales de su masa, que se traducen en deslizamientos, o en grandes asientos.

Foto 5. DAÑOS VIAL POR LICUACIÓN DE

SUELO EN PRINCE WILLIAM SOUND, ALASKA. 1964

Esta fuente, considera que este fenómeno de suelos areno-limosos flojos con baja permeabilidad ha dado lugar, durante terremotos, a grandes desastres. Por ejemplo, Niigata (Japón), en el terremoto de 1964, y Anchorage (Alaska) en ese año. (**Véase Foto 6**)

Foto 6. DETRIMENTOS EN SUBSUELO DE INFRAESTRUCTURA VIAL EN UN ÁREA DE LOS ESTADOS UNIDOS. 28/10/1989

En general, la licuación del terreno se produce cuando determinados tipos de suelos afectados por terremotos desarrollan elevadas presiones intersticiales de forma rápida (sin drenaje), dando lugar a una pérdida de la resistencia al corte (**Foto 5**) y a la rotura del suelo, que se comporta como si fuera un líquido.

De acuerdo con **González Vallejos (2002),** el fenómeno de la licuefacción, como también es conocido, provoca el fallo de las cimentaciones, rotura de taludes y deslizamientos. Los suelos susceptibles a perder parte de su resistencia ante solicitaciones dinámicas son las *arenas finas y flojas y las arenas y limos mal graduados.* Otras de las condiciones necesarias para que tenga lugar este modo de comportamiento del suelo son niveles freáticos esté alto, cerca de superficie, que según **Ineter** para la Ciudad de Managua es bastante variable, y que el grado de compactación sea bajo, equivalentes a valores N de SPT inferior a 20 golpes. De acuerdo con la observación de zonas afectadas por licuación, ésta tiene lugar en las siguientes circunstancias:

- Sismos con magnitud igual o superior a 5.5 con aceleraciones superiores o iguales a 0.2g.

- Por debajo de 15 metros de profundidad no se han dado licuefacciones.

- En la mayoría de los casos donde se han observado licuefacciones el nivel freático estaba a poca profundidad, inferior a 3 metros; por debajo de 5 metros la susceptibilidad de licuefacción es muy baja.

Algunos expertos **(Vallejos, 2002),** consideran que una propiedades más importante que caracterizan los suelos licuefactables es el bajo grado de compactación, es decir N< 10 para profundidades < 10 m y N < 20 para profundidades > 10 metros.

Por su parte, **Maximiliano Astroza** en su estudio relativo a los Efectos de los Terremotos Chilenos en la Obras Civiles editado por la Universidad de Chile, considera que la licuación ocurre en suelos arenosos saturados que pueden transformarse en fluidos por efecto de un movimiento sísmico. Dada las condiciones que deben presentar los suelos, la licuación se observa en lo sectores ubicados junto a las riberas de los ríos o en el borde costero. Según la **fuente**, los daños originados por este proceso son espectaculares y se deben a grandes deformaciones de las fundaciones. Uno de los síntomas de la presencia de este fenómeno es la formación de cráteres con eyección de barros

Otras de las definiciones existentes sobre la licuación del suelo están recogidas en el *"Mapa de Susceptibilidad de Licuefacción (***Figura 1***) para la Península de Nicoya, Guanacaste, Costa Rica*" de **OVSICORI-UNA (Octubre, 2003)**, quienes consideran este proceso (**Figura xxx)** en que los materiales térreos se licuan como una amenaza sísmica secundaria causada por una condición especial de algunos suelos o substratos constructivos, a veces llamados suelos suaves, principalmente aluviones y sedimentos poco consolidados al ser sometidos a las aceleraciones de un sismo de magnitud mayor o igual a 7.0. Como consecuencia los sedimentos que conforman los suelos aluvionales, en especial aquellos formados por arenas o gravas, pierden cohesión y forma original (adquirida durante su formación) y expulsan agua de los espacios entre los granos que forman el sedimento para deformarse en forma permanente. El agua que se libera del suelo o substrato se escapa a la superficie a través de grietas o volcanes de arenas.

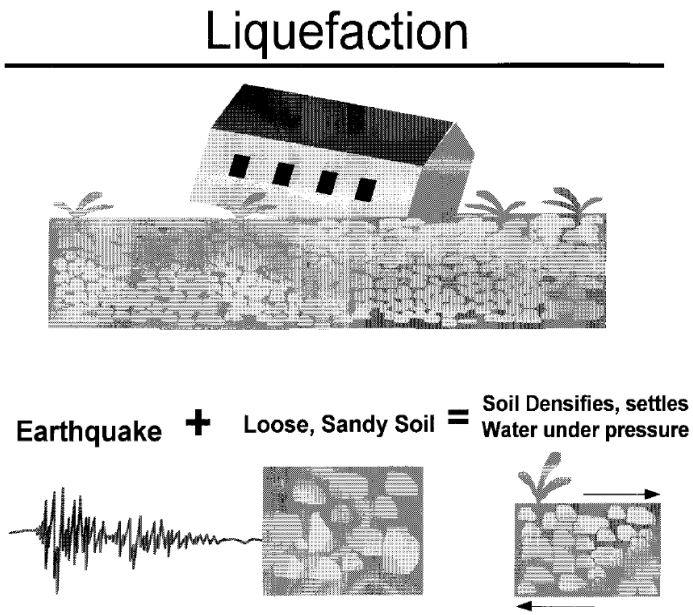


Figura 1. MECANISMO DE LICUEFACCIÓN DEL SUELO. **Fuente:**

Según **OVSICORI-UNA (Octubre, 2003)**, expresan que los daños causados directamente por la energía liberada por un sismo constituye la amenaza sísmica primaria. Sin embargo, existen sitios en donde las condiciones locales tienden a aumentar los daños causados por un sismo y se les conoce como amenazas sísmicas secundarias. Entres estas, la amplificación sísmica, la ruptura superficial por fallas, los deslizamientos inducidos por un sismo y la licuación de suelos. Este último principal eje de investigación del presente

trabajo doctoral. Con frecuencia las amenazas sísmicas secundarias producen más daños en sitios vulnerables a esas amenazas que la amenaza sísmica primaria o sea la liberación de la energía sísmica.

Sauster (1989), opina que el estado de licuefacción, se presenta únicamente en suelos saturados y pocos densos como arenas y las arenas limosas sin consolidar.

De igual manera, **Rico, A. y Del Castillo, H. (1988),** manifiesta que el fenómeno de licuación de suelo consiste en la pérdida rápida de resistencia al esfuerzo cortante, temporal o definitivo. Tal pérdida conduce al colapso a cualquier estructura civil (Figura 2) edificada sobre o hecha de un material que entre en licuación

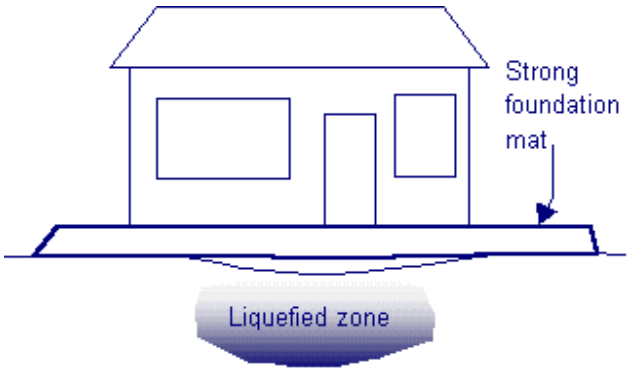


Figura 2. ZONA LICUABLE EN CIMIENTOS DE UNA EDIFICACIÓN SIMPLE.

Franz Sauter F., en su libro *Fundamento de Ingeniería Sísmica* del año 1989, define la Licuefacción del Suelo como la transformación de suelos granulares saturados y poco consolidados, por ejemplo arena, en una masa con propiedades de un líquido o fluido debido a la vibración del terreno causada por un sismo.

Según Jesús González en su investigación sobre Evaluación de riesgo de licuación de suelos utilizando sísmicas de refracción somera en la isla barrera de la Laguna de Unare, Estado Anzoátegui, considera que los estudios de licuación de suelos se realizan mediante ensayos geotécnicos que generalmente resultan muy costosos, como por ejemplo: el ensayo de penetración estándar (Standard Penetration Test, SPT) y el ensayo de cono de penetración (Cone Penetration Test, CPT). De acuerdo con este autor, el fenómeno de licuación se considera un proceso no drenado, lo que implica que se presenta generalmente entre capas lutíticas que evitan que el agua salga del estrato licuado, y mayormente ocurre en suelos de comportamiento granular que tengan una distribución de partículas uniforme y

con cierta cantidad o contenido de materiales finos como limos o arcillas, es decir, gravas y arenas bien gradadas, arenas finas y arenas limosas.

La fuente opina que entre las condiciones necesarias que se deben reunir para que los suelos granulares experimenten el fenómeno de licuación se encuentran: gradación uniforme y redondez de sus partículas, deben estar sueltos y sometidos a elevados esfuerzos de confinamiento, el material debe poseer baja densidad, debe estar ubicado por debajo el nivel freático, lo cual le confiere la condición de ser un sedimento saturado, y principalmente, debe estar sometido a la acción de fuerzas dinámicas como las que generan los sismos. A medida que en un terreno granular el contenido de finos aumenta, disminuye la propensión a la licuación.

Foto No x. Licuación de suelos en Kobe (Japón) tras terremoto del 17 de enero de 1,995. Fuente: Guilen, M.(2,006)

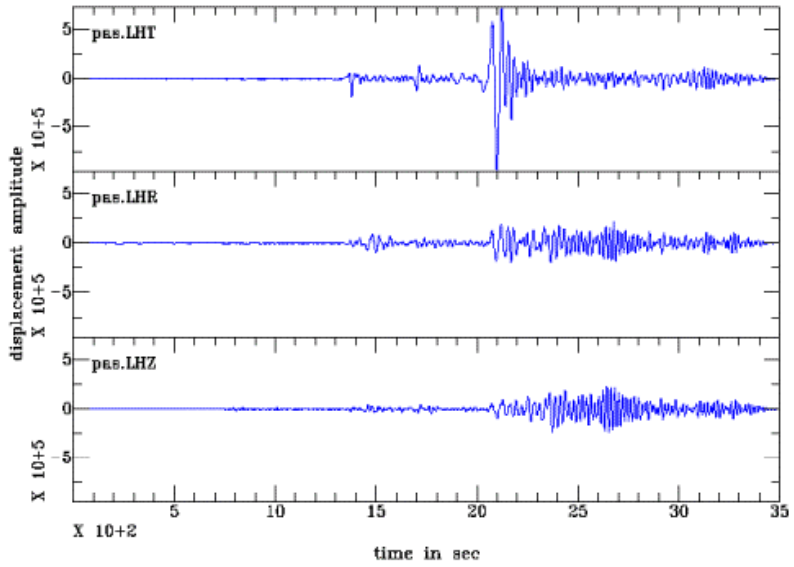
Jesús González, manifestó que un suelo arenoso totalmente saturado se licua cuando la resistencia al esfuerzo cortante entre sus partículas disminuye a tal grado que la mezcla agua-suelo se comporta como un semilíquido o líquido. Tal fenómeno está condicionado por la generación de presión en el agua, también conocida como presión de poro, dentro de la masa del suelo, lo que determina la reducción de los esfuerzos efectivos, y con ello, la disminución y pérdida temporal de su resistencia al esfuerzo cortante. González, expresó que el fenómeno de licuación de suelos tiene un potencial destructivo muy alto. En muchos países, ha causado daños severos en obras de ingeniería, infraestructura y vivienda tales son los casos reportados durante los sismos de Michoacán, 1985 y Manzanillo, 1995 en México; Niigata, 1964 y Kobe, 1995 en Japón; Anchorage 1964 en Alaska y California, 1994 en E.U.A; por citar sólo algunos casos.

Foto No x. Inclinación del edificio debido a fallos del terreno a causa de la licuación de suelos en Kobe (Japón) durante sismo del 17 de enero de 1,995

González, aseveró que para la estimación de potencial de licuación de suelo se sigue procedimiento estándar, el cual consiste en realizar inicialmente una clasificación de la zona de gradación en función de la granulometría y contenido de finos de los suelos en estudio utilizando ábacos específicos. Posteriormente se realiza el cálculo del valor de N equivalente (Neq), para de esta manera obtener los valores de presión vertical efectiva y aceleración equivalente (aeq), estos valores se calcularon a partir del valor de número de golpes N obtenido con ecuaciones empíricas que relacionan N con Vs, la cual se extrajo de la sísmica. Finalmente, empleando estos valores se puede determinar la factibilidad de licuación en función del tipo de suelo.

Un caso reciente fue el terremoto de Kobe, que según Guillen, M. en sus trabajos opina que el suelo en esta ciudad esta formado por diferentes tipos de suelos sueltos, rocosos y

blandos, problema que se presentó también en el de la ciudad de México y de San Francisco. El movimiento del terreno fue de período largo de aproximadamente 16 cm en la dirección horizontal y de 10 cm en la dirección vertical, las más grandes jamás registradas en Japón tal como se ilustra en la gráfica que sigue. A su vez, Guillen, expresó que las aceleraciones y velocidades máximas se estimó en 832 gals y de más de 40 cm/seg. , Lo cuál varía de acuerdo a la distancia al epicentro, esto significa aceleraciones cercanas al de la gravedad terrestre, lo que indica que muchos objetos e inclusive persona no podían mantenerse en pie, ya que para aceleraciones de 1000 gals, los objetos serían despedidos por los aires, inclusive aceleraciones del 50% de la gravedad arrojarían al suelo objetos de pie.



Gráfica No 1. Sismograma del terremoto de Kobe del 17 de enero de 1,995

Fuente: Guilen, M (2,006)

Por su parte Alarcón, E. (1989), es del criterio que uno de los problemas más espectaculares que ha debido afrontar la ingeniería sísmica es la licuación o licuefacción de suelos. Alarcón, dice que los estudios más serios para interpretarlo se produjeron tras los terremotos de Niigata (1964) en Japón y Anchorage (1964) en Alaska, aunque el fenómeno

era conocido de antiguo, y todos los laboratorios de mecánica del suelo del mundo tienen preparada una demostración de este.

No obstante, Alarcón, opina que evidentemente un fenómeno tan complejo no puede ser representado con los modelos antes referidos. Su modelado matemático es todavía una cuestión abierta.

Este autor, opina que la aproximación práctica de Seed consiste en comparar las curvas de tensión cíclica provocadas por N ciclos del terremoto de cálculo con la curva, determinada en laboratorio, de la tensión cíclica capaz de producir la licuación en N ciclos en el terreno en cuestión. De esta comparación es posible extraer la zona peligrosa, aunque para ello ha sido preciso desarrollar criterios que permiten pasar de un movimiento sísmico real a otro equivalente y uniforme.

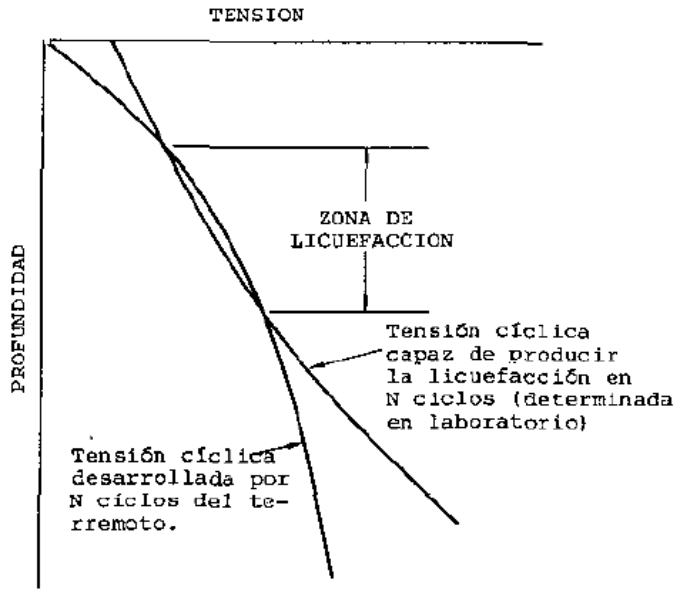


Figura x. Comparación de curvas de tensión cíclica de posible licuefacción en el laboratorio y en el terreno.

Alarcón, E. (1989), expresó que un elemento de terreno que sufre en superficie una aceleración máxima, cuando toda la columna de suelo de altura h se comporta como un - suelo rígido:

$$(\tau_{máx})_{rig} = \frac{\gamma h}{g} a_{máx}$$

y si se considera su deformabilidad:

$$\tau_{máx} = 0{,}65 \frac{\gamma h}{g} a_{máx}\, r_d$$

A su vez, el número de ciclos significativos depende de la magnitud del sismo, proponiéndose la siguiente correlación:

Magnitud	$5\frac{1}{4}$	6	$6\frac{1}{4}$	$7\frac{1}{2}$	$8\frac{1}{2}$
Número de ciclos significativos	2-3	5	10	15	26

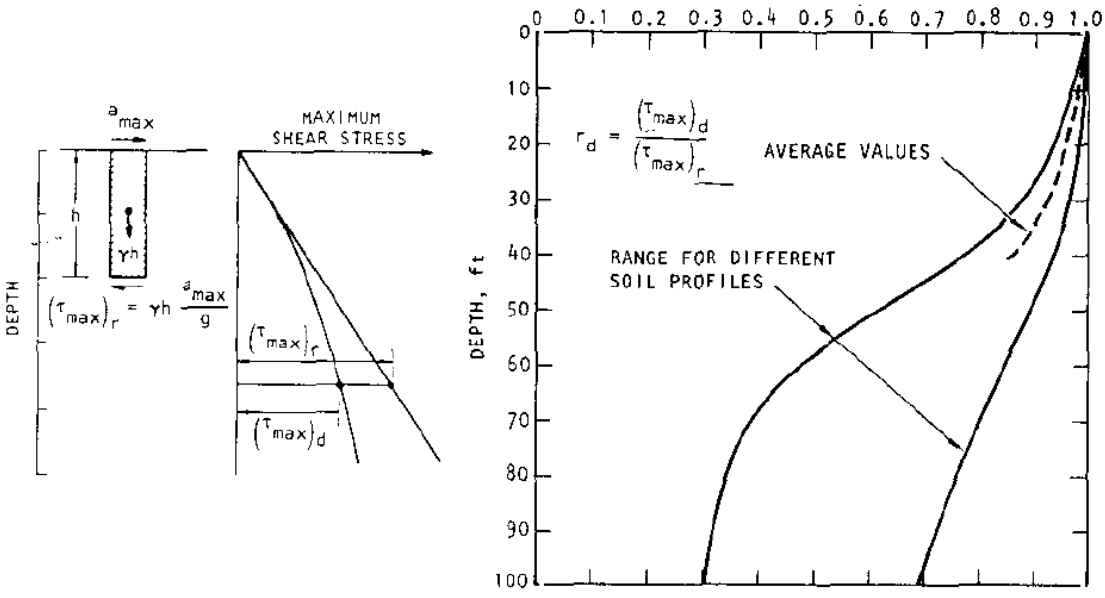


Figura x. Comportamiento de un elemento de terreno sometido a una aceleración en superficie.

Según Alarcón, E. (1989), esto permite construir curva de tensión cíclica producida por el terremoto a cada profundidad y escoger el número de ciclos a que debe ensayarse en una muestra en laboratorio tal como se ilustra en las figuras que siguen

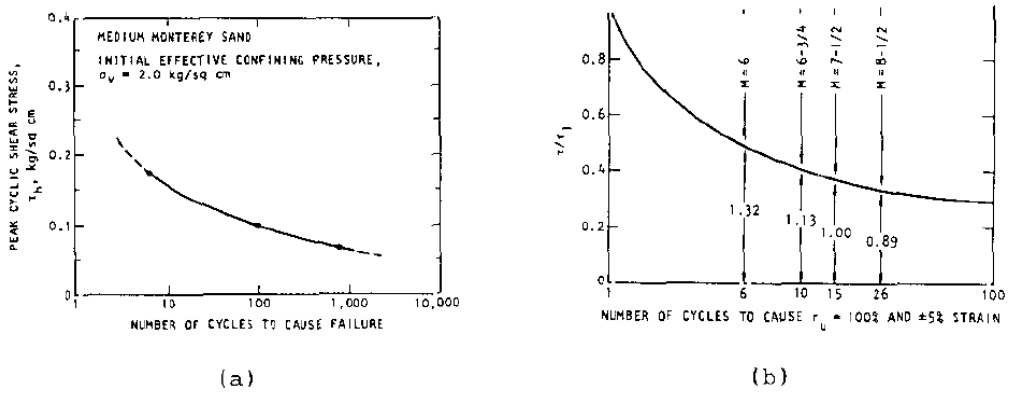


Figura No x. Curvas de tensión cíclica: a) resultado de ensayo en laboratorio. b) gráficas de variables parámetricas en función del número de ciclos. Fuente: Alarcón, E. (1989)

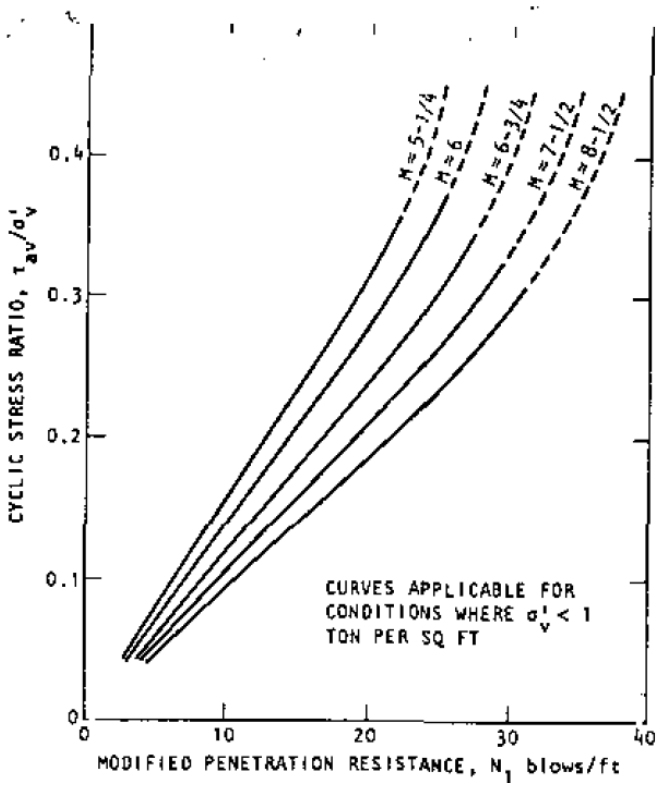


Figura No x. Curvas de tensión tangencial equivalente en función de la tensión vertical efectiva considerando la magnitud del terremoto M, y resistencia a la penetración N. Fuente: Alarcón, E. (1989)

Según Alarcón, E. (1989), las expresiones gráficas descritas se resumen en el siguiente modelo numérico que opera considerando la magnitud del terremoto y la resistencia de penetración N1, siendo esta la ecuación, y demás gráficas que se le relacionan:

$$\frac{\tau}{\sigma'_v} = 0{,}65 \frac{\gamma h}{g} \frac{a_{máx}}{\sigma'_v} r_d$$

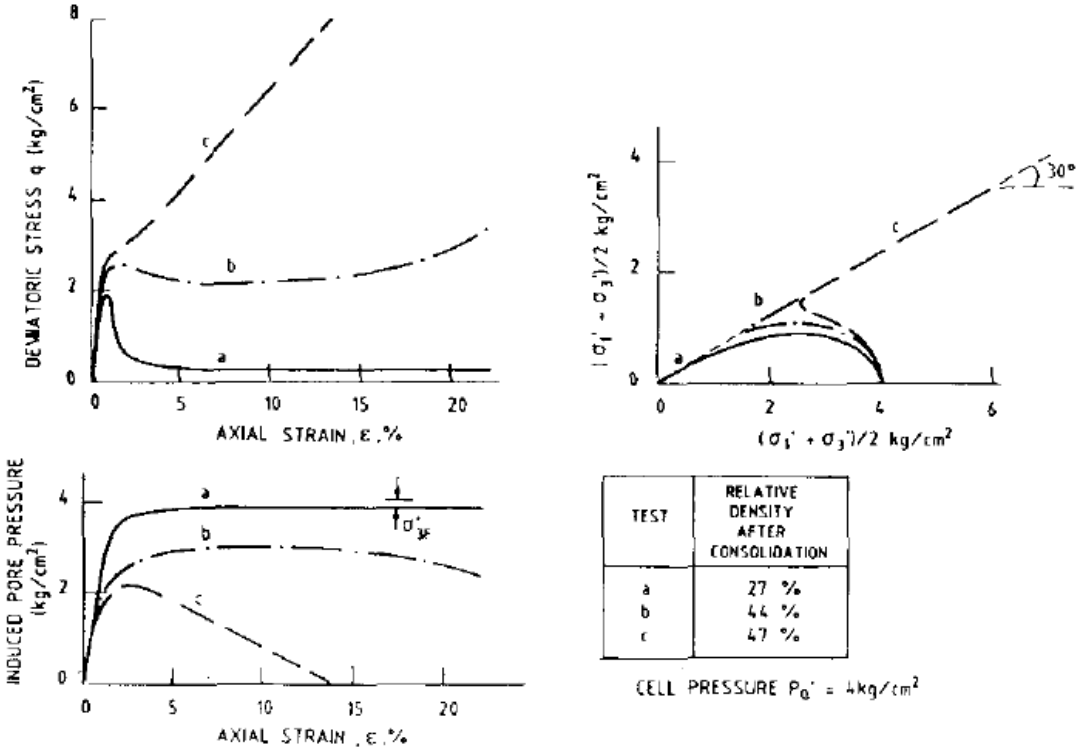


Figura No x. Comportamiento de arenas de diferente valor de densidad. Fuente: Alarcón, E. (1989)

No obstante, Alarcón, E., considera que un modelo muy prometedor ha sido desarrollado recientemente por Pastor e. al., sobre la plastificación con otras de potencial plástico, del cual no se tiene una plasticidad no asociada. Por ejemplo, tenemos en las gráficas el comportamiento de las arenas en estado suelto, y otro denso tal como se ilustra más abajo.

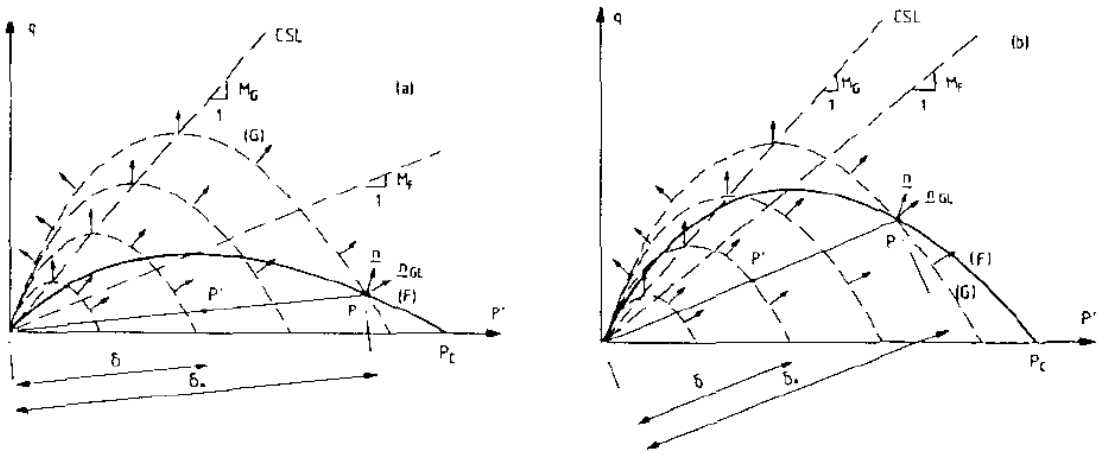
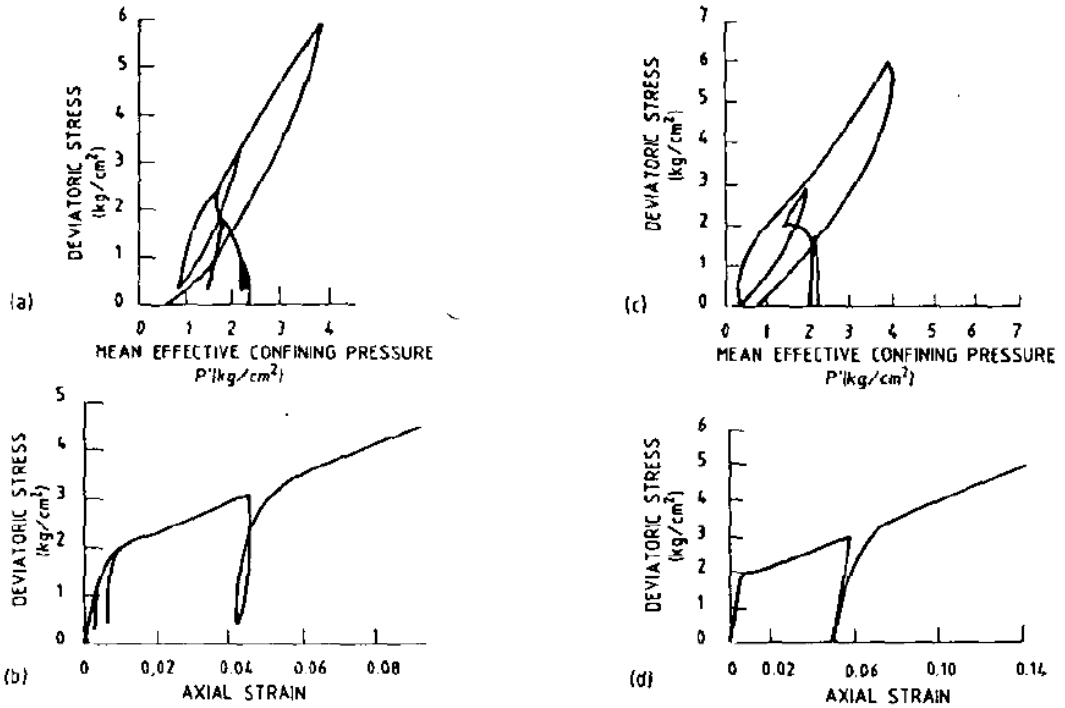


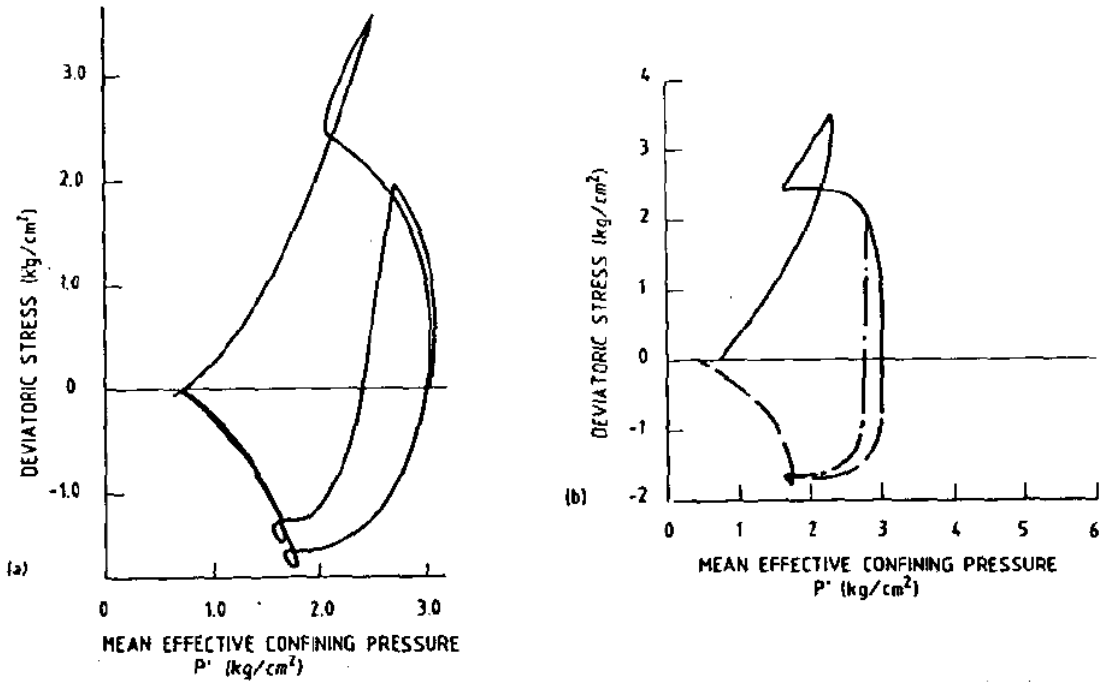
Figura No x. Comportamiento de arenas de distinto grado de plasticidad. Fuente: Alarcón, E. (1989)

Alarcón, E. (1989), es del criterio que los modelos hasta aquí propuestos ponen de manifiesto su capacidad predictiva validados a través de ensayos experimentales y simulaciones numéricas.



Loading–unloading behaviour of loose Fuji river sand: (a) and (b) data from ishihara *et al.* ; (c) and (d) predicted

Figura No x. Resultados experimentales y producidos por el modelo de Pastor et al. (1,985).



Loading-unloading behaviour of loose Fuji river sand: (a) data from Ishihara *et al.* ; (b) predicted

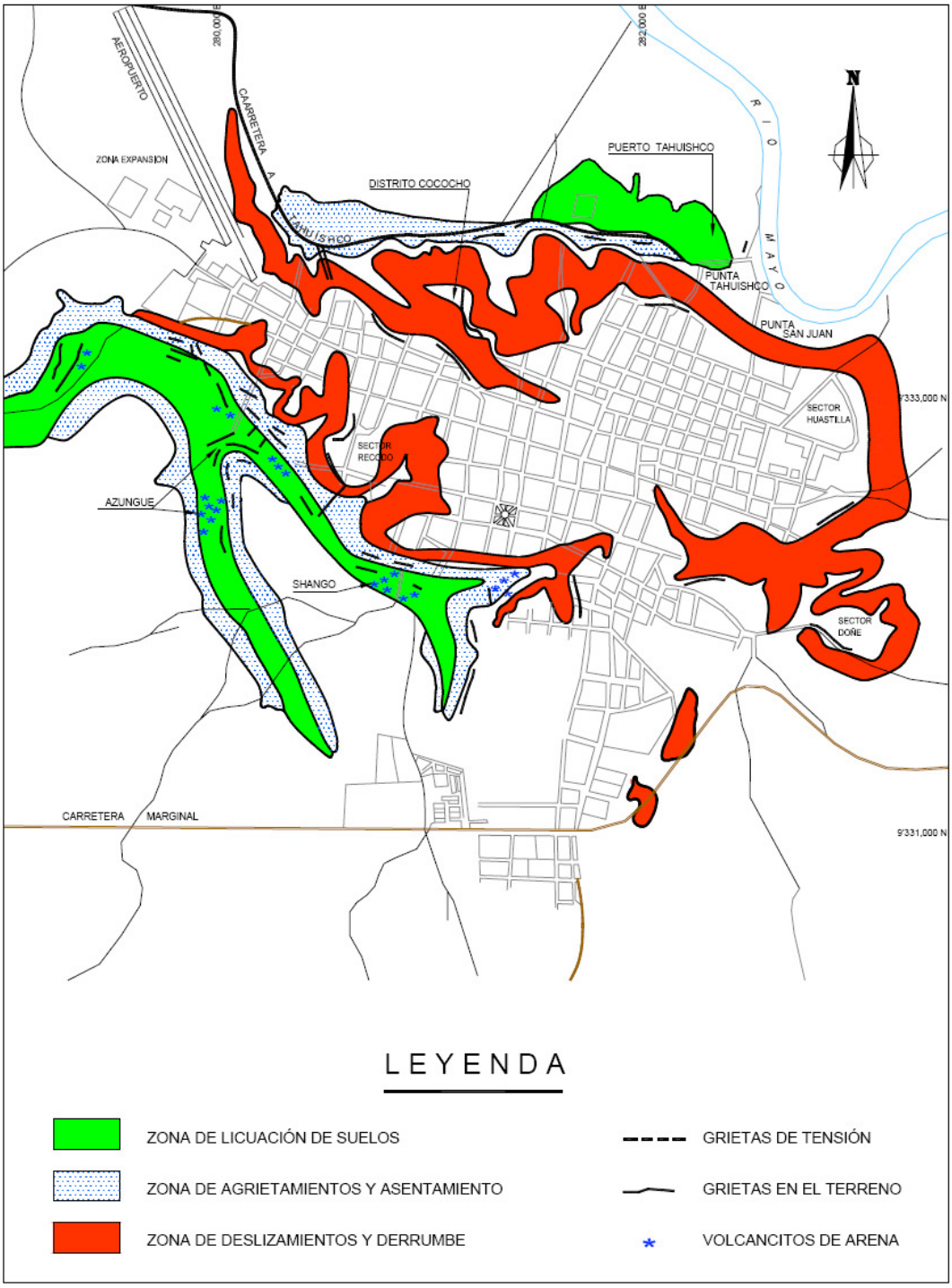
Figura No x. Resultados experimentales y producidos por el modelo de Pastor et al. (1,985).

Por otro lado, Alva Hurtado, J. E., se expresa sobre un caso típico de licuación como los acontecimientos ocurridos en el Puerto de Tahuishco en Moyobamba. Según el autor, se desarrollaron desplazamientos laterales en la escuela de Tahuishco en 1991 con grietas de 10 cm de ancho y 50 cm de profundidad. El piso de un aula fue destruido. En 1990 el fenómeno no alcanzó al edificio de la escuela, pero ocurrió en el patio de la escuela; también aparecieron volcanes de arena en el patio de la escuela. Durante terremotos de Chimbote del 31 de mayo de 1970, y los terremotos del 29 de mayo de 1990 y el 04 de abril de 1991 en Perú, se dañaron segmentos de la carretera entre Moyobamba y Tahuishco.

En Azunge, ubicado en las partes bajas de Moyobamba, se desarrollaron grietas en el terreno y desplazamientos laterales. Se reportó grietas de 100 m de longitud y 40 cm de ancho con 1 m de profundidad. La mayoría de las casas sobre los taludes se derrumbaron. La estación de bombeo y cañerías del alcantarillado fallaron. Todas las casas de tapial y algunas casas de albañilería en terreno blando se derrumbaron. En Shango, las casas de

tapial colapsaron. Se observaron grietas de 80 m de longitud y 20 cm de escarpa. En la calle Miraflores, las grietas eran de 30 m de longitud y 30 cm de profundidad. Durante el terremoto de 1990 se reportó licuación de suelos en El Chorro y Molino Valencia en Rioja, también en Segunda Jerusalén-Azunguillo, río Negro y La Conquista.

En el mapa que sigue presenta los efectos del terremoto en la ciudad de Moyobamba. El subsuelo en las partes más bajas de la ciudad, como Tahuishco, Azungue y Shango consiste de arenas finas y arenas limosas con densidades relativas bajas y el nivel de agua alto. El suelo en los taludes se constituye principalmente por arenas arcillosas y limosas con densidad media y el nivel de agua relativamente bajo, considerando que el terreno en la parte elevada de la ciudad (meseta) consiste en arcillas y arenas arcillosas de media a baja capacidad portante y nivel de agua profundo. Las Intensidades sísmicas en las partes más baja fueron dos grados más altas que en la parte elevada de la ciudad de Moyobamba.



Mapa No x. Efectos del Terremoto en la Ciudad de Moyabamba (Perú) por los Sismos el 29 de Mayo de 1990 del 4 de Abril de 1991

Igualmente, **INGEOMINAS (2,003),** el fenómeno producto de la carga sísmica cíclica descrito

Se define licuación como la pérdida de resistencia súbita del suelo debido a las cargas dinámicas impuestas a éste durante un evento sísmico y que, en consecuencia, puede tener impactos negativos sobre el área urbana de Tumaco.

El área delimitada como potencialmente licuable es aquella que, por las caraterísticas de los materiales superficiales existentes y la posición del nivel freático, presenta condiciones favorables para que se desarrolle el fenómeno de licuación durante un evento sísmico.
Fue definida a partir de evidencias históricas (sismo de diciembre de 1979), áreas de rellenos antrópicos y estudios de licuación.

Se consideran potencialmente licuables todas las zonas de rellenos hechos por el hombre (antrópicos), salvo el construido por la firma Texas Petroleum Company, bajo la consideración de que casi la totalidad de los rellenos existentes en la isla, no fueron ni diseñados, ni construidos técnicamente y por lo tanto tienen un comportamiento geotécnico muy pobre, lo que se corrobora con las evidencias de licuación encontradas después del sismo de diciembre 1979 y la ejecución de pruebas de campo.

Se consideran potencialmente licuables los sitios que, de acuerdo con los estudios de INGEOMINAS, presentan licuación superficial (en los primeros 4m de profundidad).

Son igualmente licuables y en mayor grado las áreas de baja mar, aunque no se han demarcado como tales en cuanto pertenecen al área marina y por tanto no son aptas para desarrollo urbano. Cualquier estructura con cimentación superficial que allí se ubique, estará en grave peligro frente a la amenaza por licuación.

Los límites del área potencialmente licuable son indicativos, es decir, no son exactos en razón a que la ubicación de los rellenos antrópicos existentes y las evidencias históricas en campo es aproximada.

En razón a que las características geotécnicas de los suelos naturales (arenas) y de los rellenos antrópicos son variables, se puede esperar que el fenómeno de licuación no se presente de manera homogénea en toda el área demarcada como potencialmente licuable, es decir, que el fenómeno podrá manifestarse con mayor intensidad en unos sectores que en otros.

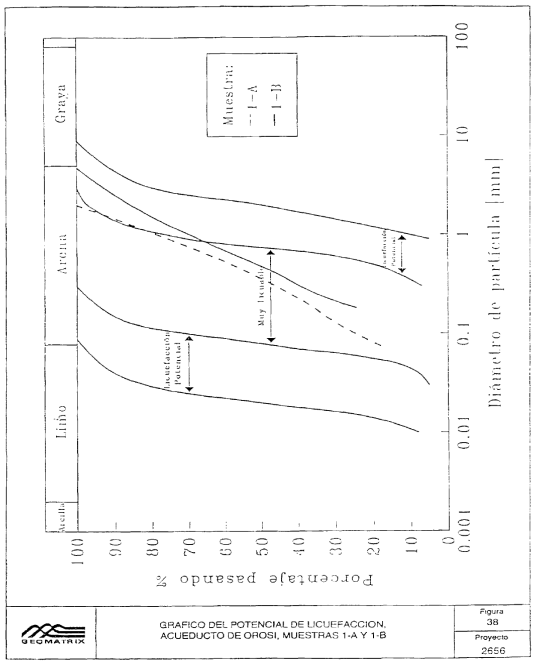
El fenómeno de licuación se manifiesta en superficie por hundimientos, ebulliciones de arena y/o flujos en los términos descritos en el numeral 3 de la memoria explicativa de este mapa.
De estos efectos son los hundimientos los que probablemente causen mas daño a las estructuras, aunque de manera diferencial dependiendo de las diferencias de vulnerabilidad de dichas estructuras.

La profundidad y tipo de cimentación de las estructuras es un factor determinante de la vulnerabilidad frente a este fenómeno. Estará expuesta al fenómeno cualquier estructura o instalación con cimentación superficial (hasta 4m de profundidad).
No obstante el nivel de daño estará determinado, además de la magnitud de los hundimientos, por la calidad de la cimentación y estuctura. Las edificaciones sin vigas de amarre y/o columnas de confinamiento son altamente vulnerables, de tal manera que hundimientos de baja magnitud pueden causar daños severos.

Hay que destacar, que existe procedimiento simplificado para el análisis de la licuefacción, como veremos más adelante, que se basa en fórmulas experimentales que toman como puntos de partida los datos geotécnicos del suelo y los resultados obtenidos del análisis

dinámico de la estructura (tensiones). Así se compara la solicitación debida al sismo con la resistencia del terreno y se obtiene el valor de CSR (Cyclic Stress Ratio).

Entre otras de las metodologías empleadas para la investigación de la licuefacción del suelo tenemos el Método de Tsuchida (1970), el Método de Iwasaki (1978), entre otros. Todas ellos tratan de evaluar el factor de resistencia de licuefacción y el factor del potencial de licuefacción. La mayoría de los métodos disponibles y reconocidos a nivel internacional se apoyan de ensayos granulométricos, límites de consistencia (materiales cohesivos y/o firmes), en el número de golpes N en caso de ensayo de Penetración Estándar (SPT), el peso unitario de los materiales, diámetro medio de la partícula (D50) y la aceleración máxima en la superficie del terreno, y otros.



A su vez, es preciso decir que los terremotos por sí mismos suelen ser muy dañinos pero cuando a la acción del sismo se le suma el efecto de Licuefacción del terreno los resultados son catastróficos.

Lee, K.L. et. al. (1,976), opinan que se reportado daños materiales ocasionados por la licuación en regiones altamente sísmicas como Alaska y Japón. Expresó, que en Guatemala, en el área de Amatitlán, también fueron observados algunos deslizamientos de suelos, relacionados con licuefacción, después del terremoto del febrero de 1976.

Por su parte, Schmidt, R. (2,005), dice que la licuefacción es un efecto secundario durante terremotos. Se refiere a sedimentos poco o no consolidados y saturados de agua. Los depósitos en la superficie o en un nivel cercano de la superficie pueden perder su resistencia causados por el movimiento de la tierra. Cuando ocurre debajo de edificios u otras estructuras de construcción puede causar daños graves.

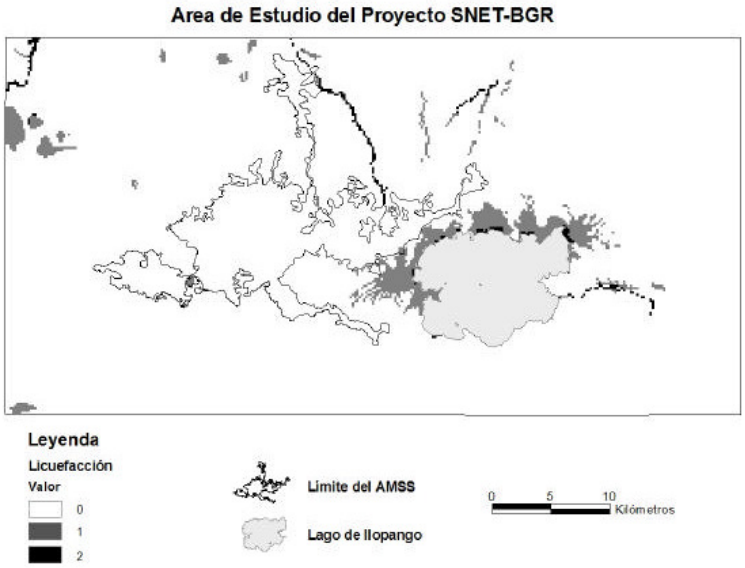


Figura x. Mapa de susceptibilidad a licuefacción del área de estudio con su evaluación para el cálculo de la amenaza sísmica relativa. Se tomaron en cuenta las unidades litológicas sedimentarias poco consolidadas y potencialmente saturadas de agua.

Según Estudios científicos realizados, la licuefacción de suelos es un fenómeno que puede afectar los materiales granulares como son las arenas. La fuerza de resistencia de un suelo granular depende de la fuerza de contacto entre sus granos, la cual disminuye con la presión del agua intersticial. Cuando ocurre un sismo, la sacudida eleva la presión del agua en los poros del suelo y si esta llega a igualar la fuerza de contacto entre los granos, la resistencia del suelo se reduce a cero. En este caso, la capacidad de carga del suelo es nula y efectivamente el suelo se comporta durante la sacudida como un líquido y cualquier estructura cimentada en un suelo
licuado se hunde.

Esta fuente, es del criterio que las cenizas volcánicas, como la tierra blanca, son propensas a la licuefacción y durante el sismo del 3 de mayo de 1965 hubo varias observaciones de

licuefacción en las orillas del Lago de lopango. La licuefacción causó daños importantes en los muelles de Amatitlán y agrietamiento en la pista del aeropuerto de Ilopango.

A su vez, la susceptibilidad de una arena a la licuefacción durante un sismo depende de la intensidad y la duración del movimiento sísmico, la saturación y la densidad del suelo. Una forma sencilla para medir la resistencia del suelo es con la prueba de penetración estándar (SPT). En la mayor parte de la AMSS el nivel freático se encuentra a profundidades del orden de 80 a 90 metros y por tanto no existe potencial de licuefacción. Sin embargo, en las orillas del Lago, donde aflora el nivel freático, existe amenaza de licuefacción. Además, pueden haber puntos locales, especialmente en las orillas de las barrancas, donde el suelo está saturado y por tanto susceptible a licuefacción. Un caso de licuefacción aislada fue observado en la Colonia Santa Marta en el sismo de 1986, posiblemente asociado con la fuga de agua del sistema de distribución.

Cuando un suelo suelto está sujeto a un movimiento sísmico tiende a compactarse, tal como se hunde el contenido de una azucarera cuando ésta es sacudida. Debido a la topografía de San Salvador, especialmente por su alto releve y las barrancas que cruzan la ciudad, mucha construcción se hace encima de zonas de relleno donde se nivela el terreno con suelo extraído de otro lugar.

Normalmente se usa la tierra blanca para el relleno en San Salvador. Es necesario compactar un relleno para garantizar una adecuada capacidad portante y reducción de asentamientos. En muchas partes de San Salvador existen zonas de relleno que por no haber sido compactados están propensos a asentamiento, especialmente en condiciones sísmicas. En su informe sobre el sismo del 3 de mayo de 1965, relatan el caso de un edificio de cuatro pisos de concreto reforzado que sufrió daños estructurales importantes debidos al asentamiento diferencial en sus zapatas, que se apoyaban en un relleno artificial no compactado. En el sismo del 10 de octubre de 1986 hubo daños severos en el Colegio Guadalupano debido a asentamientos de rellenos así como extensivos asentamientos en los rellenos (en una barranca) en el Externado de San José

En otros lugares se usan rellenos para formar diques que también pueden estar propensos al asentamiento y al derrumbe si no están compactados, como fue el caso de la planta de Unisola y Molsa sobre el Boulevard del Ejercito y un puente sobre la carretera al aeropuerto de Comalapa.

De acuerdo con datos aportados por la **Guía EDAN SALUD (2,008),** la licuación se presenta suelos arenosos, saturados con agua, usualmente ubicados cerca de ríos y mares. También en terrenos donde existieron lagos o lagunas; éstos al producirse el terremoto pierden su consistencia y mientras dura la vibración, pierden su capacidad portante, es decir, la de sostener las estructuras que han sido construidas allí.

Por otro lado**, Alcántara, I. et. al. (2,001),** expresan que los movimientos de masas térreas que ocurren en pendientes muy suaves, que dan como resultado desplazamientos casi horizontales. Con frecuencia son causados por licuación, fenómeno en el que los materiales sueltos y saturados, predominantemente arenosos y limosos, adquieren el comportamiento de un fluido como consecuencia de las vibraciones causadas por un sismo.

Esta fuente, aseveró que la licuación de suelos consiste en la pérdida de resistencia de suelos arenosos, con partículas de tamaño uniforme y que se encuentren saturados. Como consecuencia de las vibraciones del terreno natural que origina el paso de ondas sísmicas, durante la ocurrencia de un temblor.

Algunos especialista (CRÓNICAS DE DESASTRES—TERREMOTOS EN EL SALVADOR, 2,001), opinan que los sismos ocurridos durante el 13 de enero y 13 de febrero de 2001 en El Salvador produjeron graves efectos sobre la geodinámica externa, evidenciados por numerosos deslizamientos y fenómenos de licuefacción de suelos, que resultó en 1.159 personas fallecidas, 8.122 personas heridas y 1.582.428 damnificados en el país.

