

ANÁLISIS PROBABILISTA DEL PELIGRO DE LICUACIÓN

MARIO ORDAZ¹, MIGUEL MÁNICA², EFRAÍN OVANDO²,
LUIS OSORIO², MARÍA CLARA MADRIGAL²

¹ COORDINACIÓN DE INGENIERÍA SISMOLÓGICA

² COORDINACIÓN DE GEOTECNIA

La licuación o licuefacción es un fenómeno que acontece cuando, por efecto de movimientos del terreno inducidos por sismo, la presión de poro en el suelo, típicamente arenas uniformes saturadas, aumenta de manera tal que las partículas que lo forman pierden contacto unas con las otras, con lo que el material se comporta como un fluido. Este fenómeno ocurre cuando la presión de poro tiende al valor del esfuerzo medio total, i.e. cuando el esfuerzo medio efectivo tiende a cero, siendo este último el que controla la resistencia en los suelos granulares. Esto tiene, naturalmente, consecuencias graves para las construcciones asentadas en suelos que experimentan licuación, por lo que un diseño geotécnico adecuado procura que este fenómeno no ocurra frecuentemente, o bien busca mitigar sus efectos.

El problema de predecir en qué circunstancias se presentará licuación, en un suelo caracterizado por un cierto perfil, se ha estudiado desde hace varias décadas. Los métodos más comúnmente usados en la práctica profesional de la geotecnia permiten calcular el factor de seguridad ante la licuación para un estrato localizado a cierta profundidad, cuando el perfil de suelo es excitado por un movimiento sísmico de ciertas características.

Como veremos después, los métodos tradicionales permiten tener una idea del potencial de licuación del suelo ante un temblor individual, definido por sus características de magnitud, aceleración máxima del suelo y, en cierta medida, por su contenido de frecuencias. Sin embargo, los métodos tradicionales dan pocos indicios sobre qué tan frecuentemente ocurrirá la licuación, lo cual hace que el proceso de diseño/revisión se realice sobre bases poco firmes desde el punto de vista probabilista.

Recientemente, investigadores de las Coordinaciones de Ingeniería Sismológica y Geotecnia, a propósito del proyecto de la refinera de Dos Bocas, nos hemos propuesto mejorar los

métodos tradicionales de evaluación del potencial de licuación dándoles un marco probabilista más formal, escribiendo los resultados en un formato probabilista comparable al que se usa en otras áreas de la Ingeniería Sísmica. En este breve artículo se reportan algunos de nuestros hallazgos preliminares.

Métodos tradicionales de evaluación del potencial de licuación

Los métodos tradicionales están enfocados a calcular el factor de seguridad ante licuación FS , comparando dos cantidades, el Cociente de Esfuerzo Cíclico (CSR , por las siglas en inglés de Cyclic Stress Ratio) y el Cociente de Resistencia Cíclica (CRR , por las siglas en inglés de Cyclic Resistance Ratio) de la siguiente manera:

$$FS = \frac{CRR}{CSR} \quad (1)$$

Como se verá más adelante, las tres cantidades que aparecen en la ecuación anterior dependen de la profundidad de la sección de análisis, z . Sin embargo, por sencillez en la notación, se ha omitido la dependencia explícita de la profundidad.

Como se aprecia en la definición del factor de seguridad, CRR es una medida de resistencia del suelo mientras que CSR es una medida del tamaño de la acción sísmica. De acuerdo con Seed e Idriss (1982), el primer parámetro se define de la siguiente manera:

$$CRR = CRR_{7.5} MSF \quad (2)$$

donde $CRR_{7.5}$ es la resistencia cíclica estandarizada a temblores de magnitud $M=7.5$, mientras que MSF es un factor de corrección por magnitud, dado por:

$$MSF = \left(\frac{7.5}{M} \right)^{2.56} \quad (3)$$

Conviene señalar que existen ecuaciones similares a las ecuaciones de la 1 a la 3 propuestas por otros autores; hemos escogido las aquí presentadas sólo con fines ilustrativos. Siguiendo el procedimiento clásico propuesto por Seed e Idriss (1971), CSR se define de la siguiente manera:

$$CSR = (\tau_{av} / \sigma'_{vo}) = 0.65 (a_{max} / g) (\sigma_{vo} / \sigma'_{vo}) r_d \quad (4)$$

donde a_{max} es la aceleración máxima del suelo en la superficie del depósito, g es la aceleración de la gravedad, σ_{vo} y σ'_{vo} son los esfuerzos verticales totales y efectivos al nivel analizado respectivamente, mientras que r_d es el coeficiente de reducción de esfuerzo, que depende de las características del estrato y de las características de la excitación (amplitud y frecuencia) al nivel de análisis.

