

CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LOCALIDADES SUJETAS AL FENÓMENO DE LICUACIÓN - EL CASO DE TAMBO DE MORA¹

Guillermo J. Zavala², Manuel Olcese², Jorge Zegarra² y Viviana Moreno²

Resumen: El sismo ocurrido el 15 de agosto de 2007 cerca a Pisco, Perú, ocasionó licuación de arenas en múltiples lugares ubicados a lo largo de 250 kilómetros de la costa de Perú al sur de Lima. Este artículo presenta los resultados de investigaciones geotécnicas efectuadas en la ciudad de Tambo de Mora, donde se encontraron evidencias del fenómeno de licuación en las observaciones de campo efectuadas después de dicho sismo. También se presentan análisis de susceptibilidad a licuación. En las zonas más afectadas por el sismo se encontraron suelos heterogéneos con una capa de arena suelta superficial, y una capa de grava a distintas profundidades. El nivel freático se encontró a profundidades menores a un metro. Los análisis de licuación mostraron que la capa de arena suelta superficial tiene una alta probabilidad de licuación si es sometida a un sismo similar al del 2007. Además, debajo de la capa de grava se encontró arena limpia que podría ser también susceptible a licuación.

Palabras clave: licuación, Tambo de Mora, terremoto de Pisco 2007.

GEOTECHNICAL CHARACTERIZATION OF SITES SUBJECTED TO LIQUEFACTION – THE TAMBO DE MORA CASE HISTORY

Abstract: The earthquake that occurred on August 15, 2007 near Pisco, Perú, caused liquefaction in multiple locations along 250 kilometers of the Peruvian coast south of Lima. This article presents the results of the geotechnical investigation performed in areas close to the district of Tambo de Mora, where significant liquefaction evidence was encountered during the field observations after the earthquake. Liquefaction susceptibility analyses are also presented. In the areas most affected by liquefaction, heterogeneous soil conditions were encountered with a layer of superficial loose sand underlain by a gravel layer at different depths. The ground water table was found very close to the surface. Liquefaction analyses show that the layer of loose sand is highly susceptible to liquefaction under a seismic loading similar to the earthquake of 2007. Under the gravel layer there are clean sands that may also be susceptible to liquefaction.

Keywords: liquefaction, Pisco earthquake of 2007, Tambo de Mora.

INTRODUCCIÓN

Este trabajo presenta los resultados de trece perforaciones efectuadas en el distrito de Tambo de Mora, provincia de Chíncha, departamento de Ica, Perú. En este lugar el sismo del 15 de agosto de 2007 frente a Pisco, Perú, produjo fallas importantes del suelo debido al fenómeno de licuación. El objetivo del trabajo es utilizar los resultados de las perforaciones efectuadas y analizarlos con los métodos comúnmente empleados para evaluar el potencial de licuación del suelo.

EL FENÓMENO DE LICUACIÓN DE SUELOS

El fenómeno de licuación en arenas ocurre cuando las cargas cíclicas de movimiento sísmico causan un incremento en la presión de agua en los vacíos del suelo, reduciendo los esfuerzos efectivos y haciendo que el suelo

¹ Artículo recibido el 7 de setiembre de 2011 como parte del 2do Encuentro Latino de Profesores de Geotecnia. Artículo aceptado en versión final el 15 de noviembre de 2011.

² Docentes, Departamento de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Perú, Av. Universitaria 1801, San Miguel, Lima, Perú. Emails: gzavala@pucp.edu.pe, molcese@pucp.edu.pe, jorge.zegarra@pucp.edu.pe, vmoreno@pucp.edu.pe