En muchos sitios web se divulga vídeo que captura el momento de ocurrencia del terremoto de 1964 en Niigata en Japón, y es una de las únicas evidencias reales que registra un

fenómeno asociado a los terremotos que se conoce como licuefacción. En ese vídeo se evidencia como el agua comienza a brotar del suelo, o literalmente, como el suelo parece cambiar de estado sólido a líquido en un lugar donde minutos antes la gente caminaba normalmente.

Hoy día se desconoce definición única para el fenómeno de la licuefacción, debido a la complejidad del fenómeno. Sin embargo, se puede afirmar que es uno de los fenómenos naturales más dramáticos y destructivos.

Puntualmente, el evento ocurrido en Niigata (Japón), una ciudad construida sobre terreno sedimentario de baja densidad, en donde las napas freáticas próximas a superficie, son producto de un fenómeno conocido como licuefacción.

La licuefacción se encamina a la pérdida de resistencia de los suelos, saturados en agua y sometidos a la sacudida de un terremoto, las cuales fluyen como un líquido a causa de un aumento de la presión. El sedimento cae y el agua que satura el suelo tiende a salir como una fuente que brota a borbotones. La licuefacción puede considerarse una consecuencia de los terremotos en lugares con terrenos poco consolidados o suelos arcillosos. Cuando se produce la licuefacción, los edificios y casas se encuentran flotando en un lodo inestable saturado en agua, y por lo tanto pierden la estabilidad. La pérdida de resistencia del suelo hace que las estructuras sean incapaces de mantenerse estables, siendo arrastradas sobre la masa de suelo líquido. Un experimento nos muestra un efecto extremo sobre la debilidad de un suelo en estado de licuefacción al que se le arroja una pelota, en él los sedimentos lejos de estar compactados, se comportan como líquido:

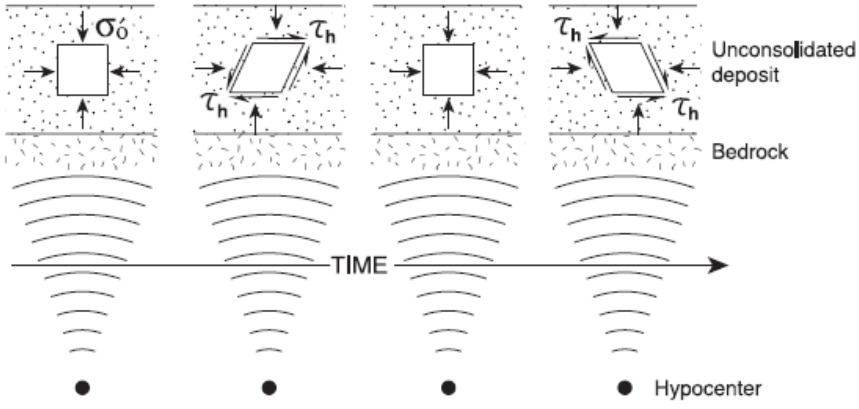


Figura x. Vista de la deformación de partículas del subsuelo ante reiteradas carga sísmica resultante del hipocentro.

Cabe mencionar, que efectos causados por el fenómeno de licuefacción pueden resultar también asombrosos, en algunos casos, los materiales o construcciones se hunden como tragados por la tierra. Por ejemplo, tenemos hundimiento del terreno con el terremoto de México en 1985, donde la construcción ha descendido de nivel a tal punto, que lo que era planta baja ahora se encuentra en el subsuelo.

Figura x: Subsidencia del terreno en Mexico, 1985

Algunos expertos (**Davis, M. y Masten S., 2005**), consideran las subsidencia del terreno como la pérdida de elevación de la superficie causada por la desaparición de soporte del suelo. La subsidencia del terreno origina muchos problemas, entre los que se encuentra:

- Daños a puentes, caminos, drenajes, construcciones y demás estructuras
- Inundaciones y cambios en los patrones de corrientes, entre otros

Los daños económicos que origina la subsidencia pueden resultar considerables, alcanzando cifras enormes de millones de dólares.

De acuerdo con reporte técnico del Departamento de Defensa de los Estados Unidos (MIL-HDBK-1007/3 15 NOVEMBER 1997, en muchos casos los daños ocurridos en edificios son causados por la liquidación o licuación de los cimientos por temblor de tierra combinados por la variabilidad del subsuelo. Daños mayores de este tipo, también, se

producen en edificios situados en rellenos. En regiones de actividad sísmica, debe hacerse todo lo posible para compactar el suelo através de fundación de apoyo para las intervenciones estructurales.

Según la fuente, los factores que favorecen la licuefacción son: el carácter de movimiento de tierra, tipo de suelo, las condiciones de estrés. Tres principales factores que controlan el desarrollo de cíclico la movilidad o de licuefacción.

De acuerdo con **RODRÍGUEZ, L. M. et. al. (2,006**), la manifestación de licuación, en Venezuela, ocurre en sismo de magnitud superior a 5 y distancias inferiores a 200 km. Este autor, propone una relación empírica, basada en un función logarítmica, representada por la ecuación m = 1,07 log (x) +1,57, y su correlación con evidencias de licuación y efectos de sitio; donde m = magnitud y x = distancia epicentral. Esta fuente, se basó en casos históricos venezolanos de licuación tras 26 sismos ocurrido en la región occidental, central y oriental de este país entre los años del 16 de enero de 1674 y 09 de Julio de 1,997, evaluados en un lapso de tiempo de 323 años.

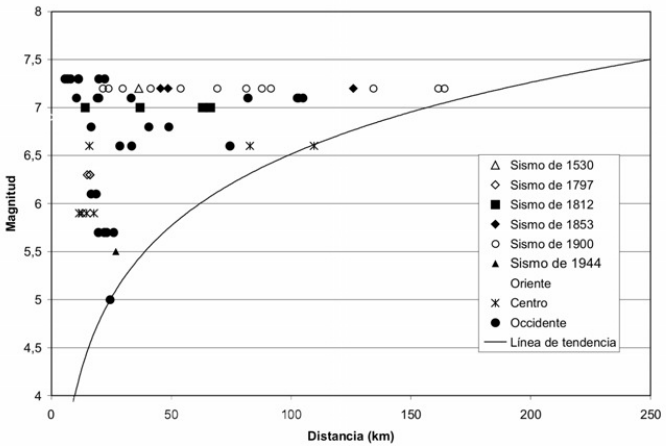


Figura x. Relación magnitud versus distancia partiendo de los datos sísmicos, donde la línea de tendencia es representada por la ecuación y = 1,07Ln(x) + 1,57; donde y = magnitud, x = distancia
Fuente: **RODRÍGUEZ, L. M. et. al. (2,006),**

RODRÍGUEZ, L. M. et. al. (2,006), opina que se entiende por licuación de suelos la transformación temporal a estado líquido de materiales granulares saturados, como consecuencia del incremento de la presión de poros. Se requieren ciertas condiciones para que esto ocurra: (1) deben ser suelos jóvenes y de baja compacidad; (2) que exista la presencia de capas de arenas saturadas e intercaladas con capas de arcillas y (3) en ambientes sedimentarios de formación reciente.

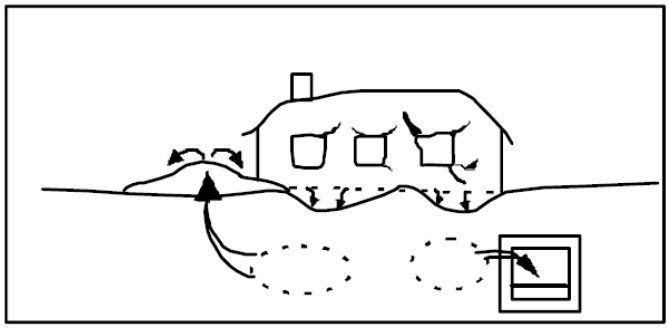


Figura x. Modelo esquemático sobre el fenómeno de licuación, formación de volcanes de arena.
Fuente: RODRÍGUEZ, L. M. et. al. (2,006),

El carácter de movimiento de tierra (la aceleración y contenido de frecuencia) controla el desarrollo de cepas de cizalla que causan la licuefacción. Por la misma aceleración, mayor magnitud terremotos son más perjudiciales, debido a las reiteradas aplicaciones de tensión cíclica.

Relativamente un buen drenaje en suelos tipo GW, GP son mucho menos probables de que se licuen SW, SP, o SM. Los suelos granulares densos tienen menos probabilidades de licuar que los suelos flexibles. Suelos granulares sujeto a alta presión de confinamiento inicial eficaz (por ejemplo, la reducción de tabla de agua debajo de la superficie, los suelos más profundos), es menos probable que se licuen. La historias de casos indican que por lo general de licuefacción se produce dentro de una profundidad de 50 pies o menos.

Los expertos apunta que la licuefacción es más probable que ocurra en suelos granulares, que en suelos con contenidos de arcilla.

En nuestros días, la evaluación del Potencial de licuefacción se expresa en un factor de seguridad frente a la ocurrencia de licuefacción. Este

factor se define como la relación entre la resistencia del suelo disponible a la licuefacción, expresado en términos de la cíclico destaca requerida para causar la licuefacción del suelo, y subraya el esfuerzo cíclico generado por el terremoto de diseño. Ambos parámetros se normalizan con respecto a la eficacia de los terrenos ante el estrés inicial.

De acuerdo al estado actual del conocimiento de la predicción licuefacción, se discute y existe un consenso general sobre los procedimientos actuales para el funcionamiento del método en suelo casi plano. Dos enfoques básicos utilizados son los siguientes: un sobre la base de los ensayos de penetración (SPT) y la otra en el prueba de penetración de cono (CPT).

Varios métodos empíricos simplificado, son los más empleados hoy día. El término "simplificado procedimiento "que fue desarrollado a lo largo de los últimos 25 años se ha convertido en el nivel de la práctica en los Estados Unidos y en la mayoría de los países del mundo. Tales métodos se basan en la evaluación de de la historia de licuefacción del suelo, y sus características de resistencia in situ como por ejemplo los números de golpes N medidos, entre otros. En la mayoría de los análisis empírico, la demanda sísmica impuesta al terreno se calcula a partir de ecuación empírica o del análisis de respuesta dinámica apoyado de programa de ordenador como SHAKE.

a) El Método SPT. El procedimiento para la evaluación usando SPT se dislucida más adelante del presente documento. Esta metodología comprende:

1.- Cálculo de la relación de estrés ciclico, CSR (siglas en inglés) que se asocia a la aceleración máxima percibida en la superficie durante el terremoto diseño. La ecuación que sigue se explica más adelante.

$$CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma_o'} = 0.65 (a_{max}/g) (\sigma_o/\sigma_o') r_d$$

2.- Corrección de valores SPT. Para esto se aplica la siguiente notación matemática:

$$N_1 = C_N \times N$$

$$(N_1)_{60} = C_N \; ER_m \; N/60$$

ERm: Relación de energía medida en un 60%

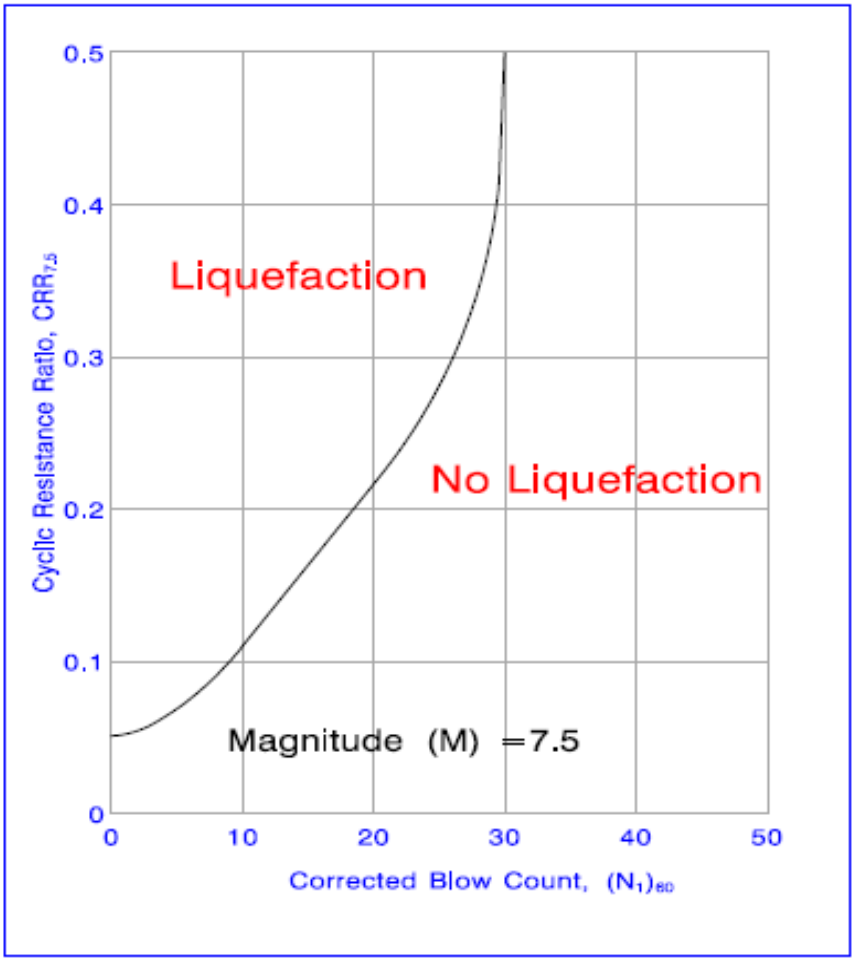


Figure 24
Cyclic Resistance Ratio (CRR) for Clean Sands
Under Level Ground Conditions Based on SPT
(After Robertson and Fear, 1996)

Con lo antes descrito, se permite obtener el coeficiente de Resistencia Ciclica (CRR) solicitada para causar licuedacción en suelos arenosos, y asu vez, calcular el factor de

seguridad F, compatible con el tipo de estructura que se pretende construir. La ecuación que sigue, igualmente, se dislucida más adelante del presente documento.

$$F_s = \frac{CRR}{CSR}$$

CRR = coeficiente de resistencia cíclica necesaria para provocar licuefacción

CSR = relación estrés cíclico generado por el terremoto diseño

b) El Método CPT. El procedimiento de utilización de datos CPT es el siguiente:

1.- Cálculo de CSR a través del método SPT
2.- Empleo de gráficas que muestran la relación de resistencia ciclica (CRR) usando datos corregidos CPT. Estas gráficas son válida para terremoto de magnitud 7,5 para materiales arenosos.

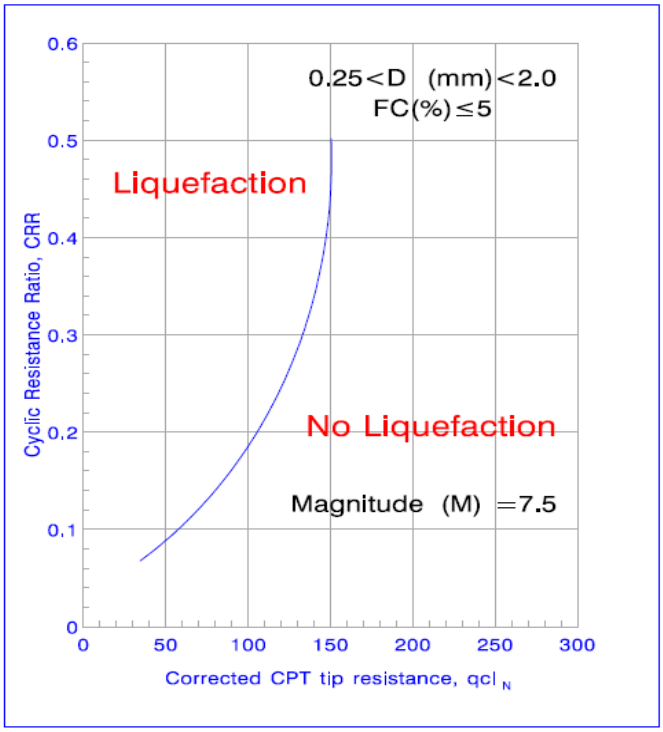


Figure 25
Cyclic Resistance Ratio (CRR) for Clean Sands
Under Level Ground Conditions Based on CPT

3.- Cálculo del factor de seguridad, FS, apoyado del método SPT.

c) Corrección del Contenido de Fino. Para corregir materiales con contenido de finos (FC) de más del 5 por ciento, la curva en la Figura x puede ser utilizada.

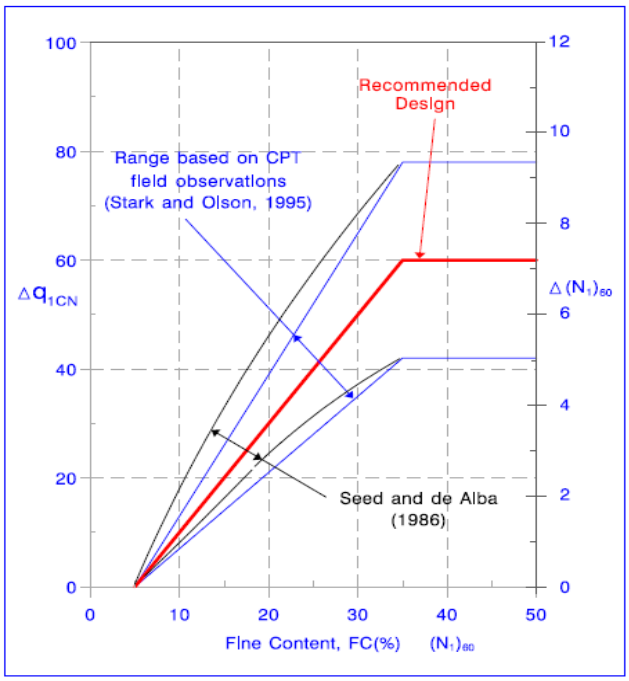


Figure 26
Correction to SPT and CPT Values for Fine Contents

Para aplicar esta correción, un incremento de resistencia a la penetración de síntesis, q1cN, o (N1)60, se añade a la resistencia calculada normalizado q1cN. Este incremento representa las influencias combinadas del contenido fino sobre resistencia a la penetración en función de la FC.

For FC≥35%	$\Delta q_{1cN}=60$	$\Delta(N_1)_{60}=7.2$
For FC≤5%	$\Delta q_{1cN}=0$	$\Delta(N_1)_{60}=0$
For 5%<FC>35%	$\Delta q_{1cN}=2(FC-5)$	$\Delta(N_1)_{60}=(1.2/5)(FC-5)$

d) La corrección de diferentes magnitudes de terremotos. Para ajustar CRR a otras magnitudes de 7.5, calculado CRR7.5 se multiplica por el factor de escala de magnitud el magnitud requerida. La misma magnitud se usan factores de escala son usado con datos de cono de penetración para uso en datos de penetración estándar.

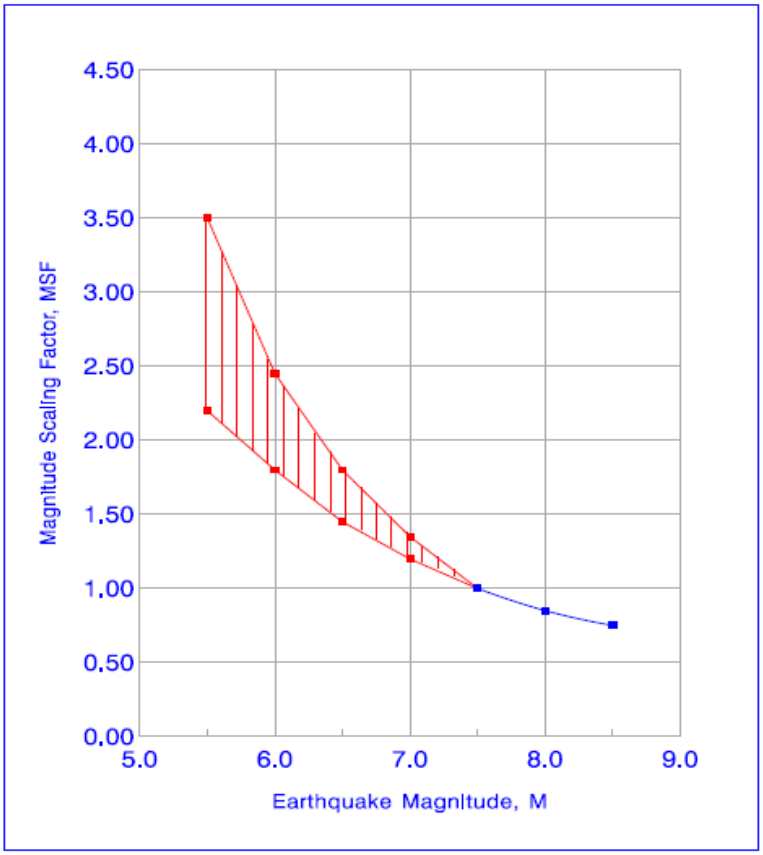


Figure 27
Range of Magnitude Scaling Factors for
Correction of Earthquake Magnitudes

e) Corrección de la CPT para capas delgadas del suelo. Esta corrección se aplica únicamente a las capas delgadas rígido incrustado dentro capas de espesor suave. La Figura que sigue se usa para tal próposito.

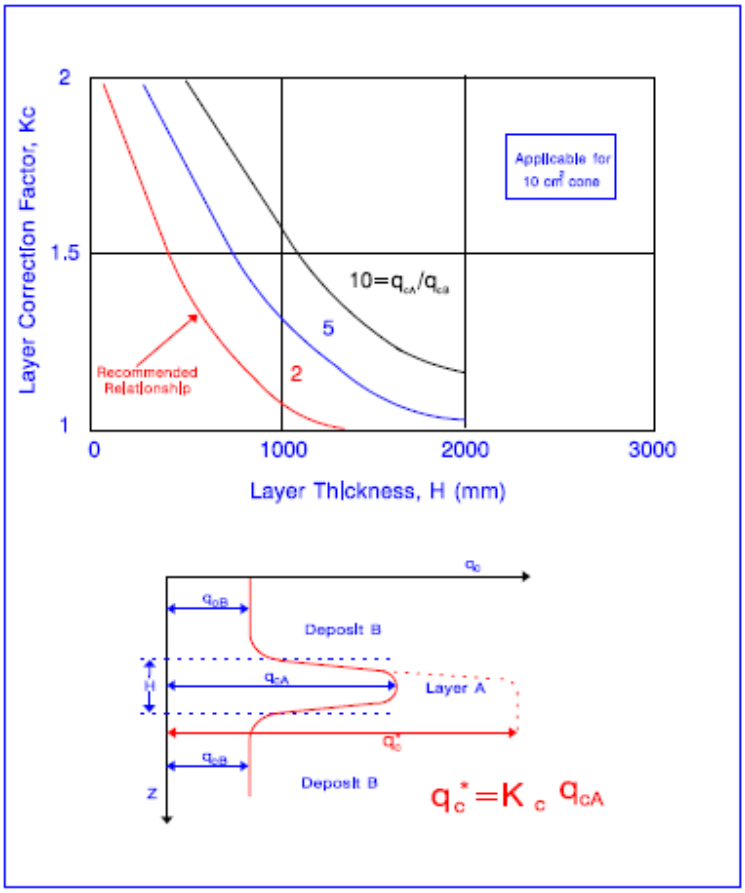


Figure 28
Correction (Kc) to CPT Penetration Resistance
in Thin Sand Layers

La ecuación para evaluar el factor de corrección, Kc, es:

$$K_C = 0.5[(H/1,000) - 1.45]^2 + 1.0$$

Donde H: Espesor de la capa inter-estratificada en mm

f) Finos plástico. Para los suelos de contenido de finos plásticos, la evaluación de licuefacción se basa en tres importantes condiciones:

1. Contenido de arcilla (partículas menores de 5?) <15%

2. Límite líquido <35%

3. El contenido de humedad Natural> 0,9 veces que el líquido límite

Por otro lado, en lo referente a la demanda sísmica impresa al terreno, pues el máximo de aceleración, Amax, comúnmente utilizados para el análisis de licuefacción, son los valores de la aceleración máxima horizontal que se produce en un lugar determinado. Por lo tanto, el Amax utilizados en la ecuación para la CRS, es una estimación del de aceleración corrgida tomada en afloramiento de roca en función de la aceleración local como parte de la respuesta del suelo, pero sin tener en cuenta el exceso de presión de poros del agua que pudiese desarrollarse.

Métodos comúnmente utilizados para estimar Amax incluyen:

a) Estimaciones de aceleración máxima estándar válida para curvas de atenuación de las condiciones de suelo comparables;

b) Las estimaciones de curvas de atenuación estándar de aceleración máxima de los sitios de roca, con corrección de Amax por efectos de sitio local utilizando curvas de amplificación local,

c) Análisis computarizado de la respuesta del sitio, y de los mapas probabilísticos de Amax, con o sin la corrección en función de amplificación o atenuación de sitio en función de la roca o las condiciones del suelo utilizado para generar los mapas.

Un programa de microcomputadora, llamado LIQUFAC, fue desarrollado por NAVFAC para evaluar el factor de seguridad contra la licuefacción de

cada capa de suelo durante un terremoto. Asimismo, estima la solución dinámica asociada.

El programa se utiliza en la evaluación de los riesgos por terremotos para los sitios de la Marina de Guerra ubicada en zonas sísmica. Para efectos de emplear este método se solicita para depósitos de arena de hasta 50 pies, y profundidades superior a 50 pies. Para ello, se recomienda que este procedimiento sea complementado con pruebas de laboratorio y métodos de respuesta de sitio que se describe a continuación.

a) Pruebas de laboratorio y el método de respuesta del sitio. Estos procedimientos de evaluación de condiciones de estrés cíclico generados en el subsuelo en virtud de un terremoto. Estos método conlleva a una selección diseño y su comparación con resultados observados a causa de la licuefacción. Estos ensayos analíticos deben ser corregidos por entre el laboratorio y las condiciones del campo.

b) Pendientes. Son relativamente pocos los materiales despeñados durante los terremotos, pero se han producido algunos. Muchos de estos, se mide mejor en términos de la deformación Los suelos cohesivos saturados con densidad de suelta a media están sujetos a la licuefacción del terreno, lo cual merecen tratamiento especial A igual, que las arcillas sensibles.

c)Diseño Pseudoestatico. Se refiere a la fuerza lateral actuando a través del centro de gravedad de la masa deslizante. Hoy día se aceptan factores seguridad contra deslizamiento general, de 1,0 a 1,5 según a los diferentes códigos y reglamentos. El más importante y más difícil en este tipo de análisis se refiere a la resistencia del suelo a cizalla. En muchos casos, la dinámica de cizalla la resistencia del suelo se supone igual a la fuerza de cizalla antes del terremoto. Esto no es válido en suelos cohesivos saturados con densidad media

d) Diseño de Tensión potencial. La tensión que se produce durante ensayos de compresión triaxial cíclico cortante sin drenar. También se utilizan para el análisis y diseño, en especial para presas de tierra.

e)Difusión lateral de licuefacción. La deformación lateral deformación inducida por los terremotos se discute a continuación.

La Deformación lateral se refiere a la ocurrencia de licuefacción y sus asociados debido a la pérdida de resistencia del suelo que resulta en grandes deformaciones horizontales del terreno. Estas deformaciones pueden causar el fracaso de los edificios, cortar los oleoductos, puentes hebilla, y derribar muros de contención. Hoy día se conoce varios tipos de fallos del suelos en función de la pendiente del terreno, estos se explican más adelante.

Por otro lado, se dispone de procedimiento para la evaluación de la licuefacción del suelos. Dos modelos son conocidos en funció de la pendiente del terreno:

a) Modelo para terrenos suaves

$$\begin{aligned} \text{Log } D_H = \; & -16.3658 + 1.178\ M - 0.9275\ \text{Log } R - 0.0133\ R \\ & +0.6572\ \text{Log } W + 0.3483\ \text{Log } T \\ & +4.5270\ \text{Log}(100-F_{15}) - 0.9224\ D50_{15} \end{aligned}$$

b) Modelo para terreno empinados

$$\begin{aligned} \text{Log } D_H = \; & -15.7870 + 1.1782\ M - 0.9275\ \text{Log } R - 0.0133\ R \\ & +0.4293\ \text{Log } S + 0.3483\ \text{Log } T_{15} \\ & +4.5270\ \text{Log}(100-F_{15}) - 0.9224\ D50_{15} \end{aligned}$$

donde:

DH = Estimación de los desplazamientos laterales de tierra en metros.

D5015 = tamaño medio de grano en las capas granulares incluidas en el T15, en milímetros.

F15 = Promedio contenido de fino (fracción de los sedimentos una muestra que pasa tamiz N º 200) en forma de gránulos capas incluidas en el T15, en por ciento.

M = Terremoto magnitud (magnitud momento).
R = distancia horizontal de la energía sísmica fuente, en kilómetros.
S = pendiente del terreno, en por ciento.

T15 = espesor acumulado de capas granulares saturados corregida con golpe cuenta, (N1) 60, menos de 15, en metros.

W = Relación de la altura (H), de la libertad de cara a la distancia (L) de la base de cara a la libre el punto en cuestión, en por ciento.

g) Aplicación

La licuefacción de los suelos granulares saturados y la consiguiente deformación de terreno han sido las principales causas de daños a la obra construida durante los últimos terremotos. Pérdida de resistencia, asentamiento diferencial, y horizontal, desplazamiento lateral debido a la propagación son los principales tipos de deformación del suelo bajo nivel a los sitios de pendiente suave.

Para tal efecto, en nuestros días se usan programa de microcomputadora, llamado LATDER2, desarrollado para permitir la rápida propagación lateral de cálculo resultante de licuefacción de un sitio.

De acuerdo con los expertos la licuefacción se define como la pérdida total de la fuerza del suelo debido a la presión de poro a un nivel tal que la eficacia de la masa del suelo se reducen a casi cero.

Los especialista en estos temas consideran que para una evaluación del potencial de licuefacción se requiere dos conjuntos de parámetros que influye de manera distinta en este proceso, entre estos la carga sísmica, y parámetros que representan las características del depósito de suelo.

Una gran número de estudios relativos a la licuefacción se han realizado en la última década, en que se considera tal proceso de licuefacción por unos como un fenómeno determinista y por otros como un proceso probabilística.

La naturaleza aleatoria del terremoto, y la sensibilidad de respuesta del suelo ante fluctuación de carga sísmica es un evento al azar para análisis de vibraciones, siendo atractivo el estudio de la licuefacción. Mediante la aplicación de análisis de vibración aleatorias, se obtienen directamente de las estadísticas de los suelos respuesta a la futura carga sísmica.
La evaluación de las estadísticas del suelo como depósito, así como, la carga transmitida solicita suficiente datos de terremoto.

Según los especialista, en aras de realizar un efectivo análisis del fenómeno de licuefacción se recurre a varios métodos de ensayos analíticos, entre estos, triaxiales cíclicos, cíclicos simples, torsión y cizalla. Estos permiten reproducir las condiciones de estrés del suelo al momento de sismos. Con ello se realiza la evaluación acumulativa daños en el suelo

Otros parámetros influyentes en el potencial de licuación de un sitio la textura del suelo, densidad relativa, presión de poros efectivo y la acción del agua subterránea, sin olvidar los parámetros de carga sísmica.

Por tanto, la carga sísmica transmitida a suelos granulares y cohesivos saturados, puede hacer de estos que pierdan fuerza y, en general, simulen un comportamiento parecido a un líquido. Los daños a edificios y estructuras puede ser causado por el exceso de asentamiento y la inclinación, grietas terreno, la inestabilidad de las laderas, fallos del terrenos, entre otros.

De ahora en adelante se entenderá aquí la licuefacción como un proceso que inicia cuando la presión de poros en arena saturada de agua llega a su máxima eficacia. Estos es influido, a su vez, por la magnitud y naturaleza de terremoto, la energía liberada en la fuente, la atenuación de esta energía con la distancia, la naturaleza de la agitación en el lugar y luego considerar una parte de esta energía, capaz de elevar la de agua de presión de poros en el sitio.

No obstante, hay destacar que el análisis de ingeniería relativo a la licuefacción del suelo, o bien, el calcular la tensión cortante solicita durante sacudida por el terremoto diseño, el empleo de ensayos de campos sobre la fuerza del suelo. En otros términos, la norma de ensayos de penetración. En el primer enfoque de las muestras de suelo se probarán en el laboratorio de más allá de establecer el nivel de licuefacción que se produce. Este nivel se espera en relación con la horizontal pico aceleraciones en el sitio, que se espera que se produzca durante el terremoto de diseño, y la licuefacción potencial en el lugar se evalúa.

En el segundo enfoque de los resultados empíricos sobre la penetración estándar las pruebas están relacionadas con las tensiones en el suelo durante terremoto o temblor a la energía disipada en el suelo por el incidente de las ondas sísmicas. Este último método es simple, directa, general y fiable. Se puede reducir a un simple criterio de evaluación de licuefacción potencial en términos de penetración de la norma resistencia, sino que requiere el empleo de un fiable empírica métodos de evaluación de la onda sísmica

disponible
energía.

En general, diversos investigadores han investigado la licuefacción del suelo, tanto en el laboratorio y sobre el terreno. El mecanismo básico es el de licuefacción progresiva acumulación de exceso de presión de poro de agua debido a cortante cíclico subraya. Cuando la presión de poros se acumula a un punto inicial igual a la de limitar el estrés, el suelo pierde su fuerza y se produce gran deformación.

Razón por el cual, la zonificación de licuefacción ha sido un objetivo importante en los últimos años. En lo que respecta a la práctica japonesa de diseño se refiere, uno de los métodos más comúnmente empleados en la evaluación del potencial de licuefacción es el concepto de Factor de Seguridad. Ello solicita la relación de un enfoque cíclico de fuerza del suelo (por algunos expertos conocidos por la letra R) con el máximo cíclico de cizalla o equivalente estrés inducida al depósito de suelo durante un terremoto (conocido por la letra L).

Por ello el potencial de licuefacción estimado para el depósito de suelo está en función del factor de seguridad (FS mayor que 1, la cizalladura inducida por el terremoto supera la resistencia del suelo, y por tanto, la licuefacción se va a producir. En caso contrario, cuando FS es menor que 1.0, licuefacción no se produce).

Por su parte, **Cárdenas, J. et. al. (2,007)** manifestó que la historia registra innumerables casos de fallas catastróficas, con considerables perjuicios económicos, pérdidas de vidas y daños al medio ambiente, causados por el fenómeno de licuación. Generalmente el término de licuación es históricamente utilizado para englobar una gran variedad de fenómenos que están relacionados con deformaciones de suelos causados por cargas monotónicas, transientes o cargas repetitivas en suelos saturados sin cohesión sobre condiciones no drenadas. Cuando la licuación ocurre, un súbito aumento de la poropresión disminuye la resistencia efectiva hasta valores nulos, comportándose el suelo por instantes como un fluido, y por consiguiente, es reducida su capacidad de soportar estructuras o de mantener

taludes en condiciones estables. El fenómeno de licuación que resulta de este proceso mencionado puede ser dividido en dos principales grupos; flujo por licuación y movilidad cíclica.

Esta fuente, expresó que los cargamentos estáticos o dinámicos pueden iniciar la licuación de suelos. Sobre cargamentos dinámicos, además de fuentes sísmicas, este fenómeno también fue constatado como resultado de vibraciones causadas por el anclaje de estacas, por tránsito de vehículos, exploración geofísica y explosiones. Sobre cargamentos estáticos, la licuación fue observada en depósitos de suelos naturales, terraplenes y depósitos de relaves de mina.

De acuerdo con **Cárdenas, J. et. al. (2,007)** , en el contexto del fenómeno de licuación de suelos, la literatura también registra la terminología "mobilidad cíclica". De modo general, licuación (o más exacto flujo por licuación), designa al grupo de fenómenos que presentan en común el surgimiento de altas poropresiones en suelos saturados, debido a cargamentos estáticos o cíclicos, sobre volumen constante, mientras que movilidad cíclica se refiere a la progresiva deformación de suelos saturados cuando están sometidos a cargamentos cíclicos con contenido de humedad constante.

La previsión del fenómeno de la licuación depende de una representación adecuada de la respuesta no drenada de suelos granulares saturados. Resultados de estudios experimentales de laboratorio, han sido publicados por décadas en la literatura y varios modelos numéricos para previsión del comportamiento fueron desarrollados con base a formulaciones elastoplásticas.

Cárdenas, J. et. al. (2,007), dice que unos de los modelos numéricos hasta la fecha conocidos tenemos modelo propuesto por Gutiérrez y Verdugo, basado en las siguientes tres hipótesis: a) los componentes de deformación elástica pueden no ser consideradas, esto significa que las deformaciones totales son de naturaleza exclusivamente plástica; b) el incremento de deformación volumétrica plástica pv dε está constituida por dos componentes debido a la variación de la tensión efectiva media dp′ y a la dilatancia plástica

durante el corte; c) la relación tensión-deformación del suelo puede ser representada a través de una formulación hiperbólica, donde los valores de los módulos de deformación son modificados de acuerdo al estado de las tensiones efectivas actuantes en el suelo. Algunas formulaciones matemática conocidas al respecto son la siguientes:

$$p' = \tfrac{1}{3}\left(\sigma'_a + 2\sigma'_r\right)$$
$$q = \sigma'_a - \sigma'_r$$
$$d\varepsilon_v^p = d\varepsilon_a^p + 2d\varepsilon_r^p$$
$$d\varepsilon_s^p = \tfrac{2}{3}\left(d\varepsilon_a^p - d\varepsilon_r^p\right)$$
$$\eta = q/p'$$

donde p a ε representa la deformación plástica axial en (%), p r ε la deformación plástica radial en (%), a σ ′ la tensión efectiva axial en ( ) Pa y r σ′ la tensión efectiva radial en (Pa). Según **Cárdenas, J. et. al. (2,007),** opinan que el modelo Gutiérrez y Verdugo consiguió representar con buena aproximación las respuestas del material en condición no drenada, tanto en términos de las curvas tensión-deformación, en las curvas de variación de las poropresiones, y en las trayectorias de tensiones efectivas. El modelo tiene una formulación matemática simple, de sencilla implementación numérica y con parámetros del material que pueden ser determinados fácilmente de los resultados de ensayos triaxiales convencionales.

Cárdenas, J. et. al. (2,007), dijo que el modelo constitutivo referido, presenta la capacidad para describir el comportamiento de flujo por licuación causado por cargamentos monotónicos. Su implementación es simple y sus parámetros dependen de resultados de ensayos triaxiales.

La región centroamericana, particularmente en países como Guatemala, El Salvador y Costa Rica, el fenómeno de licuación de suelos ha sido cada vez más frecuente. En 1976 hubo licuación de suelos en algunas playas del lago de Amititlán y en algunas riberas del rio motagua y se destruyó un muelle en Puerto Barrios. Un ejemplo notable de este fenómeno ocurrió durante el terremoto de Limón, Costa Rica en 1,991. Algunos muelles

del puerto fueron dañados y varios kilómetros de una carretera costera fueron, no dañados, sino destruidos. Hay algunos métodos de aplicación limitada a áreas localizadas. Sobre áreas extensas la mejor protección está en la identificación de las zonas.

De acuerdo con publicaciones científicas (**http://es.wikipedia.org/wiki/Terremoto_de_Lim%C3%B3n**), el 22 de abril de 1991 a las 3:57:00 hora local, un fuerte terremoto sacudió la zona de Limón en Costa Rica con una intensidad de 7.7 M y una profundidad de 10 kilómetros. En total se registraron 48 muertos, 651 heridos y 4452 casas colapsadas en Costa Rica, mientras que en Panamá se registraron 79 muertos y 1061 heridos. Este fue el terremoto de mayor magnitud sentido en el mundo en 1991.

Esta fuente, opina la región de la provincia de Boca del Toro (Panamá) a la que también afectó el terremoto, las consecuencias dramática del sismo, desde el punto de vista geológico, fue el levantamiento de la línea de costa del caribe costarricense, desde Moín, al norte, hasta Gandoca al sur. El levantamiento máximo fue de 1,85 m medido en las vecindades de Limón. Por otro lado, a lo largo de la costa de Bocas del Toro (en Panamá) ocurrieron subsidencias de hasta 0,9 m. Un tsunami local se observó inmediatamente después del terremoto en la costa Caribe sur de Costa Rica y Panamá, con olas de hasta 2,0 m. Otro efecto notable, fue la sismicidad inducida por el terremoto, identificada en una amplia zona de Costa Rica y Panamá. Los eventos más importantes ocurrieron el 24 de abril de 1991 (al sur de Tayutic de Turrialba, 6,1 Ms) y el 4 de mayo de 1991 (cerca de Bocas del Toro en Panamá, 6,2 Ms, 1 muerto). También, se identificó (post-terremoto) la elevación del nivel freático, que varió entre 0,5 y 2,0 m en áreas deltáicas, especialmente en Matina y al noreste de Limón. Cerca de 3.000 km² fueron afectados por licuefacción de suelos en las tierras bajas del litoral Caribe y un área de 2.000 km² (gran parte de la cordillera de Talamanca) fue devastada por deslizamientos.

Foto: D.B. Ballantyne

Foto x. Poste con transformador volcado debido a licuación de su base en Costa Rica

Sauter, F (1989), opina que las áreas bajas cercanas a la costa o lagos han quedado permanentemente inundadas después de un terremoto debido al descenso del nivel del terreno (fenómeno llamado subsidencia). Durante el gran terremoto de Alaska en 1964, en la región del Estrecho de Prince William, el movimiento cortical fue tan extenso que se pudieron observar levantamientos y descenso del terreno en un área de 200,000km2. Los efectos de un sismo pueden ser además de asentamiento del terreno, el desplazamiento del mismo a lo largo de una falla superficial, la fractura del terreno y el colapso de rellenos de tierra saturados y mal compactos. Por otra parte, en diversas lecturas electrónicas (Enciclonet_com.htm), se expresa que la licuefacción puede ser considerada como una consecuencia de los terremotos. En este fenómeno, los suelos no consolidados, no cohesivos o fácilmente disgregables y saturados en agua, se separan, debido a las vibraciones del terremoto perdiendo su resistencia de manera temporal. El sedimento cae hacia abajo y el agua de saturación tiende a salir como una fuente surgente, comportándose como material licuado, cuyo resultado es la producción de un desplazamiento o falla del terreno.

Foto 7. MATERIAL GRANULAR QUE FLUYE HACIA LA SUPERFICIE (SAND BLOW), LOMA PRIETA (SAN FRANCISCO), 1989

Sitharam et. al. (2004), quienes opinan que son muchos los factores que rigen el proceso de licuefacción tales como la intensidad del terremoto y duración, ubicación de la tabla de agua subterránea, el tipo de suelo, densidad relativa del suelo, tamaño de las partículas de gradación, forma de partículas, ambiente de deposición del suelo, condiciones de drenaje del suelo, presiones de confinamiento, el envejecimiento y la cementación de los depósitos de suelo, ambiente histórico de la tierra y la construcción de depósito /cargas adicionales sobre estos depósitos.

Según esta fuente, los métodos empleados para evaluar la licuación del suelo están enfocado en el estrés cíclico y la tensión cíclica que permite conocer la resistencia de los suelos a la licuefacción a través de prueba de laboratorio (ejemplo, ensayos triaxiales cíclicos, ensayo cíclico de torsión, entre otros) y de campo (ensayos de penetración estándar, cono de penetración, , velocidad de onda de cizalla, ensayos de dilatómetro, disipación de energía basado en el análisis probabilística, entre otro).

Por su parte, **Stephen F. Obermeier et al. (2004)**, consideran licuefacción como la transformación de material granular saturado a partir de un sólido a un estado licuado como consecuencia del aumento de la presión de poros. Según Obermeier, la licuefacción es causada por la aplicación de carga sísmica, que resulta en una re-distribución del suelo y la acumulación de presión de poros. El proceso suele ocurrir en sedimentos de poca cohesión de tamaño de grano grueso como las arenas.

Henríquez (2007), señala que algunas evidencias superficiales (**Foto 4**) más comunes de la ocurrencia de licuación son:

- Los "volcanes de arena" (**Foto 7 y 8**)
- Las grietas en el terreno.
- Las pérdidas de capacidad portante.
- Los movimientos laterales.
- Las oscilaciones horizontales del terreno.
- Las fallas de taludes por flujo del terreno.

Foto 8. BURBUJEO DE SUELOS ARENOSOS.

Otras referencias científicas internacionales, definen la licuación del suelo como:

- La anulación de la capacidad para resistir esfuerzos de corte en un suelo granular fino, saturado y con densidad relativa baja, como consecuencia del aumento de presión intersticial originado por vibraciones.
- un fenómeno típico de suelos saturados del tipo arenas finas y flojas y limos mal graduados, que ocurre cuando estos se someten a acciones dinámicas y que consiste

en una pérdida de fuerza y rigidez debido a que la presión del agua aumenta de forma rápida hasta el punto de que las partículas quedan sueltas, se mueven libremente y pierden la capacidad de transmisión de esfuerzos. Su nombre deriva del hecho de que en ese momento el suelo se comporta como si se tratara de un líquido. **(Díaz, J., 2005)**

- Un fenómeno que tiene lugar debido a la pérdida de resistencia de suelos arenosos saturados en agua que se produce habitualmente como consecuencia de un seísmo, aunque en ocasiones puede desencadenarlo una fuerte marejada al borde del mar o incluso puede ser fruto de la actividad humana (explosiones). Una onda sísmica produce en determinadas formaciones geológicas un aumento de la presión intersticial originado por las deformaciones cíclicas. Esto provoca una des-consolidación brutal del material y la des-estructuración del suelo, que pasa a comportarse como un fluido viscoso. Los cimientos de los edificios, los puentes o las presas de agua, pueden deslizarse o hundirse y se destruyen.

Foto 9. Licuación en suelo arenoso de terreno plano.

- Proceso de pérdida de resistencia de ciertos tipos de suelos **(Foto 10),** que están saturados en agua y cuando son sometidos a la sacudida de un terremoto fluyen como un líquido a causa de un aumento de la presión de poros. La pérdida de resistencia del suelo hace que las estructuras sean incapaces de mantenerse estables y sean arrastradas sobre las masas de suelo líquido. La licuefacción se ha observado principalmente en lugares cercanos a ríos, bahías, mares, y otros, donde se encuentran terrenos poco consolidados como arenas, limos, suelos arcillosos, etc

Foto 10. TRANSFORMACIÓN DEL AMBIENTE FÍSICO NATURAL Y SUELO EN UNA ZONA AGRARIA DE LOS ESTADOS UNIDOS. 28/10/1989

- Proceso de pérdida de resistencia de ciertos tipos de suelos, que están saturados en agua y cuando son sometidos a la sacudida de un terremoto fluyen como un líquido a causa de un aumento de la presión. El sedimento cae y el agua que satura el suelo tiende a salir como una fuente que brota a borbotones (**Foto 11**). La licuefacción puede considerarse una consecuencia de los terremotos en lugares con terrenos poco consolidados o suelos arcillosos. Cuando se produce la licuefacción, los edificios y casas se encuentran flotando en un lodo inestable saturado en agua, y por lo tanto pierden la estabilidad. La pérdida de resistencia del suelo hace que las estructuras sean incapaces de mantenerse estables, siendo arrastradas sobre la masa de suelo líquido. Un experimento nos muestra un efecto extremo sobre la debilidad de un suelo en estado de licuefacción al que se le arroja una pelota, en él los sedimentos lejos de estar compactados, se comportan como líquido.

Foto 11. ABERTURA SEMI-CIRCULAR EN SUELOS ARENOSOS BURBUJEADO

Por su parte, **Denys Parra** en su publicación Licuación del Suelo y Resistencia de Suelo define la Licuación del suelo como "la transformación de un material granular de un estado sólido a un estado licuado como consecuencia del incremento de la presión de agua de poros".

Esta fuente, dice que la causa más dramática de daños a edificaciones y obras civiles durante un terremoto es el fenómeno licuación, siendo un proceso en que el suelo cambia de un material firme a un material viscoso semi-líquido y bajo condiciones similares a una

arena movediza. La licuación ocurre cuando suelos arenosos son sometidos a vibración, por lo tanto, cuando un estrato de suelo se licua y empieza a fluir por la acción del terremoto, éste no es capaz de soportar el peso de cualquier suelo o estructura encima de él, debido a esto, ocurren una serie de efectos, algunos catastróficos, como: deslizamientos, flujos, hundimiento o inclinación de edificaciones, volcanes de arena, asentamientos diferenciales, etc., como ha quedado evidenciado en numerosos terremotos ocurridos en diferentes partes del mundo. O bien, se considera la siguiente aseveración de que en determinados suelos de naturaleza contractiva, es decir, con tendencia a la disminución de volumen durante el corte, la ocurrencia de un terremoto severo puede producir el incremento gradual de las presiones de poro, reduciendo la resistencia del suelo y su rigidez. A este fenómeno se le conoce como licuación y sus efectos asociados han sido responsables de una gran cantidad de daños en terremotos históricos alrededor del mundo.

La licuación ocurre en suelos saturados, esto es, suelos en los cuales los espacios entre las partículas individuales están completamente llenos de agua. Esta agua ejerce una presión sobre las partículas de suelo, de modo que influencia la forma como las partículas por sí mismas son presionadas juntas. Antes del terremoto, la presión de agua es relativamente baja. Sin embargo, el movimiento sísmico puede causar que la presión de agua se incremente al punto donde las partículas de suelo puedan fácilmente moverse una con respecto a la otra.

Por su parte, El Programa Nacional de Difusión y Divulgación de Ciencia y Tecnología (2000-2003) en su publicación "*Un Recorrido por las Ciencias de la Vida y las Ciencias de la Tierra*", consideran la licuefacción como una consecuencia de los terremotos. En este fenómeno, los suelos no consolidados, no cohesivos o fácilmente disgregables y saturados en agua, se separan, debido a las vibraciones del terremoto perdiendo su resistencia de manera temporal. El sedimento cae hacia abajo y el agua de saturación tiende a salir como una fuente surgente, comportándose como material licuado, cuyo resultado es la producción de un desplazamiento o falla del terreno.

De acuerdo con **T.G. Sitharam** et. al. en su artículo científico sobre Dynamic properties and liquefaction potential of soils (traducción en español, propiedades dinámicas y

potencial de licuefacción de suelos), considera que como resultado de la aplicación de cargas cíclicas en los suelos, los poros la presión del agua se acumula de manera constante y alcanza inicialmente la presión solicitada limitada en función de la magnitud de tensión cíclica de cizalla, así como la densidad del suelo. En mayor tensión cortante cíclica, la presión de agua de poro se acumula rápidamente y no hay activación de licuefacción en los ciclos inferiores. Un aumento de la densidad de los resultados conlleva un aumento de la fuerza cíclica del suelo, siendo menos susceptibles a la licuefacción.

Según **C.H.Loh. et. al**., en su artículo científico Probabilistic evaluation of liquefaction potential under earthquake loading, opina que el potencial de licuación de un sitio es afectado por arena saturada y parámetros tales como densidad relativa, presión efectiva y el agua de manto freático. Además, que también es afectado por la cargasísmica.

Stephen F. Obermeier, S.F., Olson, S. M., Green, R.A. (2004), quienes son del criterio que los escenario para formación e identificación de las características típicas de la licuefacción a través del tiempo se hallan en un valle fluvial, en la llanura de inundación moderna o en una terraza que se encuentra a pocos metros más alto, donde la profundidad a la tabla de agua freática generalmente se da varios metros o menos, y donde los depósitos de arena gruesa abundan.

Para ello se requiere información tales como, por ejemplo,

- El mecanismo causal que forman la característica, es decir difusión lateral, fracturamiento hidráulico y/o superficie oscilacilatorias.

- Distribución de tamaño de grano de sedimentos, y resistencia a penetración mecánica.

- Profundidad del nivel freático en el momento de la licuefacción.

- Edad de los depósitos licuables, entre otras.