Finalmente, diversos autores han intentado adaptar los métodos deterministas más populares en la práctica a un marco probabilista, y han propuesto expresiones para trasladar un cierto FS a una probabilidad de licuación (para un evento sísmico determinista). Por ejemplo, Ku *et al.* (2012) proponen la siguiente expresión:

$$P_L = \frac{1}{1 + \left(\frac{FS}{0.9}\right)^{6.3}} \quad (5)$$

donde P_L es la probabilidad de licuación. De acuerdo con los métodos tradicionales, una sección del perfil será aceptable ante el sismo de diseño si el factor de seguridad es mayor que un número convencionalmente aceptado. Sin embargo, si el análisis se hace con estos métodos, no queda claro qué tan frecuente se presentará la licuación. Claramente, las decisiones de diseño o de aceptación de un perfil serían diferentes si la licuación se va a presentar cada cien años, que si se va a presentar cada mil; pero esto no puede determinarse con los métodos convencionales. En lo que sigue, presentaremos la manera de tener indicaciones probabilistas del potencial de licuación integrando los cálculos de licuación al marco general del análisis probabilista de peligro sísmico. Aun cuando esta integración no es nueva en la literatura especializada, su uso no es común. Además, como señalaremos al final, proponemos algunas mejoras a los procedimientos probabilistas existentes.

Evaluación probabilista del peligro de licuación

Siguiendo el formalismo del análisis probabilista de peligro sísmico (Esteva, 1967 y Cornell, 1968), escribiremos la frecuencia anual de ocurrencia de la licuación v_L , en una sección del perfil del suelo de la siguiente manera:

$$v_L = \sum_{i=1, N} Prob(Licuación | Evento i) F a_i \quad (6)$$

donde $Prob(Licuación | Evento i)$ es la probabilidad de que exista licuación dado que se presentó un evento con magnitud

y localización dadas y $F a_i$ es la frecuencia anual de ocurrir del evento i ; en vista de lo señalado anteriormente, la cantidad v_L depende también de la profundidad de la sección estudiada. El término $Prob(Licuación | Evento i)$ se calcula de acuerdo con las ecuaciones de la 1 a la 5, aunque conviene hacer notar que, dado un evento, el valor de a_{max} que aparece en la ecuación 4 es una cantidad aleatoria, por lo que procede tomar en cuenta la incertidumbre correspondiente.

Resultados preliminares

La figura 1 muestra, como función de la profundidad, la frecuencia anual de ocurrencia de la licuación en un perfil de suelo con ciertas características sometido a un ambiente sísmico del sureste de México. De acuerdo con esta gráfica, la frecuencia de excedencia tolerable sería 0.002/año, que está asociada a un periodo de retorno de 500 años. Observamos, por ejemplo, que alrededor de profundidades de 4 o de 10 m, la frecuencia anual de excedencia es mayor que 0.002/año (es decir, el periodo de retorno de la licuación es menor que 500 años), lo que haría inaceptables a los estratos correspondientes a estas profundidades.

Mejoras propuestas

Los criterios aquí presentados brevemente se han incorporado ya en programas de cálculo y se empiezan a ver resultados interesantes. Durante el desarrollo de la investigación hemos ido viendo la necesidad de mejorar algunos puntos del cálculo, en particular los siguientes:

1) La aceleración del suelo en la ecuación 4 debe ser la que se presenta en la superficie del depósito. Esto implica que la precisión en el cálculo de la probabilidad de licuación dependerá de qué tan bien se modelen los efectos de amplificación local, o efectos de sitio. Una revisión de la literatura internacional nos revela que hay, en este punto, grandes oportunidades de mejorar las metodologías existentes.