perda casi toda su resistencia al corte, volviéndose su consistencia parecida a la de un fluido. Este fenómeno se empezó a estudiar en detalle luego de que su ocurrencia en los terremotos de Niigata, Japón y Anchorage, Alaska, EEUU, en 1964, causaran grandes daños (Seed et al., 2003). Muchos investigadores han desarrollado metodologías para evaluar el riesgo de licuación de suelos basado en distintos ensayos de suelos, siendo las más utilizadas inicialmente el criterio chino modificado de Wang (1979) y el método de Seed e Idriss (1982), y más recientemente Youd et al. (2001), que recopila la información de las reuniones de NCEER ocurridas en 1996 y 1998. Luego de los terremotos de Kocaeli (Turquía) y Chi-Chi (Taiwán) en 1999, donde ocurrieron severos daños debidos a licuación en lugares donde los métodos disponibles no la predecían, se vio la necesidad de desarrollar nuevos criterios con especial énfasis en la influencia del contenido de finos en el suelo. En 2003 Raymond B. Seed y un grupo de investigadores de la Universidad de California en Berkeley publicaron un documento que unificaba los resultados de investigaciones recientes acerca del fenómeno de licuación de suelos. A pesar de que existen nuevas investigaciones, algunas de ellas controversiales, en el presente estudio se utilizó la metodología propuesta por Seed et al. (2003), complementada con los estudios de Cetin et al. (2004). Esta metodología utiliza un valor N del ensayo SPT normalizado por profundidad y ajustado por la cantidad de finos para cuantificar la susceptibilidad del suelo a la licuación.

TERREMOTO DE PISCO 2007, TAMBO DE MORA Y CANCHAMANÁ

El 15 de agosto de 2007, un sismo de magnitud $M_w = 8.0$ ocurrió en el mar frente a Pisco, Perú. El registro de Ica (Parcona) muestra un PGA de hasta 0.5g y el registro de La Molina muestra duración significativa de alrededor de 100 segundos. Este sismo produjo múltiples daños en las regiones costeras cercanas al epicentro. Muchos de los daños en el terremoto se debieron al fenómeno de licuación en arenas, la cual sucedió a lo largo de 250 kilómetros de las costas del litoral peruano. Rodríguez Marek et al. (2007) describieron los aspectos geotécnicos del sismo del 2007, así como sus aspectos sismológicos. Una de las zonas más afectadas por el fenómeno de licuación fue el distrito de Tambo de Mora, localizado aproximadamente a 50 km al este del epicentro del sismo en la provincia Chincha, Departamento de Ica. En este lugar la ocurrencia del fenómeno de licuación de suelos ocasionó pérdida de vidas humanas y cuantiosos daños materiales. Maggiolo (1975) indica la existencia de licuación de suelos en Tambo de Mora en el sismo de Lima de 1974. Rodríguez Marek et al. (2007) también detallaron las observaciones y datos recolectados durante el reconocimiento de campo efectuado luego del terremoto. Para este estudio se efectuaron perforaciones en zonas de dos casos descritos por ellos.

El primer caso es un gran desplazamiento lateral en dirección al mar que se produjo en las pampas de Canchamaná, a 2.5 km al norte de Tambo de Mora. Este desplazamiento, mostrado en la Figura 1, se produjo debido a licuación de los suelos. El área desplazada mide al menos 3 km de sur a norte y 1 km de este a oeste. En este sector se produjeron grietas perpendiculares al borde marino, indicativas de este gran desplazamiento. Asimismo, se produjo un desplazamiento vertical de aproximadamente 3 metros en esa misma área (Figura 2)



Figura 1: Desplazamiento lateral en Canchamaná (de Rodríguez-Marek et al., 2007).



Figura 2: Desplazamiento vertical producto del desplazamiento lateral en la zona de la Bajada del Socorro, Canchamaná (Olcese y Zegarra, 2007)

El segundo caso comprende los hundimientos y falla de cimentaciones superficiales en un vecindario de la ciudad de Tambo de Mora. Dicha ciudad está ubicada sobre depósitos eólicos y aluviales del holoceno, y tiene algunas zonas con nivel freático casi superficial (menos de 1 m de profundidad). Hubo evidencias de licuación (conos de deyección y asentamientos menores) en varios lugares de la ciudad. Adicionalmente, en una extensión de 300 m en la avenida Alfonso Ugarte, prácticamente todas las edificaciones tuvieron asentamientos iguales o mayores a 30 cm, teniendo algunas asentamientos de entre 70 y 90 cm. (Figura 3).



Figura 3: Asentamientos de aproximadamente 90 cm en Tambo de Mora (Olcese y Zegarra, 2007).