La Licuefacción del suelo proporciona evidencias sobre la intensidad de evento sísmico. Por ejemplo, tras el terremoto de 6,100 años BP, en el Valle de Indiana – Illinois, ocurrió la propagación de diques laterales alcanzando 2,7 metros de ancho

Algunos especialistas, definen la licuefacción de los suelos debida a terremotos es el proceso por el que los materiales arenosos o limosos, en condiciones de saturación de agua, se comportan como líquidos densos al sufrir las sacudidas y las vibraciones de los terremotos. Las consecuencias son la rotura de tuberías, la destrucción de carreteras e infraestructuras y daños en los cimientos de los edificios que se hallan situados sobre estos materiales. La bahía de San Francisco, en California, es un área urbana densamente poblada y tectónicamente activa. La zona de la costa está formada por elevados acantilados y playas estrechas.

En la ilustración que sigue, se localizan zonas de depósitos incoherentes, las principales fallas y el riesgo de licuación de los suelos en caso de terremoto de magnitud 8 afectase el área de la Bahía.

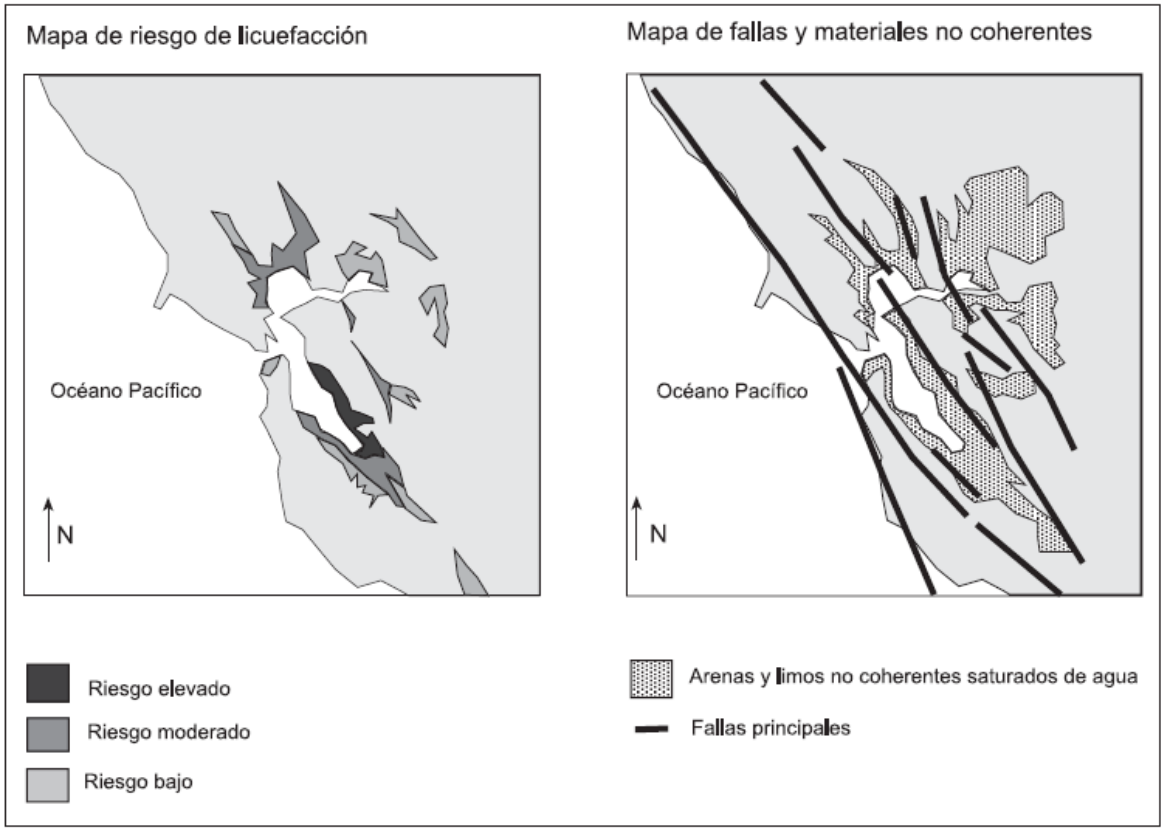


Figura No. x. Relación entre fallas geológica y el tipo de material en la producción de zonas licuables.

González, M., considera la licuefacción como un proceso de pérdida de resistencia de ciertos tipos de suelos, que están saturados en agua y cuando son sometidos a la sacudida de un terremoto fluyen como un líquido a causa de un aumento de la presión de poros. La pérdida de resistencia del suelo hace que las estructuras sean incapaces de mantenerse estables y sean arrastradas sobre las masas de suelo líquido. La licuefacción se ha observado principalmente en lugares cercanos a ríos, bahías, mares, etc..., donde se encuentran terrenos poco consolidados como arenas, limos, suelos arcillosos, etc.

La fuente, opina que la licuefacción es la pérdida de resistencia de ciertos tipos de suelos. Los suelos saturados en agua cuando están sometidos a la sacudida de un terremoto fluyen como un líquido debido al aumento de la presión de poros. Licuefacción, Terremoto de Nigata, Japón (16 Junio de 1964, magnitud 7.5). Debido a la licuefacción del suelo los

edificios han volcado hundiéndose parcialmente. Inundaciones (por ruptura de embalses, conducciones de agua, etc)

Todos estos fenómenos pueden ser muy destructivos si afectan al terreno sobre el que se asientan nuestras ciudades o las infraestructuras necesarias para el normal desarrollo de nuestra vida (Hospitales, edificios de bomberos, depósitos de abastecimiento de agua, combustible, centrales eléctricas, etc). Un aspecto muy importante a tener presente es que tras un terremoto, sobre todo si este ha sido destructivo, es muy probable que se interrumpa el suministro de luz, agua y teléfono. Ello puede obligar a tener que vivir en condiciones totalmente inesperadas, sin frigorífico donde almacenar los alimentos, sin agua o luz para cocinarlos.

No obstante, en diversas publicaciones científicas, se define la licuefacción (o licuación) como un fenómeno típico de suelos saturados del tipo arenas finas y flojas y limos mal graduados, que ocurre cuando estos se someten a acciones dinámicas y que consiste en una pérdida de fuerza y rigidez debido a que la presión del agua aumenta de forma rápida hasta el punto de que las partículas quedan sueltas, se mueven libremente y pierden la capacidad de transmisión de esfuerzos. Su nombre deriva del hecho de que en ese momento el suelo se comporta como si se tratara de un líquido. Ejemplo de caso la Ciudad de Alejandría en Egipto (Africa)

Foto No x. Mostrando cráter de arena por licuación del suelo en Alejandría (Egipto)

D.S. Liyanapathiranaa y H.G. Poulos (2003), opinan que el riesgo de licuefacción es baja cuando la velocidad de onda es relativamente baja, siendo una medida útil y fiable de la intensidad de sismos en campo.

I.M. Idriss, R.W. Boulangern (2004), opinan que confiabilidad de cualquier evaluación de licuefacción depende directamente de la calidad de la caracterización del sitio, incluyendo la calidad (y no necesariamente la cantidad), de la conservación in situ y los datos de los ensayos de laboratorio.

Además, a menudo es la síntesis de los resultados de diferentes tipos de procedimientos que establece la más conocimiento y la confianza en la toma de decisiones finales. Por esta razón, la práctica de utilizar un número de la conservación in situ metodologías de prueba, como mejor se adapten a un determinado geológicos configuración, debe seguir siendo la base de la práctica habitual.

Según los datos aportados por Ingeniería Geotécnica, el término **licuación** realmente se ha usado para describir una cantidad de fenómenos relacionados, los cuales pueden dividirse en dos principales categorías: Flujo por licuación y Movilidad cíclica.

- Flujo por Licuación

El flujo por licuación es un fenómeno en el cual el equilibrio estático es destruido por cargas estáticas o dinámicas en un depósito de suelo con baja resistencia residual. La resistencia residual es aquella que posee el suelo después de haber licuado. Cargas estáticas, por ejemplo, pueden ser aplicadas por las edificaciones sobre una ladera en pendiente que ejerce fuerzas adicionales en el suelo por debajo de la cimentación. Los terremotos, voladuras, y el hincado de pilotes son ejemplos de cargas dinámicas que pueden producir flujo por licuación.

Las fallas debido al flujo por licuación se caracterizan comúnmente por grandes y rápidos movimientos que producen efectos desastrosos después de ocurrido un terremoto.

El desprendimiento de tierra del "**Turnagain Heights**", en el terremoto de Alaska de 1964, el cual fue provocado por la licuación de lentes de arenas en un área deslizada de 52.6 Ha, es un ejemplo de flujo por licuación. La presa Sheffield sufrió una falla por flujo provocado por el terremoto de Santa Bárbara en 1925. Una sección de 90 metros (de los 220 metros de

longitud de la presa) se desplazó más de 30 metros. La presa consistía principalmente de arenas limosas y limos arenosos compactados sobre el relleno

Como estos casos históricos de falla por flujo, se pueden involucrar el flujo de volúmenes considerables de material que experimentan grandes movimientos, los que son producidos por esfuerzos de corte estáticos. Para provocar flujo por licuación sólo se necesita en algunos casos una perturbación muy pequeña.

- Movilidad Cíclica

La Movilidad Cíclica es un fenómeno de licuación provocado por una carga cíclica, ocurre en depósitos de suelo con esfuerzos de corte estáticos menores que la resistencia del suelo. Las deformaciones debido a la movilidad cíclica se incrementan porque los esfuerzos estáticos y dinámicos subsisten durante un terremoto. El desplazamiento lateral, es un resultado común de la movilidad cíclica, puede ocurrir sobre terrenos suavemente inclinados y en terrenos llanos cercados por ríos y lagunas. El terremoto de Guatemala en 1976 ocasionó un desplazamiento lateral a lo largo del río de Motagua. Sobre el nivel del terreno, debido a la alta presión de agua de poros (Figura x) ocasionada por licuación, puede ser que el agua de poros fluya rápidamente a la superficie. Este flujo puede ocurrir durante la ocurrencia del terremoto como también después de éste. Si el flujo de agua de poros asciende lo suficientemente rápido, puede llevar partículas de arena hasta la superficie donde se depositan formando volcanes de arena o ebulliciones de arena. Estos aspectos pueden observarse frecuentemente en lugares que han sido afectados por licuación

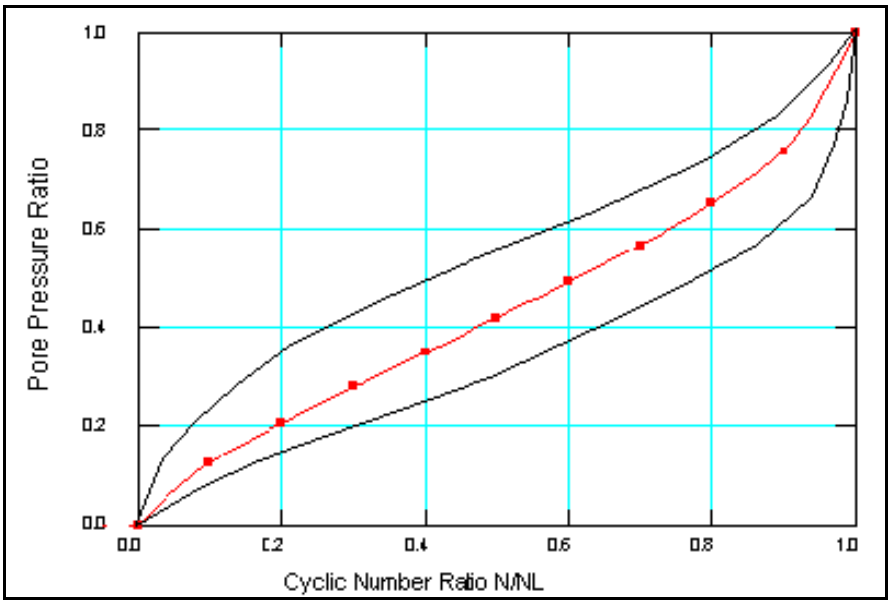


Figura 3: Relación de Presión de Poros Bajo Condiciones de Carga Cíclica.

Los ensayos de laboratorio muestran que el número de ciclos de esfuerzo requeridos para producir licuación decrece con el incremento de la amplitud del esfuerzo cíclico como se muestra en la Figura x.

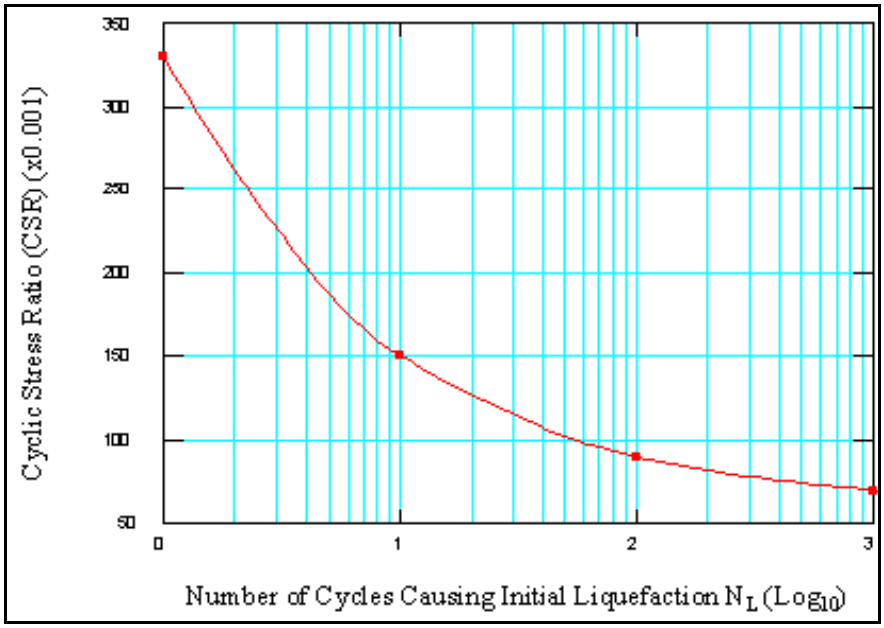


Figura 4. Esfuerzos Cíclicos Requeridos para Producir Licuación Inicial.

La curva mostrada en la Figura x es llamada usualmente la curva de resistencia cíclica a la licuación. La curva de resistencia cíclica es normalizada frecuentemente con relación a la presión de confinamiento efectiva inicial. Este esfuerzo cíclico normalizado es llamado Relación de Esfuerzo Cíclico o CSR.

Por otra parte, Estudios realizados (**Middleton y Hampton, 1976**), clasifican los flujos de sedimentos en tres categoría que se explica a continuación, algunos de estos en base a como es sostenido el sedimento en el flujo (mecanismo de soporte de grano):

- Flujos Gravitatorios

Los flujos gravitatorios son flujos con una fase fluida continua entre las partículas, donde el movimiento del sedimento ocurre por la acción de la gravedad. El papel del fluido es disminuir la fricción interna entre partículas (que se opone a su movimiento) y al soporte de los granos.

- Flujos gravitacionales de sedimento

Son flujos de sedimento que se mueven a través de la pendiente por influencia de la gravedad. Su movimiento empieza (una vez que reduce su cohesión y fricción interna) en una zona inestable, generalmente una pendiente acusada; sin embargo necesita de otros mecanismos (mecanismo de soporte de grano) que colaboren en el arrastre de las partículas.

- Flujos de sedimento fluidificado o licuado

Estos flujos ocurren en sedimentos (saturados, no consolidados y no cohesivos) que pierden temporalmente el contacto entre sus granos (es decir, su resistencia) de modo que quedan suspendidos por el fluido poral, por ende se mueven pendiente abajo (pueden hacerlo en pendientes tan bajas como 3°) como una carpeta tractiva, por acción de la gravedad.

Middleton y Hampton (1976), dice que en la licuefacción, el sedimento se sostiene por fluido temporal, que escapa de entre los granos a medida que estos se asientan por gravedad

Existen tres tipos básicos de desplazamiento:

- **Flujos de tierra.** Los materiales del suelo, en estado licuado, se desplazan rápidamente cuesta abajo por acción de la gravedad.

- **Flujo lateral.** Las capas superficiales del suelo o del sedimento se desplazan lateralmente por pendientes suaves o hacia superficies libres, como márgenes del río.

Dentro de este tipo de movimientos horizontales del terreno tenemos, **las separaciones laterales**, que según Mora, R., se trata de un movimiento de extensión lateral acompañado por fracturamiento cortante o tensional tal como se ilustra en la figura que sigue.

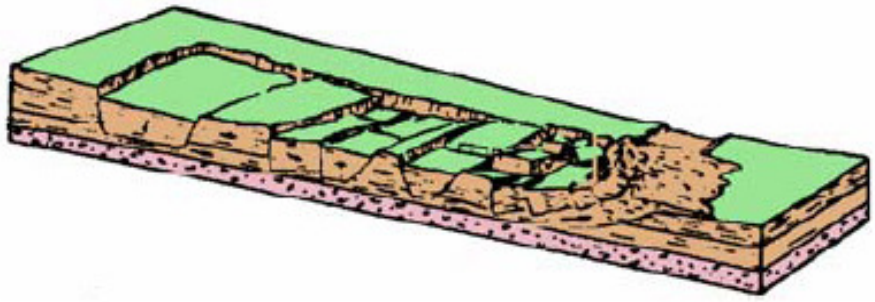


Figura No x. Separación lateral (Varnes, 1978). Fuente: Mora, R.

Mora, expresó que la separación lateral se define como una extensión de una masa cohesiva de suelo o roca, combinada con la subsidencia del material fracturado en un suelo subyacente más blando tal como se muestra en la figura abajo.

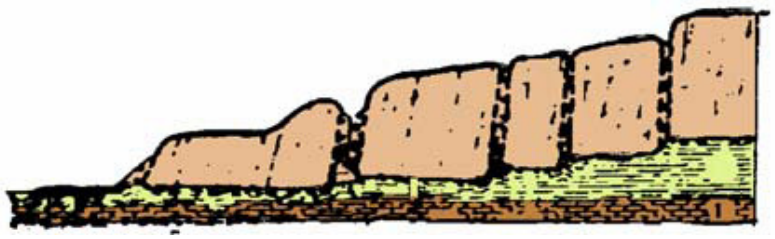


Figura No x. Separación lateral en roca. Fuente Mora, R.

Mora, asevera que la superficie de ruptura no es una superficie de corte intenso y el proceso es el producto de la licuefacción o flujo (extrusión) del material más blando.

Figura No x. Separación lateral por licuefacción durante el terremoto de Limón, Costa Rica (1,991), carretera Limón – Cahuita. Fuente: Mora, R.

- **Flotación.** Los objetos menos pesados que el sedimento licuado flotan en su superficie mientras se desplaza.

Según **Middleton y Hampton (1976),** la depositación ocurre cuando la presión en los poros decae y el flujo se paraliza gradualmente del fondo hacia arriba.

La fuente, propone algunos factores que condiciona el desarrollo de la licuefacción:

- Distribución del tamaño de los granos. La arena uniformemente graduada, con granos muy gruesos tiene mayor probabilidad de licuarse, mientras que las arenas limosas y gravas lo hacen bajo cargas cíclicas muy severas.

- Profundidad de las aguas subterráneas. Mientras menor sea el nivel de las aguas subterráneas, mayor será la probabilidad de que ocurra licuefacción.

- Densidad. El suelo puede densificarse cuando está sujeto a una carga cíclica, reduciendo su volumen de suelo- agua e incrementando la presión intersticial si los poros intergranulares se llenan de agua. Cuando esto ocurre habrá menor posibilidad de que se produzca su licuefacción.

- Peso del recubrimiento y profundidad del suelo. Las tensiones entre partículas aumentan a medida que aumenta la presión del recubrimiento y mientras mayor sea dicha tensión menor será la probabilidad que ocurra licuefacción. Por lo general, ocurre a profundidades menores de 9 metros; rara vez a mayores de 15 metros.

- Amplitud y duración de la vibración del terreno. La licuefacción de suelos bajo condiciones de tensión provocadas por un terremoto puede ocurrir ya sea: cerca del epicentro si son pequeños o moderados, o a cierta distancia si son moderados a severos.

- Edad del depósito. Los suelos jóvenes (menos de 3.000 años) son débiles y no cohesivos, de modo que tienen mayor probabilidad de licuarse que aquellos más antiguos donde actuaron procesos como compactación y cementación que incrementaron su resistencia.

- Origen del suelo. El suelo depositado por procesos fluviales se sedimenta fácilmente y sus granos tienen poca probabilidad de compactarse, de modo que se licuarán con facilidad. Los depositados glacialmente, generalmente ya son bastante densos y tienen menor probabilidad de licuarse.

- Deposito de flujos licuados:

Las estructuras sedimentarias características que ocurren por el escape de fluidos son:

a) Plato (dish) y pilar (pillars).
b) Estructuras de deformación: laminación convoluta, calcos de carga.
c) Diques y filones clásticos.

De acuerdo con **Américo L. Fernández y Alan R. Crumley** en su publicación sobre Estudio del Riesgo de Licuación para la Represa de Río Blanco (Naguabo, Puerto Rico), dicen que los casos históricos de licuación comenzaron a hacerse cada vez más notables a partir del terremoto de Niigata en 1964. Desde de entonces innumerables metodologías han sido desarrolladas para tratar de definir el riesgo de licuación de un deposito de arenas saturadas. Una vez que se determina que existe riesgo de licuación en un depósito arenoso, hay dos aspectos fundamentales que deben tratar de controlarse: la pérdida de resistencia al corte y las grandes deformaciones debido a fallas de flujo. Estos efectos cobran mayor importancia cuando se trata de una represa, pues pueden poner en peligro la integridad y estabilidad de la misma.

Esta fuente, opina que la licuación de los depósitos de arena siempre va seguida por un cierto asentamiento del terreno, lo cual se produce como resultado de la disipación del exceso de presión de poros. De acuerdo con Fernández et. al., tales asentamientos pueden alcanzar normalmente entre 10 a 20 centímetros. Los efectos de una deformación tan significativa se agravan si ocurren de manera diferencial. Más aún, si la superficie del suelo está algo inclinada la reducción de la resistencia al corte puede causar grandes deformaciones horizontales, conocidas como falla por flujo. El estudio de estos efectos es de gran importancia para las estructuras de gran longitud, tales como las presas de tierra. Por lo tanto, la evaluación del potencial de licuación, y la formulación de las correspondientes medidas de mitigación, son un factor muy importante en la evaluación del riesgo sísmico de la presa.

Según **Américo L. Fernández y Alan R. Crumley**, el análisis del potencial de licuación sigue procedimientos basados en la determinación de la razón de esfuerzos cíclicos (CSR). Esta razón CSR depende directamente de la máxima aceleración horizontal en el sitio.

Para ello se utilizan 2 tipos de correlaciones diferentes con el CSR (CPT y velocidad de ondas de corte). Con esto se define los estratos que son potencialmente licuables. A continuación se tratan los distintos enfoques que abordan el proceso de licuación.

- **Enfoque de esfuerzo cíclico**

Fernández et. al., opina que un principio generalmente aceptado que el potencial de licuación de estratos arenosos puede evaluarse utilizando correlaciones entre datos de resistencia a la penetración (tales como SPT y CPT) y la resistencia cíclica del material movilizado durante una fuerte excitación vibratoria. En este estudio se utilizaron datos de ensayos CPT debido a que éstos proveen resultados más confiables de densidad relativa en depósitos granulares. Adicionalmente, comparado con datos SPT, el cono es menos dependiente del operador del equipo y suministra un registro prácticamente continuo de la resistencia a la penetración y de la fricción lateral. Más aún, a diferencia del SPT, el efecto de perturbaciones a lo largo de la perforación no afecta la medición debido a que el cono es empujado continuamente sin requerir de la extracción y reinserción de la probeta.

Fernández et. al., expresó que en este enfoque, la resistencia cíclica es caracterizada por la relación de esfuerzo cíclico (CSR). Básicamente, la CSR se define como el esfuerzo cortante promedio (τavg) actuante en un estrato, normalizado por el esfuerzo efectivo de sobrecarga (σ'vo).

El estudio de licuación hecho para la presa de Río Blanco se basa en la correlación de esfuerzos desarrollada originalmente por Seed & Idris (1971 & 1987) y modificada por Robertson & White (1997). De acuerdo con estos autores, la CSR es una función de la duración del terremoto (representada por la magnitud del momento Mw), la aceleración horizontal máxima (representada por la aceleración pico del suelo normalizada por la aceleración de la gravedad, amax/g), la profundidad del depósito granular (representada por el coeficiente de reducción del esfuerzo, rd) y el esfuerzo vertical total normalizado (la relación entre el esfuerzo efectivo total actuando sobre el estrato, sigmavo/sigma' vo). Por lo tanto, CSR puede calcularse como:

$$CSR = \frac{\tau_{avg}}{\sigma'_{vo}} \approx 0.65 \cdot \left(\frac{a_{max}}{g}\right) \cdot \left(\frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}}\right) \cdot r_d$$

Tal como lo sugirieron Schneider y Mayne (1999), rd puede obtenerse utilizando la siguiente expresión de Idriss (1999):

$$r_d = e^{[\alpha(z)+\beta(z)*M_w]}$$

Donde z es la profundidad en metros hasta 25m, alfa y beta son funciones de ajuste definidas como:

$$\alpha(z) = -1.01 - 1.06 \cdot \sin\left[\left(\frac{z}{11.73}\right) + 5.133\right]$$

$$\beta(z) = 0.106 + 0.118 \cdot \sin\left[\left(\frac{z}{11.28}\right) + 5.142\right]$$

Según Fernández et. al., el siguiente paso es graficar los valores obtenidos de CSR contra la resistencia a la penetración del suelo. Para esto se usan datos de resistencia de punta del ensayo CPT, porque son más confiables que los datos de SPT. Una ventaja es que el CPT suministra información continua sobre el perfil el suelo, reduciendo la incertidumbre sobre las suposiciones del espesor y profundidad de los estratos licuables.

De acuerdo con la Oficina de Asistencia para catástrofes en América Latina y El Caribe (USAID/OFDA), la licuación se presenta en suelos arenosos, saturados con agua, usualmente ubicados cerca de ríos o mares, o sitios en donde en el pasado existían lagos o lagunas; estos terrenos al producirse el terremoto pierden consistencia, y mientras dura la vibración del terremoto, pierden la capacidad portante, es decir, de sostener las estructuras que han sido construidas allí.

Fernández et. al., son del criterio que para determinar el potencial de licuación, se comparan la posición de los puntos graficados con relación a la curva de referencia (CRR). Dicha curva CRR conecta las menores relaciones cíclicas de esfuerzos que se sabe producen licuación para un valor dado de resistencia normalizada de la punta (qcln). Esta curva es considerada como una frontera para limitar las condiciones en las que la licuación puede o no ocurrir

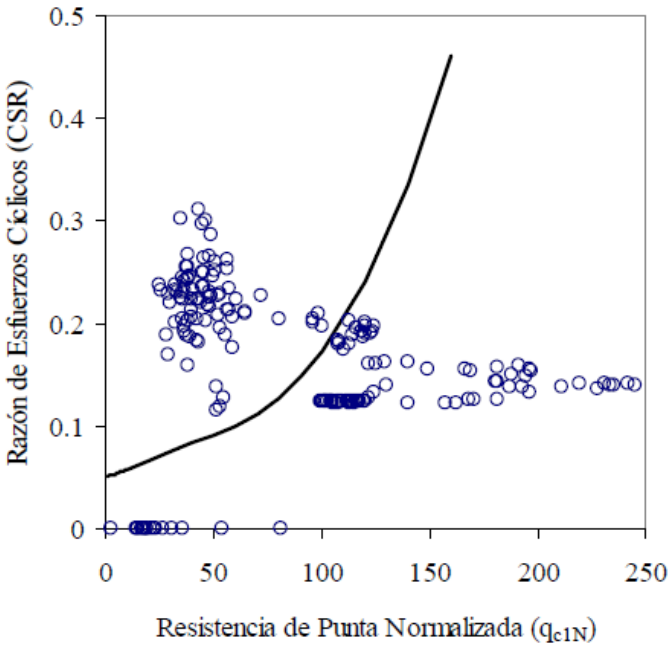


Figura x. Evaluación del potencial de licuación En Presa Río Blanco (Puerto Rico)

Otra vía propuesta **por Fernández et. al.,** para determinar la licuación del suelo es a partir del análisis de datos de ensayos CPT. Con esto se determina los esfuerzos efectivos y totales para cada profundidad. Entonces se calculan valores CSR a todo lo largo del material granular encontrado en los perfiles (desde arena arcillosa hasta grava), entonces estos valores se graficaron contra la resistencia normalizada de la punta, qcln , siendo:

$$q_{c1N} = \frac{\left(q_c / Pa\right)}{\sqrt{\sigma'_{vo} / Pa}} = \frac{q_c}{\left(\sigma'_{vo} \cdot Pa\right)^{0.5}}$$ (Pa: presión atmosférica)

Los valores de CSR graficados son comparados con la razón de resistencia cíclica, CRR, los cuales definen el umbral donde comienza la licuación. Por lo tanto, todos los puntos sobre esta línea serán sometidos a un esfuerzo cíclico cortante mayor que su resistencia cíclica, en consecuencia se licuarán. Las curvas de CRR dependen del tipo de la prueba de

penetración utilizadas. En algunos caso, los CRR son correlacionados con los ensayos CPT de acuerdo con la siguiente expresión presentada por Robertson & Wride (1998):

$$\text{If } 50 \le (q_{c1N})_{cs} < 160 \quad \text{then: } CRR_{7.5} = 93 \cdot \left(\frac{(q_{c1N})_{cs}}{1000} \right)^3 + 0.08$$

$$\text{If } (q_{c1N})_{cs} < 50 \quad \text{then: } CRR_{7.5} = 0.83 \cdot \left(\frac{(q_{c1N})_{cs}}{1000} \right) + 0.05$$

Considerando la gran cantidad de datos CPT que se obtuvieron en los estudios de campo, los resultados del análisis de licuación en cada sitio se caracterizaron con dos parámetros: (a) el factor de seguridad contra licuación; y (b) el espesor del estrato licuable en cada perfil del suelo.

El factor de seguridad contra licuación, FSL, se calculó para cada estrato licuable a fin de cuantificar el potencial de licuación. Este factor de seguridad se define como:

$$FS_L = \frac{CRR_{7.5}}{CSR}$$

Como resultado, valores de FSL menores que uno (1) identifican estratos licuable. Es importante comentar que CSR es altamente dependiente de amax. Por lo tanto, para reducir la incertidumbre, este parámetro debe determinarse basándose en aceleraciones pico del suelo "apropiadamente estimadas". Para ello se requiere valor de aceleración máxima (amax) resultante de un análisis dinámico unidimensional de un perfil representativo del suelo.

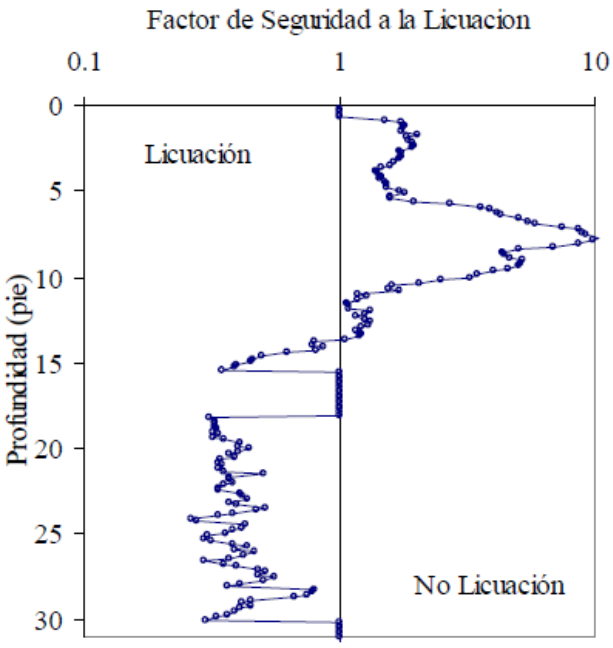


Figura x. Definición de los espesores de estratos Licuables

- **Enfoque basado en Velocidad de Onda de Corte (Vs)**

Fernández et. al., opina que los procedimientos generalmente aceptados para estimar el potencial de licuación (correlaciones con datos CPT y SPT) están basados en el estudio de los esfuerzos cíclicos inducidos. La suposición básica de este enfoque es que la resistencia a la licuación y los ensayos in situ de resistencia a la penetración son ambas función de la densidad relativa, y por lo tanto, son correlacionables.

Por otra parte, Dobry y colaboradores (1982) en estudio realizado por **Fernández et. al**., concluyen que para la predicción de los incrementos de la presión de poro y la licuación, las deformaciones cíclicamente inducidas son más significativas que los esfuerzos cíclicamente inducidos. Por lo tanto se recomienda un enfoque basado en pequeñas deformaciones. Hasta ahora, el modo más rápido y confiable para determinar pequeñas deformaciones in situ es mediante mediciones de campo de velocidades de ondas de corte,

Vs. Además, considerando que Gmax depende directamente de Vs, hay bases teóricas para correlacionar resistencia a la
licuación con Vs.

Para este estudio, se utilizó la correlación entre CRR y la velocidad de onda de corte de sobrecarga normalizada, V sl , propuesta por Andrus y Stokoe (1997):

$$CRR_{7.5} = 0.022 \cdot \left(\frac{V_{s1}}{100}\right)^2 + 2.8 \cdot \left(\frac{1}{V_{s1}^* - V_{s1}} - \frac{1}{V_{s1}^*}\right)$$

Donde:

$$V_{s1} = \frac{V_s}{(\sigma'_{vo})^{0.25}}$$

Para contenido de finos, FC $\leq$ 5 %

$V_{s1}^* = 215$ m/s

Para contenido de finos, 5% < FC < 35 %

$V_{s1}^* = [215 - 0.5(FC\text{-}5)]$ m/s

Aunque este enfoque parece ser más robusto que el enfoque basado en CPT, generalmente este método, se utiliza solamente como una herramienta de apoyo. Las razones para esto son: (1) no hay suficientes datos disponibles para cubrir con confianza el área del estudio, y (2) no hay suficientes casos documentados para verificar la curva CRR.

- **Enfoque de Mecánica de Estados Críticos**

Según **Fernández et. al**., la mecánica de estados críticos está basada en la dependencia única entre cambios volumétricos, grado de confinamiento y la densidad inicial del suelo. La relación entre la deformación volumétrica de un material granular y el esfuerzo aplicado es un aspecto muy significativo de su comportamiento esfuerzo-dependiente.

La fuente, dice que en un ensayo de compresión triaxial, la tendencia de un material arenoso a contraerse o expandirse puede caracterizarse en un espacio e-sigma definido por la relación de vacío y los esfuerzos efectivos de confinamiento. En este espacio, la región

donde los especimenes presentan altas relación de vacío y esfuerzos efectivos de confinamiento, tiene un comportamiento contractivo. Inversamente, la región con bajas relación de vacío y esfuerzos efectivos de confinamiento define un área de comportamiento expansivo. El limite entre esas áreas contractivas / expansivas se define como la línea de estados críticos (Santamarina et al. 2000).

Para ello, se conduce un procedimiento experimental para determinar la línea del estado crítico, LEC, para un espécimen de arena tomado de una calicata.

Los resultados de las pruebas muestran los siguientes parámetros: Intercepto: Γ=0.911 y pendiente: λ = 0.092

De acuerdo con la gráfica adjunta la línea del estado crítico, LEC, puede trazarse en el espacio e-sigma. Entonces las condiciones típicas del suelo antes y después de colocar la represa muestran que, aunque las condiciones iniciales tienden a mostrarse expansivas, una vez construido el terraplén, el cambio en la presión de confinamiento produce desplazamientos en el estado del suelo hacia lo contractivo.

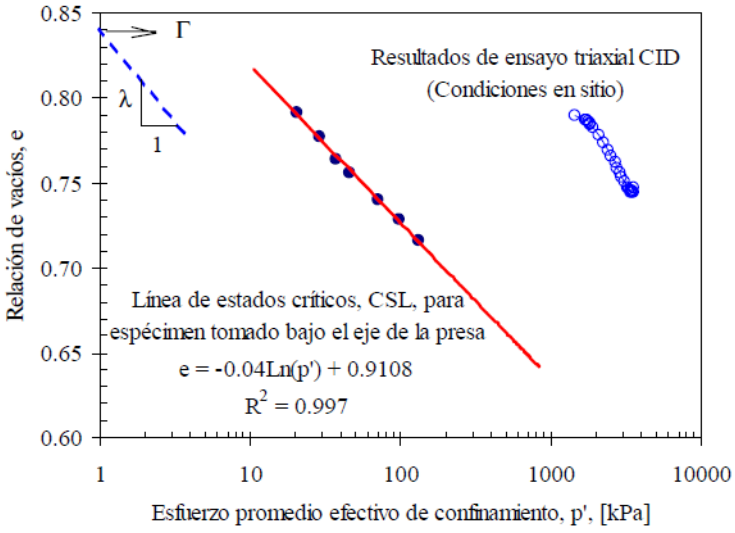


Figura x. Estado Crítico para determinar la licuación del suelo

De acuerdo con **Fernández et. al.**, el criterio para la evaluación del potencial de licuación basado en los ensayos de CPT, muestra grandes áreas potencialmente licuables, lo cual tiene un gran impacto en la extensión de las necesarias medidas de mitigación para manejar el material arenoso potencialmente licuable.

De acuerdo con la evaluación basada en CPT, hay dos grandes áreas de preocupación en relación con el espesor de la capa de arena que pudiera sufrir licuación.

Las correlaciones Vs son un método robusto para evaluar el potencial de licuación; sin embargo, para en algunos casos los datos Vs eran muy escasos. Por lo tanto, este tipo de análisis se hace solamente para corroborar resultados de aquellos estudios basados en correlaciones derivada de CPT.

A su vez, **Fernández et. al.,** quienes opinan que aunque el enfoque basado en el estado crítico sugiere que el potencial de licuación pudiera tal vez no ser tan extensivo como se muestra en el enfoque basado en las correlaciones CPT, no hay todavía suficientes datos para apoyar esta suposición. Considerando el costo y la extensión de las probables medidas de mitigación.

2.2.- Causas de ocurrencia de la licuación del suelo

Hoy día, **Rico, A. y Del Castillo, H. (1988),** aseguran que se conoce de dos causas que ocasionan la pérdida de resistencia de un suelo encaminado a un comportamiento licuable. Una de estos orígenes, es el incremento de los esfuerzos cortantes actuantes y el desarrollo correspondiente de presión de poros. O bien, el desarrollo rápido de elevadas presiones en el agua intersticial, quizá como consecuencia de un sismo, explosión, u otros, esto conlleva

a un colapso estructural rápido del suelo, cuyos vacíos, saturados de agua, tienden a reducirse, desarrollándose presiones en aquellas. La licuación casi instantánea ha ocurrido en arcilla saturada muy sensible y en arenas finas sueltas, sobre todo en condición saturada. Hay que mencionar que 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 fino no plásticos, o sus mezclas. Algunos especialistas (**La arena fluye en el espacio por Tony Phillips**) opinan que la resistencia de los materiales granulares (el suelo debajo de una casa) es causada en primer lugar por la fricción entre las partículas y la tracción entre las caras de las partículas individuales. Miles de millones de partículas contribuyen a la resistencia de todo el material y cualquier pequeño cambio en las condiciones puede tener un gran efecto sobre esta resistencia. Por ejemplo, un paquete de café envasado al vacío previo a ser abierto, es sólido y resistente. Una vez, abierto se alivia la presión y los granos se mueven libremente.

T.L. Youd (1977), destaca que la posición que tienen las partículas en un recipiente puede cambiar radicalmente durante cambios cíclicos en la carga que reciben, como ocurre en un terremoto o al agitar un envase para compactar un polvo. La adhesión entre las partículas **(1)** mantiene un gran hueco. Una pequeña tensión en sentido contrario a los punteros del reloj **(2)** hace colapsar el hueco, y otra tensión mayor **(3)** forma nuevos huecos, que colapsan cuando la tensión revierte el sentido **(4). (Véase (Figura 5)**

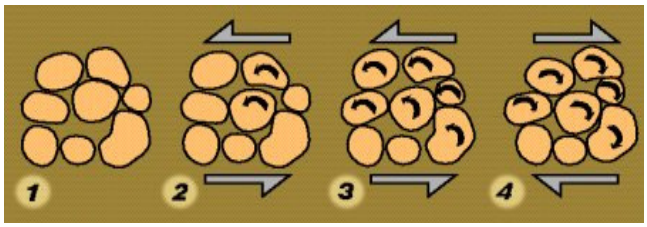


Figura 5. FASES DE DISGREGACIÓN DE PARTÍCULAS HASTA LA LICUEFACCIÓN.

Según López Querol (Comunicación telemática, fecha 15/09/08), los suelos que licuan son casi exclusivamente arenas, aunque a veces (pocas) se ha observado licuefacción en limos. De una forma muy burda, se puede estimar si una arena licúa o no en base a su curva granulométrica. Existen otros autores que estiman el grado de licuefacción de una arena en base a medidas in situ como SPT.

Esta misma fuente (Comunicación telemática, fecha 17/09/08), opina que el problema de la licuefacción (y densificación) están relacionados con suelos poco densos, los tratamientos de mejora pasan por compactar este tipo de suelos. Soluciones como la compactación dinámica o la vibroflotación parecen las más adecuadas.

De acuerdo con la opinión de los científicos, los efectos inducidos por un terremoto son fenómenos que suelen producirse durante o después de un terremoto. Las roturas de taludes, caídas de rocas y otros deslizamientos así como la licuefacción son efectos inducidos. Algunos autores consideran estos fenómenos como una de las categorías de los efectos locales], pero en general se estudian aisladamente.

Un terremoto induce en el suelo condiciones no drenadas, es decir, debido a la aplicación de la carga cíclica y rápida como la que constituye un seísmo se produce un incremento de la presión en los poros entre las partículas que puede provocar que las tensiones efectivas tiendan a cero, es decir, se produce una pérdida de la tensión en el contacto entre las partículas. Esto provoca una transformación en el estado del suelo, ya que adquiere la forma de una suspensión. Este fenómeno se llama licuefacción y se produce principalmente en suelos arenosos saturados.

Según los datos aportados por la Sismología, se ha observado este fenómeno de licuación en suelos cohesivos, pero requiere de una mayor energía para producirse, gracias a que la cohesión los previene frente a la licuefacción. El potencial de licuefacción depende de dos factores: la naturaleza de la sacudida (intensidad y duración del terremoto) y de la susceptibilidad del material a licuefactar. Este fenómeno induce daños severos en estructuras, edificios y líneas vitales (infraestructuras de transporte de personas, distribución de mercancías y telecomunicaciones). Por lo tanto, la zonación de la

LICUEFACCIÓN EN EL PASTAL, MENDOZA
23 de noviembre de 1977

licuefacción es uno de los aspectos vitales para la reducción del daño sísmico.

Figura x. Licuación del suelo en provincia de Mendoza
(Buenos Aires, Argentina)

Por su parte, Pastor, M. et. al. (1,999), propone los modelos matemáticos, constitutivos y numéricos que se emplean hoy en día para reproducir el comportamiento de cimentaciones y geoestructuras bajo solicitaciones sísmicas. Esta fuente, opina que el punto de partida son las ecuaciones de Biot-Zienkiewicz, que describen el acoplamiento entre el esqueleto sólido y el fluido intersticial.

Pastor, M. et. al. (1,999), dice que el cálculo de la respuesta sísmica de geoestructuras presenta dos dificultades específicas: (a) el acoplamiento existente entre el esqueleto sólido y el fluido intersticial, y (b) la modelización del comportamiento mecánico del esqueleto sólido, especialmente su tendencia a densificar bajo carga cíclica.

Según **Pastor, M. et. al. (1,999),** en ocasiones, este acoplamiento, unido a la tendencia del suelo a densificar, junto con una permeabilidad baja y una velocidad alta de aplicación de la carga puede hacer que se llegue a un tipo de rotura conocido como licuación. El suelo se transforma entonces en un fluido viscoso en el que se hunden los edificios y estructuras cimentados en él.

Figura x. Licuación de cimentaciones en Niigata (1,964)

Este fenómeno se debe a la tendencia del suelo a compactar bajo carga cíclica, que, debido a la baja permeabilidad relativa y a la velocidad de aplicación de la carga produce un aumento de la presión intersticial del agua. Si esta presión intersticial llega a alcanzar el valor de la tensión intergranularimcial, las tensiones efectivas se hacen prácticamente nulas y el suelo se transforma en un fluido.

ECUACIONES CONSTITUTIVAS PARA SUELOS BAJO CARGA SÍSMICA

Las investigaciones de la licuación han revelado tres aspectos fundamentales del comportamiento de los suelos bajo carga sísmica. Estos son los siguientes:

• Cuando a un suelo se le somete a una serie de ciclos de carga-descarga, como los que se generan bajo la acción de un terremoto, el suelo tiende a compactar.

• El proceso de carga sísmica tiene lugar, en general, en condiciones sin drenaje. Esto quiere decir que la tendencia del suelo a compactar se traduce en un aumento de la presión intersticial que tarda en disiparse un tiempo considerablemente mayor que la duración del terremoto.

• Las condiciones de rotura del suelo bajo carga monótona y sísmica son, esencialmente, las mismas. Si se llega a rotura con una serie de ciclos de amplitud más baja que la correspondiente a carga estática es debido a la generación de presión intersticial antes mencionada, que ha hecho disminuir la tensión efectiva de confinamiento. (No se considera aquí el daño acumulado en el material de cementación).

Los modelos constitutivos más empleados hoy en día para suelos son los de tipo plástico. En ellos se parte de la existencia de una función convexa de carga o de fluencia en el espacio de tensiones.

$f(o',k) = O$

En esta expresión, o’ es el tensor de tensiones efectivas (totales menos intersticiales) de segundo orden o una representación vectorial del mismo y k un parámetro o conjunto de parámetros que caracterizan el tamaño y la forma de la superficie f = O.

Estudios científicos (Universidad de Alcalá, Curso 2007/2008), definen la licuefacción como la pérdida de consistencia del suelo, de manera temporal, debido a una redistribución de las partículas del suelo y el agua que contiene. Suele deberse a movimientos sísmicos y actividad antrópica.

La licuefacción tiene lugar en los suelos no consolidados, no cohesivos o fácilmente disgregables y saturados en agua. El sedimento cae hacia abajo y el agua de saturación tiende a salir como una fuente surgente, comportándose como material licuado, cuyo resultado es la producción de un desplazamiento o falla del terreno.

Figura x. Ilustrando el proceso de licuefacción en los suelos.

Las últimas investigaciones sobre la licuación de suelos, a partir de datos aportados por la Sismología, indican que los factores que aumentan la probabilidad de que el terreno se comporte como un líquido son varios:

_ Distribución del tamaño de los granos.
_ Profundidad de las aguas subterráneas
_ Densidad, origen y edad del depósito.
_ Peso del recubrimiento y profundidad del suelo.
_ Amplitud y duración de la vibración del terreno.

De acuerdo con los datos aportados por la Sismología, las acciones a tomar ante la licuefacción son:

_ Evitar áreas donde pueda ocurrir la licuefacción y el flujo lateral.
_ Estabilizar el material licuable.
_ Colocar los cimientos por debajo del material licuable.
_ Agregar peso a la estructura para lograr una flotabilidad neutral.
_ Usar material flexible al movimiento

Por otro lado, Octavio Rojas Vilches (ocrojas@udec.cl) en su publicación sobre Peligros Geológicos, define la licuefacción como un fenómeno que se produce en áreas donde los materiales están saturados con agua. El suelo que hasta entonces permanecía estable se pasa a comportar como un fluido, no siendo capaz de soportar edificios.

Rojas, expresó que la ocurrencia de esta se restringe a ambientes con arenas y limos recientemente depositados (no + de 1000 años) y con niveles altos de aguas subterráneas.

Figura x. Edificio volcado por licuefacción del suelo y aceleración intensa en Adapazari, Turquía.

Omar Darío Cardona y Alex Barbat en su publicación en revista TREBOL edición No 17-3 sobre Desastres Sísmicos de Turquía y Colombia en 1999, confirman que es

imprescindible tener en cuenta los fenómenos sísmicos colaterales, como la licuefacción del suelo (Figura xx) y las zonas de ruptura de fallas geológicas. Estos efectos locales deben ser inversiones fundamentales de los planes de ordenamiento urbano y reglamentación de usos del suelo, con el fin de evitar que estas zonas sean urbanizadas.

A su vez, **Camacho, E., y Viquez, V. (1,991)**, quienes dicen que los efectos del sismo de 7,5 grados de magnitud del 22 de abril de 1,991 sacudió la mayor parte de región Caribe de Costa Rica y Noroeste de panamá. En este último, particularmente, en la provincia de Bocas de Toros, en que se encontró rastro de licuefacción del suelo

Esta fuente, opinan que la licuefacción en Bocas de Toro fue masiva sobre todo la zona deltaica y costera del noroeste de Bocas de Toro, abarcando una superficie aproximadamente de 355km2 y hasta una distancia de 100km del epicentro.

Figura x. Canal de drenaje obstruido por arena, Finca 11, Changuinola (Panamá)

Según Camacho, E., y Viquez, V. (1,991), en varios casos de canales de drenajes de las fincas bananeras, así como el Canal de Changuinola (Figura xx), se vieron obstruidos por gran cantidad de arena proveniente del subsuelo, otras veces surgieron volcancitos y cráteres de arenas, grietas y fracturas. En otros casos, agua fétida fue expulsada hasta altura de 3m.

Figura x. Grieta debido al desplazamiento lateral en oficinas de Chiquiri Land Company en Changuinola.

De acuerdo con Camacho, E., y Viquez, V. (1,991), efectos como los anteriormente descritos podrían repetirse en condiciones similares en otras área de la República de Panamá con condiciones de suelos parecidas. Un buen ejemplo de esto lo tenemos en la ciudad de Colón y áreas adyacentes, las cuales ya sufrieron licuefacción masiva durante el terremoto del 7 de Septiembre de 1882 (Ms = 7,5 – 8,0). Igual podría suceder en algunas partes de la Ciudad de Panamá y alrededores, en donde no se comenzó ha efectuar rellenos hidráulicos sino hasta después de 1910.

Alva H. y Parra, D. M. (1,991), opinan que el terremoto de 7,8 grados de magnitud del 31 de Mayo de 1970 produjo el fenómeno de licuación de suelos en el área epicentral, principalmente en la ciudad de Chimbote, zona industrial y pesquera del norte peruano.

La ciudad se ubica sobre depósitos aluviales del río Lacramarca, constituidos por arenas limpias y arenas limosas saturadas, con compacidades medias y sueltas en algunas zonas. Se presenta en un mapa las áreas en donde el fenómeno de licuación de suelos ocurrió en Chimbote durante el sismo de 1970. La evaluación del potencial de licuación se realizó por medio de metodologías simplificadas desarrolladas en Estados Unidos y el Japón, que están

basadas en ensayos de penetración, contenido de finos de la arena, magnitud y aceleración del sismo de diseño y la resistencia a la licuación del suelo en estudio.