2) Aunque no tenemos espacio suficiente para explicarlo, el factor r_d que aparece en la ecuación 4, depende del perfil de esfuerzos resultante en el depósito, el cual a su vez, depende tanto de las propiedades del suelo (incluyendo las no lineales) como del contenido de frecuencias del movimiento incidente. Aquí también, los métodos tradicionales son bastante rudimentarios, por lo que cabe mejorarlos. |

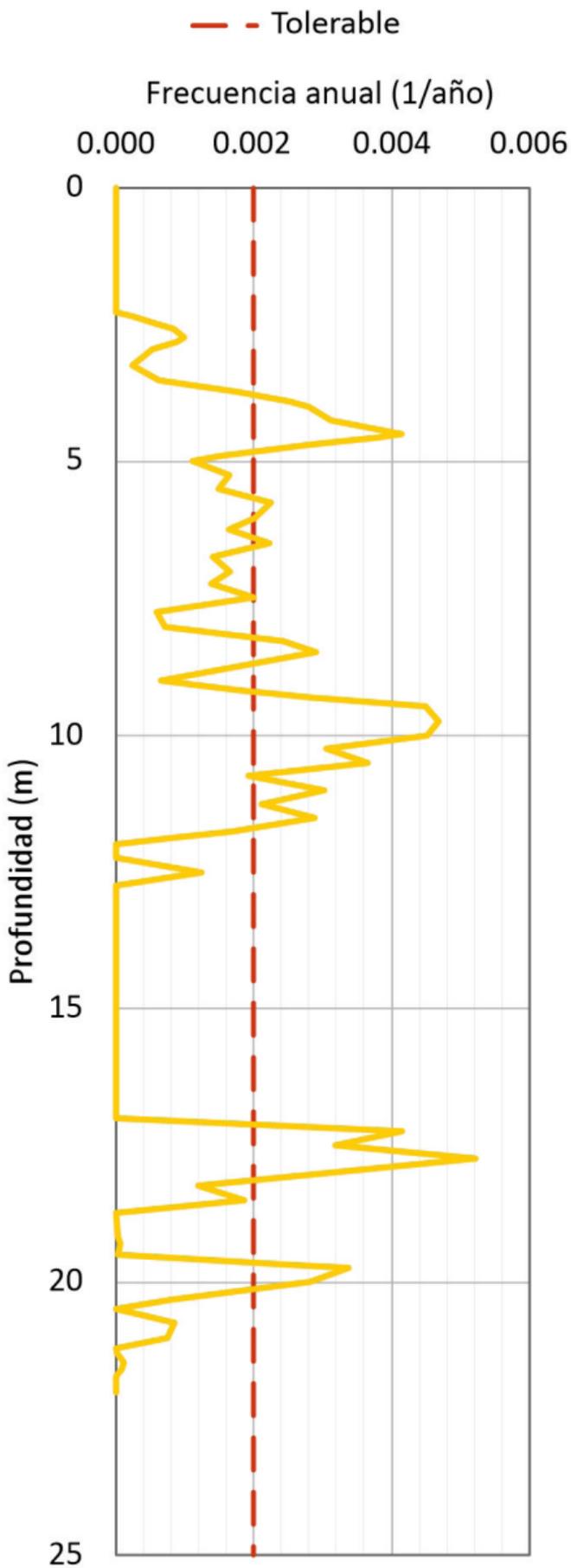


Figura 1. Ejemplo de resultados obtenidos del análisis probabilista de licuación

Referencias

1. Cornell, C. A. (1968). Engineering seismic risk analysis, *Bull. Seism. Soc. Am.* 63, 9-48.
2. Esteva, Luis (1967). Criteria for the construction of spectra for seismic design, *3rd Pan-American Symposium of Structures*, Caracas, Venezuela, 3-8 July (in Spanish).
3. Ku C. S.; Juang H.; Chang C. W. y Ching J. (2012). Probabilistic version of the Robertson and Wride method for liquefaction evaluation: development and application, *Canadian Geotechnical Journal* 49, 27-44.
4. Seed, H. B. e Idriss, I. M. (1971). Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential, *J. Geotech. Engrg. Div., ASCE*, 97(9), 1249-1273.
5. Seed, H. B. e Idriss, I. M. (1982). Ground motions and soil liquefaction during earthquakes, *Earthquake Engineering Institute Monograph*, Oakland, California.