Según Alva H. y Parra, D. M. (1,991), La evaluación del potencial de licuación de los suelos de Chimbote se ha realizado mediante el método simplificado, basado en el comportamiento del suelo en terremotos pasados. Este método consiste en comparar las condiciones de sitios en donde haya o no haya ocurrido licuación de suelos en sismos pasados, con las condiciones del sitio en estudio. Se compara la relación de esfuerzos (esfuerzo cortante promedio actuante/esfuerzo vertical efectivo), con valores corregidos del ensayo de penetración

En Estados Unidos, Seed et al (1983) y Seed y De Alba (1986) han presentado el método simplificado, en base a ensayos de penetración estándar y el cono holandés. En el Japón, Tokimatsu y Yoshimi (1981, 1983), Iwasaki et al (1978) e Iwasaki (1986) han presentado también el método simplificado en base a la experiencia japonesa. Estas metodologías simplificadas fueron programadas en lenguaje Basic para realizar un análisis sistemático de los datos. La conversión del ensayo de penetración estándar al de cono holandés se realizó según Robertson y Campanella (1983, 1985)

Figura x. Licuación del suelo en los Ángeles (California). Terremoto de San Fernando (Ms = 6,6), el 09 de Febrero de 1971.
Fuente: Jack Meehan, ingeniero estructural

La corrección de sobrecarga se realizó de acuerdo a Liao y Whitman (1986). Los datos requeridos para realizar el análisis simplificado de licuación, empleando cualquiera de las metodologías descritas, involucran el conocimiento de: Perfil estratigráfico del subsuelo, que incluye el tipo de suelo y la ubicación del nivel freático.

Las características de los estratos del subsuelo, es decir, su densidad, contenido de finos y diámetro promedio de las partículas, los valores de N ó qc con la profundidad y su conversión.

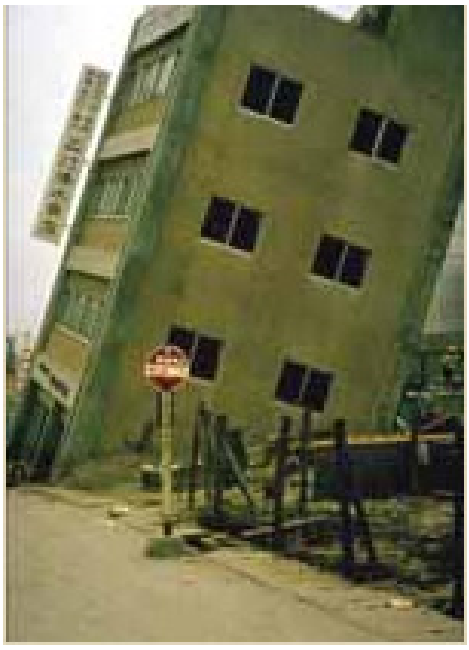


Figura x. Vista lateral de la licuefacción de cimentaciones de un edificio en terremoto de Niigata (Japón), en que ni siquiera se han roto los cristales y que todo el edificio se ha volcado sin sufrir daños

Los parámetros del sismo de diseño, es decir su magnitud (Ms) y la aceleración máxima en la superficie del terreno.

Alva H. y Parra, D. M. (1,991), son del criterio que las distintas metodologías simplificadas de evaluación del potencial de licuación, aplicadas en Chimbote, producen resultados semejantes.

Se requiere el conocimiento del perfil estratigráfico y ensayos de penetración, nivel freático, ensayos de clasificación de laboratorio y el sismo de diseño para ejecutar el análisis. De igual forma, se presenta un mapa de áreas con potencial de licuación de suelos

en Chimbote (Figura x, y xx), ante sismos de 0.15 y 0.30 g de aceleración máxima, con magnitud de Ms=7.5. Existe una excelente correlación entre la geología y la zona de ocurrencia del fenómeno. La predicción del fenómeno de licuación de suelos en Chimbote con la metodología simplificada ha sido validada con el sismo del 31 de Mayo de 1970.

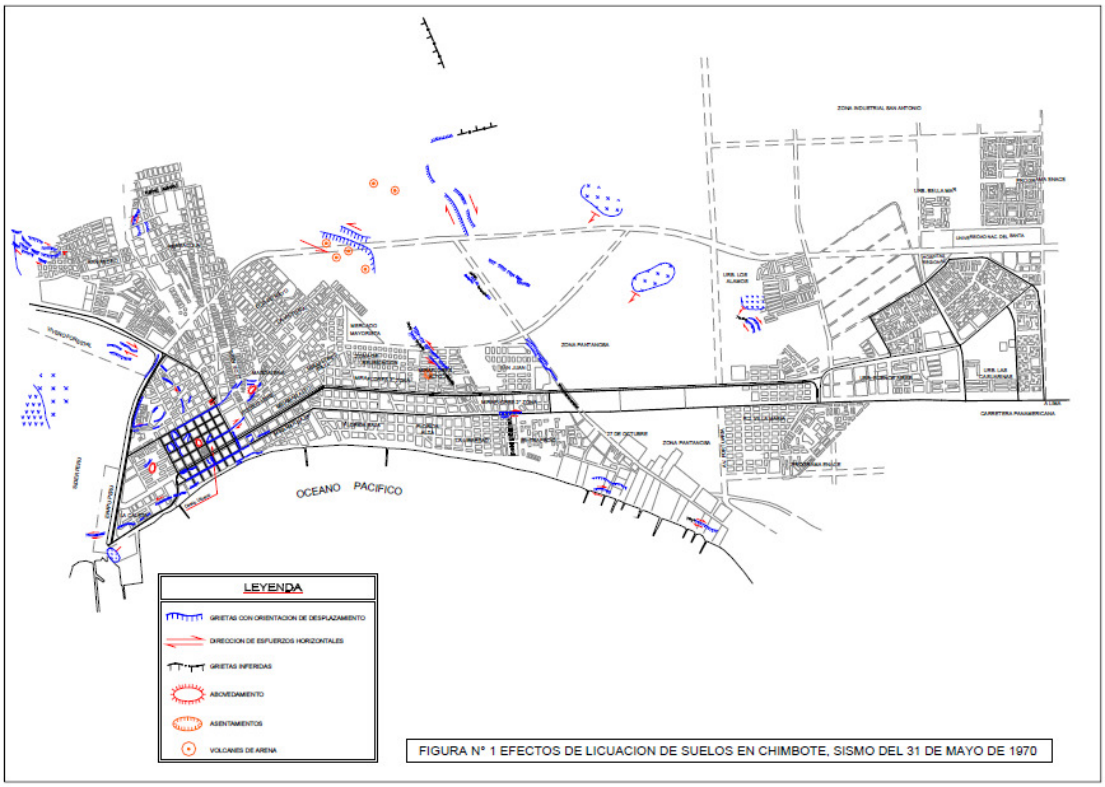


Figura x. Evidencia superficiales de la licuación del suelo en la Ciudad de Chimbote en Perú luego del sismo de 1979. Fuente: Alva H. y Parra, D. M. (1,991),

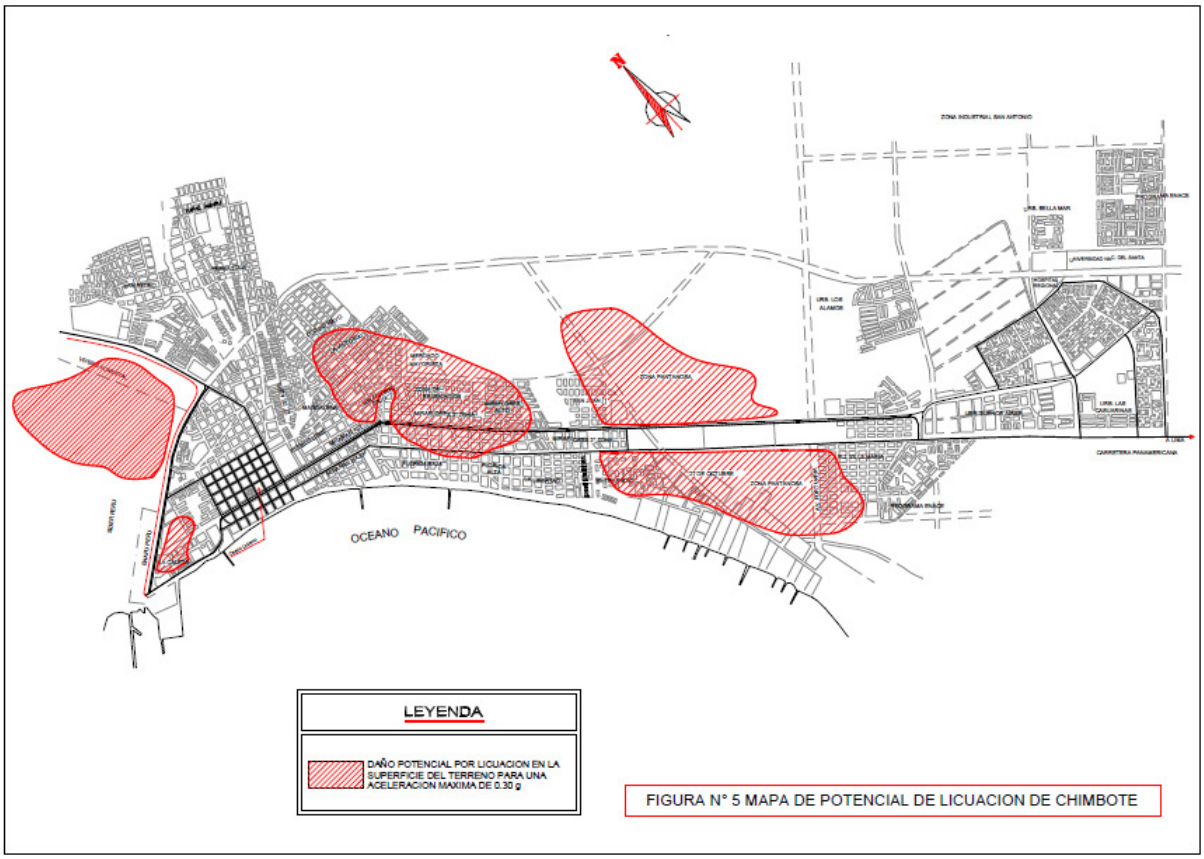


Figura xx. Zonas susceptible a la licuación en la Ciudad de Chimbote (Perú). Fuente: Alva H. y Parra, D. M. (1,991),

Asimismo, en diversas publicaciones científicas vía ON LINE (Por ejemplo, www.webtext.cfm.htm), consideran que la Tierra actúa en forma diferente durante un terremoto. Algunas veces, el suelo se comporta como arenas movedizas cuando se sacude. Experimentos en el espacio han estudiado muchas de las propiedades del suelo.

De acuerdo con especialistas en el tema, opinan que se necesita un poco de agua para que la arena se compacte. Si le agregas demasiada agua, no podrás darle forma pues se derrumbará muy fácilmente. Los científicos saben que el agua penetra en los espacios entre

las partículas de arena y hace que los granos de arena se "conecten" entre si. Si se agrega demasiada agua, estas "conexiones" se rompen y la arena se mueve.

Durante un terremoto, los geólogos y los ingenieros han observado que el suelo realmente se hunde cuando se sacude. Si hay edificaciones sobre este terreno, también se hundirán en la tierra y podrían dañarse seriamente.

La fuente, es del criterio que el terreno que se hunde está muy húmedo - a veces completamente mojado. Esta gran cantidad de agua hace que el terreno se licue, lo que significa que actuará más como un líquido que como un sólido. Si estuvieses de pie sobre este suelo durante un terremoto, probablemente sentirás como si estuvieses sobre arena movediza.

Especialista científicos (www.webtext.cfm.htm), opinan que el proceso que se describe se conoce como licuefacción - cuando el suelo está tan húmedo que el espacio entre las partículas se llena con agua, lo que hace que las partículas deslicen una contra la otra y así toda el área se hunde cuando las partículas se asientan. El suelo se hace más fuerte si lo confinas dentro de un espacio (esto se conoce como "presión de confinamiento").

Un buen ejemplo de cómo esta presión de confinamiento puede cambiar las características del suelo es un paquete de café. Algunas clases de café vienen empacadas en cubos o rectángulos. Cuando se envasa el café, se remueve todo el aire del empaque - en otras palabras, el paquete se "sella al vacío". Cuando el paquete está cerrado, se siente muy duro cuando lo tocas. Al abrirlo, se elimina la presión de confinamiento (el vacío), y las partículas se mueven y separan para usar el café en la cafetera.

Los ingenieros pueden entender mejor dónde y cómo construir edificaciones mejores y más resistentes - o incluso dónde no se deben construir. Las personas que almacenan granos y productos en polvo entenderán mejor cómo y por qué las partículas se comportan de cierta manera dependiendo de lo secas o mojadas que están.

Figura x. Efecto de licuación como consecuencia del terremoto Kobe en Japón (1995) Escala 7.2 Ritcher. Fuente: http://www.pcivil.gov.ve/terremoto.html

Según datos aportados por la Sismología, indican que durante los terremotos el movimiento del terreno puede causar una pérdida de la firmeza o rigidez del suelo que da como resultados el desplome de edificaciones, deslizamientos de tierra, daños en las tuberías, entre otros. El proceso que conduce a esta pérdida de firmeza o rigidez es conocido como licuación del suelo. Este fenómeno está principalmente, más no exclusivamente, asociado con suelos saturados poco cohesivos. El término licuación, incluye entonces todos los fenómenos donde se dan excesivas deformaciones o movimientos como resultado de transitorias o repetidas perturbaciones de suelos saturados poco cohesivos.

Debido a las enormes magnitudes de los efectos destructivos de la licuación durante el terremoto de Niigata, Japón en 1964, los ingenieros se vieron en la obligación de brindarle toda su atención. Desde entonces se ha avanzado a pasos agigantados para entender el fenómeno, sus consecuencias, analizando y evaluando el potencial de licuación de un lugar y desarrollando nuevas tecnologías que mitiguen las acciones destructoras de un terremoto.

Figura x. Desarrollo de Proceso de Licuefacción en Suelo. Fuente: Univ. Washington, 2000

El conocimiento del proceso y sus efectos se ha basado en tres diferentes principios:

- Observaciones de campo durante y después de los terremotos.
- Experimentos en el laboratorio en muestras de suelos saturados, y en modelos de fundaciones y estructuras.
- Estudios teóricos.

Algunos de los efectos de licuación del suelo son catastróficos, tales como la falla de grandes pendientes o presas, el desplome de edificios y puentes, el colapso parcial o total de muros de contención. Otros sin embargo son un poco menos dramáticos como largas deformaciones de la superficie terrestre, el asentamiento y consecuente inundación de grandes áreas, etc. Aún estos efectos laterales en muchos terremotos causan daños de grandes proporciones a carreteras, vías férreas, tuberías y edificios.

Las últimas investigaciones sobre la licuación, a partir de datos aportados por la Sismología, señalan que las pruebas de laboratorio han demostrado que un drenaje oscilatorio puede causar el aumento en la presión del agua en los poros en un suelo saturado como resultado del reordenamiento de las partículas del suelo con una tendencia a compactarse entre ellas. Si el agua en los poros no puede drenar durante la filtración, la carga gravitacional no será soportada por la estructura mineral, sino más bien por el agua capilar (en los poros), lo que conlleva a una reducción en la capacidad del suelo para soportar un esfuerzo. También se han dado a conocer aquellos factores de mayor influencia para la licuación en los suelos: Suelos granulares saturados sin la presencia de fuerzas cohesivas (entre partículas), son más susceptibles a un aumento de la presión del agua en los poros. La densidad de un suelo poco cohesivo también es un importante factor ya que la alta presión en los poros da como resultado arenas muy sueltas, y puede alcanzarse un punto donde la arena pierda su resistencia inicial al corte. Otros factores que afectan el grado de aumento de presión en los poros incluyen la amplitud de la filtración oscilatoria, el tamaño, la forma y gradación de las partículas, la presión de confinamiento que actúa en el suelo, la textura del suelo y la rata de sobreconsolidación de éste.

Efectos sobre las tuberías enterradas

Las experiencias japonesas indican que el daño en las tuberías enterradas es mucho mayor en los terremotos asociados con licuación del suelo que en aquellos que no están a asociados a tal efecto.

A grandes rasgos existen dos formas de deformaciones sísmicas en el suelo, que están ligadas directamente a la licuación y que podrían causar daños sobre las tuberías enterradas. Una es la deformación dinámica o tensión y compresión alternantes. La otra es deformación estática o en una sola dirección.
Las tuberías salen a flote sobre la superficie debido a que son cuerpos de mucho volumen y poco peso. Se da entonces el efecto conocido como empuje: ya que el suelo saturado tiene un comportamiento similar al de un fluido estático, la tubería inmersa en él recibe de parte del suelo una fuerza vertical ascendente igual al peso del volumen de suelo desalojado. Además existe un gran aumento en la presión del agua en los poros del suelo que contribuye en este proceso.

Los suelos susceptibles a la licuación generalmente forman topografía plana. Por esta razón grandes deformaciones en el terreno no pueden ser vistas con facilidad. Este hecho dificulta después de un terremoto determinar el tipo de deformación del suelo que ha causado el daño en una tubería. La evaluación del grado de vulnerabilidad de las tuberías existentes es esencial para establecer medidas efectivas, siendo particularmente importante para redes de distribución de gas y agua, las cuales están extendidas en una amplia variedad de suelos.

Los efectos de unas pocas formas típicas de desplazamiento del suelo, tales como movimientos de falla y expansiones laterales, en la vulnerabilidad de las tuberías han sido estudiadas por muchos investigadores. Todavía no se ha propuesto un método general para evaluar los efectos de las condiciones del suelo, pero una forma de análisis estadístico permite determinar la correlación entre las condiciones del suelo y la susceptibilidad a los daños en cierto tipo de tuberías.

Las estadísticas de los daños obtenidas durante terremotos pasados indican lo siguiente:

1. Los daños se concentran en áreas donde se presentan condiciones irregulares del suelo; la causa de las mayores deformaciones del suelo es la no uniformidad en el desplazamiento debido a tal condición irregular.

2. El grado de vulnerabilidad depende en gran medida del tipo de sistema de tuberías. Entre menos flexible sea la tubería (respecto tanto a las uniones como a los materiales), presenta mayor grado de vulnerabilidad.

3.La vulnerabilidad depende también de la intensidad del movimiento sísmico, el cual está representado por la máxima aceleración.

Es conveniente entonces, investigar las fallas en tuberías continuas de acero que ofrecen rigidez, ductilidad y son menos susceptibles de fallar que cualquier otro tipo de tuberías. Debido principalmente a la ductilidad, el proceso de fractura se ve reflejado en el modo de deformación en las partes fracturadas, lo cual sugiere o da una idea del proceso de carga durante el terremoto.

No se ha observado daños sísmicos en las tuberías continuas de acero de grandes diámetros, excepto en las uniones de aquellas más viejas que fueron mal soldadas. Aunque las fallas encontradas en tuberías de diámetros pequeños (100mm o menos), en algunos casos pueden ser debido a una mala soldadura, parece que estas todavía se encuentran sujetas al complejo proceso de deformación durante el terremoto.

La licuación es considerada entonces como la principal causa de daño del sistema de tuberías durante un terremoto. Las condiciones del subsuelo original afectan la extensión del levantamiento de las tuberías:

Una capa licuada presionará el suelo existente sobre este.
Una capa impermeable evitará la disipación de la alta presión del agua en los poros del suelo.
Una amplificación del movimiento sísmico aumentará el grado de licuación del suelo que está sobre esta capa de subsuelo.
Estos tres factores darán como resultado un mayor levantamiento y desplazamiento de las tuberías.

Se han desarrollado estrategias de mitigación, tales como el uso de material poco o no licuable en el suelo que está sobre el subsuelo, el método del gato horizontal, paredes aislantes en la interfase entre el subsuelo original y el que se encuentra sobre este, y fundaciones relativamente pesadas sujetas a la estructura, que pueden ser efectivas en la reducción del levantamiento y sus consecuentes daños. Sin embargo su relación eficiencia-costo es otro importante factor que debe ser considerado desde un punto de vista práctico.

KOBE: ¿UN DESASTRE NO ANUNCIADO?

Según, Sato, J. M., y Kumagai, Y., científicos de la Universidad de Tsukuba (Japón), las características, efectos producidos y enseñanzas del Terremoto de Hanshin-Awaji, más conocido fuera del Japón como Terremoto de Kobe, y notas sobre el proceso de reconstrucción a medio año del evento.

El sismo, de magnitud de 7.2 en la escala de Richter, ocurrió a las 5:46 de la mañana del 17 de enero de 1995, causando destrucción en Kobe y áreas aledañas. Se contabilizaron 5,502 muertos, 41,521 heridos, más de 100,000 viviendas destruidas por colapso o incendios, cerca de 320,000 refugiados y casi 100 billones de dólares en pérdidas materiales.

Este evento causó una serie de sorpresas, empezando por el hecho que ocurrió en una zona que se pensaba libre de terremotos, por la destrucción de estructuras supuestamente sismo-resistentes, la tardía reacción por parte del gobierno, y, por el lado positivo, la loable participación espontánea de voluntarios en la emergencia.

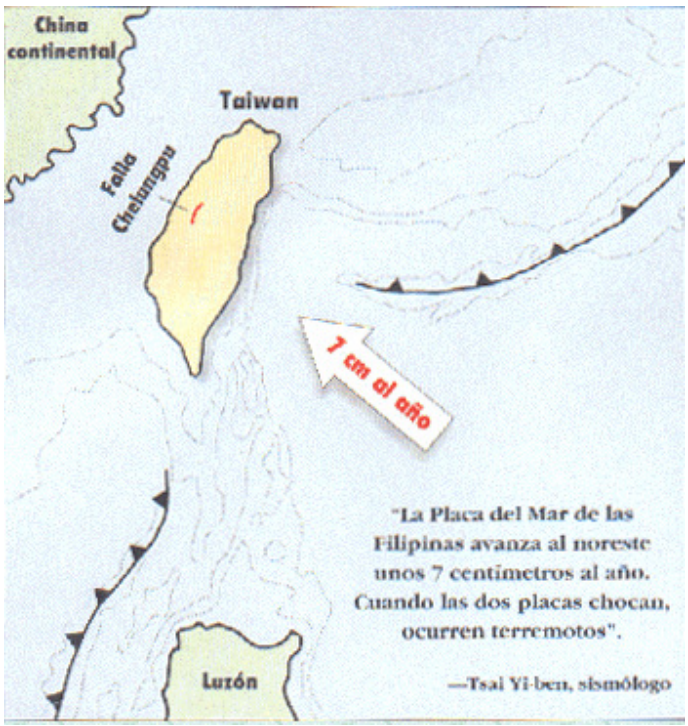


Figura x. Ambiente tectónico de Taiwán.

Fuente: Sato, J. M., y Kumagai, Y

ANTECEDENTES

Daños Producidos

Se ha estimado que la perdida en estructuras y líneas vitales bordea los 10 trillones de yenes (aproximadamente US $ 100 billones

Licuación de Suelos

La licuación de suelos ha sido una de las mayores causas de destrucción de estructuras e instalaciones en las áreas costeras de la Bahía de Osaka, y en especial en las áreas ganadas al mar e islas artificiales como Port Island y Rokko (ver figura 1).

Se ha determinado que el asentamiento máximo ha sido de más de 3 metros y en algunos lugares paredes de muelle se han desplazado más de 5 metros lateralmente hacia el mar. La mayoría de las grúas de contenedores se descarrilaron y se dañaron como resultado del movimiento del suelo inducido por la licuación. Depósitos de arena y grava enlodaron áreas de patios de contenedores y vías vehiculares, sin embargo, hubo sólo daños ligeros en la parte central de las islas, en donde las construcciones en altura se construyeron sobre cimentación con pilotes y métodos de mejoramiento como drenaje de arena.

Líneas Vitales

Los daños a líneas vitales se calculan en 5 mil millones de dólares. Las líneas vitales, tal como su nombre lo indica, son las que permiten que una ciudad moderna funcione adecuadamente y su interrupción crea no solo inconveniencias sino que afecta a las acciones de emergencia. Los daños se pueden resumir en:

• Electricidad

Un millón de hogares quedaron sin servicio. El servicio de electricidad se restableció a la mitad de hogares a las 24 horas, a otros sectores al tercer día y totalmente a los 7 días de ocurrido el sismo.

• Gas

Distribuido por medio de una red de tuberías, unas 850,000 familias quedaron afectadas. Dos meses después, todavía 100,000 familias no contaban con este servicio.

• Agua

Más de un millón de puntos de servicio quedaron sin suministro de agua. La restauración del servicio demoró en ciertos casos más de cinco semanas, debido a la dificultad de localizar puntos de fuga subterránea (1,000 puntos en 4,000 km de tubería en Kobe) y daños a las tuberías matrices de suministro.

• Telecomunicaciones

En cuanto a teléfonos, 285,000 circuitos quedaron interrumpidas (20%). Hubo un aumento de 20 a 50 veces en el número de llamadas telefónicas en el día del evento y al día siguiente. Se instalaron 2,550 teléfonos y 361 facsímiles gratuitos, incluyendo puntos para llamadas internacionales. También cumplieron un rol importante en la emergencia los teléfonos portátiles, la radio y el Internet.

• Sistema de Desagüe

42 de las 102 estaciones de tratamiento fueron dañadas y se produjeron más de 10,000 roturas en el sistema de tuberías.

El devastador terremoto que sacudió Taiwan devastador terremoto que sacudió Taiwán. Los distritos de Changhua, Yunlin y Chiayi, a lo largo de la costa occidental de Taiwan, se han hundido entre 40 y 50 centímetros. “Dicho cambio en el mapa tiene mucho que ver con la licuación de tierra encontrada en estas zonas tras el terremoto”, dijo Chang Yuan-hsu, director del Departamento de Administración de Tierras del Ministerio del Interior.

Los científicos explicaron el fenómeno de hundimiento. Indicaron que el terreno a lo largo de los lechos de los ríos, que contienen altos porcentajes de arena tienden a saturarse con agua subterránea. Cuando ocurre un terremoto fuerte, las tremendas sacudidas provocan que agua adicional se acumule en el ya suave terreno de estas zonas, causando licuación y luego hundimientos.

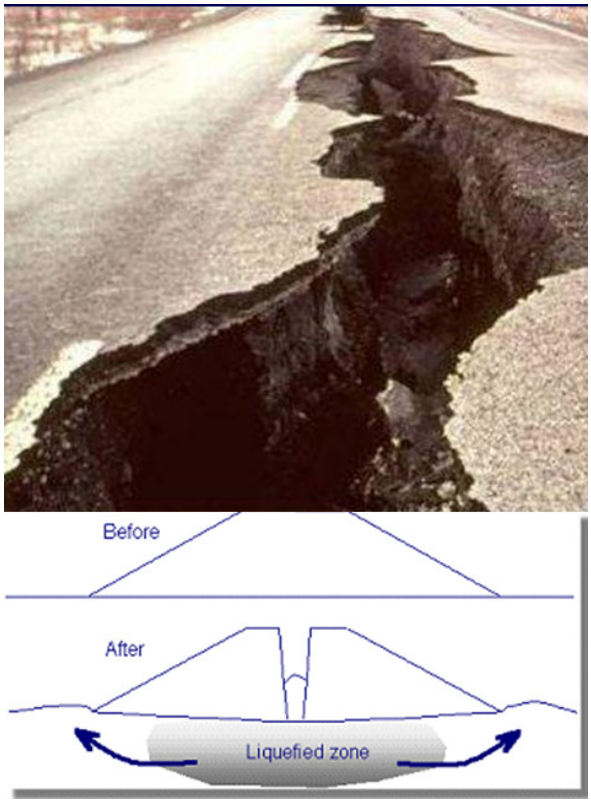


Figura x. Pérdida de la capacidad portante del suelo a causa de la licuación del terreno. Fuente: Johanson, Univ. Washington, 2000

Según publicación de la Universidad de Córdoba, los procesos de licuación hacen referencia de fenómenos de consecuencias diversas sobre las estructuras afectadas. La licuación propiamente dicha se vincula con "fallas catastróficas". Sin embargo, las movilidades cíclicas pueden implicar deformaciones permanentes que pongan en peligro la funcionalidad de las estructuras afectadas.

Dentro de los medios de caracterización de la potencialidad de licuación de distintos materiales, los métodos de evaluación de campo tienen las mayores aplicaciones.

Los ensayos de laboratorio se encuentran con el inconveniente de la reproducción adecuada de las condiciones in situ originales.

Figura x. Licuación del Suelo en un área de Venezuela (1985)

Fuente: UNI. SAN LUIS, 2001

De acuerdo con científicos de la Universidad de Córdoba, los reconocimiento del perfil del terreno a través de ensayos tipos SPT o CPT son los más recomendados a la hora de la caracterización de los materiales. En el caso de gravas se recomienda en el empleo de sistemas tipo BPT.

Figura x. Licuación del Suelo en Presa San Fernando,
Califonia (U.S.A). Fuente: Johanson, Univ. Washington, 2000

Los modelos de simulación de los procesos de licuación basan su desarrollo en la definición de las tendencias de crecimiento y disipación de las presiones de poros. Si bien existen importantes variedades de modelos, las formulaciones sencillas resultan de interés por su probada capacidad de aplicación. Con ello, se estudia los efectos de la licuación en el terreno tal como se ilustra en las figuras que siguen.

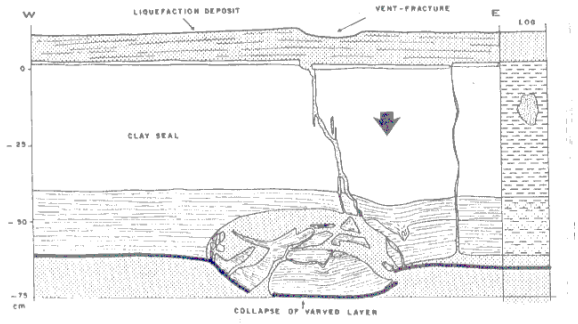


Fig. 12 : North wall of Pit N° 12. Void generation produced by the extrusion of liquefied sands induced the collapse of the bottom of varved layer.

(A la izquierda: esquema ilustrando el proceso de la licuación del suelo, Venezuela (1,989)
(A la derecha: volcancito de arena resultante de la licuación. Fuente: UNI. SAN LUIS, 2001)

Por otro lado, algunos de los estados tenso deformacionales existentes en el desarrollo de la licuefacción se clasifican en dos categoría:

- Licuefacción (propiamente dicho)

- El equilibrio estático es roto por la aplicación de acciones estáticas o dinámicas, en suelos con una reducida resistencia residual.
- Las acciones externas derivan en un proceso de crecimiento de las presiones de poros, sin posibilidad de disipación rápida en función del tiempo de carga.
- La resistencia residual es la existente en el suelo licuado.
- Acciones desencadenantes:

  Estáticas: construcciones o excavaciones.

  Dinámicas: sismos, explosiones, pilotajes, etc.
- Las fallas se asocian con grandes desplazamientos y acciones catastróficas.

- Movilidad cíclica

- Fenómeno ocasionado por fuerzas cíclicas que actúan en suelos bajo condiciones estáticas inferiores a la condición residual.

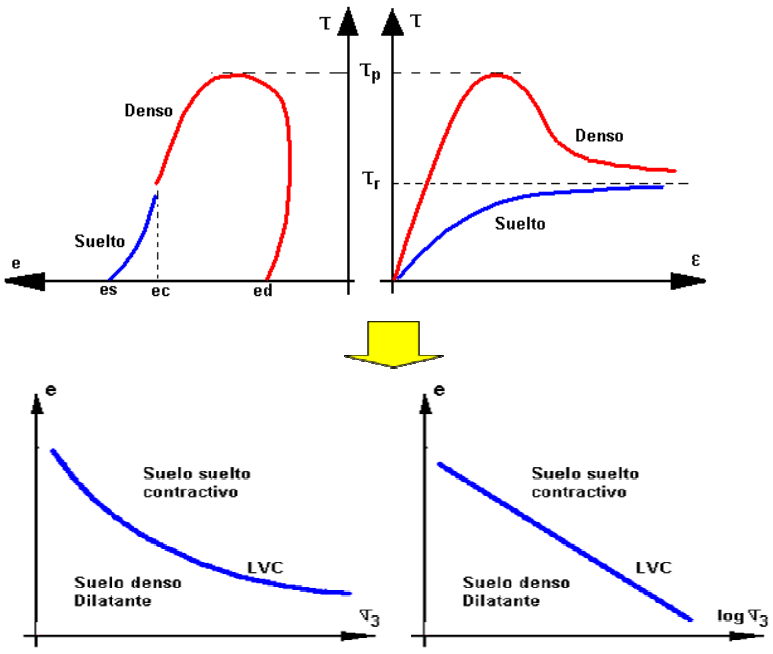
- Las deformaciones se desarrollan en forma incremental durante el período de acción de la solicitación dinámica.

De acuerdo con los especialista de la Universidad de Córdoba, algunos de los factores concurrentes en el desarrollo del estado tenso-deformacional en la licuación son:

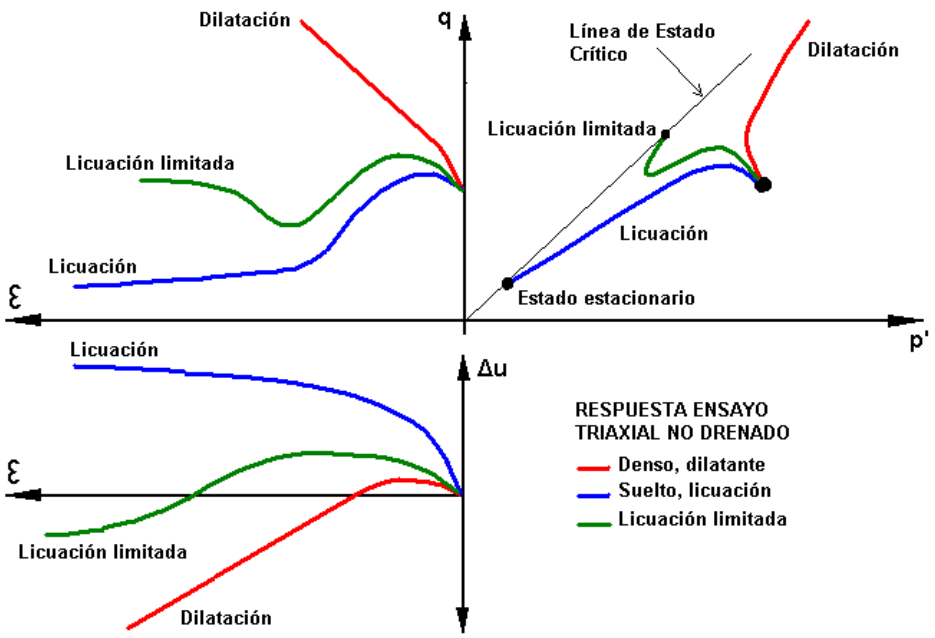
- Niveles de humedad, saturado o próximo a la saturación
- Permeabilidad reducida para evitar las disipaciones rápidas
- Resistencia movilizada especialmente por factores friccionales
- Confinamiento efectivo reducido en relación con las solicitaciones aplicadas

Las ilustraciones que siguen diversas fases (a hasta g) del comportamiento del suelo que culminan en la licuación de este, tal como fue antes referido :

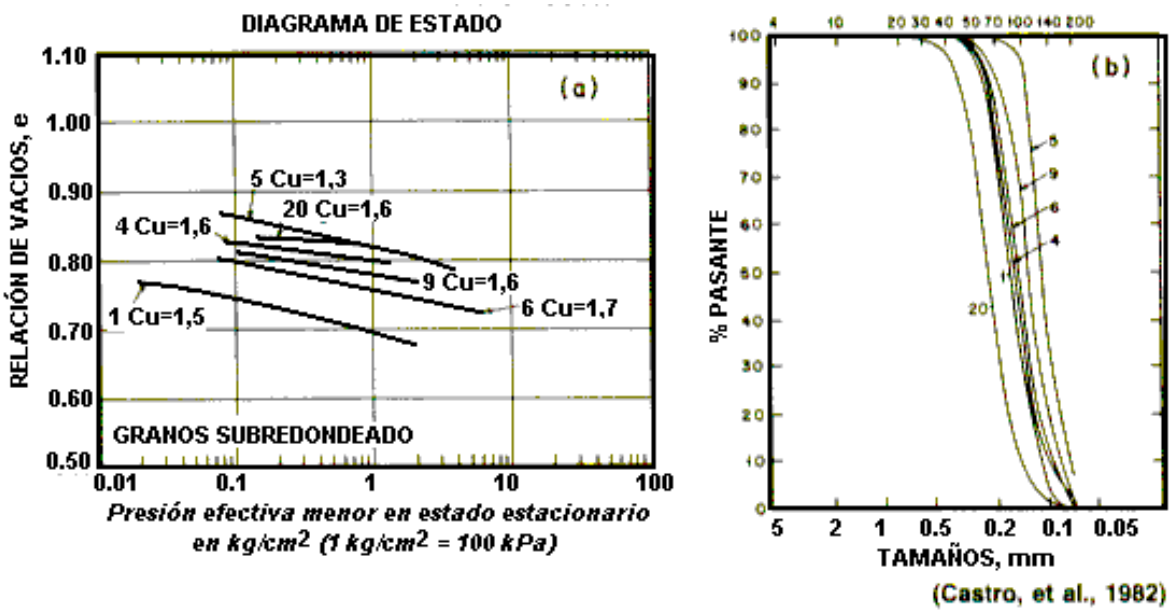
a) LINEAS DE ESTADO CRITICO (Suelos Drenados) Casagrande, 1936



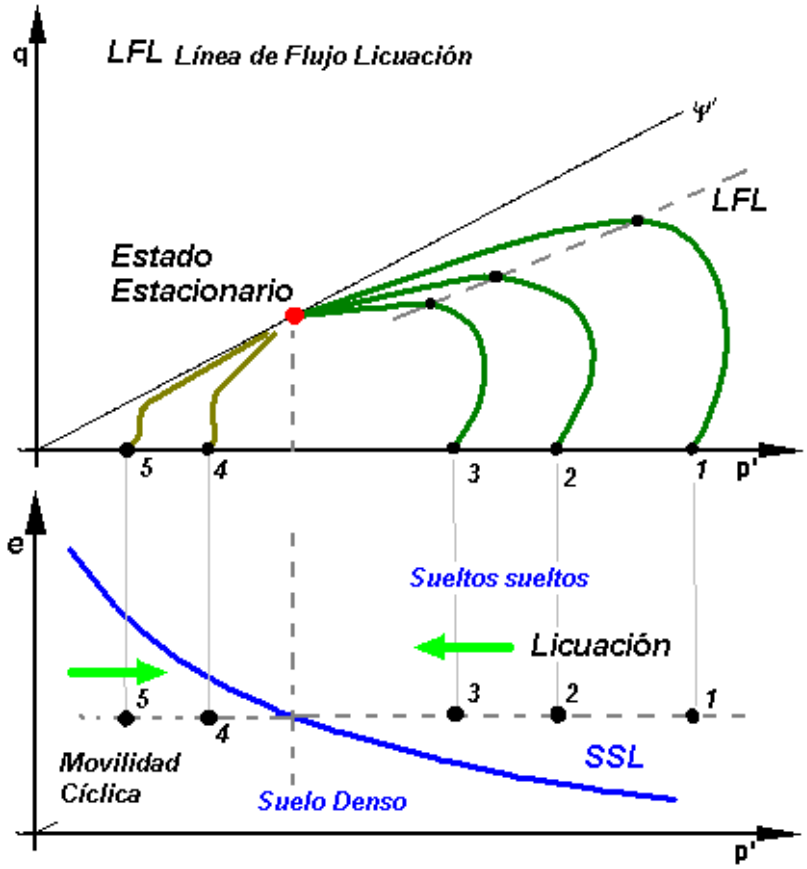
b) CAMINOS DE TENSION (Ensayo Triaxial No Drenado)



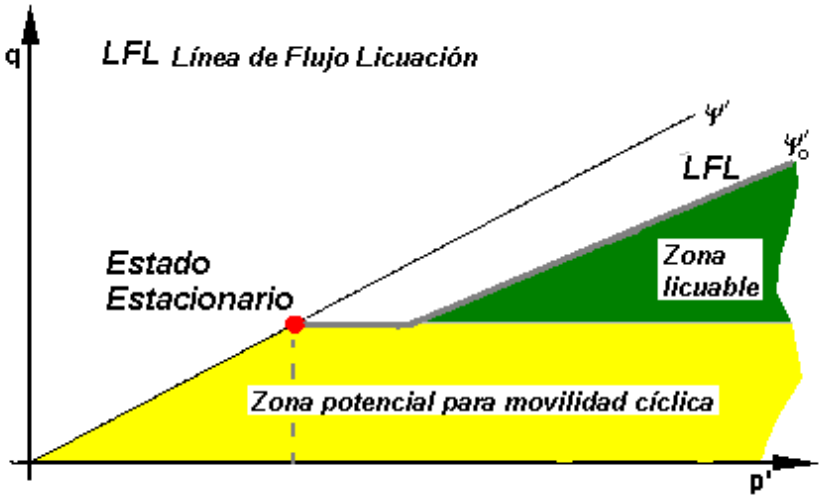
c) LINEAS DE ESTADOS ESTACIONARIOS (SSL) - D. Experimentales



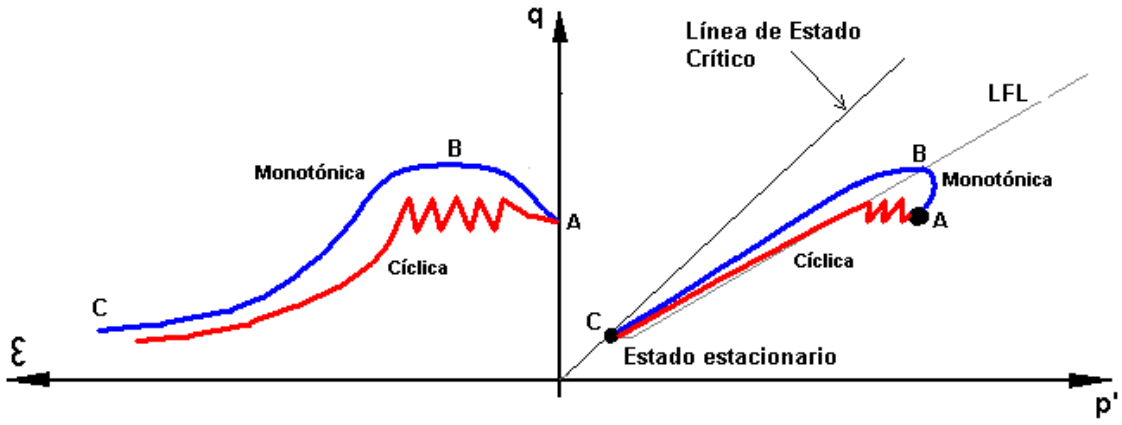
d) CAMINOS TENSIONES - LICUACION Y MOVILIDAD CÍCLICA



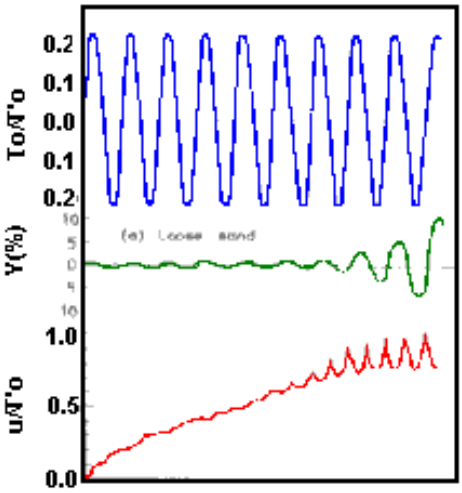
e)ZONIFICACION DE ESTADOS TENSIONES LICUACION Y MOVILIDAD CÍCLICA

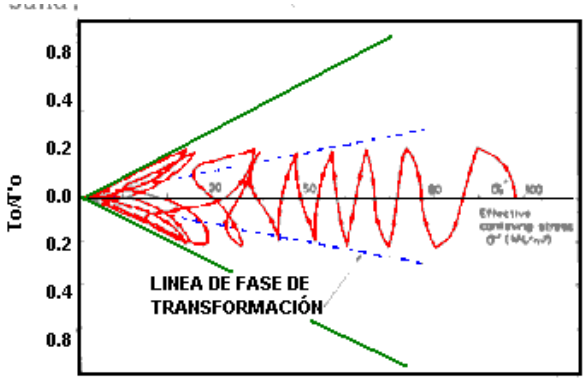


f)LICUACION BAJO CARGA MONOTÓNICA O CICLICA



g)**LICUACION BAJO CARGA CICLICA**





2.3.- Tipología de fallos del terreno vinculados con la licuación del suelo

Estudios científicos, definen la licuación como el aumento progresivo de la presión del agua intersticial, dentro de los suelos granulares, bajo la acción sísmica, de manera que el esfuerzo efectivo se reduce eventualmente a cero y el depósito se comporta como un líquido. Son fenómenos relacionados de movilidad cíclica y el corrimiento lateral; ocurre en suelos arenosos y en limos no plásticos y parcialmente saturados.

Según datos aportados por la Sismología, los suelos granulares tienen una tendencia natural a densificarse bajo carga, ya sea ésta monotónica cíclica. Cuando el suelo está saturado y el drenaje es lento o totalmente inexistente, esta tendencia a la densificación causa el crecimiento de la presión de poros, en exceso de su estado estático, y el decrecimiento correlativo del esfuerzo efectivo hasta que sobreviene la flotación de las partículas, lo que ha recibido el nombre genérico de licuación.

Los fenómenos hasta la fecha conocidos relacionados con la licuación son:

- Licuación de Flujo. Se define como un estado de movimiento catastrófico donde el esfuerzo cortante estático es superior a la resistencia correlativa del suelo en su condición licuada. Cuando sobreviene el movimiento sísmico, este actúa como un disparador y en adelante las grandes deformaciones generada son el producto del estado de esfuerzos estáticos.
- Movilidad cíclica. Ocurre cuando el estado de esfuerzos estáticos es inferior a la resistencia del suelo licuado; durante el movimiento sísmico el estado de esfuerzos aumenta en forma escalonada hasta que se alcanza la resistencia del suelo y sobreviene la falla.
- Casos especiales. Términos como licuación horizontal, corrimiento lateral y oscilación del terreno son caso especiales de la movilidad cíclica observados en la práctica más adelante descritos.

- Volcanes de Arena. Es un fenómeno que frecuentemente acompaña la ocurrencia de la licuación, durante el movimiento sísmico, o inmediatamente después, el exceso de presión de poros es disipados hacia arriba como la dirección más fácil y en puntos localizados, a lo largo de grietas, se producen erupciones de arenas en estado líquido que conforma pequeños volcanes.

De acuerdo con la opinión de los especialista, no todos los suelos son licuables. En consecuencia, es preciso conformar una lista de características del suelo mismo y de su circunstancia, que conducen a que la licuación sea posible. Estos son:

a) La edad geológica es determinante, suelos del Holoceno son más susceptibles que los del Pleistoceno y la licuación de depósitos anteriores es rara.

b) El depósito de suelo debe estar saturado, o poco menos, para que ocurra la licuación

c) Depósitos fluviales, coluviales, eólicos, cuando saturados, son susceptibles de licuación.

d) Asimismo pueden clasificarse como licuables los depósitos de abanicos aluviales, planicies aluviales, playas, terrazas, y estuarios.

e) Limos no plásticos también ofrecen cierta susceptibilidad la licuación.

f) Son más susceptibles las arenas finas, relativamente uniformes

g) Son menos susceptibles los depósitos bien gradados con tamaños hasta de gravas.

h) El contenidos de finos y su plasticidad son considerados Inhibitorios de la licuación

i) Suelos con partículas redondeadas, son más susceptibles que suelos con partículas angulares. Suelos con partículas micáceas, propios de suelos volcánicos, son más susceptibles.

j) Ingrediente fundamental para que se produzca la licuación es que el depósito sea angular y que se encuentre en estado suelto.

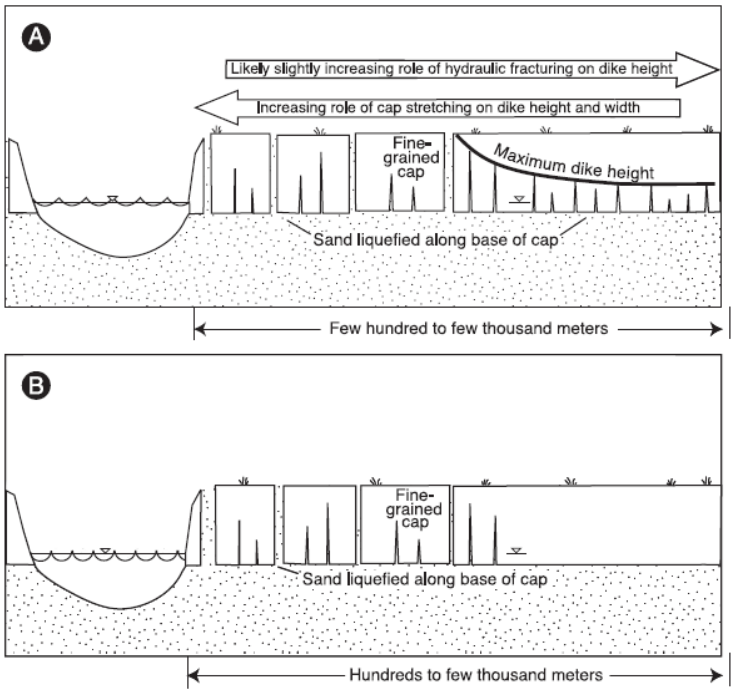
Por su parte, algunos expertos, opinan que hasta hoy día, existen varios tipos de desplazamientos asociados a la licuefacción:

- **Flujos de tierra**: Los materiales del suelo se desplazan rápidamente cuesta abajo en un estado licuado, a veces causando coladas de barro o avalanchas.

Foto 12. COLAPSO DE PRESA DE SAN FERNANDO POR FLUJO DE TIERRA DERIVADO DE LICUACIÓN DEL SUELO DURANTE TERREMOTO DE 1971.

- **Flujo lateral (Foto 13)**: Desplazamiento limitado de las capas superficiales del suelo a favor de pendientes suaves o hacia superficies libres, como márgenes del río. En este tipo de desplazamientos, a menudo ocurre que las capas subsuperficiales están revestidas de suelos superficiales adecuados, por ejemplo, asfaltos. Cuando estas capas más profundas se licuan, las capas superficiales del suelo a menudo se mueven lateralmente en bloques sólidos, tanto durante como después del seísmo, provocando una deformación permanente del suelo.

Foto 13. FLUJO LATERAL EN COSTA RICA. Fuente: D.B. Ballantyne



En la ilustración adjunta (gráficos, A y B) , se muestra en sección vertical el proceso de expansión lateral y fracturación

hidraúlica que resultan en diques de dimensiones diversas cuando se trata de licuefacción de suelos severa.

- **Flotación (Foto 14)**: Objetos enterrados menos pesados que el suelo licuado desplazado, como tanques, buzones o tuberías de gravedad, ascienden a través del suelo y flotan en la superficie.

Foto 14. BUZÓN FLOTANTE POR LA LICUACIÓN EN NIIGATA, JAPÓN (1964). Fuente: D.B. Ballantyne

- **Pérdida de resistencia de soporte.** Reducción de la capacidad de soporte de los cimientos (**Foto 15**) debido al debilitamiento del material del suelo subyacente o adyacente que puede hacer que las estructuras se hundan.

Foto 15. COLAPSO DE EDIFICIOS POR LICUACIÓN DEL SUELO EN DAGUPAN, FILIPINAS. Fuente: D.B. Ballantyne

Algunos autores, delinean 3 formas de fallos o desplazamientos laterales permanentes del terreno ocasionado por la licuación de los suelos. Estos se sintetizan en la **Figura 6.**

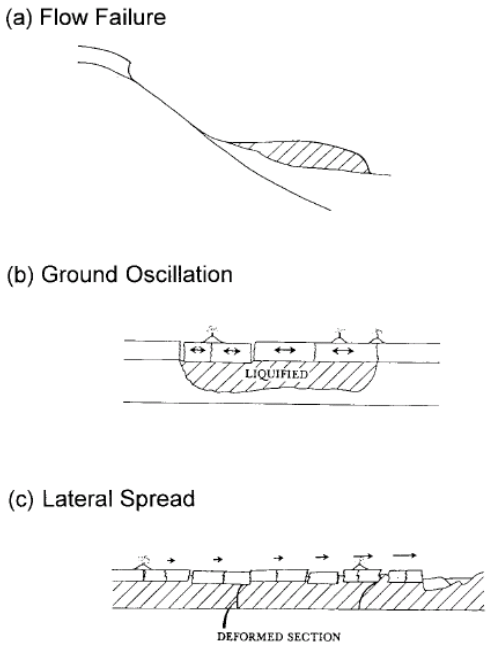


Figura 6. TIPOLOGÍA DE MOVIMIENTOS DEL TERRENO DURANTE EL PROCESO DE LICUEFACCIÓN: (a) FLUJO POR ROTURA; (b) OSCILACIÓN DEL TERRENO; Y (c) EXPANSIÓN LATERAL

A su vez, alguna literatura electrónica (http://www.scribd.com/doc/2567670/licuacion-de-suelos-y-resistencia-ciclica-ing), considera que para fines de ingeniería, la ocurrencia de la licuación no es el factor de primera importancia, sino la severidad o la capacidad destructiva de ésta. Los efectos destructivos de la licuación toman muchas formas, entre otras: falla de flujo, corrimiento lateral, oscilación del terreno, pérdida de capacidad portante, asentamientos, e incrementos en las presiones laterales sobre muros de contención.

- **Falla de Flujo**

La falla de flujo es el tipo de falla más catastrófico causado por la licuación pues comúnmente desplaza decenas de metros grandes masas del terreno. En unos pocos casos las grandes masas de suelo han viajado decenas de kilómetros, a través de largos taludes, a velocidades por encima de los diez kilómetros por hora. Los flujos pueden estar compuestos de suelo completamente licuado o por bloques intactos de material flotando sobre la capa de suelos licuados. Los flujos se presentan en arenas y limos sueltos y

saturados, en taludes relativamente empinados con pendientes superiores a los 3 grados (**Figura 7**).

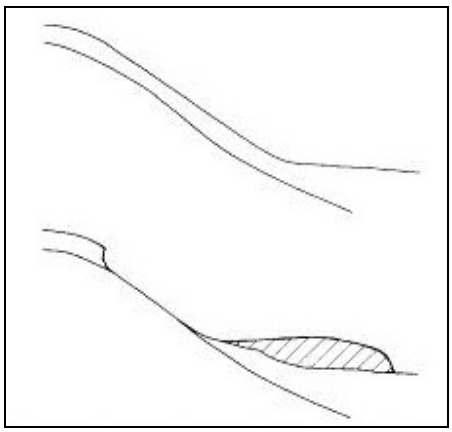


Figura 7. Falla de flujo causada por licuación

- **Corrimiento Lateral**

El corrimiento lateral (**Figura 6**) involucra el desplazamiento de grandes bloques de suelo como resultado de la licuación. El desplazamiento ocurre en respuesta a la combinación de las fuerzas de la gravedad y las inerciales generadas por el sismo. Los corrimientos laterales se presentan por lo general en pendientes suaves (comúnmente menores a los 3 grados) y se incrementan en las cercanías a un canal o un río.

La magnitud de los desplazamientos horizontales generalmente varía en el orden de los metros.

Las capas de suelos desplazados en general presentan fisuras, fracturas, escarpes y hundimientos de bloques (graben). Los desplazamientos laterales generalmente afectan las fundaciones de edificios, puentes y líneas vitales.

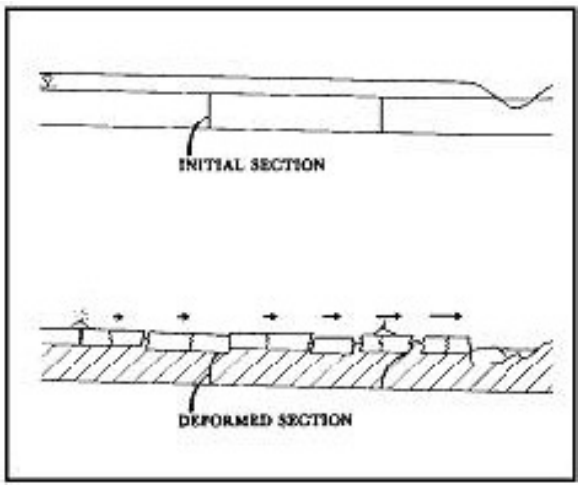


Figura 8. Corrimiento lateral debido a licuación

Carmona Cevallos, J.V. et. al. (2,002), dicen que la licuación es un fenómeno en el cual una masa de suelo pierde un porcentaje considerable de su resistencia al esfuerzo cortante como resultado de cargas cíclicas o monotónicas. Esto provoca un movimiento aleatorio de las partículas del suelo, chocándose una con otras perdiendo fricción por el aumento de la presión de poros anulando las superficies de contacto y produciendo densificación en la que se tiende a comprimir el agua que ocupa los espacios entre las partículas sólidas. Éste fenómeno es producido generalmente por cargas sísmicas, ocasionando un aumento en la presión de poros y reduciendo los esfuerzos efectivos.

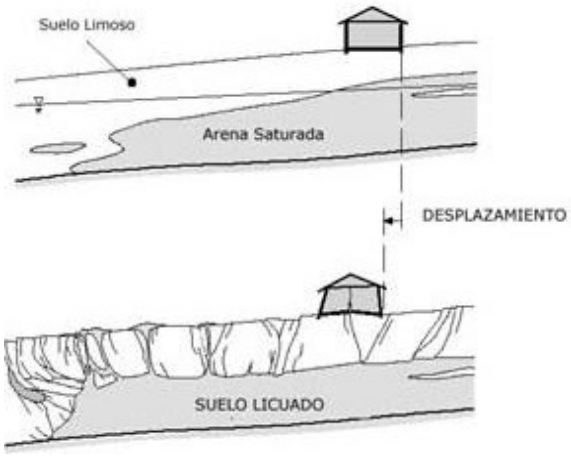
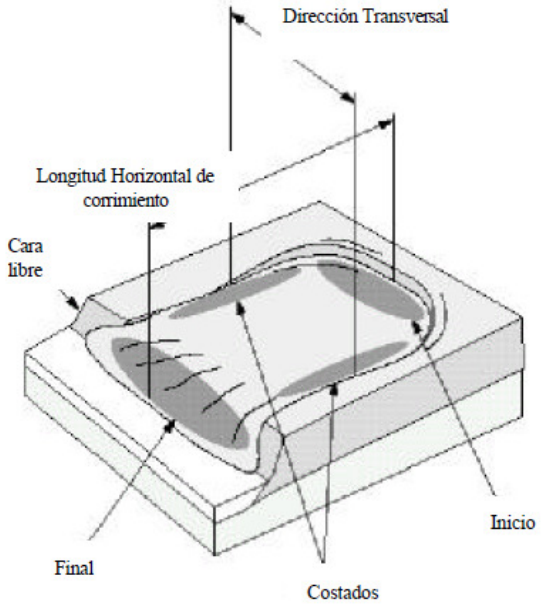


Figura 1. Corrimiento lateral.

Fuente: **Carmona Cevallos, J.V. et. al.** (2,002),



Según Carmona Cevallos, J.V. et. al. (2,002), la magnitud del sismo es un parámetro que hace variar los corrimientos de una manera significativa y es un parámetro muy influyente en las ecuaciones del corrimiento. A su vez, la fuente, opina que el parámetro longitud horizontal de corrimiento junto con la magnitud del sismo son los que más afectan el corrimiento dando rangos bastante significativos de un valor a otro.

Figura No x. Nomenclatura asociada con el fenómeno de corrimiento lateral. Fuente **Carmona Cevallos, J.V. et. al. (2,002).**

- **Oscilaciones del Terreno**

Donde el terreno es plano o la pendiente demasiado suave para permitir corrimientos laterales, la licuación de estratos subyacentes puede causar oscilaciones que no dependen de las capas superficiales, la cual se manifiesta hacia los lados, arriba y abajo en la forma de ondas de terreno. En general, dichas oscilaciones son acompañadas por la apertura y cerramiento de fisuras en el suelo, y la fractura de estructuras rígidas como los pavimentos y tuberías (**Figura 9**)

Las manifestaciones de oscilaciones del terreno han sido evidentes en muchos sismos. En el de Loma Prieta-USA (1989), en el Distrito Marina en San Francisco en extensas áreas se presentaron roturas en las tuberías, pavimentos y aceras peatonales debido a las oscilaciones del terreno.

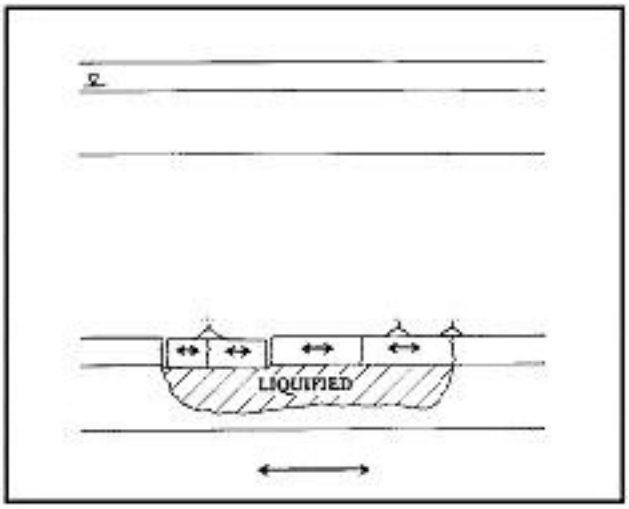


Figura 9. Oscilación horizontal del terreno causada por licuación

- **Pérdida de la Resistencia del Suelo de Soporte**

Cuando el suelo que soporta un edificio u otra estructura se licua y pierde su resistencia, se pueden presentar grandes deformaciones en su interior, las cuales hacen que las estructuras superficiales se asienten y se inclinen. Las fallas más espectaculares que se conocen por éste fenómeno ocurrieron en el sismo de Niigata-Japón (1964), cuando algunos de los edificios de 4 pisos del Condominio Kawangishicho se giraron hasta unos 60º. Por el contrario los tanques enterrados y pilotes pueden flotar en el suelo licuado (**Figura 8**).

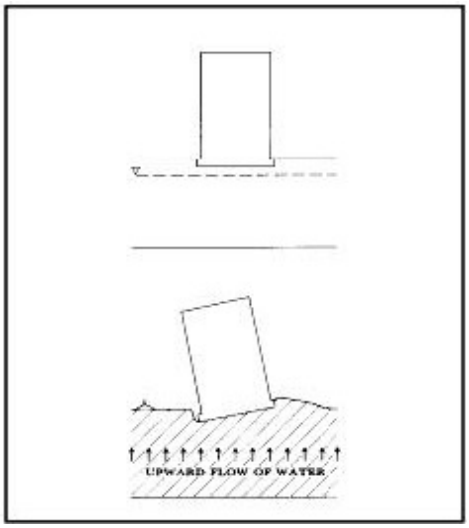


Figura 10. Pérdida de la resistencia del suelo de soporte por licuación

- **Asentamientos**

En muchos casos el peso de la estructura puede ser insuficientemente para causar los grandes asentamientos asociados con las perdidas de capacidad portante descritas anteriormente. Sin embargo, pueden ocurrir pequeños asentamientos cuando la presión de poros se disipa y el suelo se consolida después de un sismo. Estos asentamientos pueden causar daños aunque menores a los producidos por fallas de flujo, corrimientos laterales o pérdidas de capacidad portante. La erupción de volcanes de arena, o mezclas de sedimentos que emanan a partir de las capas licuadas, son una manifestación de la licuación que puede conducir también a asentamientos diferenciales localizados.

- **Incrementos de la Presión Lateral sobre Muros de Contención**

Si el suelo de relleno de un muro de retención se licua, las presiones laterales sobre dicho muro se pueden incrementar enormemente. Como un resultado de esto, el muro puede desplazarse en el sentido lateral, cabecear o fallar estructuralmente como se ha observado en un gran número de rompeolas e islas artificiales durante varios sismos.

Denys Parra Murrugarra en su publicación sobre **Licuación de Suelos y Resistencia Cíclica** en la Universidad de Ingeniería, comparte las consideraciones de Young (1972), quién propone tres tipos de falla del terreno asociados al fenómeno de licuación de suelos:

- **Desplazamiento Lateral**

Es el tipo más común de falla del terreno por licuación de suelos. Este tipo de falla involucra el movimiento lateral de las capas superficiales como resultado de la licuación y la pérdida transitoria de la resistencia de las capas inferiores. El desplazamiento lateral ocurre generalmente en terrenos relativamente llanos (con pendientes comprendidas entre el 0.5 y 5%). En condiciones normales el desplazamiento lateral tiene un rango de pocos metros, y en condiciones anormales pueden ocurrir desplazamientos laterales de varias decenas de metros acompañados de grietas en el terreno y desplazamientos diferenciales verticales. Los desplazamientos laterales muy a menudo distorsionan las cimentaciones de edificios, dañan las tuberías de desagües y otras estructuras a lo largo de la zona afectada. El daño ocasionado por este tipo de falla no es siempre espectacular y raras veces catastrófico, sin embargo es muy destructor. En el terremoto de Alaska de 1964 se dañaron

266 puentes hasta el punto de requerir reemplazo o grandes trabajos de reparación. Este tipo de falla es particularmente destructiva para las tuberías. Por ejemplo, casi todas las roturas de tuberías en la ciudad de San Francisco durante el terremoto de 1906 ocurrieron en áreas de desplazamiento lateral; cuando surgieron incendios en la ciudad, no se pudo contar con agua de las tuberías para extinguir el fuego. Existen técnicas de estabilización contra fallas de desplazamiento lateral, pero son relativamente caras y sólo únicamente justificables en lugares críticos. Las técnicas de estabilización incluyen la remoción, compactación, inyección, drenaje o la utilización de contrafuertes.

- **Falla de Flujo**

Son las fallas del terreno más catastróficas causadas por el fenómeno de licuación. Los flujos pueden movilizarse a grandes distancias (decenas de metros) a altas velocidades (decenas de Km/h). Los flujos pueden involucrar suelo completamente licuado o bloques de suelo firme viajando sobre una capa de suelo licuado. Este tipo de falla se desarrolla generalmente en arenas saturadas, sueltas, con pendiente del terreno mayor que 5%. Muchas de las mayores y más dañinas fallas de flujo se han desarrollado bajo agua en áreas costeras. Por ejemplo las fallas de flujo submarinas que afectaron grandes secciones de los puertos de Seaward, Whittier y Valdez en Alaska. Estas fallas adicionalmente generaron grandes olas que causaron daños adicionales y pérdidas de vidas. La falla en Valdez durante el terremoto de Alaska de 1964, involucró 75 millones de metros cúbicos de sedimentos deltaicos y ocasionó la destrucción del puerto. Esta falla ocasionó desplazamientos laterales de 5 metros en la población detrás del puerto, ocasionando daños adicionales. No se han desarrollado medidas prácticas para estabilizar fallas de flujo similares a las presentadas. En el caso de Valdez, se trasladó a la población 6 Km al noroeste, en un terreno más estable. En tierra firme, las fallas de flujo han sido más catastróficas aunque menos frecuentes que los flujos submarinos. Durante el terremoto de Kansu, China de 1920 se produjeron varias fallas de flujo cuyo tamaño fue de hasta 1.6 Km

de largo y ancho. Se cree que la presión del aire, en vez de la presión de poros generó dichas fallas. No existen técnicas prácticas para prevenir este tipo de falla.

Las fallas de flujo pequeñas durante los terremotos son comunes en terrenos montañosos húmedos y arenosos. Por ejemplo, en los depósitos de arena eólica de San Francisco en el terremoto de 1906 y en los depósitos volcánicos de Tokachioki, Japón y Chile.

Otro de los efectos de falla por flujo por licuación inducida por sismo, han sido los evidenciados en depósitos y presa de relaves antiguas, construidas por el método de aguas arriba, algunas de ellas con consecuencias catastróficas para los recursos humanos y económicos y para el medio ambiente. Este tipo de fallas han sido muy comunes en décadas pasadas obligando a mejorar las técnicas de construcción de presas de relaves en áreas de alta actividad sísmica.

- **Pérdida de la Capacidad Portante**

Cuando el suelo que soporta una edificación licua y pierde su resistencia, pueden ocurrir grandes deformaciones en el suelo, que ocasionan que la edificación se asiente, se incline o sumerja. Aunque esta es una falla espectacular, es la menos común producida por licuación.

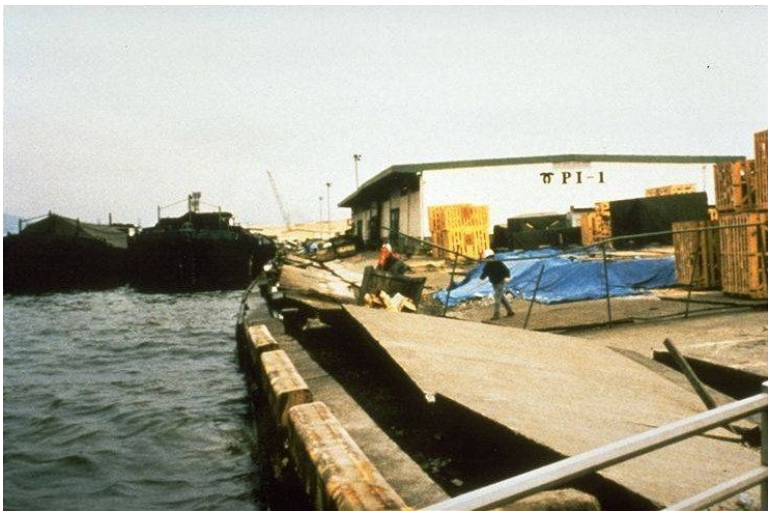
Quizás la falla por pérdida de capacidad portante más publicitada ha sido la de los edificios Kawagishi-cho durante el terremoto de Niigata, Japón en 1964. Estos edificios rotaron hasta 60° y se hundieron en la arena licuada. El subsuelo en dicha zona consiste de 15 m de arena suelta (N<20goles/pie) suprayaciendo arenas más densas. El nivel freático estaba a 1 metro por debajo de la superficie. Aparentemente la licuación inicialmente se desarrolló en las partes media e inferior del depósito de arena suelta, después se propagó hacia la superficie debilitando el suelo de cimentación. El daño estructural de las edificaciones no fue grave.

Algunos especialista, opinan que la licuefacción se produce en suelos saturados, cuyos efectos son observados en zonas cercanas a cuerpos de agua tales como ríos, lagos, bahías, y los océanos. Los efectos de la licuefacción incluyen deslizamientos de tierra tipo Slumping hacia cuerpos de agua. Por ejemplo, el caso del Lago Merced **(Foto 16)** en el año 1957, y las orillas del Río Motagua durante el terremoto de 1976 en Guatemala.

Foto 16. AMBIENTE FÍSICO EN LAGO MERCED
TRAS OCURRENCIA DE LA LICUACIÓN DEL SUELO

Por otro lado, múltiples obras portuarias como puertos y muelles están situados en zonas susceptibles a la licuefacción del terreno, siendo dañados tras la ocurrencia de sismos. Muchos de estas infraestructuras civiles tienen importantes estructura de retención permitiendo el estacionamiento de buques próximo a zonas de manipulación de carga. (**Foto 17)**

Foto 17 EXPANSIÓN LATERAL DE CIMIENTOS EN MURO DEL MUELLE PORT LAND EN KOBE (JAPÓN), 1995



No obstante, cuando el suelo en los cimientos de muros de puertos o muelles son afectados por la licuefacción, estos se pueden ser desplazados o inclinarse hacia el agua, tal como se ilustra en la **Foto 18**

Foto 18. DAÑOS FÍSICOS DE LAS INSTALACIONES PORTUARIAS EN CIUDAD DE HYOGO-KEN NANBU, KOBE (JAPÓN), 1995

Por último, el Centro Mundial de Datos de Sismología, de Denver, dependencia especializada del Centro Nacional de Información sobre Terremotos del Servicio Geológico de EE.UU. (siglas en inglés USGS), informa de la ocurrencia de un terremoto de magnitud 7,3 grados Ritcher en Honduras el día Jueves 28 de mayo de 2,009 a las 08:24:05 UTC.

Según la fuente, este evento ocurrió a 130km al NNE de la Ceiba, Honduras y 320km NNE de Tegucigalpa, Honduras a las 2:24 AM MDT del 28 de Mayo de 2009 (3:24 AM EST en Honduras).

Se reporta por el USGS en su sitio web (http://neic.usgs.gov/neis/eq_depot/2009/eq_090528_heak/neic_heak_nr.html), al menos 6 muertos 6 muertos, 40 heridos y más de 130 edificios dañados o destruidos en el norte de Honduras. El colapso de un gran puente en El Progreso fue destruido. Al menos 5 edificios destruidos y 25 dañados en Belice. Este evento fue sentido en la mayor parte de Belice, El Salvador, Guatemala y Honduras. A igual que en las Islas Caimán y en partes de Colombia, Costa Rica, Cuba, Jamaica, México, Nicaragua y Panamá. Olas marinas se notificaron en La Ceiba y Roatán, y ***posibles grietas de licuefacción*** se observó en el Río Monkey, Belice.

Foto No x. Pérdida de resistencia mecánica de suelo debido a la licuefacción. Terremoto 7,1º Ritcher del 28 de mayo 2,009 en puente el Progreso en Honduras

Fuente: http://www.youtube.com/watch?v=XUMS6-1sgNo&feature=related

En la Ilustración que sigue (**Tabla No x**), se presentan información relativa a la intensidad y profundidad del evento, posición espacial y temporal, ubicación geográfica y cartográfica, entre otros, del sismo ocurrido el pasado 28 de mayo de 2,009 en Honduras.

Tabla No x. Reporte Sismológico de la USGS del terremoto del 28 de mayo de 2,009 en Honduras, causante de licuación de suelos en Río Monkey de Belize.

Magnitud 7.3 FRENTE DE LA COSTA DE HONDURAS

jueves, 28 de mayo 2009 a las 08:24:45 UTC

Preliminary Earthquake Report

Magnitud	**7.3**
Fecha-Hora	**jueves, 28 de mayo 2009 a las 08:24:45 (UTC)** - Tiempo Universal Coordinado jueves, 28 de mayo 2009 a las 02:24:45 AM hora local al epicentro Hora del Terremoto en otras zonas de horario
Localización	16.73N 86.21W
Profundidad	10.0 kilómetros
Región	FRENTE DE LA COSTA DE HONDURAS
Referencia	125 km (75 miles) NNE of **La Ceiba, Honduras** 220 km (135 miles) N of **Juticalpa, Honduras** 315 km (195 miles) NNE of **TEGUCIGALPA, Honduras** 1185 km (730 miles) SSW of **Miami, Florida**
Calidad de la Localización	Estimado de error: horizontal +/- 4.0 km; profundidad fijada por programa de localizacion
Parámetros de calidad de localización	Nst=300, Nph=300, Dmin=316.7 km, Rmss=1.15 seg, Erho=4.0 km, Erzz=0 km, Gp=37.9 grados
Fuente de información	USGS NEIC (WDCS-D)
Comentarios	At least 6 people killed, 40 injured and more than 130 buildings damaged or destroyed in northern Honduras. The central span of a major bridge at El Progreso was destroyed. At least 5 buildings destroyed and 25 damaged in Belize. Felt in much of Belize, El Salvador, Guatemala and Honduras. Also felt in the Cayman Islands and in parts of Colombia, Costa Rica, Cuba, Jamaica, Mexico, Nicaragua and Panama. Seiches were reported in swimming pools at La Ceiba and Roatan and ground cracks and possible liquefaction was observed at Monkey River, Belize.
Event ID	usheak

Fuente de datos: http://neic.usgs.gov/neis/eq_depot/2009/eq_090528_heak/neic_heak_esp.html

2.4.- Factores que influyen directamente en la licuación del suelo

Algunas literaturas electrónicas especializadas que aborda este problema geotécnico (http://www2.uah.es/difusion_cientifica/cienciastierra/ct3.htm), explican que los factores que aumentan la probabilidad de que el terreno se comporte como un líquido son diversos:

- **Distribución del tamaño de los granos**: La arena de tamaños de grano uniforme, con granos poco finos o muy gruesos tiene mayor probabilidad de licuarse y es posible que se vuelva más densa. Las arenas con gran porcentaje en limos y gravas también son susceptibles a la licuefacción bajo fuertes temblores cíclicos.

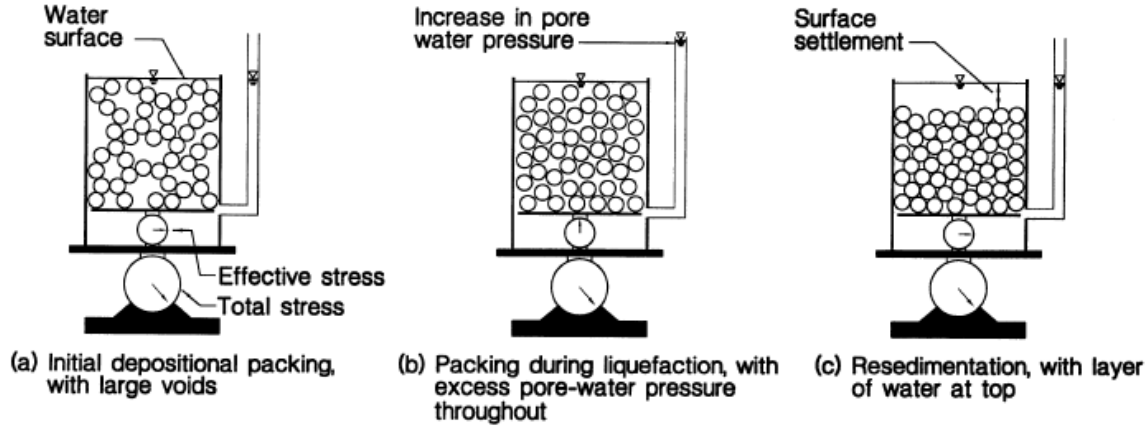


Figura x. Ilustración de los cambios en el empaquetamiento de los granos del sedimento a causa de la licuefacción.

- **Profundidad de las aguas subterráneas**: Se puede producir la licuefacción si existe agua subterránea en el punto del suelo donde se está produciendo la densificación. Mientras menor sea la profundidad, menor será el peso del recubrimiento del suelo y el peligro de densificación. Por tanto, mientras menor sea el nivel de las aguas subterráneas, mayor será la probabilidad de que ocurra licuefacción.

- **Densidad**: La licuefacción ocurre principalmente en suelos sueltos, saturados y no compactados. Ese suelo puede densificarse cuando está sujeto a un movimiento

cíclico. Al densificarse, se reduce el volumen de suelo y agua y se incrementa la presión intersticial si los poros intergranulares se llenan de agua. Cuando la presión intersticial se vuelve igual a la tensión media total, el suelo pierde su resistencia y se licua. Si el suelo es compacto, habrá menos posibilidad de que se produzca la licuefacción.

- **Peso del recubrimiento y profundidad del suelo**: Las tensiones entre partículas aumentan a medida que se incrementa la presión del recubrimiento. Mientras mayor sea la tensión entre las partículas, menor será la probabilidad de que ocurra la licuefacción. Por lo general, la licuefacción ocurre a profundidades menores de 9 metros; rara vez ocurre a profundidades mayores de 15 metros.

- **Amplitud y duración de la vibración del terreno**: La capacidad del suelo para resistir una vibración provocada por un seísmo sin causar fallas depende de la intensidad del movimiento del terreno, incluida tanto su amplitud como su duración. Los movimientos más fuertes tienen mayor probabilidad de causar fallas. La licuefacción de suelos bajo condiciones de tensión provocadas por un terremoto puede ocurrir ya sea cerca del epicentro de terremotos pequeños o moderados, o a cierta distancia de terremotos moderados a severos.

- **Edad del depósito**: Los suelos no cohesivos por lo general son jóvenes. Con el tiempo, actúan dos factores para incrementar la resistencia de un suelo típico: la compactación, que cambia la relación de los huecos entre los granos y varios procesos químicos, que actúan para cementar los granos del suelo, mediante reacciones químicas. Una regla general es que los depósitos anteriores al Pleistoceno tardío (más de 500.000 años de antigüedad) tienen poca probabilidad de licuarse, mientras que los depósitos del Holoceno tardío (menos de 3.000 años de antigüedad) tienen mayor probabilidad de licuarse.

- **Origen del suelo.** El suelo depositado por procesos fluviales se sedimenta fácilmente y sus granos tienen poca probabilidad de compactarse. De manera

similar, los rellenos artificiales no compactados, generalmente por debajo del nivel del agua, pueden tener deficiencias similares. Una práctica común de décadas pasadas era la colocación de los rellenos hidráulicamente. Todos ellos se licuarán con facilidad. Por otro lado, los sedimentos depositados glacialmente, particularmente aquellos sobre los cuales ha pasado un glaciar, generalmente ya son bastante densos y tienen menor probabilidad de licuarse.

Por su parte, El Programa Nacional de Difusión y Divulgación de Ciencia y Tecnología (2000-2003) en su publicación "*Un Recorrido por las Ciencias de la Vida y las Ciencias de la Tierra*", consideran conveniente presentar algunas medidas para mitigar la licuefacción. Entre estas tenemos:

- Evitar áreas donde pueda ocurrir la licuefacción y el flujo lateral.
- Estabilizar el material licuable.
- Colocar los cimientos por debajo del material licuable.
- Agregar peso a la estructura para lograr una flotabilidad neutral
- Usar material flexible al movimiento.
- Aceptar el daño.

Por su parte, **Henríquez, C. (2007),** considera que los factores más importantes, basados principalmente en evidencia experimental de laboratorio, pueden agruparse en las tres categorías que se presentan a continuación:

- Propiedades índice y de estado de los suelos.
- Condiciones iniciales de esfuerzo y de deformación.
- Características de la solicitación.

Algunos de estos factores, son difíciles de controlar, de manera precisa, en los ensayos de laboratorio e imposible de evaluar fidedignamente en el campo.

- Propiedades índice y de estado de los suelos

En esta categoría se ubican características geotécnicas tales como:

a) Tipo de suelo

Henríquez (2007), opina que los suelos uniformemente graduados son más susceptibles de licuarse que los bien graduados. **Expresó**, que dentro de los primeros, las arenas finas se licuan más fácilmente que las gravas o suelos arcillosos aluviales. En suelos bien graduados, al reacomodarse las partículas más pequeñas (llenando los huecos dejados por las partículas más grandes) bajo condiciones drenadas, se produce un menor cambio de volumen, y por ende, un menor incremento en la presión intersticial bajo condiciones no drenadas. Evidencias en sismos recientes revelan que en la mayoría de casos de licuación han estado involucrados suelos uniformemente graduados.

Aseveró, que la forma de las partículas del suelo también puede ser un factor de influencia. Suelos con partículas de forma redondeadas tienden a densificarse más fácil que los con partículas de forma angulosa. Las partículas de forma redondeadas frecuentemente tienen origen fluvial o aluvial, en donde es común encontrar depósitos de suelos flojos saturados, siendo usualmente la susceptibilidad a la licuación alta

La **Figura 5**, establece los límites en las curvas granulométricas que definen fronteras que separan los suelos licuables de los no licuables.

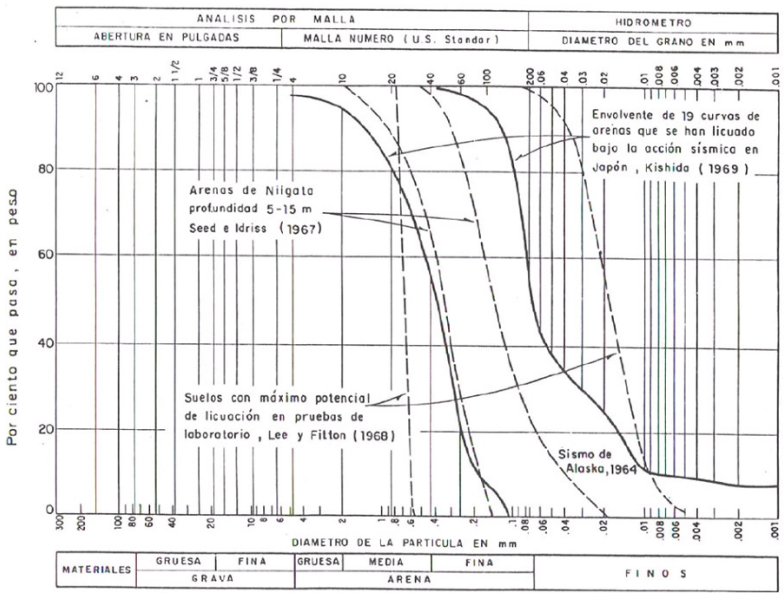


Figura 11.
GRANULOMETRÍA DE ALGUNOS SUELOS QUE HAN LICUADO

De la Ilustración (**Figura 11**), se revela que la influencia del contenido de finos en la disminución de la tendencia del suelo a densificarse es condicionada por el tamaño de las partículas, definiendo así la ocurrencia o no de la licuación. **Susana (2008)**, sugiere las curvas de gradación que ilustra en la **Figura 12**, en donde se compara el comportamiento de las arenas en suelos licuables en Japón.

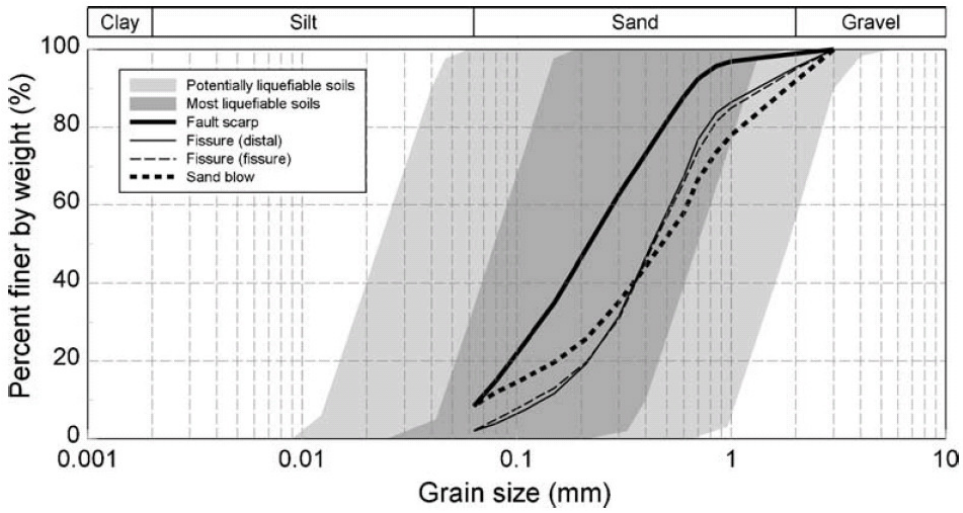


Figura 12. VARIACIÓN DEL TAMAÑO DE GRANO CON PORCENTAJE DE FINO PARA SUELOS LICUABLES EN JAPÓN. **Fuente: Susana (2008)**

b)- Compacidad relativa (Cr) - relación de vacíos (e) (**Véase Figura 7**)

Según **Henríquez (2007),** una arena suelta es más susceptible de licuarse que una arena densa (Figura xxx). Este autor, dice que en sismos previos, se han licuado suelos cuya compacidad relativa o densidad relativa (Cr) era del orden del 50 por ciento o menor (indicativa de alta susceptibilidad a cambios de volumen), no siendo así, en arenas con una Cr del orden del 70 por ciento o mayor, en que no se produjo este fenómeno.

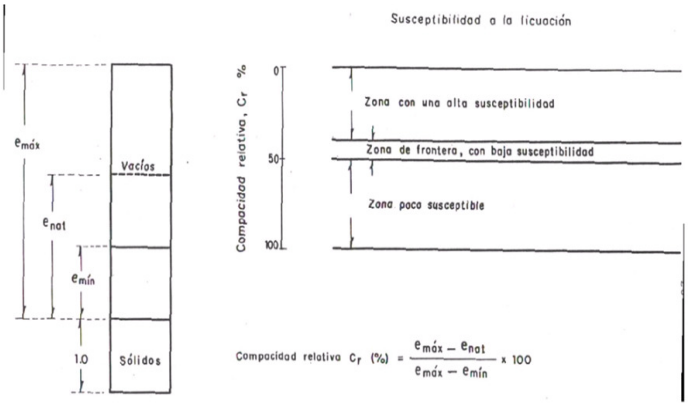


Figura 13. CONCEPTO DE COMPACIDAD RELATIVA

De acuerdo con información de campo tomada del terremoto de Niigata (1964) por Keshida (1969) reunida en el estudio "*Mejora de terrenos potencialmente licuables con inyecciones de compactación",* de **Henríquez (2007),** se concluyó que suelos con densidades relativas mayores al 75% no licuarán. Sin embargo, puede ocurrir movilidad cíclica (pérdida temporal de la resistencia), inclusive en suelos con una densidad relativa de hasta el 100%.

c)- Estructura

Algunos especialistas (Henríquez, 2007; Ladd, 1976 y 1977; Mulilis y otros, 1975 y 1977)**,** consideran que el método de preparación de la muestra (y en consecuencia la estructura), puede influenciar el valor de la relación de esfuerzos cíclicos ($\sigma dc/2\sigma c$) que provoca la licuación hasta en un 200 %

- Condiciones iniciales de esfuerzo y de deformación

Corresponden a las características de la historia previa de esfuerzos o de deformaciones que soportada por el suelo. Entre estos tenemos:

a)- Esfuerzo confinante inicial

Henríquez, 2007, asegura que la licuación disminuye al aumentar el esfuerzo o presión confinante, tal y como se ilustra en la **Figura 8**, siendo corroborados con ensayos de laboratorio y evidencias de campo, que sugieren que difícilmente se presenta el fenómeno de licuación a profundidades superiores a 20 metros. Este planteamiento es compartido por varios estudiosos de la materia como Seed y Peacock, 1971; Seed y Lee, 1966; y Peacock y Seed, 1968, entre otros.

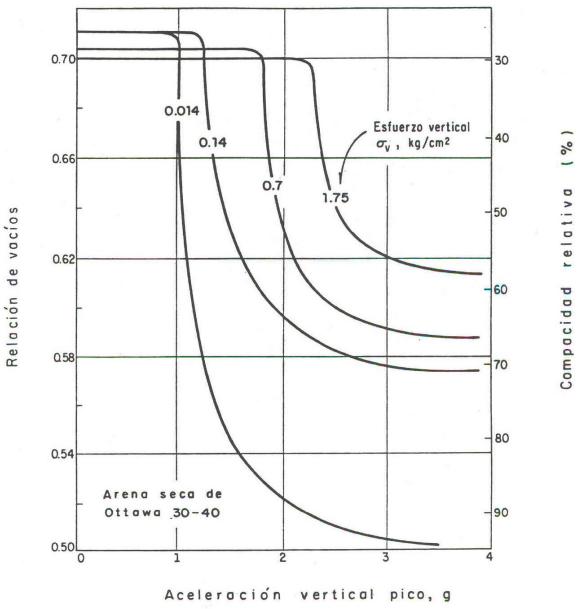


Figura 14. Relación triple entre parámetros físicos en arenas secas. **Fuente: Henríquez (2007)**

Otros gráficos que muestran la relación de algunos parámetros dinámicos del suelo con el esfuerzo de confinamiento inicial se resumen en las siguientes ilustraciones gráficas (**Figura 15 y16**):

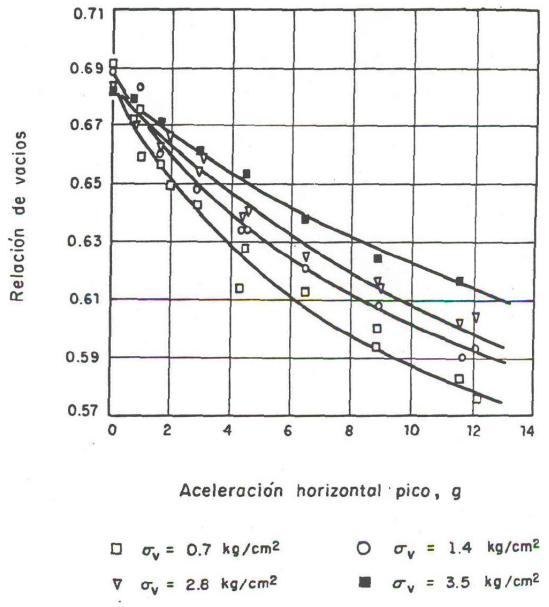


Figura 15. EFECTOS DE LA INTENSIDAD DE LA ACELERACIÓN Y ESFUERZO DE CONFINAMIENTO SOBRE LA RELACIÓN DE VACÍOS DE ARENA SECA. **Fuente: Henríquez (2007)**

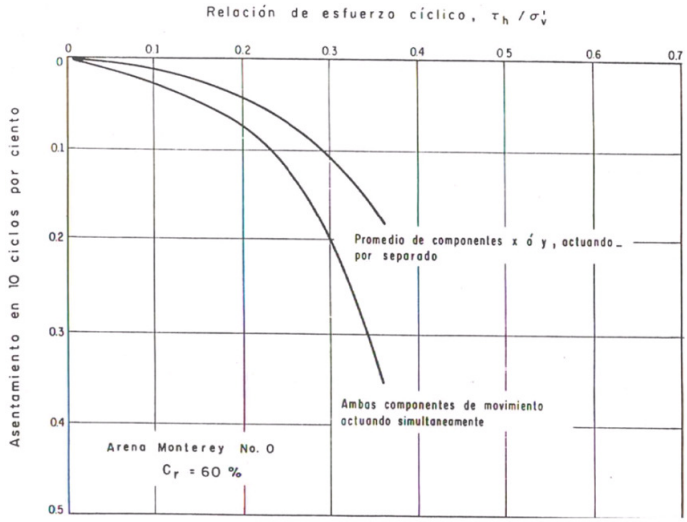


Figura 16. ASIENTO DE ARENA SECA BAJO MOVIMIENTO UNIDIRECCIONAL Y MULTIDIRECCIONAL .**Fuente: Henríquez (2007)**

b).- Lapso de esfuerzo sostenido

Henríquez, 2007, dice que aquellas muestras idénticas sometidas a cargas sostenidas por períodos que variaron de 0,1 a 100 días antes del ensayo, sufrieron en función del tiempo, aumentos de hasta un 25 por ciento en el valor de la relación de esfuerzos cíclicos que produce licuación. Este autor, explica que un mismo volumen, con el tiempo se hace más fuerte el contacto entre las partículas. Por ende, el efecto de la edad del depósito es un

factor importante a tener en cuenta, hay que destacar, las enormes diferencias de escalas de tiempo entre laboratorio y campo.

c)- Historia previa de deformaciones

Algunos discernimientos experimentales de laboratorio de los especialistas (Finn, Bransby y Pickering, 1970; y otros) referidos en el estudio realizado por **Henríquez, 2007,** enuncian que las características del fenómeno de licuación es influido por la historia previa de deformaciones.

Por su parte, Seed, Mori y Chan (1975), científicos, mencionados en el estudio anterior, afirman que las muestras de arenas sujetas a vibraciones de pequeña amplitud generada en condiciones de laboratorio y comprobada en condiciones reales a través del historial sísmico (**Figura 17**) conocido, permitiendo concluir que por efecto de esta historia sísmica incrementa la resistencia a la licuación.

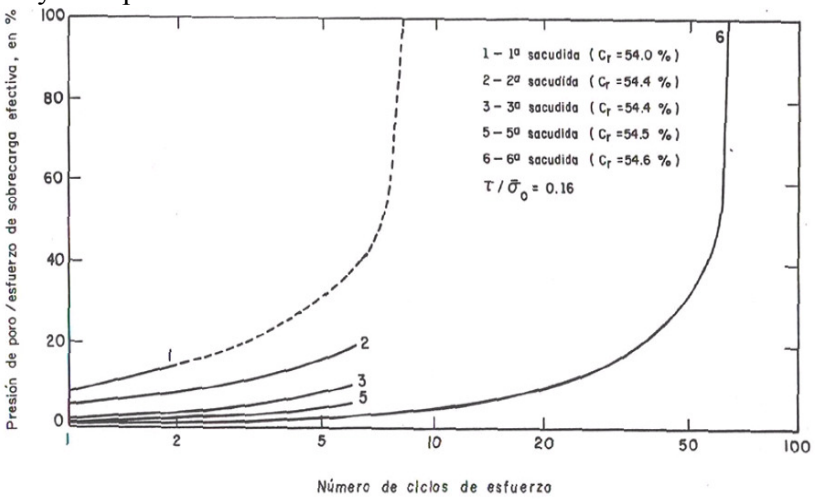


Figura 17. EFECTO DE LA HISTORIA SÍSMICA SOBRE LAS CARACTERÍSTICAS DE LICUACIÓN DE UNA ARENA

En resumen, se puede afirmar que para un número de ciclos dados, las muestras de arena sometidas a perturbaciones previas que inducen esfuerzos o deformaciones de bajo nivel, requieren una relación de esfuerzos cíclicos mayores para licuarse. (**Henríquez, 2007)**

d)- Historial previo de tensiones

Según conclusiones técnicas, derivadas de ensayos de laboratorio, de Bransby y Pickering (1970) incluida en el estudio de **Henríquez (2007)**, establecen que el número de ciclos

requerido para causar licuación es substancialmente reducido por episodios previos de licuación. Hay que tener en cuenta el criterio ingenieril a la hora de evaluar el potencial de licuación en los lugares donde anteriormente se haya producido.

- Características de la solicitación

a)- Magnitud del esfuerzo repetido

Henríquez, 2007, explica que cualquier suelo granular con una relación de vacíos mayor que la mínima es susceptible de sufrir pérdida parcial o total de resistencia, si la excitación es de intensidad suficiente. Añadió, que los terremotos generan componentes de la aceleración y por ende tensiones en las tres direcciones principales.

Henríquez, comparte el criterio propuestos por científicos **Seed e Idriss** en el año 1970 sobre que la arenas sueltas han resistido sismos de poca intensidad (aceleración superficial máxima, amáx = 0,05 g) y se han licuado ante la acción de sismos intensos (amáx = 0,16 g). De ello se concluye que la resistencia a la licuación decrece al aumentar la magnitud del esfuerzo cíclico aplicado tal como se presenta en las **Figuras 18 y 19**

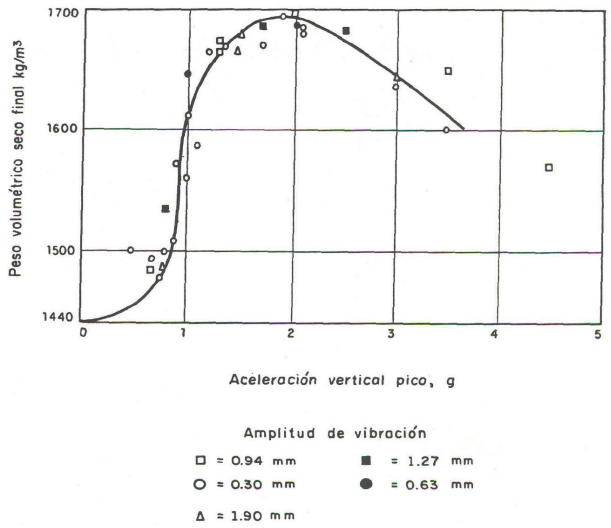


Figura 18. EFECTOS DE LA INTENSIDAD DE LA ACELERACIÓN VERTICAL SOBRE LA DENSIFICACIÓN DE LAS ARENAS.

Fuente: Henríquez (2007)

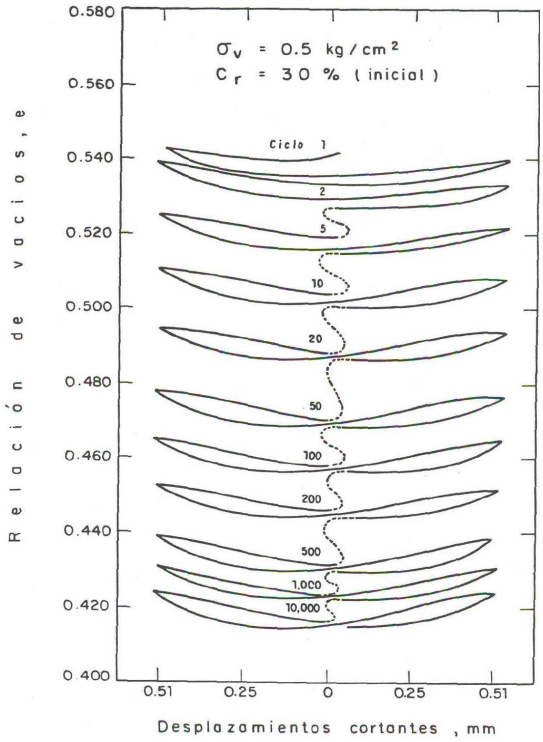


Figura 19. COMPACTACIÓN VS. HISTORIA ESFUERZO-DEFORMACIÓN EN UNA PRUEBA DRENADA DE ESFUERZO CORTANTE CÍCLICO SOBRE ARENA

b)- Número de ciclos de esfuerzo

Algunos estudios de laboratorio, y su confirmación in situ durante el terremoto de Alaska de 1964, indican que las muestras de suelos sometidas a cargas repetidas, con un nivel de esfuerzo o de deformación definido, el inicio de la licuación dependerá de la aplicación de un número de ciclos de esfuerzo adecuado a cada caso, proposición compartida por **Henríquez (2007)**

Por su parte, **Denys Parra** en su publicación Licuación de Suelos y Resistencia Cíclica, opina que entre las causas que originan el fenómeno de licuación se encuentran:

- Magnitud del Movimiento Sísmico

La magnitud del movimiento está relacionada con la magnitud de los esfuerzos y deformaciones inducidos en el terreno por este movimiento. Dependiendo de la distancia hipocentral, la magnitud del movimiento producirá cierto valor de aceleración máxima en la roca basal, la cual sufrirá amplificación, dependiendo de las condiciones locales del suelo, hasta llegar a la superficie, de esta manera la propagación de las ondas de corte durante un terremoto a través del esqueleto del suelo, producirá una complicada distribución de esfuerzos de corte en función del tiempo, causando así deformaciones en la masa de suelo cuya magnitud dependerá de la magnitud del terremoto.

- Duración del Movimiento Sísmico

Normalmente la duración de un movimiento sísmico es corto (entre 5 a 40 segundos), pero si este es intenso, predominará la condición no drenada, es decir la disipación de la presión de poros se verá restringida, y por el contrario se evidenciará el aumento de la misma, produciendo en algún momento condiciones de esfuerzo efectivo nulo, y por lo tanto, licuación.

- Granulometría del suelo

Los suelos más susceptibles a sufrir licuación son aquellos que poseen una granulometría uniforme, siendo las arenas finas uniformes las que son más propensas a licuar que las arenas gruesas uniformes. Además, según algunos autores las arenas limosas poseen mayor resistencia a sufrir licuación con respecto a las arenas limpias o con escaso contenido de finos. El problema de licuación será más serio si el suelo tiene un coeficiente de uniformidad mayor o igual a 2.

- Densidad Relativa

Durante la ocurrencia de un terremoto, una arena suelta puede sufrir licuación mientras que este mismo suelo en un estado más compacto puede no evidenciar el fenómeno. Una arena con un valor de resistencia a la penetración estándar de 40 golpes/30cm (densidad relativa de 70 a 80%) puede mostrar evidencias de licuación en la forma de volcanes de arena, pero no es probable que experimente más del 10% de deformación por corte bajo la influencia de la vibración sísmica, aún después de que se hayan desarrollado altas presiones de poros. En contraste con ello, arenas con valor de 20 golpes/pie (densidad relativa de 30 a 60%), pueden desarrollar relaciones de presiones de poro de 100% y experimentar deformaciones por corte muy grandes del orden del 25-30%, bajo la acción de los esfuerzos de corte aplicados (Seed et al., 1984).

- Profundidad del Nivel Freático

Es una condición necesaria para que ocurra licuación. La presión de poros, producida por el agua que ocupa los vacíos existentes entre las partículas del material debido a la posición del nivel freático, se incrementa por efecto de la vibración producida en el movimiento sísmico.

Por consiguiente, la ubicación del nivel freático cuando se produzca un terremoto en un depósito arenoso, será de mucha importancia porque regirá la condición de saturación y por lo tanto, influirá también en el esfuerzo efectivo.

2.5.- Factores que afectan indirectamente la licuación del suelo

Algunas consideraciones prácticas de laboratorio planteadas por los especialistas Martin, Finn y Seed en el año 1975 contenidas en el estudio realizado por **Henríquez, 2007,** enuncian que existen una serie de parámetros del terreno no relacionados con la licuación de manera directa, pero influyen en su potencial ocurrencia, y que dictan de un modo u otro como el suelo responderá a las tensiones aplicadas tal es el caso de los cambios volumétricos que pudiesen ser relacionado con los niveles de deformación tangencial que el suelo experimenta ligados con rigidez tangencial o el modulo de rigidez de un suelo bajo un específico nivel de carga.

En esta misma fuente, se manifiesta que los movimientos sísmicos pueden ser amplificados o atenuados, dependiendo de las características del perfil del terreno y su interacción con el contenido de frecuencias del sismo (propagación vertical de las ondas transversales), las cuales depende directamente de los valores de la rigidez y del amortiguamiento.

Martin y otros (1975), afirman que el modulo de rigidez tangencial (G) crece con la densidad y la tensión confinante, y disminuye con la magnitud de las deformaciones tangenciales. **Expresaron**, que los coeficientes de amortiguamiento, por otro lado, crecen con las deformaciones tangenciales y parecen disminuir con el incremento de la tensión confinante y la densidad.

Por otro lado, algunos especialistas, dicen que para entender la licuefacción, es importante reconocer las condiciones que existen en un depósito del suelo antes de un terremoto. Un depósito de suelo consiste en un ensamble de las distintas partículas de la tierra. Si miramos de cerca a estas partículas, podemos ver que cada partícula está en contacto con una serie de partículas vecinas. El peso de las partículas del suelo, próximo a producir el contacto entre las fuerzas de partículas - esas fuerzas tienen las partículas individuales en su lugar y dar la tierra su fuerza tal como se ilustra en la **Figura 13.** La licuefacción ocurre cuando la estructura de un suelto, arena saturada se rompe debido a la rápida aplicación de algunas de

carga. A medida que la estructura se rompe, en términos generales el individuo repleto de partículas de suelo intento de pasar a una configuración más densa. En un terremoto, sin embargo, no hay suficiente tiempo para que el agua en los poros de la tierra para ser exprimido. En lugar de ello, el agua es "atrapados" y evita que las partículas de la tierra de acercarse juntos. Este es acompañado por un aumento en la presión del agua que reduce el contacto entre las fuerzas de cada uno de las partículas del suelo, con lo que el reblandecimiento y debilitamiento del suelo depósito. (**Figura 20)**

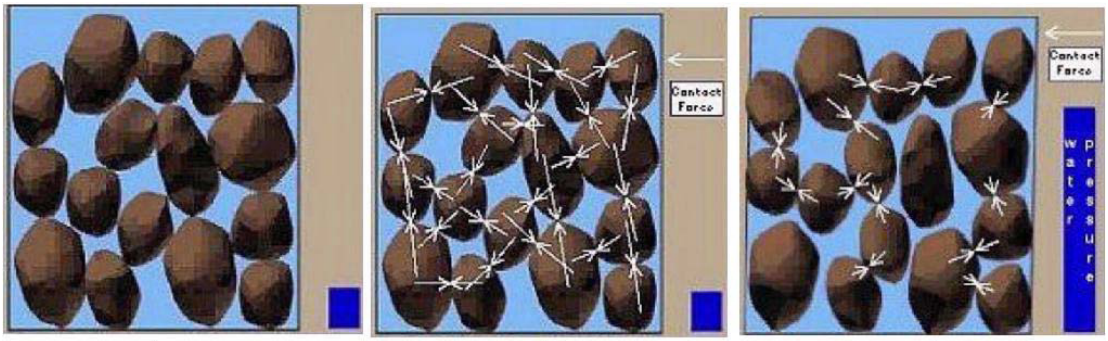


Figura 20. Representación esquemática del fenómeno de licuación. a) Estado inicial de tensiones. b) Fuerzas de contacto entre las partículas. c) Disminución de las fuerzas de contacto entre partículas, al incrementarse la presión de poros.

En la ilustración (Figura 20) se presenta un elemento de suelo sometido a una serie de tensiones cíclicas. Como consecuencia de las tensiones de corte aplicadas, la estructura no drenada del suelo tiende a ser más compacta, resultando una transferencia de tensiones a la presión de poros y por tanto, una reducción en la tensión efectiva. Si la arena está suelta, la presión de poros puede incrementarse rápidamente a un valor igual a la presión de confinamiento, y la capa de suelo puede experimentar grandes deformaciones.

García Núñez (2007), opina que el fenómeno se manifiesta cuando un depósito de arena saturada se ve sometido a las ondas de corte que se propagan durante un sismo, de manera que la estructura de la arena tiende a densificarse. Sin embargo, como la duración de la aplicación de las tensiones de corte cíclico es, en general, muy pequeña en comparación

con el tiempo necesario para que ocurra algún drenaje, la tendencia de la arena a disminuir de volumen durante cada ciclo se refleja en un incremento progresivo de la presión de poros. Esto produce una reducción continua de la tensión efectiva y consecuentemente una disminución en la resistencia al corte de la arena. Si en el curso de la carga cíclica la presión de poros aumenta hasta un valor igual a la tensión de confinamiento inicial, la tensión efectiva o intergranular existente en el esqueleto de la arena se reduce a cero y en consecuencia la arena pierde completamente la resistencia al corte, al menos en principio. En otras palabras, la arena se licua, esto es, se comporta como un líquido viscoso, generándose grandes deformaciones que pueden dar origen a múltiples mecanismos de falla, algunas de ellas catastróficas como el rompimiento de presas, destrucción de puentes , y falla de taludes.

Esta misma fuente, es del criterio que durante la ocurrencia de sismos severos se ha observado sistemáticamente que depósitos saturados de suelos granulares con deficiente grado de compactación sufren un significativo nivel de deformaciones que es incompatible con la estabilidad de cualquier estructura. Al analizar las características de las fallas se han identificado dos fenómenos, que aunque presentan similitudes, son diferentes. En el primero existe una pérdida de resistencia, en cambio en el segundo existe una pérdida de rigidez. En el primero no es necesaria la acción permanente de la perturbación en el momento de la falla, en cambio en el segundo es necesaria la acción sísmica durante el desarrollo de las deformaciones. Para referirse a cada uno de estos fenómenos cuyo denominador común es un importante incremento de presión de poros, Casagrande propuso dos términos: licuación verdadera y movilidad cíclica.

No obstante, para entender cómo la licuefacción del suelo se inicia, algunos conceptos básicos de mecánica de suelos son importantes como es el coeficiente de Vacío Crítico.

El Coeficiente de Vacío Crítico. En 1936, el doctor Arthur Casagrande realizando una serie de pruebas de tensión triaxial de drenaje controlado, descubrió que muestras sueltas y densas a la misma presión de confinamiento tiene la misma densidad cuando se trituraba

a grandes tensiones. La proporción de vacío a esa densidad le denomino Coeficiente de Vacío Crítico (E_c). (**Figura 21**)

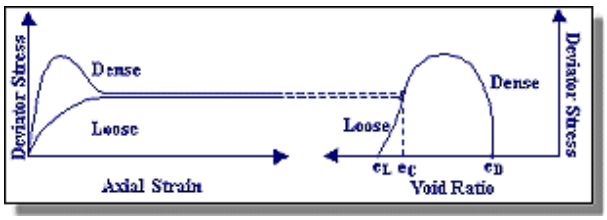


Figura 21. COMPORTAMIENTO DE SUELOS DENSOS Y SUELTO EN PRUEBA TRIAXIAL CONTROLADA DE TENSIÓN MONOTÓNICA.
Fuente: http://www.ce.washington.edu/~liquefaction

En la realización de pruebas para distintas presiones de confinamiento efectivas, **Casagrande** encontró el coeficiente de vacío crítico (CVR), en el que el gráfico que sigue ilustra la línea de frontera entre un comportamiento dilative y un contractive en condiciones de compresión triaxial drenada. (**Figura 22**)

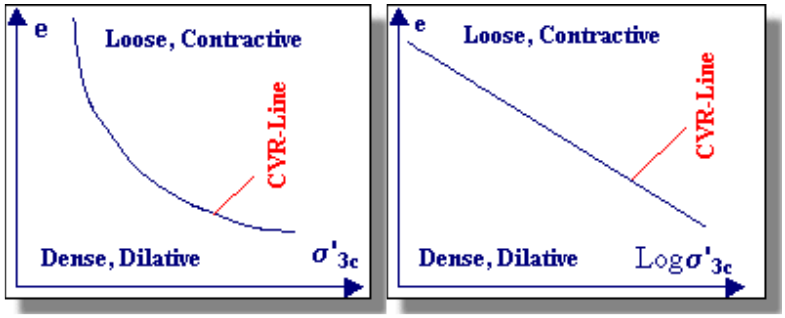


Figura 22. CURVAS CVR PARA PRESIÓN DE CONFINAMIENTO EFECTIVO.

En el año 1960, 24 años más tarde, Gonzalo Castro, estudiante de Casagrande realizó ensayos de esfuerzos triaxiales controlados, en el que observó tres tipos de esfuerzo de tensión dependiendo del estado de deformación del suelo. La contracción inicial de muestras densas con aumento en sus fisuras debido al incremento de la presión de confinamiento y el esfuerzo de cizalla. Por otra parte, algunas muestras muy sueltas fueron trituradas al aplicárseles pequeños y rápidos esfuerzos de cizallas. Castro denomino este comportamiento Licuefacción. Similar comportamiento se experimentaron en suelos de densidad media, pero al ser transformado por la licuación presentando comportamiento

contractivo, comenzó de mostrar un comportamiento dilativo al que denomino licuefacción limitada. (**Figura 23**)

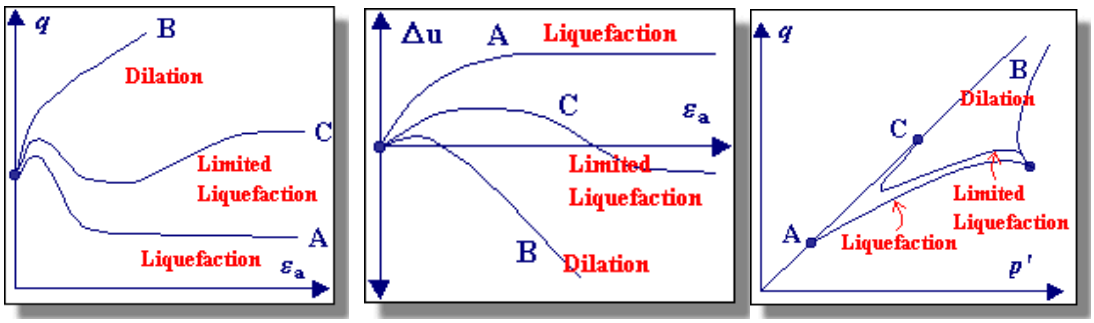


Figura 23. RESULTADOS DE ENSAYOS DE ESFUERZO TRIAXIAL REALIZADA A TRES MUESTRAS CON DENSIDADES DIFERENTES

Algunos especialista, consideran que la evaluación del potencial de licuefacción se logra mediante la comparación de la medida equivalentes carga sísmica y la resistencia a la licuefacción (**Figura 18**). El enfoque más común para la caracterización de la carga sísmica es mediante el uso del esfuerzo cortante cíclico de cizalla (CSR). Todo lo anterior finaliza con la determinación de factor de seguridad contra la licuefacción dada por la expresión:

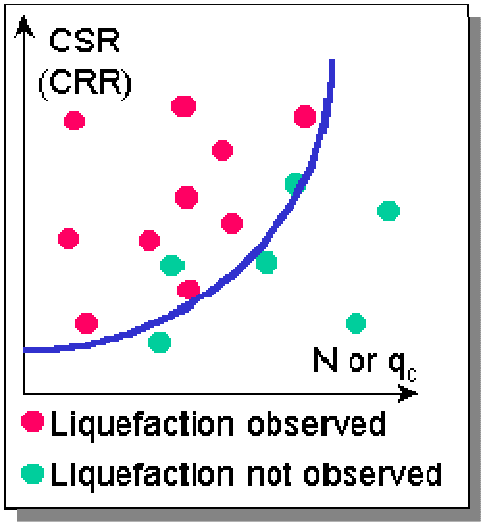


Figura 24. VALORES CSR VERSUS N

FS = CRR / CSR

FS > 1, indica que la resistencia de carga sísmica es superior a la licuefacción y, no se espera fallos del terreno. Se detalla varias páginas adelante

2.6.- Ejemplos de algunos casos históricos de licuación del suelo

En diversas regiones geográficas donde el tremendo desarrollo tecnológico y económico no está exento de los efectos que la licuefacción imprime a los suelos, que es soporte físico, de muchas sociedades urbanas excesivamente pobladas. Tal son los casos de:

- Loma Prieta, San Francisco (USA) en el año 1989 que bajo influencia de terremoto de magnitud 7.1 º R ocasiono que los suelos se licuasen, interrumpiendo la funcionalidad del Puerto de Oakland, y daños en numerosas tuberías subterráneas en distintos distritos de San Francisco.

- Las Filipinas, particularmente, en ciudad Dagupan en el año 1990 sujeta a sismos de magnitud 7,7º Ritcher, colapsos e inclinaciones de edificaciones físicas, y puentes inhabilitados en su terraplenes debido a la expansión lateral de los sedimentos.

- Valle de la Estrella (Costa Rica), en el año 1991 abatida por terremoto de 7,4 de magnitud Ritcher, en que obras viales, particularmente, puentes fueron perjudicados expansión lateral de los sedimentos.

- Río Nisqually (Washington) en el año 2001 perturbado por sismos de magnitud de 6.8º Ritcher, en cuya llanura sedimentaria tuvo lugar la licuefacción del terreno (**Foto 19)**

Foto 19. Huecos en suelos Barrosos humedecidos

- Hanshin, zona portuaria, dentro de la Ciudad de Kobe (Japón), en el año 1994 fue sometida a sismo de 6,9 º Ritcher de magnitud, que se tradujo deterioros e interrupción de puertos marítimos, fallas del terreno, y 2000 metros de tubería rotas. Se reportaron más de 5,500 muertos y más de 26,000 heridos. La pérdida económica se ha estimado en unos 200 millones de dólares americanos. La proximidad del epicentro, y la propagación de ruptura directamente debajo de la

densamente poblada región contribuye a la considerable pérdida de vidas humanas y el alto nivel de destrucción.

El espectacular hundimiento de la autopista Hanshin evidencia la fuerza de la carga sísmica que se impuso a la estructura en la zona (**Foto 20**).

Foto 20. DAÑOS ESTRUCTURALES OCASIONADO POR LA LICUACIÓN DEL SUELO EN AUTOPISTA DE HANSHIN

Fuente: http://www.ce.washington.edu/~liquefaction

A su vez, los fuertes sismos que llevó al colapso de los Hanshin Express, también causó graves daños al puerto y las instalaciones de muelle como se ilustra en la **Foto 21,** a causa de la expansión lateral de la superficie pavimentada de 1.2 a 2 metros acompañada de inundaciones locales.

Foto 21. MENOSCABOS FÍSICO DE AUTOPISTAS TERRESTRA E INSTALACIONES PORTUARIAS EN HANSHIN, JAPÓN. **Fuente: http://www.ce.washington.edu/~liquefaction**

- Isla de Rokko, Kobe (Japón) en el año 1995 tras un sismo de considerable magnitud ocasiona daños en paredes de muelle e instalaciones portuarias **(Foto 22)**, siendo empujados hacia el exterior de 2 a 3 metros a 3 y 4 metros de profundidad hacia zonas deprimidas llamado graben debido a la licuación del suelo.

Foto 22. INFRAESTRUCTURA PORTUARIA AFECTADDA POR LA LICUACIÓN DEL TERRENO

Fuente: http://www.ce.washington.edu/~liquefaction

- Niigata (Japón) en el año 1964 sometido a sismo de considerable magnitud ocasionando daños físicos en puente **Showa** debido a la expansión lateral del suelo (**Foto 23)**.

Foto 23. COLAPSO DE INFRAESTRUCTURAL VIAL EN JAPÓN.

- Niigata (Japón) en el año 1955, edificaciones físicas **(Foto 24)** y obras viales (puentes) son abatidas por terremoto intenso y dilatado, inhabilitando la estabilidad en sus cimientos a causa de la insuficiencia de resistencia física del suelo, cuya caída se dio paulatinamente en varias horas.

Foto 24. LICUEFACCION CAUSA MENOSCABOS DE OBRAS CIVILES EN NIIGATA, JAPÓN

- Adapazari (Kocaeli, Turkey) en el año 1999 severos daños físicos a causa de sismos que indujo la formación de suelos licuados (**Foto 25**)

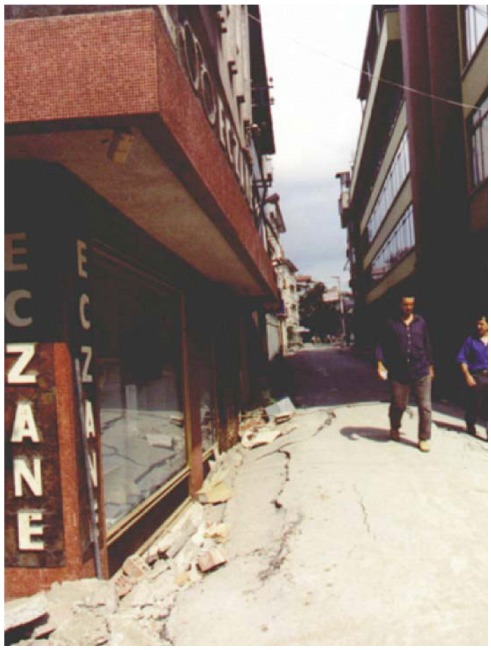


Foto 25. DAÑOS ESTRUCTURALES EN LA EDIFICACIÓN A CAUSA DE AUSENCIA SOPORTE FÍSICO DURANTE EL 1999 TERREMOTO DE KOCAELI.

- Adapazari (Kocaeli, Turkey) en el año 1999 severos daños físicos a causa de sismos que indujo la formación de suelos licuados.

- Túnel que cruza la calle Webster y Posey (Oakland, USA) influenciado por terremoto de Loma Prieta deteriorado debido al estado licuable del suelo (**Foto 26**)

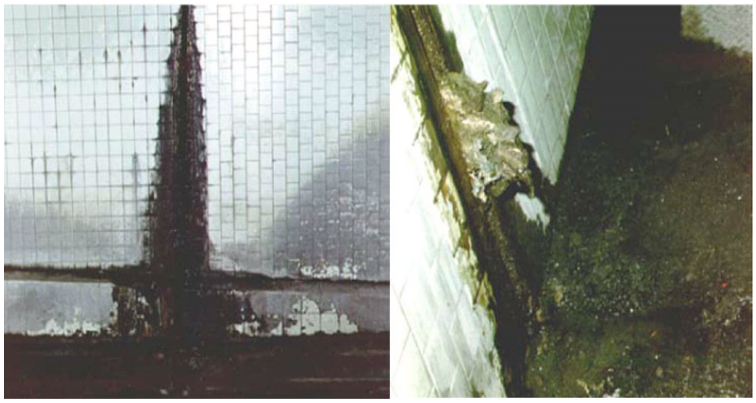


Foto 26. Licuefacción induce daños físicos en tubería de túnel en la Calle Webster en Oakland.

- Zona de la Costa Sur de Alaska **(Foto 27)**, en el año 1964, un gran terremoto de magnitud 9.2º Ritcher con duración de 3 minutos golpeó Prince William Sound, siendo afectado por la licuación del suelo ± 500,000 kilómetros cuadrados de superficie.

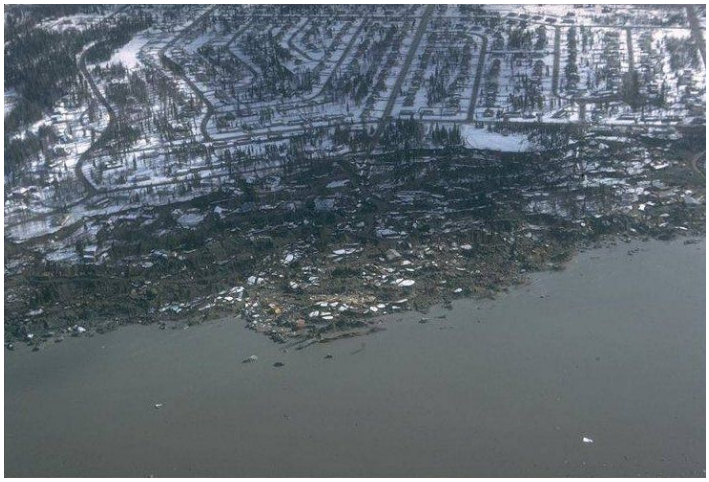


Foto 27. LICUEFACCIÓN DEL SUBSUELO EN UN ÁREA DE PRINCE WILLIAM SOUND, ALASKA

Fuente: http://www.ce.washington.edu/~liquefaction

- Área de Turnagain Heigth (Alaska), en el año 1964 se produjo terremoto considerable que resulto en la licuefacción de arenas y limos dentro de formación arcillosa.

Por otro lado, ciertamente la licuefacción de los suelos de fundación granulares saturados representa una importante causa de falla de obras viales como los puentes (**Foto 28**). Por ejemplo, la región de Alaska, en donde con el terremoto de 1964 colapsaron completamente 9 puentes y 26 sufrieron deformaciones severas o colapso parcial, en los cuales la pérdida de apoyo de las fundaciones provocó grandes desplazamientos de las pilas y estribos.

Foto 28. FUNDACIÓN INESTABLES DE PUENTE AFECTADO POR LICUEFACCIÓN DEL SUBSUELO EN UN ÁREA

Fuente: http://www.ce.washington.edu/~liquefaction

Hoy por hoy, el diseño de obras viales, sobre todo, los puentes construidos en zonas con potencial de licuefacción siguen una filosofía de diseño denominada Riesgo Calculado, especialmente para los puentes menos esenciales para las comunicaciones en los momentos inmediatamente posteriores a sismos. No obstante, algunos especialista, opinan que desde el enfoque económico no se justifica el diseño de algunos puentes para que resistan un gran movimiento sísmicos en ambiente de licuefacción sin sufrir daños significativos (**Foto 29**)Sin embargo, la posibilidad de optimizar el diseño de los puentes es unas de las tantas alternativa de manera tal que el costo de reparar los potenciales daños sísmicos no supere el costo de las soluciones y construcciones adicionales necesarias para evitas estos menoscabos.

Foto 29. AUTOPISTA PANAMERICANA PRÓXIMA OCÉANO PACÍFICO A 190 KM AL SUR DE LIMA, PERÚ. 15/08/2007, MAGNITUD 8.0 GRADOS RITCHER. **Fuente: http://mceer.buffalo.edu**

2.6.1.- Las sismitas y otros efectos de la licuación del suelo

Según **Luis González Vallejos** en su obra *Ingeniería Geológica*, define la Sismitas como estructura originadas en sedimentos blandos y suelos granulares por la sacudida cíclica del terreno al paso de las ondas sísmicas y, en su mayor parte, son debidas a fenómenos de licuefacción.

Vallejos (2002), dice que para la formación de sismitas es necesario que el suelo sea de naturaleza granular, con empaquetado poco denso, que se no cohesivo y que esté saturado. Al paso de la onda sísmica la tensión tangencial cíclica vence la resistencia del esqueleto granular y éste cambia a un empaquetamiento más denso, expresó Vallejos.

De acuerdo con **Vallejos**, la velocidad y ciclicidad del fenómeno impiden la expulsión de agua y la presión intersticial aumenta casi instantáneamente, lo que lleva a la deformación y flujo de sedimento con el agua, esto es, a la fluidificación. Este flujo da lugar a inyecciones de material arenoso hacia arriba y a la eventual salida al exterior sobre la superficie, de tal manera que las estructuras que se forman por estos procesos son los volcanes de arena, los sand blow, los diques clásticos y los sill clásticos.

Esta misma fuente, opina que en áreas lacustres, se forman otros tipos de estructuras, como laminaciones convolutas, los pilares y las estructuras en plato. El conocimiento del fenómeno de la licuefacción y de las estructuras que produce, permite evaluar cuantitativamente el tamaño de los paleoterremotos.

Vallejos (2002), asevera que hay un umbral de intensidad mínima del terremoto para que puedan producirse fenómenos de licuefacción. En suelos de alta susceptibilidad este umbral de intensidad es de VI en la escala Modificada de Mercali, o magnitudes superiores a 5,5 (**Figura 25)**

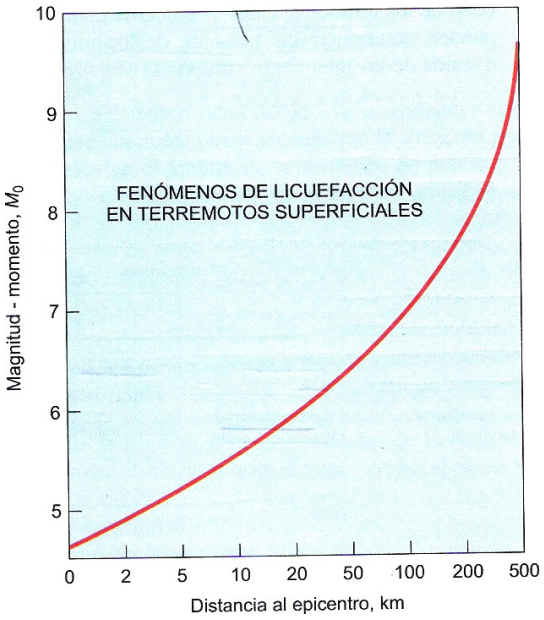


Figura 25. DISTANCIA MÁXIMA HASTA LA QUE SE HAN OBSERVADO ESTRUCTURAS DE LICUEFACCIÓN EN TERREMOTOS SUPERFICIALES, EN FUNCIÓN DE LA MAGNITUD DEL SISMO. **Fuente: Vallejos (2002)**

2.7.- Investigaciones experimentales: contexto actual

Según **Byrne (2003),** en nuestros días se realizan intentos por establecer un marco de estado crítico drenado para el comportamiento cíclico de las arena. Exclusivamente, en aquellas investigaciones experimentales destinadas a comprender mejor el comportamiento de la arenas bajo vibraciones cuyo fin es desarrollar leyes constitutivas que consideren los posibles mecanismos de fallos del terreno como algunos descritos en capítulos anteriores del presente documento.

Byrne (2003), considera que sólo los modelos (numéricos o diseños de ingeniería) sujetos a validación son lo suficientemente confiables para prevenir posibles peligros por licuefacción del suelo. Expresó, la dificultad de validar modelos numéricos de licuefacción (Foto x), debido a las dimensiones de los mismos y a la condición fortuita de los procesos geológicos como los terremotos.

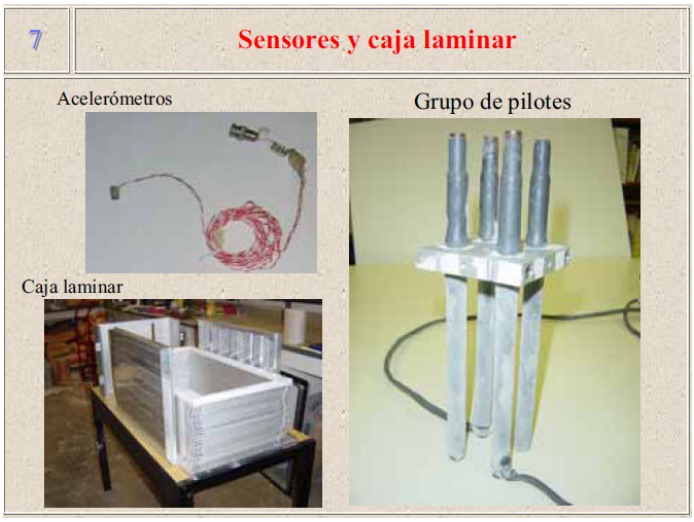


Foto x. Equipos electrónicos para la detección de de la licuación de suelos. Fuente: **Gonzalez, L.** (1,994)

El comportamiento del suelo es dependiente del esfuerzo, y los modelos a escala con exigua precisión simplemente son capaces de reproducir cualitativamente el fenómeno investigado, afirmó Birne. Por ejemplo, la mesa de sacudida sísmica con mucha aceptación desde el punto de vista geotécnico estructural.

Por tal razón, Birne, opina que uno de los alicientes para contrarrestar estos hechos fue el desarrollo de un equipo de centrifugación que reprodujeran modelos a escala del estado inicial de esfuerzo, en que se recrea la aceleración de gravedad (Foto x) con lectura que alcanza los 100g luego de giros de alta velocidades.

Foto x. Vista de Centrífuga geotécnica automatizada para determinación de valores de aceleración en el suelo
Fuente: **Gonzalez, L.** (1,994)

A partir de la década de los años 90' a la fecha, este aparato tiene uso generalizado y extendido en la dinámica de suelo. Algunos proyectos de centrifugadoras (**Byrne ,2003**) tienen especial importancia para la verificación de modelos numéricos. Tales como:

- VELACS (Análisis de Verificación de licuefacción por estudios centrifugados): muestras de arenas Nevada con diferentes de densidades iniciales relativas fueron probadas en condiciones de drenados y esfuerzos cortantes cíclicos y ensayos triaxiales. En principio, equipos de investigación en todo el mundo desarrollaron modelos numéricos, después que se ha realizado investigación experimental de centrifugación y su comparación con resultados numéricos. Luego de finalizado estos proyectos, gran cantidad de códigos numéricos son verificados usando datos experimentales obtenidos de estos.

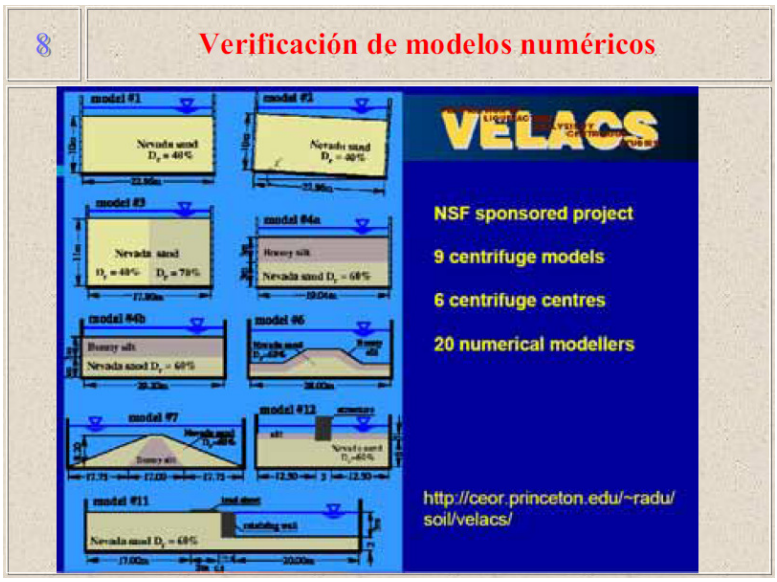


Figura x. Proyecto VELAC. Fuente: **Gonzalez, L.** (1,994)

- Mitigación de daños inducido por terremotos en la licuefacción del suelo. El análisis de material (arenas) procedió del **Río Fraser,** en que se hizo notable el elevado número de ensayos de esfuerzo cortante cíclico para diferentes densidades iniciales relativas y condiciones de esfuerzo de confinamiento para la calibración de modelos constitutivos. Una vez más, se realizó ensayos de centrifugación usándose como proceso de verificación.

López, S. (2008), considera que existe otra línea de investigación para la identificación de los rendimientos de los suelos a la licuefacción a través de modelos numéricos tomando en cuenta los datos de campo.

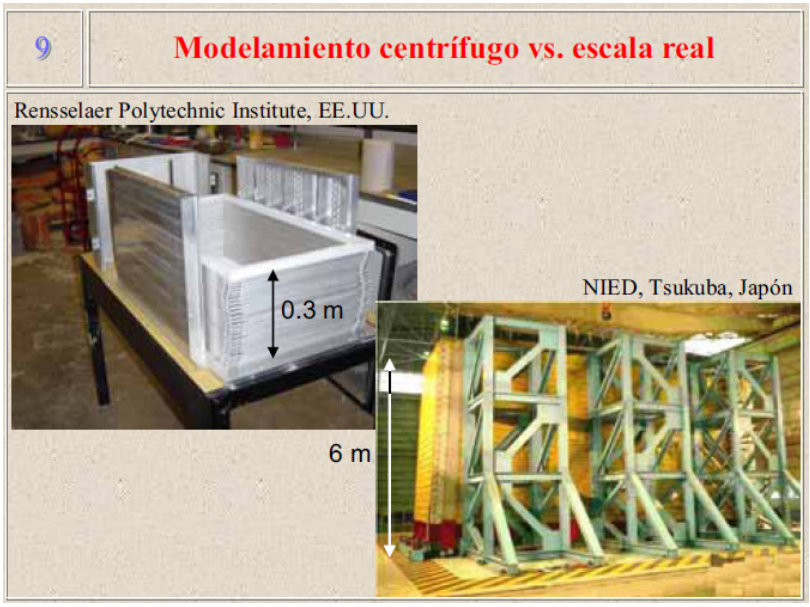


Foto x. Mostrando modelos experimental y a escala real para cuantificar la licuación del suelo. Fuente: **Gonzalez, L.** (1,994)

Esta fuente, dice que esta investigación se basa en la no alteración del material ubicado en el terreno, procurando evitar el grado de incertidumbre debido a ensayos de laboratorio y reconstitución de las muestras. La prueba más usada en campo es el SPT, con la cual se establece correlaciones de la capacidad portante y características mecánicas del suelo.

Gonzalez, L. (1,994), propone aplicaciones típicas de los modelos instrumentales hasta la fecha conocidos para el estudio de la licuación del suelo:

- Ensayos de fundaciones superficiales y profundas.
- Estabilidad de taludes, terraplenes y presas de tierra.
- Estabilidad de túneles.
- Estructuras de contención (gravitacionales, sheet piles, tierraarmada, etc.)
- Licuación y lateral spreading.
- Interacción suelo-estructura.
- Transporte de contaminantes.

- Cráteres por explosiones.

Gonzalez, L. (1,994), expresó que los ensayos de laboratorio tradicionales y modelos analíticos simplificados sugieren que no existe limite de profundidad. La fuente dice que históricamente, no ha habido observación de licuación a profundidades mayores a 30 m; poca información sobre desarrollo de licuación a grandes profundidades, ya sea de información de terreno o de laboratorio; evaluación de licuación a grandes esfuerzos de confinamiento basado en extrapolación sobre comportamiento observado a poca profundidad ($z < 15 – 20$ m).

A pesar de ello, algunas lecturas electrónicas http://es.wikipedia.org/wiki/Licuefacci%C3%B3n_(inestabilidad) , consideran que el limitado conocimiento relativo a este fenómeno se debe en gran parte a dos factores:

- Dificultad en observar sus características en condiciones reales.

- Complejidad del fenómeno pues para, además de ser el resultado de una acción símica de carácter altamente variable, induce en el suelo un comportamiento fuertemente no lineal e histerético, con fuerte degradación de las características mecánicas del suelo de cada ciclo determinada por la generación de presiones neutras en la muestra bajo acción sísmica.

En la actualidad, uno de los problemas fundamentales es el conocimiento básico sobre los mecanismos de rotura y deformación asociados al fenómeno de la licuefacción, lo que limita el uso de ensayos elementales para estudiarlo (las conclusiones pueden ser adulteradas si los mecanismos inducidos en laboratorio difieren de los in situ).

En general,

- No existe una definición única para el fenómeno de la licuefacción.

- Una definición general y cualitativa para este fenómeno, capaz de producir grandes deformaciones en el terreno y de las estructuras en él existentes, asociado a gran degradación de las características mecánicas de los solo granulares debido a la generación o migración del exceso de presión neutra resultante de la acción cíclica producida por sismos en condiciones por lo menos parcialmente no drenadas.

Según el Instituto Tecnológico Geominero de España (2000), la licuefacción en depósitos saturados durante un terremoto es una de las causas más dramáticas de daños en edificaciones y obras civiles durante un terremoto. Esta misma fuente, opina que algunos estudios sobre licuefacción, han determinado una relación empírica entre las características e intensidad del movimiento del terreno y la resistencia en la penetración para determinar el potencial de licuefacción. Este tipo de relaciones empíricas suelen tener un marcado efecto "localista" siendo muy difícil y problemática la extrapolación a otras áreas distintas de las que se realizo el estudio.

De acuerdo con Instituto Tecnológico Geominero de España (2000), otros métodos para el estudio del potencial de licuefacción consisten en la comparación de los materiales existentes en la zona, con el huso granulométrico de arenas que han sufrido licuefacción bajo cargas cíclicas y vibraciones inducidas por sismos en otras zonas.

Se pueden estimar la máxima extensión de un área susceptible a licuefacción mediante la zonificación de ciertas unidades geomorfológicas, especialmente sensibles o según diferentes depósitos sedimentarios tal como se ilustra en la figura x.

Atendiendo a todos los criterios anteriormente señalados, (granulometría de los distintos niveles, unidades geomorfológicas presentes, tipos de depósitos y edad de los mismos), se ha estudiando la posibilidad de que debido a un movimiento sísmico pudiese producirse el fenómeno de la licuefacción de arenas saturadas en el subsuelo de la Ciudad de Lorca (España). El análisis de toso los datos disponibles revela que en el subsuelo, no existen capas continuas de arenas sueltas (con valores SPT inferiores a

16), saturadas, o secas y de granulometría uniforme, que pudieran causar problemas de licuefacción a causa de un terremoto.

Por otra parte, los depósitos con susceptibilidad potencial de licuefacción más alta (áreas próximas a cauces fluviales actuales y zonas de llanura aluvial), están en Lorca constituidos por materiales granulares gruesos (gravas arenosas) o por materiales finos mayoritariamente limo arcillosos, lo suficientemente alejados de las granulometría típicas de las arenas susceptibles.

Solamente existen con características aproximadas a las de las arenas susceptibles algunos lentejones aislados, pocos representativos.

Si a todo lo anterior se une el hecho de que en la Ciudad de Loraza el nivel freático se encuentra a una profundidad > 50 m. y que la probabilidad de saturación de las escasas capas puramente arenosas que hay en el subsuelo más inmediato es muy baja, se comprende que el riego de licuefacción en la ciudad sea muy bajo.

Rango	Unidad geomorfológica	Licuefaccion potencial
A	Sedimentos fluviales actuales y antiguos, pantanos o marismas, tierras bajas o interdunas	Licuefacción probable
B	Abanico aluvial, dunas arenosas, llanuras de inundación, playas y otras llanuras	Licuefacción posible
C	Terrazas fluviales antiguas, colinas y relieves montañosos	Licuefacción improbable

Tipo de depósito	Distribución general de los sedimentos incoherentes en el depósito	Edad del depósito <500 años	Holoceno	Pleistoceno
Canales fluviales	Localmente variable	Muy alta	Alta	Baja
Llanura aluvial	Localmente variable	Alta	Moderada	Baja
Coluvial	Variable	Alta	Moderada	Baja
Rellenos artificiales poco compactos	Variable	MuyAlta		
Rellenos artificiales compactos	Variable	Baja		

Por su parte, **B. Nuhfer, E. et. al. (1997)**, opina que la vibración de un terremoto origina flujo de suelos sensibles. Algunos inclusos se licuefactan al colapsar los granos de suelo y liberarse agua de poros microscópicos. Las estructuras construidas sobre los suelos sensibles colapsan y se hunden. Por ejemplo, en Granada (España), por las características licuefactibles de las arenas de su vega, se pueden producir fallos en el

suelo, si se produce un terremoto, que serían los causantes de la mayoría de las pérdidas personales y económicas.

2.7.1- Leyes constitutivas

López, S. (2008), expresa que es muy conocido el comportamiento plástico de las arenas cuando se somete a pequeñas cargas. Por tanto, un modelo numérico de plasticidad es necesario para su modelación. Modelos basados en teorías clásicas de plasticidad, que son de uso general en problemas estáticos o monotónicos, no son capaces de reproducir el rendimiento de las arenas bajo carga dinámica, en vista que no brindan conductas de plasticidad que se producen en la realidad. Por lo cual, algunos modelos avanzados desarrollados específicamente para carga dinámica son necesarios. Algunos de ellos (**Birne, 2003**) se refieren a continuación:

- **Modelo de superficie envolvente.** Tienen uso generalizado. Ellos requieren la definición analítica de rendimiento y superficie de potencial, que admita las deformaciones plásticas en su interior. Usualmente, se incluyen normas de endurecimiento y ablandamiento. Sin embargo, la falta de eficiencia en el tiempo es necesaria para los cálculos numéricos.

- **Modelos basados en la Plasticidad Generalizada.** Se desarrollan con éxito en la solución de problemas dinámicos de los suelos. Incluyen normas para el endurecimiento y ablandamiento que completa las posibles modelos del comportamiento del suelo. Incluye, también, contracción y dilatación. Por ejemplo, el modelo de **Pastor-Zienkiewicz,** usado y validado para la establecer conductas en las arenas.

Según García Nuñez (2,007), se ha desarrollado hasta el momento, una gran cantidad de modelos constitutivos orientados a reproducir las principales características del fenómeno de licuación. De hecho, cada programa de elementos finitos está asociado a un modelo constitutivo determinado, cuyo nivel de complejidad varía de un autor a otro, existiendo

casos de modelos que requieren una gran cantidad de parámetros, los cuales son difíciles de programar y además muchos de los parámetros no tienen un claro significado físico.

De acuerdo con la fuente, uno de los aspectos que es necesario investigar corresponde al flujo en la zona no saturada que se produce hacia la superficie del terreno, una vez se licua el depósito de arena. En numerosos sitios y a raíz de un sismo, se han presentado manifestaciones superficiales de un exceso de presión de poros en estratos de materiales granulares sueltos y parcialmente saturados. Estas manifestaciones ocurren en forma de volcanes de arena, grietas en la superficie, y se presentan después del temblor. Existen casos reportados en la literatura como el de Niigata en Japón, donde menciona que los chorros de arena se mantuvieron durante 20 minutos después de finalizado el temblor.

García Nuñez (2,007), opina que en la literatura solamente se cuenta con la solución analítica propuesta por Alberro (Alberro & Hernández, 2002)], para predecir el comportamiento post-sismo de depósitos granulares. Numéricamente el problema es muy complejo, difícil de modelar, ya que por un lado restringimos las presiones de poros a cero, lo cual limita cualquier posibilidad de flujo hacia las capas superiores, y por otro lado, tenemos una arena parcialmente saturada, cuyo comportamiento no puede ser modelado con el modelo Pastor-Zienkiewicz, ni tampoco como material elástico.

2.8.- Aplicación de la tecnología a la mejora de suelos licuables

Henríquez (2007), opina que las medidas para impedir la ocurrencia de este fenómeno, consiste en excavar y reemplazar las capas o estratos peligrosos, aumentar la densidad relativa y reforzar el terreno, facilitar la disipación de los incrementos de presiones intersticiales generadas en el terreno, entre otras. **Afirmó**, que las medidas para afrontar las consecuencias de la licuación, comprenden el refuerzo de las estructuras o el uso de cimentaciones profundas que sobrepasen las capas potencialmente licuables.

Esta fuente, asegura que resulta conveniente adoptar medidas que se basan en densificar y/o reforzar el terreno, debido a que las tareas de excavación son muy complicadas y

muchas veces imposibles, sobre todo cuando se realizan bajo el nivel freático o bajo la cimentación de alguna edificación.

Hoy día se debe entender el término de licuefacción del suelo como la disrupción in situ del soporte mutuo entre granos, generalmente por una sacudida sísmica, en la que se produce la pérdida total o parcial de la resistencia de cizalla de los materiales afectados. En suelos sin cohesión, la transformación de un estado sólido a líquido es el resultado del aumento de la presión de los poros que disminuye el coeficiente de fricción durante un terremoto. El suelo completamente saturado, con arenas sin cohesión, generalmente limpias, que pueden incluir algo de gravas puede ser licuefaccionado durante la sacudida sísmica por la propagación de las ondas de cizalla.

Algunos expertos (Allen 1977, 1982), opinan que los sedimentos arenosos sin cohesión y los depósitos de limos suelen tener una resistencia de cizalla alta, soportando grandes cargas sin producirse alteraciones en su estructura interna. Pero bien por causas naturales o artificiales, se puede producir la pérdida de resistencia de esos materiales, cambiando su estado para pasar a comportarse como líquidos viscosos. El mecanismo que afecta a este cambio de estado, de sólido a líquido, es la licuación que genera depósitos licuefaccionados Esta pérdida de cohesión puede producir desplazamientos a favor de la pendiente o inyecciones de materiales licuefacccionados en respuesta a gradientes de presión.
Los ambientes sedimentarios más favorables para la génesis de licuefacciones son: playas, barras arenosas y sistemas fluviales, ambientes lacustres y fluviolacustres.

De acuerdo con especialista en el tema (Obermeier et al. 1990, 1993), señalan que para que se produzcan inyecciones en filón y cráteres de arena es necesaria una capa de arena de al menos 3 m de potencia. Esta fuente, opina que en cuanto a la edad de los materiales sedimentarios, considera que no se produce licuefacción en materiales anteriores al Pleistoceno y que la probabilidad de licuefacción disminuye mucho por debajo de los 3 m del nivel freático y sólo en condiciones particularmente inestables y con magnitudes mayores que 7,5 se genera licuefacción por debajo de este nivel. También las altas tasas de sedimentación favorecen la licuefacción (sedimentos de grano fino, lacustres y fluviales).

Hasta la fecha algunos especialistas, proponen más métodos para mejorar la resistencia de los suelos a la licuación. Estos métodos tienen correspondencia con los factores que aumentan la vulnerabilidad del suelo ante los esfuerzos ciclicos. Estos son:

a) Explosiones y voladuras. Con un patrón determinado y a una profundidad relacionada con la magnitud del problema, puede inducir licuación limitada y producir densificación del material hasta 40 metros.

b) Vibro-densificación. Es una densificación por vibración que opera por medio de una licuación moderada que produce densificación del depósito.

c) Vibro-compactación. Vibración bajo agua que produce la densificación de material; las aberturas son rellenadas luego con material compactado.

d) Pilotes de compactación. Procede mediante el hincado con vibrración de pilotes de desplazamientos.

e) Compactación dinámica. Mediante una repetida aplicación del impacto de un gran peso dejado caer desde cierta altura con una guía preparada para el efecto.

f) Inyecciones de compactación. Inyecciones de una mezcla gruesa y viscosa de material que produce el desplazamiento y la compactación del depósito.

g) Estribos de sobrecarga. Que consiste en aumentar la resistencia a la licuación aumentando con sobrecarga, la presión efectiva de confinamiento.

h) Drenajes. Drenajes y subdrenajes de grava, gravilla, drenajes tipo WICK y pozos para mantener baja la presión del agua y disipar eventuales excesos.

i) Inyección de elementos químicos. Inyección a presión de elementos químicos cementantes del depósito arenoso grueso.

j) Jet grounting. Que excava, mezcla y rellena materiales adicionales, incluso cementante mediante chorros de agua de alta presión.

k) Pilotes y pantallas preexcavadas. La colocación de pilotes y pantallas a presión o sin ellas rellenas en cemento cal, cal o asfalto reducen el potencial de licuación.

l) Vitrificación in situ. Consiste en la fundición del suelo mediante chorros de fuegos que transforma el material en roca.

m) Vibro-reemplazo. Huecos perforados a golpes, son luego rellenados con grava arena y piedra, con o sin agentes cementantes.

n) Pilotes radicales. A veces llamados banderillas, con diámetros reducidos, perforados e inyectados, pueden reducir el potencial de licuación.

Según Obermeier (1994) y Moretti et al. (1995), coinciden en decir que sismos de magnitud 6 pueden generar estructuras de licuefacción en un radio de 40 km.

Por su parte, Audemard y De Santis (1991), estudiaron estructuras de licuefacción a 25 km del epicentro, para sismos de magnitud 5 a 5,7. Para terremotos de magnitud 7 según Seed (1968) el radio en el que se pueden dar licuefacciones es de 70 km y para sismos de magnitud 8 o superior, el radio pasaría a ser de 100 km (Moretti et al. 1995).

Sin embargo, durante el sismo de 1977 ocurrido en la provincia de San Juan, con magnitud 7,4, se registró licuefacción a distancias de hasta 260 km en línea recta al epicentro. Este fenómeno es un punto de análisis donde se involucran varias condiciones, desde la forma de transmisión de ondas sísmicas, los tipos de suelos, hasta la variación de los niveles

freáticos en las subcuencas que forman el valle en el que se asienta la mayor parte de la población.

En muchos de los terremotos ocurridos, por ejemplo en países como Argentina, se registraron fenómenos de licuefacción, principalmente en planicies fluviales de los valles en los que se ubica la mayor parte de la población y donde las condiciones son ideales para sufrir tales fenómenos.

Algunos de los terremotos con características destructivas en los que se registraron volcanes de arena, grietas y derrames típico efecto durante la ocurrencia de la licuefacción del suelo, se describen a continuación:

- El **Terremoto del 13 de Diciembre de 1692 (Salta)**. Se produce un violento sismo de Ms 7,0 con profundidad hipocentral de 30 km ocasionando derrumbes y agrietamientos en el Valle de Lerma donde estaba la ciudad de Salta, en donde de acuerdo con testimonio de habitante del lugar, "la tierra se abrió en varias partes y lanzó una manga de agua, que inundó todo, no dejando tras sí, sino un montón de ruinas", o bien, que "Esteco se arruinó enteramente con un terremoto que abriendo la tierra por varias partes arrojó borbotones de agua que inundaron todo el terreno".

- El Terremoto de 4 de Julio de 1817 (Santiago del Estero). Se produjo fuerte sismo a una profundidad de 30 km con Ms 7,0 en Santiago del Estero, fenómenos de licuefacción "Informes fidedignos que se han tomado ha causado el terremoto del día 4 del corriente, rige los mas espantosos estragos en la jurisdicción, así al norte de la ciudad se desplomaron las Iglesias, se destruyeron los edificios, se abrieron grietas en la tierra y salió agua, en este pueblo ruinoso en lo material según el quebranto que han sufrido los templos y los conventos sin poderse registrar una casa particular que no haya sufrido algo" (Actas Capitulares de Santiago del Estero, 1817). Hubo destrozos en Tucumán y Jujuy y en los alrededores de la ciudad de Salta, la tierra se abrió arrojando cantidad de agua y arenas de distintos colores (Temple 1920).

- El Terremoto del 18 de Octubre de 1844 (Salta). Se produjo un sismo de Ms 6,5 y 30 km de profundidad. Se produjeron daños en construcciones y se registraron fenómenos de licuefacción "hubieron varios reventones de tierra: de algunas brotó agua, y de otras la tierra interior apareció en la superficie" (Toscano 1901). Según otro relato, "La tierra se entreabrió en varios lugares, expeliendo grandes cantidades de agua y arena" (Diario El Orden 1884). El sismo fue percibido en Tucumán, Catamarca, La Rioja y Santiago del Estero.

- El Terremoto del 20 de Marzo de 1861 (Mendoza). Se produjo un terremoto de Ms 7,2, profundidad de 30 km con epicentro en la ciudad de Mendoza, el que produjo más de 12.000 muertos (Rickard 1863), alrededor a 1.000 heridos y numerosas casas destruidas. La ciudad de Mendoza fue completamente destruida y se registraron fenómenos de licuefacción (INPRES 1995, 2006).

Buena Nueva y Las Ciénagas fueron las zonas más afectadas por la licuefacción, con grandes fisuras y grietas, con eyección de agua y formación de volcanes de arena y derrames. Ponte (1987) describe que durante este terremoto se generó una grieta en la localidad de Borbollón de la que salieron gases y agua con fuerte olor a podrido, conocido como "Los baños del Obispo".

Forbes (1861) describió que después de una violenta detonación y una sacudida general cayeron grandes masas rocosas. A la mañana siguiente observó fisuras y grietas en las colinas montañosas donde enormes masas rocosas rodaron hacia los valles, "algunas laderas han sido fisuradas surgiendo abundante agua".

Bastías et al. (1993) relacionan este sismo con la denominada falla La Cal, ubicada inmediatamente al norte del cerro del mismo nombre. Mingorance (2000ª y 2000b) también reconoció evidencias topográficas de rupturas recientes, al NE de la antigua ruta 7 (ruta provincial 83) y asoció esta falla al terremoto de 1861.

- El Terremoto del 27 de Octubre de 1894 (SA. DE LA PUNILLA, SAN JUAN - LA RIOJA). Se produjo terremoto con una magnitud de 8,2 (Bodenbender 1894) y profundidad de 30 km, teniendo carácter ondulatorio y larga duración. Este evento causó alarma en gran parte de la Argentina y se percibió con distinta intensidad en Chile, sur de Brasil y Perú. Algunas particularidades de este sismo fueron las grandes alteraciones del terreno aún en áreas muy alejadas del epicentro. Se produjeron fenómenos de licuefacción, con agrietamiento del terreno, volcanes de arena y salida de agua en forma de chorros de hasta 2 metros de altura, en los terrenos saturados de agua y sin cohesión

El diario La Unión del día 2 de noviembre de 1894 señala en el departamento Iglesia interesantes fenómenos ocurridos en el departamento Iglesia donde señala arroyos que salieron de sus cauces naturales y formaron lagunas, caída de masas de tierra en los barrancos, generación de grandes grietas de las que surgía el agua. También describe la aparición y desaparición de manantiales y que "en la zona de La Jarilla, camino a Copiapó, se han abierto muchas grietas, zanjas hondas y campos pantanosos, esto es, en el área del río Blanco".

En la ciudad de La Rioja y al sur de Jáchal se registraron chorros de agua y arena que alcanzaron más de un metro de altura. También se registraron en Guandacol y al norte de la sierra de Famatina (Bodenbender 1894).

En las localidades de Angaco y Albardón, por las características de sus suelos, se produjeron fenómenos de licuefacción y roturas en los canales de regadío, con enormes daños en los cultivos. Las enormes grietas con salida de agua se produjeron cerca de los arroyos, ríos y canales de regadío. Se registraron volcanes y cráteres de arena y derrames (Bodenbender 1894).

El epicentro de este terremoto fue localizado en el área norte del sistema de fallamiento El Tigre, en alguno de sus tramos, especialmente asociado a las fallas Leoncito y La Bolsa, aunque no se han podido reconocer rupturas superficiales a pesar de su gran magnitud

- El Terremoto del 12 de Abril de 1899 (JAGÜÉ, LA RIOJA)

En abril de 1899 se produjo un sismo cuya magnitud asignada fue de Ms 6,4 y profundidad de 30 km (INPRES 2006) con epicentro en el oeste de la provincia de La Rioja, poco conocido en el registro histórico de nuestro país a pesar de que su intensidad se reconstruyó en IX (EMM) (INPRES 2006) en las poblaciones más cercanas al área epicentral. El sismo principal se produjo a las 13:10 hs, su duración fue de 90 segundos y fue acompañado de varias réplicas. Fue precedido además por un sismo premonitor a las 16:20 hs. del día anterior, y otro, instantes antes del sismo principal. El terremoto fue percibido en las provincias de La Rioja, Catamarca, San Juan, Córdoba, Tucumán y Santiago del Estero (Fig. 5). Tuvo características destructivas en las localidades de Vinchina y Jagüé, población que quedó completamente destruida y ocasionó daños en numerosas localidades de la provincia de La Rioja. Además de los numerosos deslizamientos de laderas, se describieron grietas en el terreno de las que salían "humo y cenizas" en Vinchina, Jagüé y Hornos.
Según un artículo del diario La Prensa (1899) "no quedó ninguna casa en pie, ninguna muralla, todo se vino al suelo, quedando el pueblo (Jagüé) completamente agrietado como una granada". La cantidad de víctimas probablemente no fue mayor por la hora en que ocurrió el sismo y por la escasa densidad poblacional en la región. Perucca y Navarro (2005) establecen que el terremoto del 12 de abril de 1899 habría tenido su epicentro en el oeste del bolsón de Jagüé, posiblemente relacionado con la falla del mismo nombre, aunque no se han reconocido evidencias de ruptura superficial histórica (Fig. 3).

- Terremoto del 12 de Agosto de 1903 (USPALLATA, MENDOZA)

Se produjo fuerte sismo de Ms 6,3, y profundidad de 70 km que afectó sobre todo la localidad de Las Heras y destruyó viviendas e iglesias. Su epicentro se ubicó en la región de Precordillera, cerca de Uspallata (INPRES 1995, 2006).

La intensidad del sismo fue mayor en Las Heras donde se registró salida de agua. En Canota se formaron grietas y fisuras de las que emanaba agua caliente. En una de ellas el agua era clara, pero en las otras dos, oscura (Diario Los Andes 1903)

- Terremoto del 26 de Julio de 1917 (PANQUEHUA, MENDOZA)

Se produjo violento sismo de Ms 6,5, profundidad de 50 km. Se registraron numerosos grietas y fisuras y volcanes de arena a escasos kilómetros al norte de la ciudad de Mendoza, en Panquehua. Se reportaron fisuras y volcanes de arena en Las Heras en donde el agua surgente desapareció a los 4 días. También se menciona surgencia de agua en lugares conocidos como "ojos de agua" y diques de arena formados por el terremoto. Este sismo fue registrado por el Observatorio de La Plata y por el Servicio Sismológico de Santiago de Chile (Tello 2003) y constituye uno de los primeros antecedentes de registro instrumental en la Argentina.

Bastías et al. (1993) vinculan a la zona de falla del cerro Salinas, en el Sistema de Fallamiento de Precordillera oriental con el epicentro de este sismo, aunque no se han registrado evidencias de ruptura superficial histórica

- El Terremoto del 17 de Diciembre de 1920 (CENTRAL - COSTA DE ARAUJO, MENDOZA)

Se registró un sismo de Ms 6,8 y profundidad de 40 km con epicentro en Costa de Araujo Las localidades más afectadas fueron Costa de Araujo, Colonia Estrella, Lavalle, La Central y Tres Porteñas. También El Borbollón y Jocolí fueron dañadas. Se registró una intensidad VI en Colonia André, IX en Colonia Estrella y X (destrucción total) en Costa Araujo, con 250 víctimas.

En la localidad de La Central, departamento San Martín se generaron numerosas grietas y fisuras, de las cuales emergió agua con arena. La mayor tenía 2,5 m de ancho y 3 m de profundidad (Morey 1938). También se generaron cráteres por los que salía agua y arena en

la localidad de Tres Porteñas Describió abundantes fisuras en Costa de Araujo cerca del río Mendoza, dispuestas paralelamente y con una orientación N-S y anchos entre 0,2 y 0,3 m y numerosos cráteres ubicados en grupos cada 40 o 50 m en el lecho del río, por los que emergía agua y arena.

En la localidad de Lavalle se abrieron numerosas grietas y en algunos lugares, la tierra se elevó formando un círculo convexo de unos 4 o 5 m de ancho por 1 m de alto. Se observaron estas estructuras en un campo cultivado y en el pueblo de Lavalle (Morey 1938).

Durante este terremoto, el agua subterránea rellenó canales de riego e inundó calles complicando el tránsito. A partir de esa fecha, el nivel freático ascendió notablemente en Jocolí, Corralitos, San Martín y Alto Verde y centenares de hectáreas de cultivos quedaron inundadas. La localidad de Alto Verde, caracterizada por sus cultivos de alfalfa, fue invadida por una vegetación de tipo lacustre.

Como consecuencia del terremoto del 17 de diciembre, el nivel freático se elevó en Valle Hermoso y Tres Porteñas.

Por otra parte, algunos pozos artesianos y pantanos se secaron por lo que los agricultores de Corralitos, Buena Nueva, y Rodeo de La Cruz requirieron un mayor volumen de agua de riego. Otro efecto producido por el sismo fue la subsidencia del terreno desde Jocolí hasta Alto Verde y los numerosos daños en las construcciones. Loos (1926) expresó que la depresión del Borbollón rodeada por depósitos eólicos se originó por este terremoto.

- Terremoto del 14 de Abril de 1927 (USPALLATA, MENDOZA)

Este terremoto afectó la parte más moderna de la ciudad capital, colapsaron la casa de gobierno y numerosas escuelas. También fueron dañadas iglesias y la localidad El Resbalón fue completamente destruida con tres víctimas fatales. Fue percibido en San Juan, con

numerosos daños y en La Rioja, Córdoba, y Buenos Aires. Su magnitud fue de Ms 7,1, la intensidad VIII (EMM) y la profundidad 110 km.

Los observadores notaron un incremento de agua caliente en los manantiales de los baños termales de Villavicencio, continuando esta situación hasta el día siguiente (Loos 1928). También se reportaron numerosas fisuras, grietas y cráteres en los que surgía agua en la localidad de Resguardo (Las Heras).

- Terremoto del 30 de Abril de 1929 (VILLA ATUEL - LAS MALVINAS, MENDOZA)

Este terremoto, de magnitud Ms 6,5 y profundidad 40 km, afectó las provincias de Mendoza, San Juan, San Luis, NO de Córdoba, sur de Santa Fe, centro- oeste de Buenos Aires, La Pampa y Neuquén; causando 40 muertos y numerosos heridos. Se destruyeron numerosas viviendas y cuantiosos daños en bodegas. El ferrocarril Pacífico resultó afectado en numerosos tramos, con deformaciones de vías, roturas de bulones y hundimientos (hasta 75 cm). Lünkenheimer (1929) describió numerosos cráteres de los que surgía agua caliente (18°C) en Villa Atuel. Este autor mencionó que la licuefacción se vio favorecida por la presencia de loess y un nivel freático a sólo 95 cm de profundidad.

Las fisuras y grietas se generaron a lo largo y paralelamente a las paredes de las casas, canales de regadío y dunas.

Si bien este sismo ha sido asociado a la falla Las Malvinas, localizada en el borde oriental del Bloque de San Rafael (Fig. 5), con una longitud de 68 km y rumbo N25º O (Cisneros y Bastias 1993), no se han encontrado evidencias de rupturas asociadas a dicho evento sísmico.

- El Terremoto del 24 de Diciembre de 1930 (SALTA)

Se produjo violento sismo de Ms 6,0 en la localidad de La Poma a una profundidad de 30 km.

El pueblo fue completamente destruido, quedando en pie la iglesia y algunos edificios en muy mal estado. Se registraron más de cuarenta muertos y numerosos heridos. El diario La Opinión (1930) describe la formación de "grietas que lanzaban agua hirviendo y que paulatinamente se fueron cerrando".

- El Terremoto del 15 de Enero de 1944 (ALBARDÓN, SAN JUAN)

Se produjo un sismo que duró 15 o 20 segundos destruyendo la ciudad de San Juan casi completamente. Alcanzó una magnitud Ms 7,4, y profundidad de 30 km. La zona de máxima intensidad fue comparativamente reducida y abarcó aproximadamente 200 km2. El epicentro fue ubicado a 20 km al norte de la ciudad, en la localidad de La Laja y el sismo fue percibido en las ciudades de Córdoba y Buenos Aires.

En comparación con los otros grandes sismos ocurridos en la provincia de San Juan (27 de octubre de 1894 y 23 de noviembre de 1977), este sismo fue de relativamente corta duración y de menor área total de percepción del fenómeno. El área de mayor destrucción durante el terremoto se localizó en la ciudad de San Juan, especialmente en el norte y en el departamento Albardón y aledaños.

Aproximadamente el 80% de los edificios construidos mayoritariamente con barro y paja mediante el empleo de adobes, materiales que se usaban desde la colonia, fueron destruidos. Murieron entre 6.000 y 10.000 personas y hubo un número elevadísimo de heridos, sumándose una marcada recesión económico - social (INPRES 1993).

En la falla La Laja, Harrington (1944) midió luego del sismo un desplazamiento vertical máximo de 22 cm y uno horizontal de 25 cm. Castellanos (1945), observó un movimiento de 0,30 m luego del sismo, que creció a 0,60 m en los meses subsiguientes. Notó además, que el sismo había sido más violento en Albardón que en la capital de San Juan, ya que se

destruyeron incluso algunas casas construidas con ladrillos, y las veredas y calles quedaron onduladas.

Durante el terremoto de 1944 se registraron numerosos fenómenos de licuefacción, con la surgencia de aguas y la formación de volcanes de arena, no sólo en el departamento Albardón sino también en localidades vecinas. En las canteras de travertino ubicadas unos 5 km al norte de los baños, el sismo fue de gran intensidad y los efectos de considerable importancia, las casas construidas con bloques de travertino orientadas de norte a sur se cayeron y de las salas de máquinas cortadoras saltaron numerosas piezas. Se originaron grietas de las que surgió un agua sulfurosa y termal (Castellanos 1945).

En la quebrada de Ullum Castellanos (1945) menciona la caída de rocas y deslizamientos y en las localidades de Zonda y Ullum en donde se originaron hundimientos de áreas cultivadas y formación de grietas con escapes de agua y arena.

Perucca y Paredes (2003) describen fallas inversas subparalelas, con un rumbo promedio N 40º E, en general coincidentes con la estratificación de sedimentitas neógenas que inclinan entre 30º y 45º al este y que afectan distintos niveles de conos aluviales, terrazas y travertinos de edad cuaternaria (Fig. 3). La longitud de los distintos tramos de falla varía entre 6 y 8 km.

- El Terremoto del 25 de Agosto de 1948 (ANTA, SALTA)

Ocurrió un violento terremoto con epicentro en la localidad de Anta, a las 6 hs y a una profundidad de 50 km. La magnitud fue de Ms 7,0 y su intensidad máxima IX (EMM) (Figs. 4 y 5) (INPRES 2006).

En Anta, casi todas las casas del pueblo se vieron afectadas por el sismo, algunas derrumbadas y otras a punto de caer, sin víctimas. En los alrededores de la población, como una muestra de lo violento que fue el fenómeno en esa zona, la tierra presentaba grietas profundas.

También se registraron fenómenos de licuefacción en las localidades de Santa Rita y Las Pavas, donde a consecuencia del fenómeno, "se abrieron grietas en la tierra, vertiendo agua en cantidad" (Diario El Intransigente 1948).

Se observaron también, grietas en los caminos que "desprendían un barro colorado" (Diario La Nación 1948).

- El Terremoto del 17 de Diciembre de 1949 (LAGO FAGNANO - TIERRA DEL FUEGO)

Se produjo un fuerte terremoto a las 6:53 hs. con una magnitud Ms 7,8 e intensidad VII (EMM) y luego de varias réplicas se registró un nuevo sismo de igual magnitud alrededor de las 12 hs. (Figs. 4 y 5) (Schwartz et al. 2001, 2002, INPRES 2006), que provocó hundimientos en la costa del lago Fagnano y generó en su margen oriental una barrera de grava que cerró una laguna de hundimiento formada por olas de origen sísmico (seiches). El faro del cabo San Pablo se inclinó 15° respecto de su posición original. El sismo fue percibido por los habitantes de Ushuaia donde se registró una víctima fatal y se produjo la rotura del muelle y daños de menor importancia, y también en Río Grande. Fue percibido además en Río Gallegos y San Julián, al sur de la provincia de Santa Cruz. Según el INPRÉS (2006), los diarios La Prensa y La Nación mencionaron mayores daños en la población de Punta Arenas (Chile) con derrumbes de viviendas y agrietamientos, además de una fuerte marejada que arrojó las embarcaciones contra la playa; que en Ushuaia. Fue muy probable la ocurrencia de fenómenos de licuefacción en la zona de turbales en Ushuaia y en planicies costeras fangosas en el área de Río Grande, consideradas actualmente áreas muy susceptibles a sufrir licuefacción (Isla y Bujalesky 2004).

Schwartz et al. (2002) describen el relato de un poblador de la zona en el que menciona la formación de una escarpa de un metro de altura coincidente con el trazo de la falla, que interrumpió el tránsito de vehículos en un camino ubicado en la orilla oriental del lago Fagnano.

- Terremoto del 10 de Junio de 1952 (POCITO, SAN JUAN)

Se produjo un sismo de magnitud Ms 7,0, y profundidad 30 km. Su epicentro se ubicó al sudoeste de la ciudad capital y las zonas más afectadas fueron los departamentos de Zonda, Pocito y Ullum.

Hubo algunos heridos y escasas víctimas fatales. Los daños más serios en las construcciones se produjeron en las localidades del Abanico, Villa Aberastain, La Rinconada, Pocito, Carpintería y Zonda.

En el Abanico se destruyeron unas 200 viviendas no sismorresistentes y la intensidad fue de VIII en la escala Mercalli Modificada.

En la ciudad, los daños fueron menores y la intensidad fue de VI MM. También se registraron grietas y fisuras en numerosos terrenos cultivados, con salida de agua en Zonda y derrumbes en el cerro Blanco, que interrumpieron el tránsito.

El sismo fue percibido en una extensa región que abarcó parte de Chile y las provincias de Córdoba, Santa Fe y Buenos Aires. El epicentro de este sismo se ha ubicado en la localidad de La Rinconada, asociado a las fallas modernas del sistema de fallamiento de Precordillera Oriental - tramo Rinconada, aunque no se han encontrado evidencias de ruptura superficial durante este evento (Tello y Perucca 1993). Sin embargo, Groeber (1944) menciona la existencia de un antiguo camino para carros, en el cual se habría formado un escalón durante un evento sísmico anterior a 1944.

La falla Rinconada se localiza en el borde oriental de la sierra Chica de Zonda y posee una longitud aproximada de 30 km (Bastias 1986), con un rumbo submeridianal e inclinación entre 20º y 40º al este (Fig. 3). Las fallas afectan superficies aluviales de edad pleistocena-holocena y terrazas holocenas y su trazo es ligeramente curvo y cóncavo al oeste (Tello y Perucca 1993, Martos 1987, 1993, 1999, Perucca y Paredes 2004).

- Terremoto del 23 de Noviembre de 1977 (CAUCETE, SAN JUAN)

Se produjo un terremoto de larga duración que afectó la región centro-oeste de la Argentina y se percibió en gran parte del territorio, en el centro de Chile y hasta en el sur de Brasil (Figs. 4 y 5). Este terremoto se generó por un mecanismo denominado de evento múltiple, ya que ocurrieron dos terremotos, el primero disparador del segundo. El primer sismo se produjo a las 6:26 hs.; su magnitud fue Ms 6,6 y su epicentro se ubicó al noreste de la sierra de Pie de Palo, a una profundidad de 17 km. Veintiún segundos más tarde se produjo el terremoto principal de magnitud Ms 7, intensidad IX (MM) y epicentro en el extremo sudeste de la sierra de Pie de Palo a una profundidad de 25 km

El terremoto de 1977 produjo 65 víctimas fatales y más de 300 heridos. Las zonas más afectadas fueron los departamento que rodean a la ciudad de San Juan, en el valle del Tulum (Caucete, 25 de mayo, 9 de Julio, San Martín, Angaco, Santa Lucía Rawson, Sarmiento y Pocito). Los mayores daños se produjeron en las construcciones de adobe. Al igual que en los sismos anteriores, se produjeron fenómenos de licuefacción de suelo, al este del valle del Tulum y valle del río Bermejo. Se originaron cráteres y volcanes de arena,

derrames laterales y violentas salidas de agua con hasta tres metros de altura. La red vial fue enormemente afectada, al igual que la red de riego y drenaje y la infraestructura ferroviaria. Por la licuefacción se produjeron numerosos daños en las líneas de transmisión de energía, redes de distribución de agua potable, perforaciones para riego (INPRES 1977, 1993). También hubo daños en numerosas obras civiles aún no inauguradas, como barrios y escuelas.

El terremoto de 1977 se asocia al sistema de fallamiento Ampacama-Niquizanga, durante el cual se produjo ruptura superficial y un desplazamiento vertical promedio de 30 cm, según un relevamiento geodésico efectuado en 1982 (Bastias 1986).

2.8.1- Métodos de mejora de terrenos potencialmente licuables

Según **Carlos Henríquez** *en su estudio Mejora de Terrenos Potencialmente Licuables con Inyecciones de Compactación*, la mejora de los suelos licuables se divide en dos grupos:

a) Los métodos aplicables a obras nuevas, es decir, métodos realizados antes de la ejecución de un determinado proyecto.

b) Los métodos aplicables a obras existentes, con los cuales se modifica las condiciones existentes del terreno, en la estructura o en su cimentación.

Con todo lo anterior, la mitigación del fenómeno de licuación es clasificada en dos categorías de medidas:

a) Medidas orientadas a prevenir el fenómeno como tal. Algunas de estas ya mencionadas en el presente acápite.

b) Medidas orientadas a contrarrestar sus consecuencias. Esta medida permite la operatividad de una obra de ingeniería a pesar de las deformaciones del terreno a causa de la licuación. Muchos de los métodos de refuerzos (preferiblemente flexibles) están en función del tipo de obra civil a fin de reducir los daños en estructuras enterradas.

2.8.1.1. - Métodos orientados a obras nuevas

a) Vibroflotación

Consiste en un método de mejora basado en la densificación del terreno, en la cual un vibrador es introducido al terreno, penetrando hasta la profundidad requerida, por peso propio y las vibraciones, y de ser necesario, es ayudado por agua a presión lanzada por la punta, aseguró **Hernández (2007)**. Expresó, que las vibraciones producidas por el aparato se transmiten al suelo provocando un movimiento vibratorio, principalmente horizontal, de frecuencia igual a la del vibrador y de amplitud variable con la potencia y distancia del mismo. (**Figura 26**)

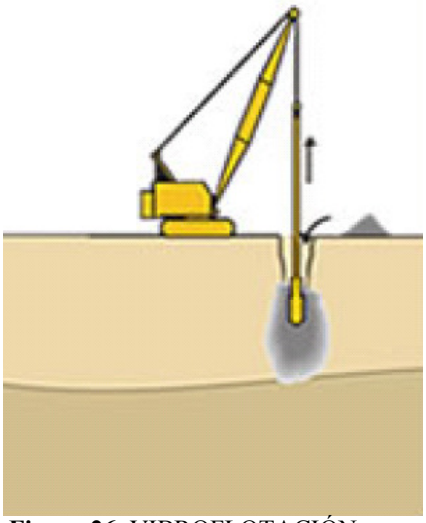


Figura 26. VIBROFLOTACIÓN
Fuente: Hernández (2007)

De acuerdo con **Hernández (2007)**, la compactación produce la formación de un embudo en la superficie del terreno (**Figura 27**), que se rellena con material procedente del propio terreno o de aportación externa.

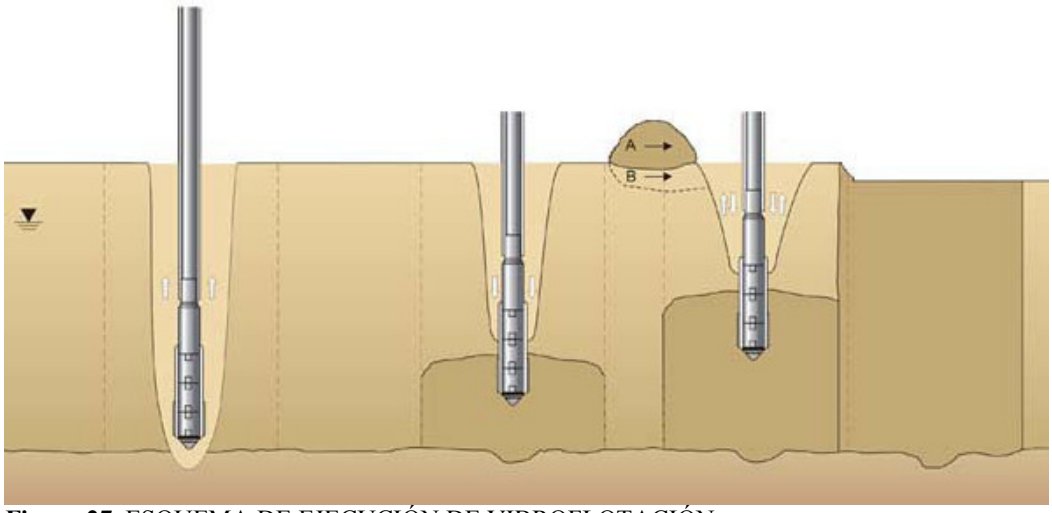


Figura 27. ESQUEMA DE EJECUCIÓN DE VIBROFLOTACIÓN. **Fuente: Hernández (2007)**

b) Vibrosustitución

Es un método de mejora mediante densificación y refuerzo del terreno, con un proceso constructivo similar al de la vibroflotación, en la que se recurre a la construcción de columnas de grava o arena para mejorarlos dando lugar a una verdadera sustitución del contenidos fino por material granular en los puntos de aplicación. (**Figura 22**)

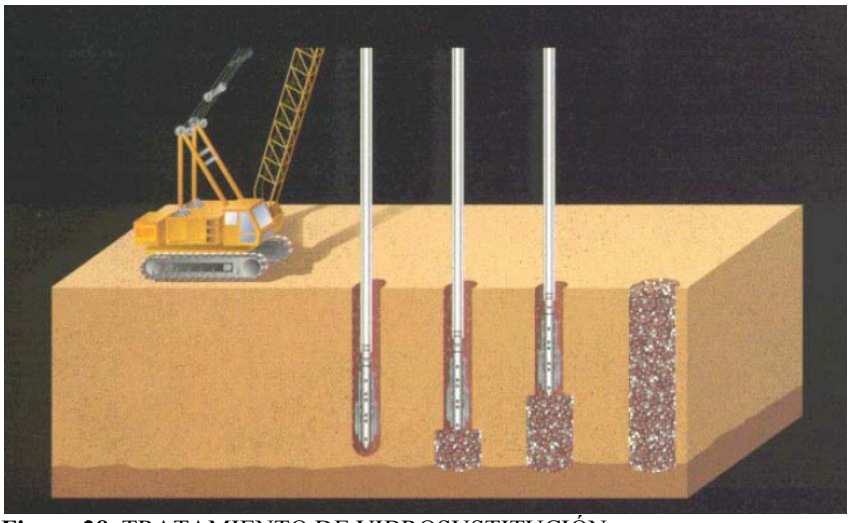


Figura 28. TRATAMIENTO DE VIBROSUSTITUCIÓN. **Fuente: Hernández (2007)**

El esquema de ejecución de este tipo de tratamiento y sus pasos de ejecución se ilustra en la **Figura 23**.

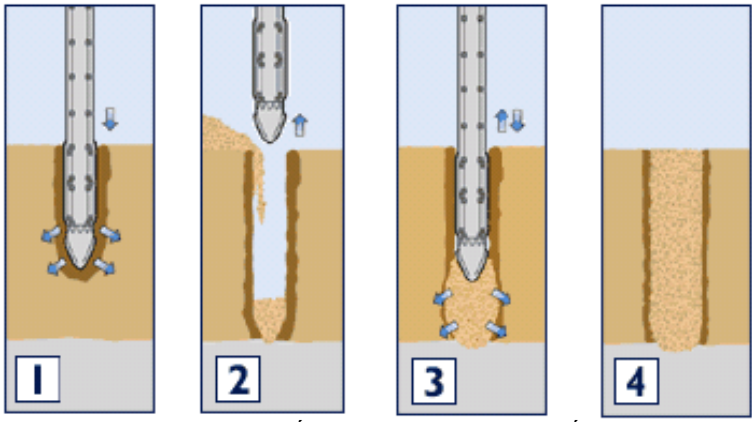


Figura 29. ESQUEMA DE EJECUCIÓN DE VIBROFLOTACIÓN **1)** PENETRACIÓN DEL VIBRADOR POR PESO PROPIO, LAS VIBRACIONES Y ALGUNOS CASOS AYUDADO POR UNA LANZA DE AGUA O AIRE. **2)** ALIMENTACIÓN DEL MATERIAL GRANULAR. **3)** COMPACTACIÓN MEDIANTE VIBRACIÓN DEL MATERIAL GRANULAR, LEVANTANDO Y REINTRODUCIENDO EL VIBRADOR. **4)** EJECUCIÓN DE LA COLUMNA COMPLETA. **Fuente: Hernández (2007**

La profundidad del tratamiento que se puede alcanzar con este método es de hasta 30 m, sin embargo no existiría riesgo de licuación por debajo de los 20m de profundidad.

c) Compactación dinámica clásica (CDC)

Consiste en la densificación provocada por la aplicación repetida, en puntos convenientemente espaciados de la superficie del mismo, de impactos de gran energía. (**Foto 30**)

Foto 30. COMPACTACIÓN DINÁMICA CLÁSICA.
Fuente: Hernández (2007

En esta técnica, grandes pesos (10 a 20 ton) al caer desde alturas elevadas (15 a 30 m), compactan el terreno hasta que después de un cierto número de impactos, no se obtiene ninguna disminución de volumen, pues la elevación de la presión intersticial hace que el suelo se

comporte como un líquido (se produce licuación). Se detiene el trabajo hasta la disipación del exceso de presión intersticial, y a continuación, se efectúa una nueva pasada.

d) Compactación rápida por impactos o compactación dinámica rápida (CDR)

Tiene similares características operativas que el método antes descrito. Esta únicamente difiere en que se utiliza una pesa de 7 t la cual se levanta con un sistema hidráulico hasta una altura de 1.2 m y a continuación se deja caer sobre una zapata de acero especialmente diseñada, de 1.5 m de diámetro, con una frecuencia de hasta 50 golpes por minuto. Normalmente, en cada fase se aplican unos 40 a 60 golpes en cada uno de los puntos de compactación, los cuales se distribuyen según mallas triangulares o cuadradas, de 1.5 a 2 m de lado. (**Foto 31**)

Foto 31. COMPACTACIÓN DINÁMICA RÁPIDA
Fuente: Hernández (2007)

Las profundidades máximas alcanzadas con este tipo de tratamiento varían entre 3 y 5 m, dependiendo de las características del terreno. Debido a la menor energía de golpeo que utiliza, la CDR produce un impacto medioambiental, en términos de ruido y de vibraciones, bastante inferior al de la CDC, aseguró **Hernández (2007)**. Afirmó, que esto genera menos molestias a las personas y permite realizar trabajos de compactación más próximos a estructuras existentes, sin correr el riesgo de afectarlas.

e) Deep Mixing

Consiste en mezclar mecánicamente (vía húmedo/seco, rotatorio/jet, hélice/paleta) con algún tipo de aditivo químico (agente estabilizante, por ejemplo, cemento, cal y posibles aditivos, como yesos y cenizas volantes que reacciona con el terreno a fin de incrementar la resistencia y reducir la deformabilidad, impidiendo la ocurrencia de licuación. Por otro lado, este tratamiento confiere al terreno una cohesión (entre 0.05 y 2.5 Mpa), que en muchos casos es capaz de resistir, por si sola, las acciones sísmicas externas. Con esta técnica se pueden alcanzar profundidades de hasta 30 m. (**Figura 30 y 31**)

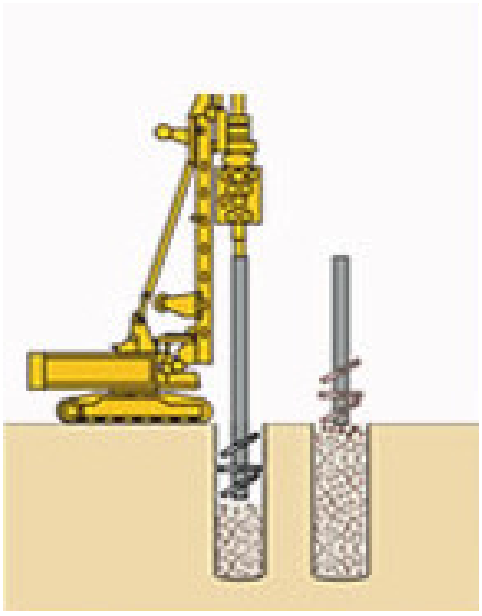


Figura 30. DEEP MIXING
Fuente: Hernández (2007

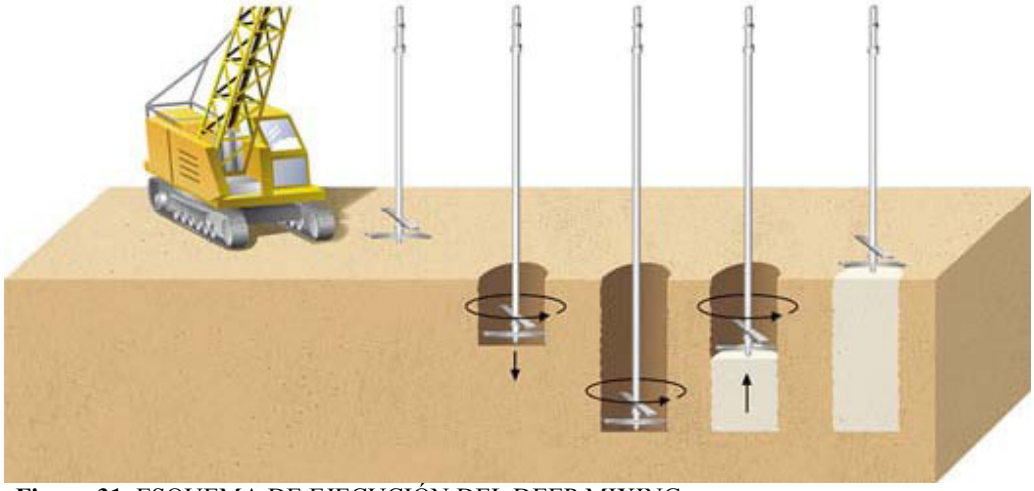


Figura 31. ESQUEMA DE EJECUCIÓN DEL DEEP MIXING.
Fuente: Hernández (2007

f) Reemplazo

Consiste en minimizar el riesgo de licuación mediante la excavación del estrato susceptible a licuar (**Figura 26**) y reemplazarlo por un material que no sea susceptible o fácilmente compactable

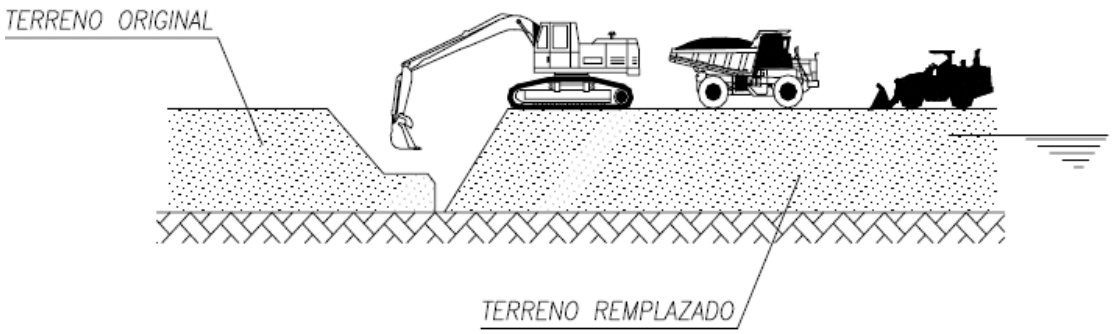


Figura 32. MÉTODO DE REEMPLAZO
Fuente: Hernández (2007

Atendiendo a los altos costos que significa, en general sólo resulta recomendable, en el tratamiento de superficies relativamente pequeñas, en depósitos de poco espesor y cerca de la superficie, apuntó **Hernández (2007).**

g) Método de premezclado

Consiste en el proceso de premezclado de un terreno granular (preferiblemente arenas) con una pequeña cantidad de algún agente estabilizante (cemento o solución química) para garantizar un material con comportamiento adecuado ante las acciones sísmicas y a su vez sobre el fenómeno de la licuación (**Figura 33**)

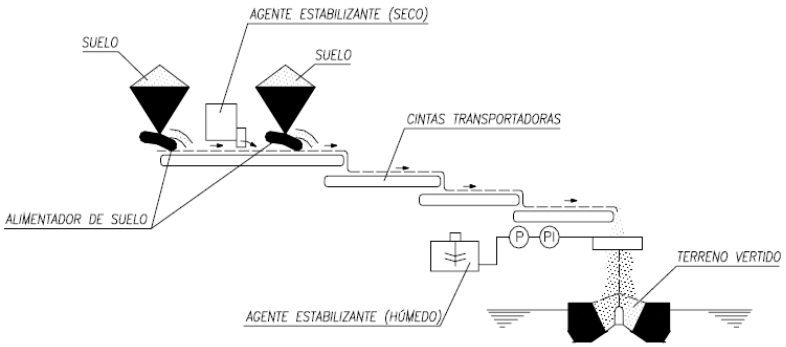


Figura 33. MÉTODO DE PREMEZCLADO
Fuente: Hernández (2007

Según **Hernández (2007)**, este método tiene las siguientes ventajas:

1- El material una vez vertido no necesita otro tipo de mejora del terreno.
2- Se puede utilizar un vertido directo y a gran escala, es decir, tiene grandes rendimientos.
3- La resistencia esperada del terreno tratado es fácilmente lograda.
4- Además de incrementar la resistencia a la licuación, reduce el empuje del terreno esperado, pudiéndose utilizar mecanismos de contención más simples.
5- No tiene problema de ruido, ni vibraciones.

Dentro de las desventajas se pueden mencionar:

1- La resistencia esperada varía con el tipo de terreno.
2- Los agentes estabilizantes encarecen el tratamiento.
3- Debe considerarse la influencia del agente estabilizador sobre la calidad del agua en el sub-suelo.

h) Rebajamiento del nivel freático

Los efectos de mejora se basan en los siguientes tres factores:

1- El estrato de suelo susceptible a licuar localizado por encima de nivel freático rebajado estará en estado semi-saturado y consecuentemente no licuará.

2- Se producirá un incremento en la tensión de confinamiento, lo cual llevará asociado un incremento en la resistencia al cortante cíclico.

3- El espesor del estrato no licuable bajo la superficie del terreno se incrementa, en consecuencia se reducirá la influencia del estrato potencialmente licuable sobre el o los estratos de suelo superiores.

i) Disipación inmediata del exceso de presión intersticial

A través de la instalación de drenes artificiales o de grava en depósitos de arena, con el objetivo de disipar el exceso de presión intersticial inducido por acción sísmica. (**Figura 28**)

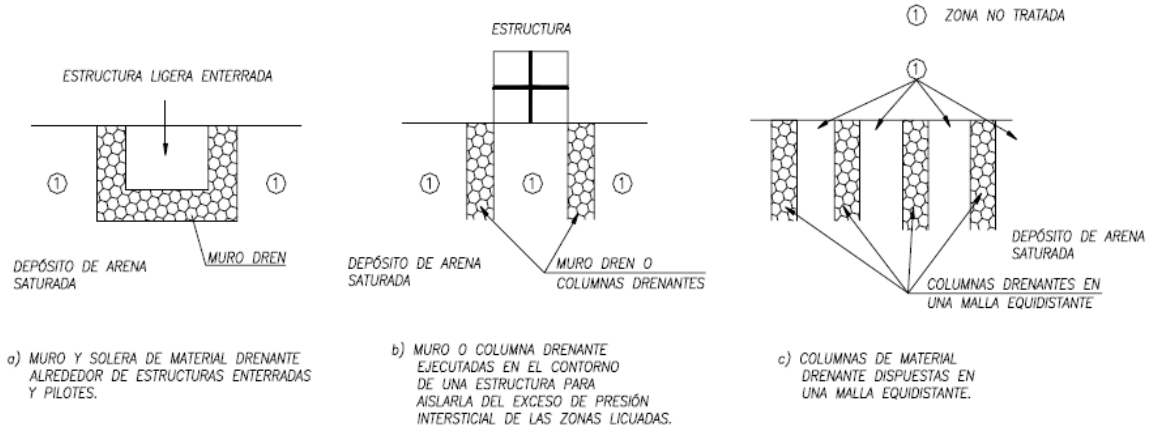


Figura 34. DISIPACIÓN DE LA PRESIÓN INTERSTICIAL
Fuente: Hernández (2007

El método de disipación puede ser dividido en dos grupos, de acuerdo al tipo de material utilizado como dren; métodos con drenes de grava y métodos con drenes artificiales.

J) Explosivos

En algunas ocasiones se han empleado para compactar materiales arenosos. Tiene la ventaja de poder densificar áreas grandes en un corto periodo de tiempo, pero presenta la desventaja de la falta de control en el proceso ejecución del mismo, debido a la gran erraticidad de los resultados que suelen obtenerse, además de generar problemas ambientales (mucho ruido y vibraciones), expresó **Hernández (2007)**

k) Inclusiones rígidas hincadas

Los terrenos granulares pueden ser mejorados por la ejecución de inclusiones rígidas (**Foto 32**), por ejemplo, pilotes de hormigón prefabricado hincados en el terreno que incrementa la resistencia a la licuación, dispuestos en una malla. Finalmente, esta técnica se puede ser económicamente viable hasta una profundidad de 20 m, expresó **Hernández (2007)**

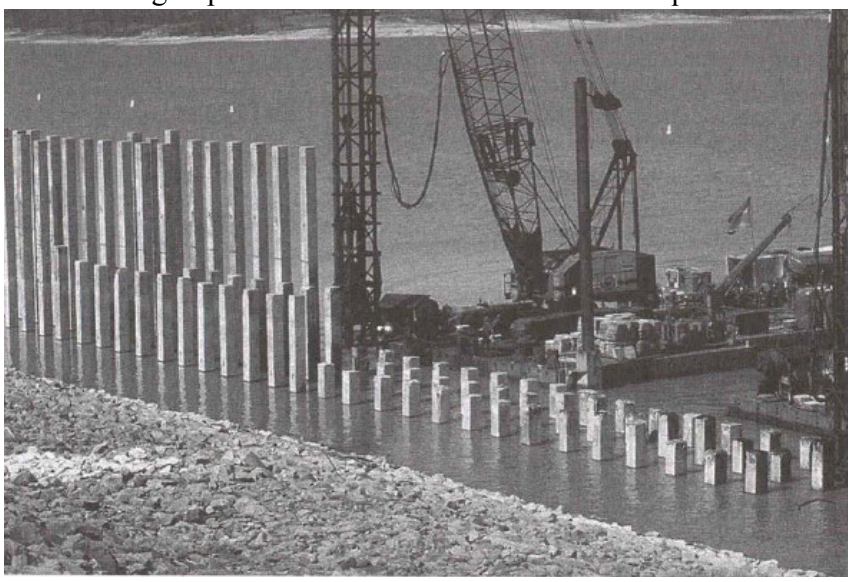


Foto 32. HINCA DE PILOTES EN UN ARREGLO RETICULAR
Fuente: Hernández (2007

l) Refuerzo de las estructuras

Consiste en tomar medidas, durante las fases de diseño y ejecución de proyectos, de tal manera que garanticen el funcionamiento de una determinada estructura (**Figura 29)** al producirse el fenómeno de licuación, aseveró **Hernández (2007)**

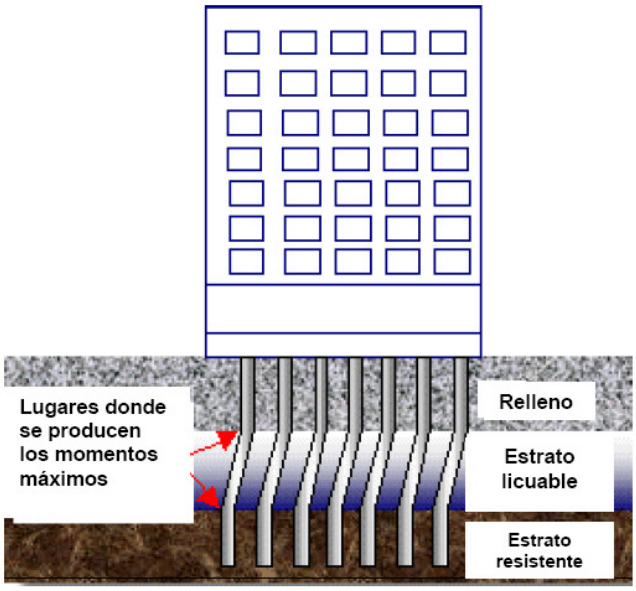


Figura 35. PILOTES FLEXIONADOS POR LA LICUACIÓN
Fuente: Hernández (2007

2.8.1.2. - Métodos orientados a obras existentes

a) Recalce con micropilotes

Hernández (2007), dice que un micropilote es un elemento cilíndrico, con un diámetro inferior a 300 mm, perforado "in situ", armado con tubería de acero, reforzada a veces con uno o varios redondos, e inyectado con lechada o mortero de cemento en una o varias fases.

Esta fuente, opina que los micropilotes son capaces de transmitir los esfuerzos al terreno mejorando su funcionalidad. En el tratamiento de suelos potencialmente licuables, los micropilotes se han utilizado como técnica de recalce, en la cual las cargas de una determinada estructura son transmitidas a capas más profundas del terreno con mejores características, atravesando los estratos susceptibles a licuar (**Figura 36**)

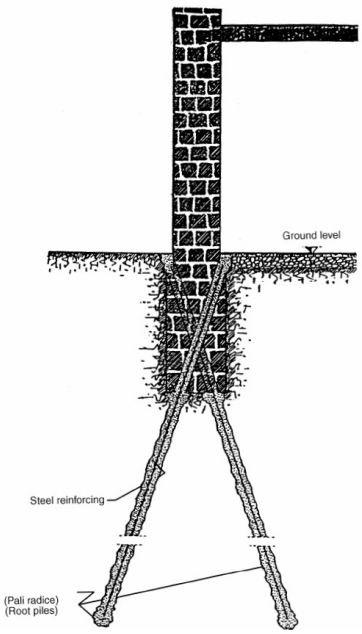


Figura 36. RECALCE DE MICROPILOTES
Fuente: Hernández (2007

b) Inyecciones de impregnación

Consiste en la inyección de un fluido al interior del terreno (**Figura 37**) sin modificar o alterar la estructura del suelo a fin de reducir la permeabilidad e incrementar la resistencia y la deformabilidad del terreno

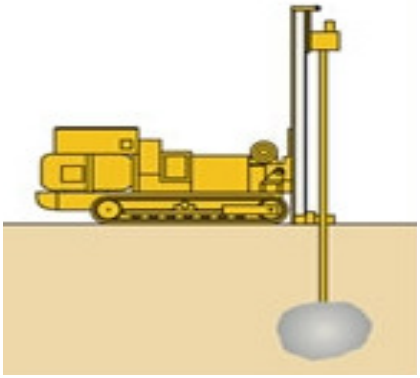


Figura 37. INYECCIÓN DE IMPREGNACIÓN

Fuente: Hernández (2007

Este método está restringido a arenas y gravas limpias u otro tipo de terrenos porosos que puedan ser penetrados por las inyecciones poco viscosas. Se puede estimar que el volumen aproximado inyectado estará entre 10-25% del volumen total del terreno a tratar, expresó **Hernández (2007)**

Los agentes utilizados en este tipo de tratamientos, pueden consistir en suspensiones convencionales como cemento Pórtland, microcemento, cenizas volantes, arcilla y agua o soluciones químicas como son los silicatos sódicos, acrilaminas, lignosulfatos y resinas, explicó **Hernández (2007)**

c) Inyecciones de fracturación

Consiste en la hidro-fracturación deliberada del terreno mediante la inyección bajo presión a fin de colmatar con la mezcla inyectada las fisuras así creadas, junto a los posibles huecos y fisuras naturales existentes. El resultado final, es un terreno armado e impermeabilizado por la red de fisuras rellenas con la mezcla inyectada, así como consolidado, en cierto grado, por lo pequeños desplazamientos del proceso de hidro-fracturación (**Figura 38**)

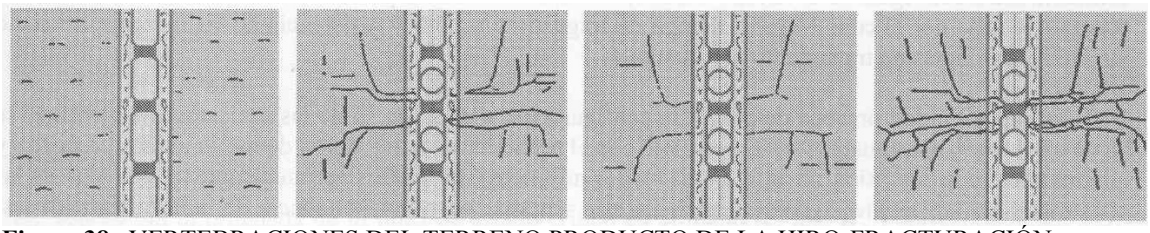


Figura 38. VERTEBRACIONES DEL TERRENO PRODUCTO DE LA HIRO-FRACTURACIÓN.

Fuente: Hernández (2007

Las inyecciones de fracturación se pueden utilizar como método de refuerzo de terrenos potencialmente licuables. La lechada o soluciones químicas inyectadas forman una vertebración de inclusiones fraguadas y endurecidas que arman el terreno, aumentando la estabilidad de la estructura interna del terreno, su resistencia y disminuyendo su deformabilidad, por lo tanto, evitando la generación de presión intersticial por la acción cíclica sísmica. Al mismo tiempo, el tratamiento sirve de barrera, confina el terreno bajo la cimentación y evita la propagación de sobre presiones intersticiales desde zonas licuadas circundantes.

d) Jet Grouting

Consiste en la disgregación del terreno con alta energía en sentido generalmente ascendente y la mezcla con una lechada de cemento, con el fin de crear de una forma controlada columnas seudo cilíndricas de suelo-cemento. Aunque estas columnas vienen en ocasiones reforzadas por armaduras de acero situadas en su eje, lo habitual es que estén compuestas únicamente por la mezcla del suelo, previamente disgregado, con la lechada de cemento. (**Figura 33**)

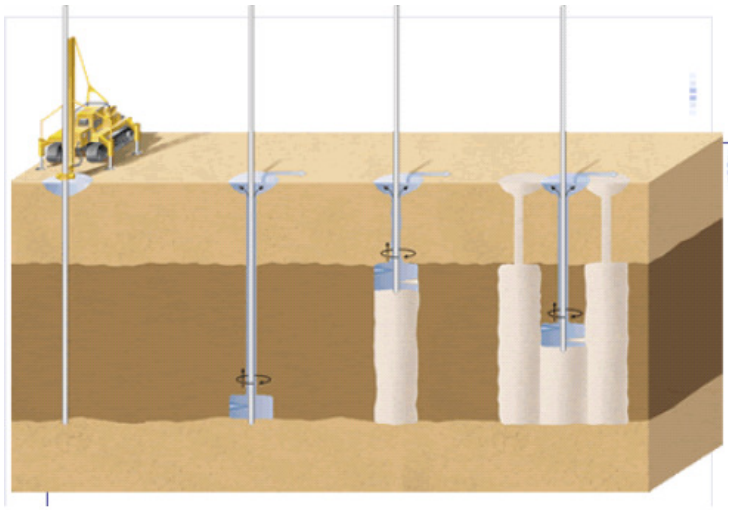


Figura 39. JET GROUTING

Fuente: Hernández (2007

Esta técnica ha sido usada ampliamente para recalces de estructuras, contención de excavaciones, control de redes de flujo en el terreno y refuerzo del terreno.

e) Inyecciones de compactación

Consiste en la inyección de un mortero seco (**Figura 40**), de baja movilidad, que al ser inyectado se expande como una masa homogénea desplazando y compactando el terreno circundante. Este método ha sido utilizado exitosamente para la compensación de asientos y en densificación de terrenos. Esta técnica es aplicable a terrenos granulares (donde se encuentran los terrenos potencialmente licuables), pero no es apropiada para terrenos cohesivos saturados y es marginalmente efectiva en limos. El mortero esta formado por arenas limosas, cemento, cenizas volantes y agua.

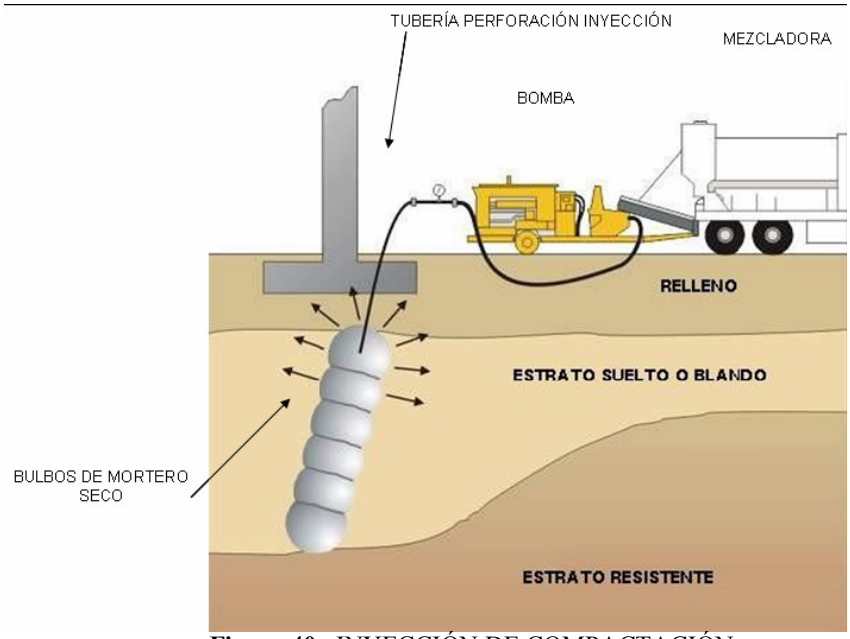


Figura 40. INYECCIÓN DE COMPACTACIÓN

Fuente: Hernández (2007

Las inyecciones de compactación son las más adecuadas para evitar y contrarrestar el fenómeno de la licuación y los efectos asociados a ella en obras existentes, por los siguientes motivos:

a) Están basadas en la densificación del terreno, a través de la inyección. De esta manera engloban las características propias de los métodos de densificación e inyección.

b) Sirven al mismo tiempo de recalce a la estructura en cuestión.
c) Su costo es bajo en relación a otras técnicas similares.
d) Su ejecución es sencilla.
e) Los resultados obtenidos en terreno granulares saturados han sido satisfactorios.
f) Se pueden realizar en condiciones de gálibo limitado.
g) No tiene efectos ambientales.
h) Son de fácil supervisión y control, entre otros aspectos.

Las aplicaciones de las inyecciones de compactación son:

a) Mejora del terreno en suelos sueltos y/o colapsables, con valores de NSPT típicos de 0 a 15-20 golpes.
b) Compensar asientos.
c) Mitigar el potencial de licuación, mediante aplicaciones pre o post constructivas.
d) Reparación de pilotes anómalos.
e) Micropilotes formados por bulbos de mortero compactado como elementos estructurales en recalces.

Algunas ventajas de la técnica de inyección de compactación son:

a) Es una técnica muy flexible, tiene unas posibilidades de aplicación ilimitadas, porque sus principios trabajan acorde con las leyes de la física, mecánica de suelos y otras leyes mecánicas simples.
b) No es una técnica destructiva, por lo general no hay excavaciones y el acceso limitado no es un problema.
c) Con la tecnología existente actualmente se puede llevar un control en todos los elementos involucrados y las fases de inyección.
d) La perforación y la inyección puede realizarse con el mismo equipo.
e) Utiliza el desplazamiento del terreno mismo para producir la mejora.
f) Las propiedades reológicas del mortero proporcionan un índice de la movilidad de la mezcla.

g) Los componentes de la mezcla son materiales comunes, cuyas propiedades son bien conocidas.

- Criterios de cese de inyección fácil de controlar:
- Presión (dada y conocida la velocidad de inyección).
- Volumen.
- Movimientos indeseados.

h) Los requerimientos laborales son mínimos, usualmente un grupo de 3 a 5 personas por punto de inyección.

Por otra parte, algunas ventajas de la técnica de inyección de compactación son:

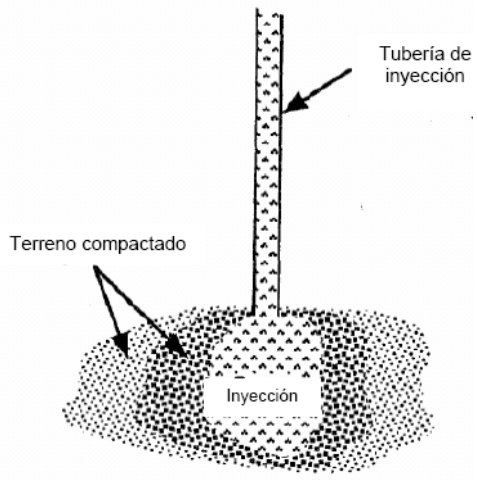
a) Para realizar el tratamiento con efectividad requiere tensiones de confinamiento mínimas del orden de 3 ton/m2, ya sea por sobrecargas de tierra o que exista en la superficie algún elemento estructural que la transmita sobre el cual se pueda hacer reacción.

b) La flexibilidad de los procedimientos de inyección hace difícil la especificación estricta del tratamiento.

c) La empresa ejecutora debe tener más que "experiencia", es decir, debe estar especializada en las aplicaciones y los problemas que se puedan presentar, además de disponer de un personal de campo bien equipado y entrenado.

d) El tratamiento requiere una coordinación entre los siguientes aspectos: propiedades del suelo, velocidad de inyección, diseños de mezcla, condiciones del suelo "in-situ", equipos. Un fallo en la coordinación de estos aspectos puede provocar retrasos, costos adicionales y hasta el fracaso del proyecto.

Generalmente, las inyecciones de compactación constituyen una técnica muy económica y flexible, que permite la mejora de terrenos



potencialmente licuables a partir de una inyección de un mortero seco a presión.

Esta técnica se puede describir como la inyección lenta (60 litros por minuto o menos) de un mortero seco, con asiento en el cono de Abrams (revenimiento) menor a 5 cm, provisto de una gran fricción interna, el cual al ser inyectado se mantiene como una masa homogénea expansiva, por lo que desplaza y compacta la masa de suelo circundante. (**Figura 41**)

Figura 41. COMPACTACIÓN DEL TERRENO

Fuente: Hernández (2007

Mediante la combinación de las características de la técnica de recalce, con las propias del sistema de inyección, hacen de las inyecciones de compactación una técnica fiable, eficaz, económica y sobre todo aplicable a escenarios variados, incluyendo la mitigación del peligro de licuación bajo obras y estructuras existentes.

Por tanto, a la hora de seleccionar un método de mitigación apropiado, el ingeniero geotécnico debe tomar en cuenta los costos, factores de ejecución, el tipo de estructura, condiciones del terreno, efectos ambientales, fiabilidad, facilidad de supervisión y además los aspectos propios de cada tipo de actuación.

2.8.2. – Estudio de Caso: Refinería Lázaro Cárdenas de Río, en Minatitlán (Estado de Veracruz), México.

Las instalaciones de la refinería (**Foto 33, a y b)** referida abarca un área total de 72 hectáreas de terreno que se extiende al oriente por la zona urbana de Minatitlán y al Sur por el Río Cuátzacoalcos. Una infraestructura civil ubicada al Sureste de la Ciudad de Minatitlán en el estado de Veracruz (México). La dificultad geotécnica reconocida fue solventada tras la aplicación del método de inyección por compactación. Los problemas surgidos en ese lugar fueron meramente debidos a las condiciones físicas del subsuelo. Esto se resume así:

a) Estratos de arenas finas sueltas, calificadas como potencialmente licuables, localizadas en dos horizontes definidos. Los estratos superficiales, potencialmente licuables, se localizan hasta una profundidad máxima de 8 m, mientras que los profundos aparecen a partir de los 10 m y nunca superan los 20 m de profundidad.

b) Capas de arcillas blandas y muy blandas con alto contenido de materias orgánicas y muy compresibles.

a)

b)

Foto 33. a) LOCALIZACIÓN DE LA REFINERÍA DE LÁZARO CÁRDENAS DEL RÍO EN MINATITLÁN (VERACRUZ), MEXICO. b) VISTA ÁEREA DE LA CIUDAD DE MINATITLÁN

Algunos especialista (**EERI, 1994**), consideran el proceso de licuefacción como un proceso mediante el cual los sedimentos por debajo de tabla freática temporalmente pierden fuerzas y se comportan como un líquido viscoso y no como un sólido. Los tipos de sedimentos más susceptibles son depósitos de arcilla, arena y limo; y salvo algunos casos gravas.

Esta misma fuente, opina que las acciones que producen la licuefacción del suelo son: las ondas de corte, pasando a través de las capas granulares saturados, distorsiona su estructura granular, y causa poco embalado de grupos de partículas de colapso. Estos ocurre si la presión de poro del agua aumenta a un nivel cercano el peso de la que cubre el suelo, el granulado temporalmente de la capa se comporta como un líquido viscoso en lugar de un sólido.

Una vez, el suelo en estado líquido puede deformarse con poca resistencia al corte; grandes deformaciones suficiente para causar daños a edificios y otras estructuras se denominan terreno fracasos.

La facilidad con la que un suelo puede ser licuado depende principalmente en la soltura de los suelos, la cantidad de cementación o entre las partículas de arcilla, y el

cantidad de drenaje restricción. El importe después de la deformación del suelo depende de licuefacción sobre la soltura de la tela, la profundidad, el grosor y la extensión lateral de la capa licuada, pendiente del terreno, y la distribución de las cargas aplicadas por los edificios y otros estructuras.

De acuerdo con los especialista **(EERI, 1994)**, la licuefacción está limitada a determinados ambientes geológicos e hidrológicos, sobre todo depositados reciente de arena y limo en las zonas con agua subterránea de alta los niveles.

Por otra parte, la licuefacción por sí misma no es un fenómeno nocivo o peligroso, únicamente en aquellos entornos construidos por obras de ingeniería (puentes, carreteras, edificaciones, aeropuertos, y otros)

Hoy día surge una pregunta sobre si ¿la Licuefacción puede ser predicha?. Y aunque es posible identificar áreas potencialmente licuables, ello está en función del terremoto que detone este fenómeno. Sin embargo, en aquellos sitios con alta posibilidad de licuarse se deben realizar series de estudios científicos para detallar y caracterizar las áreas que pudiesen ser afectadas. Esto persigue la preparación de mapas de amenaza a licuefacción, algunos países, como los Estados Unidos y Japón, están definiendo la susceptibilidad a licuación del suelo, esto se refiere, a la capacidad del suelo de resistir la licuefacción, donde los principales factores influyentes son el tipo de suelo, la densidad, profundidad y nivel freático.

De igual manera, en la actualidad, se acuña los términos **Oportunidad de Licuefacción**, esto es una funcion de la intensidad de la sacudida sísmicia o de la demanda impuesta al suelo. Los factores influyentes son la frecuencia con qué ocurren los sismos y su intensidad.

Estos mapas pueden ser utilizados de formas distintas. En California, estos mapas se integran como documentos de antecedentes de elementos de seguridad de los planes

generales de la ciudad.

Aunque todavía no ampliamente incorporado, la información de estos mapas también pueden ser traducidos en los códigos y ordenanzas. Por ejemplo, la Ciudad de San Diego ha desarrollado y adoptado disposiciones para la licuefacción de peligro en su código de construcción.

A nivel estatal, la División de California Minas y Geología de licuefacción es de cartografía zonas de riesgo en todo el estado (CDMG, 1992). Estas zonas se definen como zonas de reunión uno o más de los siguientes criterios:

(1) áreas que se sabe que ha experimentado la licuefacción histórico durante los terremotos;

(2) todas las áreas de rellenos sin compactar que contengan licuefacción de los materiales sensibles que se saturadas, casi saturado, o se puede esperar para convertirse en saturados;

(3) zonas en las que suficientes geotécnicos existentes datos y los análisis indican que los suelos son potencialmente liquefiable;
(4) áreas saturadas con subyace geológicamente sedimentos jóvenes (menores de 10.000 y 15.000 años).

¿Cuáles son las opciones de mitigación?

Hay varias maneras de mitigar un posible licuefacción de peligro:

(1) reforzar las estructuras para resistir previsto los movimientos en tierra (si es pequeña);

(2) seleccionar el tipo adecuado fundamento y la profundidad (incluyendo modificaciones fundación en el caso de las estructuras existentes), de modo que los movimientos de la tierra no afecten negativamente a la estructura (por ejemplo, la alfombra de una base para

aumentar la base de la rigidez; profunda pilotes o pilares que se extienden por debajo de un liquefiable zona de suelo);

(3) estabilizar el suelo para eliminar el potencial de licuefacción o para el control de sus efectos (por ejemplo, la eliminación liquefiable y la sustitución de suelos, in situ como densificación, o deshidratación; valorización de las zonas laterales propagación.

¿Cómo es la elección de Mitigación?

La elección depende de las opciones de mitigación en gran medida de las características particulares de el sitio. Si no hay peligro por expansión lateral, la mitigación de una nueva instalación es en gran medida una cuestión de encontrar la más rentable solución vertical para proporcionar apoyo y el control de conflictos

Para las instalaciones existentes, la mitigación es generalmente más difícil y costoso debido a la presencia de la estructura. La técnicas para densificar el suelo puede ser excluida en una instalación existente, ya que causaría la liquidación de la estructura. Cuando un peligro de propagación lateral está presente, las medidas de mitigación, para ser eficaz, puede, en algunos casos tienen que ser más allá de los empleados límite del sitio específico. Esto puede impedir efectivas de mitigación por un individuo o propietario, exigiendo en cambio la acción pública entidades o grupos de propietarios.

Otra pregunta, que surge en nuestros días es si ¿Es posible prepararse para licuefacción?

La reducción de la vulnerabilidad, y mejorar la capacidad de respuesta de emergencia son dos opciones a seguir en la preparación de la posibilidad de licuefacción. Con mapas de zonas de riesgo, es posible identificar las áreas potencialmente sujetas a licuefacción y de identificar las áreas de menor y motivo de gran preocupación. Énfasis en el desarrollo adecuado de política pública o en la selección de técnicas de mitigación deben ser el foco de discusión. Por ejemplo, la Bahía de San Francisco. En este lugar, la

propiedad pública y privada pueden utilizar mapas de riesgos para comprender que graves daños se puede esperar y qué estructuras son más vulnerables.

Según los expertos, esta información puede ser usada para decidir dónde los recursos limitados deberán concentrarse y las estrategias de mitigación, en su caso, deben adoptarse.

La Ciudad y los gobiernos también pueden utilizar este información para decidir si quieren regular el riesgo a través de ordenanza o cambios en el código. Si existen mapas adecuados, los gobiernos locales podrían designar las áreas potenciales de licuefacción, y sus requerimientos, por ordenanza, investigaciones y posibles técnicas de reducción de las propiedades en estas áreas. Adicionalmente la ingeniería necesaria para la nueva construcción, los servicios esenciales de edificios que deben fortalecerse o reubicarse; a igual, que en los sistemas de vida, especialmente bajo tuberías de transporte y rutas críticas.

No obstante, esto conlleva a resolver la siguiente cuestión ¿Cuáles son las implicaciones para la respuesta?

Los planes de respuesta a emergencias a nivel local jurisdiccional para identificar las áreas más vulnerables a la licuefacción. Aquellos sitios donde licuefacción puede causar grandes problemas pueden ser identificados utilizando la licuefacción de los mapas de peligro o de riesgo se ha mencionado anteriormente. Algunos planes de emergencia se requerirán para especificar un estudio de reconocimiento de estas zonas inmediatamente después de un terremoto. Problemas derivados de la licuefacción como daños a las tuberías subterráneas también necesitan tenerse en cuenta en cualquier planificación de la respuesta de emergencia. De emergencia debe esperar interrumpido el suministro de agua y gas natural, y fugas de aguas residuales. Copia de seguridad de las fuentes de agua necesario ser identificados o desarrollados. Además, el roadbeds en zonas potencialmente sujetos a la licuefacción podría verse seriamente dañada, lo que complica la capacidad de evacuar a los residentes o

traer a equipos de emergencia. Estos deben tener los sistemas de redundancia o alternativas.

Pero, ¿Cuáles son las implicaciones para la recuperación? . La recuperación y reconstrucción en las zonas que han experimentado los daños debidos a la licuefacción de aumentar algunos números especiales. Una de las primeras decisiones los encargados de formular políticas en la comunidad si es cara para permitir la reconstrucción de la zona dañada. En Estados Unidos, es más común de una jurisdicción para permitir la reconstrucción, pero con más las restricciones tales como que exijan una detallada inspección ocular y, posiblemente, la ingeniería de fundaciones.
El dueño de la propiedad individual también necesita para decidir si la reparación y la reconstrucción son viables, en particular desde una perspectiva financiera. El comunidad, generalmente una ciudad o condado, deberá para decidir si una especie de gran escala de la estabilización del suelo proyecto debe ser intentado durante la reconstrucción; un factor determinante en este decisión es la disponibilidad de financiación. En general, tanto para los propietarios individuales y entidades públicas, es mucho menos caro reducir la vulnerabilidad a la licuefacción antes de una terremoto que se va a pagar la reparación o retroadaptación medidas después de un terremoto. Una vez que una comunidad está en el proceso de reconstrucción, la comunidad dirigentes y los titulares de derechos de propiedad debería aprovechar todas las oportunidades para mitigar el riesgo de licuefacción.

2.9.- Aplicaciones de la informática al estudio de la licuefacción de suelos.

En la actualidad, el estudio de la Licuefacción ha ido sufriendo en las últimas décadas toda una serie de transformaciones, sobre todo, con la introducción de ordenadores personales que a la fecha se puede usar desde la comodidad de una oficina u hogar. Una serie de procesos que estaban vedados, bien por la existencia de programas informáticos específicos o bien por la extrema complejidad y dificultad que presentaban los ordenadores anteriores al PC.

Con la posterior llegada del ambiente Windows, especialmente en las versiones actuales, se ha supuesto un giro radical a toda la problemática, constituyéndose así, un entorno de trabajo amigable, realización de procesos de forma visual, y el coste de los programas, con el aumento de la competencia supone un notable abaratamiento de los mismos. En otras palabras, en nuestros días, a escala mundial, no existe estudio que no se apoye de herramientas informáticas. A continuación se van a mostrar ejemplos de está revolución informática, utilizando algunos de los últimos y más importantes programas presentes en el mercado mundial.

Es realmente difícil, pero no imposible, encontrar herramientas informáticas exclusivas y coherentes existentes en el mercado actualmente cuyo fin es la licuefacción del suelo condicionado por su costo económico.

La mayoría de los programas de cómputo destinado al cálculo del potencial de licuefacción de los suelos tienen carácter libre, denominado de dominio público, y que por tanto, se pueden reproducir y distribuir libremente, más las que tienen precio accesible.

Siguiendo este hilo conductor, se van a comentar y descripción somera de algunos ejemplos, siendo necesario hacer constar que los que se incluyen, aunque no son obviamente todos, sí constituyen una buena muestra de lo que hay disponible en la actualidad en el mercado mundial.

2.9.1.- LiqIT v.4.7.6.1

Este programa es el más reciente dentro de los programas de dominio público, pues data de 2,006. Fue desarrollado por GEOLOGISMIKI Geotecnical Software de Grecia y se puede descargar libremente en numerosas páginas web, como, por ejemplo, http://www.fileheaven.com/descargar/liqit/62206.htm. Dada su antigüedad, funciona en cualquier ordenador y entorno de trabajo, y sus aplicaciones se centran en el estudio geotécnico de variables implicadas en los procesos de licuefacción de suelo. Su configuración está diseñada para ambiente Windows con todo lo que ello significa. Su utilización es relativamente sencilla, dada la general complejidad de la temática involucrada, y desarrolla un cálculo numérico que desemboca en la definición de salida gráfica.

Figura 42. Vista inicial del programa LiqIT v.4.7.6.1.

La licuefacción de suelos arenosos saturados flojos bajo efecto del movimiento de tierra fuerte, es un problema a que el ingeniero geotécnico puede hacer frente en muchos exámenes. **LiqIT** es un software para evaluación del potencial de la licuefacción del suelo basado en datos comúnmente usados del campo.

El **LiqIT** utiliza los procedimientos deterministas y del probabilista más recientes y comúnmente más usados que existen hoy. El **LiqIT** corre en plataforma Windows 95/98/Me/NT/2000/XP con costo económico de Ciento Ochenta y Cinco dólares americanos ($185), siendo su tamaño de origen de 1.9MB.

2.9.2.- LiquetyPro

Este programa se encuentra entre las nuevas herramientas informáticas aplicadas a la Geotecnia, con tutoriales o libros de instrucciones a grandes rasgos bastantes buenos. Es distribuido por empresas de Software Geotécnico, con algunos aspectos de esta temática. Este programa funciona en ambiente Windows (95/98/NT), en un entorno más amigable. La empresa distribuidora, con sede posee una página web en España http://ingenieriageologica.iespana.es/web.htm, en la que se puede conseguir una completa descripción y características técnicas del mismo e incluso es posible obtener una versión de prueba limitada en el tiempo y/o número de sesiones, aunque no limitada en cuanto al programa en sí (impresión, guardar datos, etc.). El **LiquefyPro** ayuda al especialista en la evaluación del potencial de licuefacción y asentamientos inducidos por carga sísmica, en que se realiza cálculos numéricos con presentación gráfica para reporte geotécnicos. **LiquefyPro** muestra datos de profundidad del suelo, factor de seguridad, zonas licuables, y perfil del suelo presentado gráficamente.

2.9.3.- LIQUITER

LIQUITER es un programa para la determinación del factor de seguridad a la licuefacción de los terrenos incoherentes saturados sujetos a acción sísmica. La empresa distribuidora el LIQUITER tienen por página web para su descarga libre el siguiente portal http://www.geoandsoft.com/espanol/geotecnica_programa_calculo_sismica_licuefaccion_terrenos.htm; http://www.geoandsoft.com/espanol/download.htm

El método de cálculo empleado, propuesto por Seed e Idriss en 1982, es de largo el más conocido y utilizado en lo que respecta al conocimiento de los principales parámetros geotécnicos de uso común (porcentaje en peso de cada tipo de partículas según su diámetro, densidad relativa, y diámetro pasante al 50%). Como sucede en todos los métodos basados en el concepto de factor de resistencia, es necesario que se valore la resistencia del terreno a los esfuerzos de corte cíclico. El programa utiliza la correlación entre la resistencia a la licuefacción y el número de golpes de la prueba SPT. El último dato de entrada requerido es la definición de los parámetros sísmicos necesarios para la simulación del terremoto. El

tipo de análisis realizado permite tener en cuenta el carácter esporádico de los picos de aceleración máxima, valorando la relación del esfuerzo cíclico inducido por el terremoto en referencia a un valor medio en lugar de al valor máximo. Para cada prueba SPT realizada se calcula, mediante un coeficiente de corrección elaborado en función de la profundidad a la que se ha ejecutado la prueba y de la densidad relativa del terreno, el número de golpes corregido considerando el efecto de la presión litoestática. También es posible considerar la presencia de una carga, así como interpretar los estratos de terreno que están por encima del nivel freático como cargas adicionales sobre el terreno subyacente. La verificación se basa en la determinación del factor de resistencia a la licuefacción que se obtiene de la relación entre el esfuerzo de corte límite que induce a la licuefacción y el esfuerzo de corte máximo inducido por el sismo, prescindiendo de la presión intersticial y de la deformación sufrida durante el propio terremoto.

El programa **LIQUITER** incluye parámetros geotécnicos de la estratigrafía (profundidad desde el firme del estrato, densidad natural del terreno, densidad saturada del terreno, densidad relativa del estrato, diámetro de la granulometría), valores de NSPT (profundidad desde el firme punto de ejecución de la prueba, número de golpes) y parámetros de cálculo (carga vertical aplicada a la cimentación, anchura y longitud de la cimentación, profundidad del nivel freático a partir del nivel del terreno, magnitud del evento sísmico en examen, valor del pico de la aceleración para el evento sísmico en examen)

El programa LIQUITER determina el factor de seguridad a la licuefacción de terrenos incoherentes saturados sujetos a acciones sísmicas.

El método de cálculo utilizado (Seed e Idriss) requiere el conocimiento de pocos parámetros geotécnicos de uso corriente y de los parámetros sísmicos necesarios para la simulación del esfuerzo cíclico inducido por el terremoto.

La verificación se basa en la determinación del factor de resistencia a la licuefacción calculado como relación entre el esfuerzo de corte límite que induce a la licuefacción y el

esfuerzo de corte máximo inducido por el sismo, prescindiendo de las presiones intersticiales y de las deformaciones que se desarrollan durante el propio sismo.

El esfuerzo límite y el esfuerzo máximo se obtienen adimensionales mediante la relación entre el esfuerzo cíclico que se obtiene normalizando la amplitud del esfuerzo de corte y la presión vertical efectiva inicial σv' según la fórmula:

Según la fórmula: Fvv= ()'lim'τστσ

Hay varios métodos para determinar la resistencia a las licuefacciones basadas en el estudio del comportamiento de muestras durante ensayos de laboratorio o bien en la realización de ensayos in situ en la localidad que haya dado lugar a manifestaciones de licuefacción. En cada uno de los dos casos se llega a proponer la correlación entre la resistencia a la licuefacción y los parámetros sísmicos y geotécnicos de la zona. El parámetro del que se encuentran mayor número de correlaciones en la literatura es el número de golpes del ensayo SPT.

La formulación usada permite tener en cuenta el carácter esporádico de los picos de aceleración máxima valorando la relación de esfuerzo cíclico inducido por el terremoto con referencia a un valor medio ττav=065.maxen lugar del valor máximo τmax.

El factor de resistencia a la licuefacción, por tanto, se obtiene mediante

F_{vavv}=()'lim' τ σ τ σ
Donde τ σ σ σ $_{avvdvv}agr$'max'. () (=065)

La resistencia a la licuefacción se valora en función de la magnitud, del número de golpes, de la presión vertical efectiva y de la densidad relativa utilizando las correlaciones entre relación de esfuerzo cíclico y número de golpes observadas en terrenos que hayan dado lugar a fenómenos de licuefacción y no licuefacción durante los terremotos reales.

En el ábaco derivado de este modo, la línea relativa a un terremoto de magnitud dada separa el campo de las zonas de licuefacción probable de las zonas en la que ésta es improbable.

En la fase de cálculo el programa valora, para cada SPT realizado, el número de golpes corregido de modo que se considere el efecto de la presión litostática. Esta corrección se efectúa utilizando un coeficiente de corrección elaborado en función de la profundidad de ejecución del ensayo y de la densidad relativa.

El número de golpes corregido permite valorar para un valor de magnitud dado la relación de esfuerzo cíclico que provoca licuefacción. Si el factor de la resistencia a la licuefacción F es mayor que 1.3, el depósito se considera sin peligro de licuefacción. A continuación se muestra algunas ventanas del programa LIQUITER

Vista de Sección informativa del Software

Perspectiva inicial del Programa LIQUITER32

Selección de tipo de presentación de salida (tabla, gráficas, histogramas, y otros)

2.9.4.- FradeCPT™

El programa FradeCPT™ desarrollado por Igeotest con página web en España (http://www.igeotest.com/igeotest/medios_materiales/software.asp), está basado en ensayos in situ tipo CPT/CPTU. De cada ensayo resultan dos hojas de gráficos, la primera con los parámetros medidos y derivados de éstos y la segunda con la interpretación de los parámetros geotécnicos. El programa FradeCPT™ incluye curvas de variación en función del tiempo, cálculos de los coeficientes de consolidación horizontal frente a la presión hidrostática teórica o a la presión de equilibrio alcanzada

El FradeCPT™ permite obtener parámetros granulométricos, dinámicos y de deformación tanto en suelos granulares como cohesivos. Ellos se nombran a continuación:

2.9.4.1.- **Suelos Granulares**

» Densidad Relativa DR%
» Ángulo de Rozamiento interno ø
» *Potencial de Licuefacción*
» Módulos de Deformación E, M, Gmax.

2.9.4.2.- **Suelos Cohesivos**
» Resistencia al corte sin drenar Su
» Sensitividad St
» Historia Tensional OCR
» Módulos de Deformación E, M, Gmax.

2.9.5. SeismoStruct/SeismoSignal

Es un paquete de elementos finitos capaz de predecir el comportamientos del suelo en virtud de la carga dinámica, y la interacción suelo-estructura. Una de su ventajas es su usabilidad, sobre todo, en entornos de Windows (Microsoft Excel, Microsoft Word, y otros).

Figura xxx. Presentación del Software

Uno de los elementos importante de este paquete es el SeismoSignal, que constituye una manera fácil y eficiente para procesar datos de movimiento fuerte, con salida visual y capacidad de obtener una serie de parámetros de movimiento fuerte-a menudo por el ingeniero terremoto ingenieros y sismólogos. Entre otras cosas, este programa de cómputo calcula el espectro de respuesta dinámica, intensidades Arias, velocidad y desplazamiento del terreno, periodos naturales predominantes, duración y contenidos de frecuencias de los suelos ante sismos.

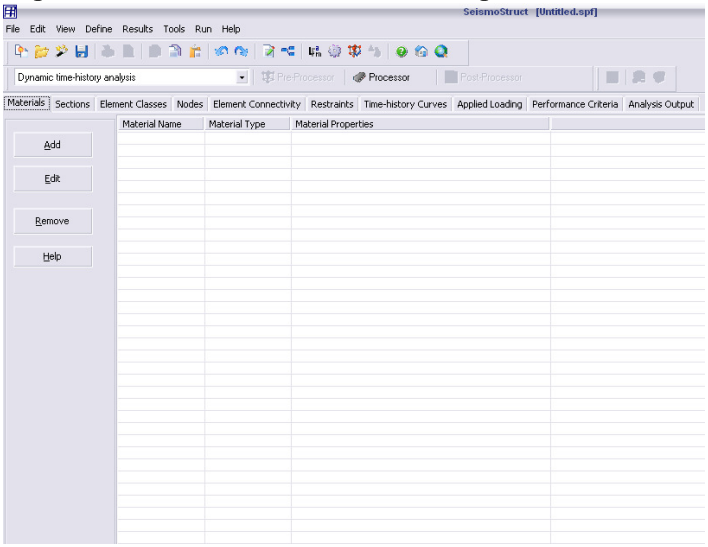


Figura xxx. Vista de datos en programa SeismoStruct

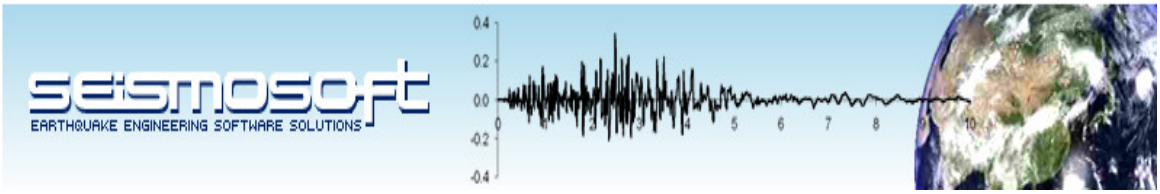
Asimismo, el SeismoSignal, permite el filtrado de contenidos no deseados de frecuencia de la señal dada, siendo capaz a su vez, de leer acelerogramas definido en una sola y de múltiples formatos de valores por línea (los dos más populares formatos utilizados por el fuerte movimiento de bases de datos), y puede aplicar la corrección para obtener la velocidad y el tiempo de desplazamiento historias.

Por último, y debido a su plena integración con el entorno Windows, permite SeismoSignal obtener resultados numéricos y gráficos de uso en Windows (por ejemplo, MS Excel, MS Word, etc), considerando sitios particulares dentro este programa.

Estos programas pueden ser utilizados libremente con fines no comerciales (por ejemplo, la investigación, la enseñanza, formación, etc.). Los programa informáticos están disponibles en el sitio Web: http://www.seismosoft.com/en/Download.aspx

SEISMOSIGNAL es un código libre que comercializa una empresa llamada SEISMOSOFT, accesible vía ON LINE. Con este código, dado el registro sísmico, puedes

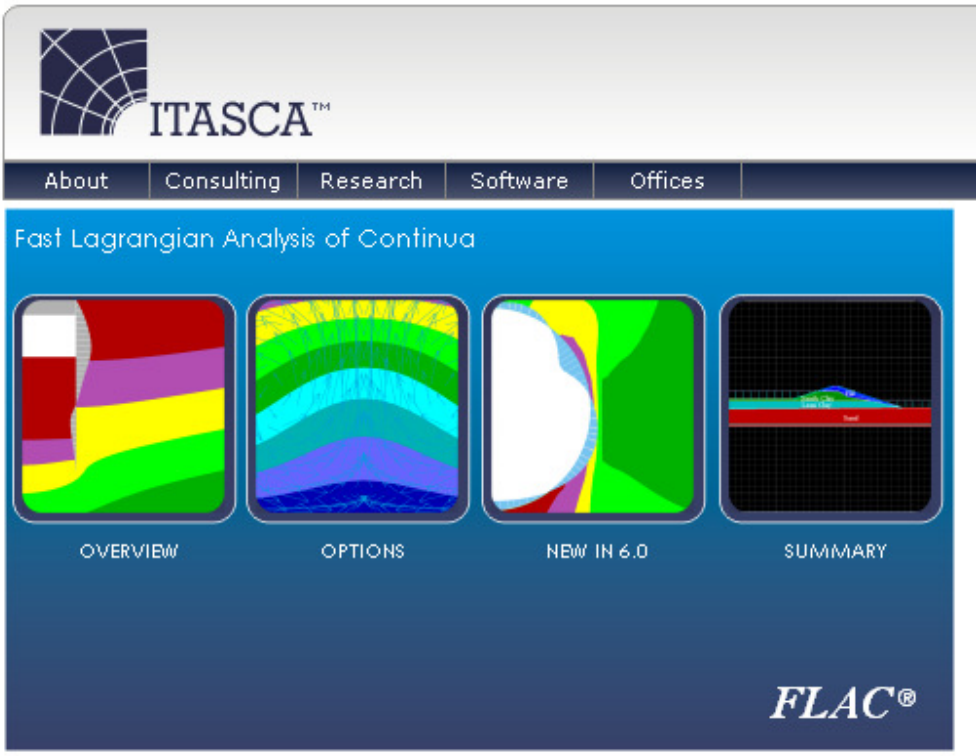
calcular espectros de respuestas, aplicar filtros de frecuencia, calcular intensidad de Arias, entre otros.



2.9.6. FLAC

Desarrollado originalmente por ingenieros de minas y geotécnicos, es un programa de cómputo distribuido por la empresa ITASCA, que ofrece una amplia gama de capacidades para resolver problemas complejos en mecánica. Permite la simulación de la respuesta del suelo considerando los elementos geológicos del sitio de emplazamiento a partir de una serie de aplicaciones de modelos constitutivos. Este programa simula el comportamiento de estructuras construidas de tierra, rocas u otros materiales que pueden someterse flujo plástico cuando su rendimiento se alcanzan los límites. El software está disponible para mayor información en sitio Web: http://www.itascacg.com/flac/newin60.html

FLAC, es un código comercial en diferencias finitas que en España comercializa una empresa llamada ITASCA, usado por universidades del mundo (por ejemplo, la University of British Columbia, el grupo Peter Vyrne, la Universidad Castilla-La Mancha en España, entre otros)



. Figura xxx. Pantalla de presentación del programa FLAC para análisis de respuesta sísmica del suelo

2.9.7.- LIQUITER GEOSTRUC

Este programa de cómputo estima el potencial de liquefacción durante terremotos mediante los siguientes criterios de previsión y métodos:

1. Criterios empíricos
2. Métodos simplificados

Se prevén las siguientes obras de consolidación

1. Drenajes
2. Pilotes de grava
3. Heavy Tamping

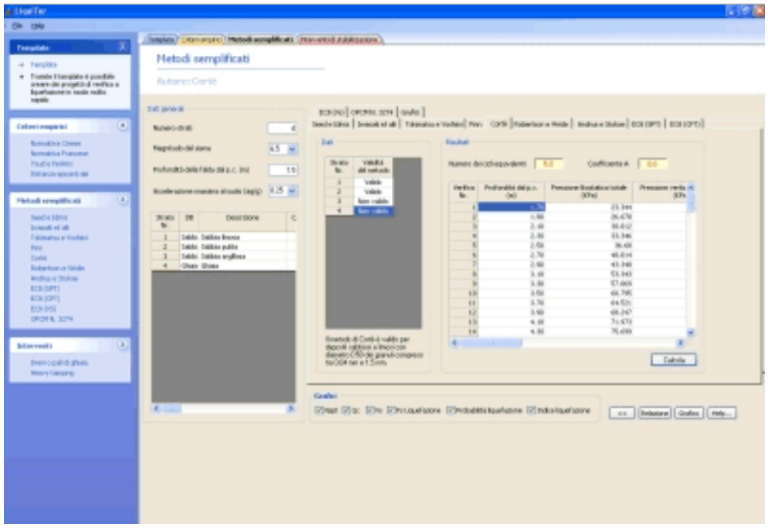


Figura x. Vista del programa Liquiter. Cortesía de Geostruc

1. - CRITERIOS EMPÍRICOS

Basado más que nada en los parámetros deducidos por pruebas de identificación o por pruebas penetrométricas estándar o también por algunas características geológicas, cualitativas, generalmente se limitan a evaluar la susceptibilidad de los depósitos más allá de los sacudidos sísmicos producidos en el sitio.

Los criterios de previsión del potencial de liquefacción adoptados por el programa son solo algunos de los más notorios, tales como:

a) Criterio de la Norma china (Chinese Building Code, 1974);
b) Criterio propuesto por Durville et al. (1985) para la Norma francesa;
c) Criterio modificado Youd e Perkins (1978);
d) Criterios que tienen en cuenta la magnitud (Kuribayashi e Tatsuoka, 1975; Berardi et al.,

1988);

2.- MÉTODOS SIMPLIFICADOS

Consiste en la relación entre las solicitaciones de corte (Cyclic Resistance Ratio) que producen liquefacción y aquellas producidas por el terremoto (Cyclic Stress Ratio); tiene por eso la necesidad de evaluar los parámetros del evento sísmico ya sea este el depósito, privilegiando métodos basados en correlaciones a la resistencia de liquefacción con parámetros deducidos en pruebas en situ.

Los parámetros utilizados por liquiter GeoStruc, son: el número de golpes en la prueba SPT, la resistencia a la punta en las pruebas estáticas (CPT) y medida de las ondas del corte Vs en las pruebas sísmicas.

Los métodos de cálculo del potencial de liquefacción adoptados por el programa son:

1) Método de Seed e Idriss (1982);
2) Método de Iwasaki et al. (1978; 1984);
3) Método de Tokimatsu e Yoshimi (1983);
4) Método de Finn (1985);
5) Método de Cortè (1985);
6) Método de Robertson e Wride (1997);
7) Método de Andrus e Stokoe (1998);
8) Método basados en el Eurocódigo 8 (ENV 1998-5);
9) Método basado en OPCM N. 3472 (2003).

Al finalizar la fase de cálculo Liquiter da la posibilidad de obtener algunos gráficos importantes

a) Estratigrafía
b) Nivel freático

c) NSPT-Profundidad

d) qc-Profundidad

e) VS-Profundidad

f) FS- Profundidad

g) IL- Profundidad

h) PL- Profundidad

Este software está disponible a través del sitio web de la empresa líder en tema de análisis geotécnico e ingeniería del suelo conocida por la palabra GeoStruc, cuya dirección es http://www.geostru.com/get/es/Liquiter.aspx

2.10.- ¿Quién presta atención a los desastres?

Según la Agencia Catalana de Cooperación al Desarrollo (ACCD, 2007), hay muchas entidades que trabajan en la cuantificación de los daños causados por desastres de origen natural; a continuación se menciona algunas de las más destacadas.

- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). Creado en 1,995, es el organismo que trata de garantizar que se haga un uso lo más eficaz posible de los recursos procedentes de las ayudas de las Naciones Unidas y de la comunidad internacional (www.undp.org). Está presente en 166 países, utiliza su red mundial para dar apoyo a los programas de las Naciones Unidas y sus asociados con la finalidad de que se cumplan los Objetivos de Desarrollo del Milenio, y trabaja en la conocida como "Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres (EIRD)", plataforma de la ONU que promueve diversas actividades para la reducción de los desastres en los campos socio-económico, humanitario y de desarrollo (www.eird.org).

- Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). Con sede en Nairobi, Kenia, es un programa que coordina las actividades relacionadas con el medio ambiente y asiste a los países con la aplicación de políticas medioambientales que favorecen el desarrollo sostenible. Confecciona una base de datos sobre catástrofes, pero solo considera aquellos casos en que se produzca por lo menos treintas muertes (www.unep.org)

- Oficina del Coordinador de las Naciones Unidas para la Emergencia en caso de Desastres (UNDRO). Punto central en el Sistema de las Naciones Unidas para la atención de las emergencias, particularmente las relativas a los desastres naturales. Moviliza, dirige y coordina de las actividades de emergencia de varias agencias de las Naciones Unidas y de otras organizaciones para la Información Internacional de

Emergencia (UNIENET). Publica estudios sobre la atención de desastres (www.un.org)

- Centro de Investigación sobre Epidemiología de los Desastres (CRED), con sede en Bruselas, Bélgica: Universidad Católica de Lovaina (www.cred.be). Junto con la oficina de EE.UU. de Asistencia a los Desastres en el Extranjero (OFDA), administran la base de datos de desastres internacionales: Emergency Events Database EM-DAT (www.em-dat.net), con datos desde 1900 hasta la actualidad. Esta base de datos incluye los sucesos que se adaptan a la definición estándar de los desastres y que cumplen alguno de los siguientes requisitos: conflictos con más de 10 muertos, más de 100 damnificados, zona donde se haya declarado el estado de emergencia o con solicitud de ayuda internacional. Prioridad de datos de agencias públicas. El EM-DAT se nutre de fuentes de información externas (informes oficiales, Federación Internacional de Sociedades de la Cruz Roja y de la Media Luna Roja, otros organismos de auxilio, compañías de seguros, etc). No tiene en cuenta los sucesos menores en que se den pérdidas relativamente pequeñas. Acceso público, www.cred.org

- Munich Reinsurance (MUNICH RE), empresa de reaseguros de alcance mundial con sede en Munich (Alemania). Anualmente publica Topics Geo. Annual Review: Natural Castastrophes, donde se presentan un estudio estadístico de las catástrofes naturales ocurridas en el mundo. Esta compañía dispone de una base de datos, NatCat SERVICE, desde 1979 hasta la actualidad, en la que se registran los desastres de origen natural que ocasionan pérdidas físicas o materiales; dispone de 15,000 entradas, más unas 700 entradas nuevas al año. Antes de 1980 esta base prestaba atención a los grandes sucesos. Prioridad de datos de la lista Lloyd's, de la agencia Roiters y de los informes de las empresas de seguros. Acceso no público www.munichre.com

- Swiss Reinsurance (SWISS RE), empresa de reaseguros de alcance mundial con sede en Suiza. Esta compañía dispone de una base de datos, D. Sigma, desde de

1970 hasta la actualidad, en las que se registran desastres antrópicos y naturales (exceptos sequías) en los que se dé alguna de las siguientes condiciones: más de 20 muertos, 50 heridos, 2,00 desalojados, pérdidas aseguradas por valor de más de 14 millones de $(marinos), más de 28 millones de $ (aviación), más de 35 millones de $ para el resto de los peligros, o unas pérdidas totales mayores de 70 millones de $. Las fuentes de los datos se obtienen de la lista de Lloyd's,la agencia Roiters, de informes internos y de otras empresas de seguros. Dispone de 7,000 entradas, más de 300 entradas nuevas al año. Acceso no público, www.swissre.com

- Federación internacional de las Sociedades de la Cruz Roja y de la Media Luna Roja (IFRC). Esta entidad pública anualmente, desde el año 1993, el informe Mundial de Desastres (Wordl Disaster Reporte), en el que se recogen los últimos hechos, análisis y tendencias de las crisis contemporáneas, tanto las naturales como las provocadas por el ser humano.

- Instituto Worldwatch. Publica anualmente un informe sobre el progreso hacia una sociedad sostenible por medio del libro El estado del mundo. Para la elaboración de esta publicación se han empleado algunos de los datos de la última edición: China e India: estado del mundo 2006. www.worldwatch.org

ACCD (2007), considera que la Información que generan estas diferentes entidades es asumida por muchos otros centros públicos y privados que la incorporan a sus necesidades para definir estrategias y programas. Entre estos tenemos están los siguientes:

- El Centro Regional de Investigación sobre Desastres en América Latina y el Caribe (CRID), que tiene por objetivo promover el desarrollo de una cultura de prevención de desastres en los países de América Latina y el Caribe, a través de la recopilación y difusión de la información relacionada con los desastres y la promoción de esfuerzos de cooperación para mejorar la gestión del riesgo en la región. (www.crid.org)

- El Comité de Asistencia al Desarrollo de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económico (CAD-OCDE)

- La Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina (RED), entidad que desarrolla el Sistema de Inventarios de Desastres para América Latina: DesInventar.

- El Centro de Coordinación para la Prevención de Desastres Naturales en América Central (CEPREDENAC), organismo regional de carácter intergubernamental que pertenece, como secretaría especializada, al Sistema de Integración Centroamericano (SICA), y que tiene por misión promover actividades, proyectos y programas que lleven a la reducción de los riesgos por desastres que comportan pérdidas humanas y económicas causadas por los factores socionaturales. www.cepredenac.org

- El Centro Asiático de Preparación para Casos de Desastres; la Oficina Humanitaria de la Comunidad Europea (ECHO), la Oficina de Asistencia para Casos de Desastres al Extranjero de los Estados Unidos, la Red Peri Peri de África Meridional.

- Y los diversos servicios geológicos nacionales u organismos similares (p.ej. Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales- Ineter, Nicaragua), así como las agencias de protección civil. P. ej. Sistema Nacional de Prevención, Reducción y Atención de Desastres (SINAPRED, Nicaragua)

2.11.- ¿Quién estudia el peligro que representa la licuefacción en los suelos?

Seguramente, grupos o empresas privadas y pública a través de sofisticado equipo tecnológico asistido por un completo paquete de programas de informática desde diferentes sectores de la sociedad, jugando un papel destacado.

En la actualidad diversas instituciones científicas internacionales, centros de investigación académicas, universidades, institutos politécnicos u otros, desarrollan investigaciones geotécnicas in situ, y de laboratorio encaminadas a determinar el potencial de licuación de suelos sujeto a carga sísmico por eventos anteriores, y sus formas de manifestación ensuperficie después de un sismo.

Algunas de las instituciones y/o empresas estatales, privadas o mixtas ofrecen a sus posibles interesados de una serie de recursos informátivos relativo a los procedimientos de análisis de la licuación, instrumentación empleadas, técnicas o métodos aplicados. Información de suma importancia, sobre todo, para ingenieros geotécnicos, ingenieros civiles, arquitectos, entre otros.

En nuestos días, se pone a disposición del público general los datos requeridos por constructores que desean conocer a detalle el tema de la licuefacción de suelos, actividad que se amplía con el pasar del tiempo.

Las empresas que brindan los servicios de análisis de la licuefacción del suelo entregan a través de On Line, las herramientas apropiadas para su estudio. Muchas de ellas están accesible a sitios más específicos, las cuales presentamos en las direcciones electrónicas que se enlista a continuación:

- http://www.igeotest.com
- http://www.geologismiki.gr
- http://www.ce.washington.edu/~liquefaction
- http://www.civil.ubc.ca/liquefaction/
- http://www.ubp.edu.ar/per/docpt-2002/1-100-Turquia-Marmara.jpg
- http://www.Terremotos y sus consecuencias _ Ryokô.htm
- http://www.webtext.cfm.htm
- http://www.licuacion.htm
- http://www.image12855-1908.html
- http://ceor.princeton.edu/~radu
- http://ceor.princeton.edu/~radu/soil/velacs
- http://geosystems.gatech.edu/Research/gpr.html
- http://nisee.ce.berkeley.edu
- http://peer.berkeley.edu
- http://quake.wr.usgs.gov
- http://rccg01.usc.edu/GEES/velacs/velacs.html
- http://science.msfc.nasa.gov/newhome/headlines/msad06jan98_1.htm
- http://wrgis.wr.usgs.gov
- http://www.abag.ca.gov/bayarea/eqmaps/liquefac/bayaliqs.gif
- http://www.ce.berkeley.edu/Programs/Geotech/Kobe/KobeReport/title.html
- http://www.civil.ualberta.ca/geot/document/canlex.htm
- http://www.consrv.ca.gov
- http://www.eerc.berkeley.edu
- http://www.eerc.berkeley.edu/bertero/html/earthquake-resistant_construction.html.
- http://www.eqe.com/publications
- http://www.gcts.com/main.html
- http://www.geotechnics.com
- http://www.haywardbaker.com
- http://www.liquefaction.com
- http://www.phri.go.jp/division/ge/geout01e.html
- http://www.pendleton.co.nz

- http://www.ce.berkeley.edu/Programs/Geotech/Kobe/ KobeReport/title.html
- http://www.vibroflotation.com
- http://mceer.buffalo.edu
- http://www.civil.ubc.ca/liquefaction/
- http://www.scribd.com/doc/2567670/licuacion-de-suelos-y-resistencia-ciclica-ing
- http://es.wikipedia.org/wiki/Licuefacci%C3%B3n_(inestabilidad)
- http://www.igeotest.com/igeotest/medios_materiales/software.asp
- http://neic.usgs.gov/neis/eq_depot/2009/eq_090528_heak/neic_heak_nr.html
- http://neic.usgs.gov/neis/eq_depot/2009/eq_090528_heak/neic_heak_esp.html

SÍNTESIS

La licuefacción del suelo, objeto del capítulo II, se dedica al estudio de los aspectos conceptuales, causas, tipología de fallos del terreno y sus efectos. De igual manera al estudio de aquellos factores influyentes en el proceso de su generación; algunos ejemplos de casos actuales e históricos; aplicaciones de la ingeniería a la mejora de los suelos licuables, con los siguientes rasgos fundamentales:

- Propiedades mecánica y dinámica de los suelos licuables
- Efectos inducidos por la licuefacción en las obras de civiles y ambiente
- Modificación de aquella propiedades no benéfica del suelo a través de técnicas de ingeniería
- Incidencia de la licuación en la resistencia y estabilidad de los materiales del subsuelo.

Palabras claves: Suelos licuables, esfuerzos cortantes, presiones intersticiales, grado de compactación, aceleraciones sísmica, volcanes de arena, granulometría, compacidad relativa, coeficiente de vacío crítico, VELAC, vibroflotación, inyección de impregnación, inyección de compactación.

Bibliografía

Obando, T. (2,009). Modelación geomecánica y temporal de la licuefacción en suelos de minas no metálicas. Estudio Caso: Ciudad de Managua (Nicaragua). Tesis Doctoral. Editorial Universidad Internacional de Andalucía UNÍA (Huelva, España). Huelva. 900pág.