TRABAJO DE CAMPO

Para el presente proyecto se efectuaron trece perforaciones en distintos lugares de la zona cercana a Tambo de Mora. Once perforaciones fueron efectuadas con el método de perforación por lavado (“Wash Boring”). La profundidad planeada para estas perforaciones fue de 15 m, pero debido a la presencia de grava mal graduada encontrada en casi todas las perforaciones (excepto en P-08) sólo se pudo avanzar hasta profundidades de entre 2.5 y 9.5 metros. Se efectuaron dos perforaciones rotativas con diamantina, con el objetivo de atravesar la capa de grava y explorar los suelos subyacentes. En ambos tipos de perforaciones se efectuaron ensayos SPT cada metro con un martillo de tipo donut, con sogas de mimbre de 1 pulgada de diámetro dando dos vueltas al malacate (sin gatillo).

La Figura 4 muestra un plano general con la ubicación de las perforaciones P-01, P-02 y P-03, y la ubicación de la zona de la ciudad de Tambo de Mora donde se hizo el resto de las perforaciones. La Figura 5 muestra el detalle de ubicación de las perforaciones efectuadas en la zona de la ciudad de Tambo de Mora (P-05 a P-13). La Figura 6 muestra los perfiles de suelo para cada una de las perforaciones, los valores de N (de campo) de los ensayos SPT y

los contenidos de finos (partículas <#200) para cada muestra. En el presente trabajo se consideraron dos zonas generales de exploración.

La primera zona comprende una gran área de la pampa de Canchamaná, correspondiente al área delimitada por Rodríguez-Marek et al. (2007) que tuvo un gran desplazamiento lateral y vertical (Figuras 1 y 2) y en ella se ubicaron las perforaciones P-01, P-02 y P-03. En la parte norte de esta zona se encontraron grietas paralelas al litoral luego del sismo de 2007 (cerca de la perforación 1) y en la zona sur es donde se pudo apreciar un desplazamiento vertical de casi 3 metros (perforaciones P-02 y P-03). Las perforaciones llegaron a profundidades de entre 5 y 10 metros y se encontró arenas sueltas superficiales seguidas por arenas medianamente densas, densas y muy densas.



Figura 4: Ubicación de perforaciones (P-01, P-02 y P-03)

La segunda zona comprende parte del área urbana de Tambo de Mora e incluye el resto de las perforaciones. La perforación 4 se efectuó cerca a la plaza mayor, en un edificio que sufrió daños considerables (no se muestra en el plano de perforaciones), con la grava encontrada a 3 m. Las perforaciones P-05, P-06, P-07, P-10 y P-11 se hicieron en una zona de muchos daños debidos a licuación en la avenida Alfonso Ugarte. En general en estas perforaciones se encontró arena suelta en las capas superficiales (hasta 2 m), seguida por arena medianamente densa a densa. La napa freática se encontró a un nivel casi superficial (entre 0.6 y 0.8 m). La perforación P-08 se hizo en una zona de pocos daños debidos a problemas del suelo. En ésta se encontró arena medianamente densa superficial sobre arena densa a muy densa. En esta perforación no se encontró grava y se llegó hasta la profundidad planeada de 15 m. La perforación P-09 se hizo en una zona de poco daño y se encontró grava muy superficial por lo que no se pudo avanzar más de 1.5 m. Las perforaciones P-12 y P-13 se hicieron con broca diamantina con la finalidad de pasar la

capa de grava. Ambas perforaciones encontraron arena densa superficial hasta 1.5 m, seguida por grava mal graduada. Debajo de la grava se encontró nuevamente arena limpia (SP), de medianamente densa a muy densa desde una profundidad de 6.7 y 8.5 m, respectivamente hasta 15 m (término de la perforación).



Figura 5: Ubicación de las perforaciones. Detalle de zona de Tambo de Mora.

ANÁLISIS DE LICUACIÓN

Se efectuó un análisis de licuación en las perforaciones siguiendo la metodología planteada por Seed et al. (2003) y Cetin (2004) para calcular la susceptibilidad del terreno a licuación basada en el ensayo SPT. Se utilizó los parámetros del sismo de 2007, con magnitud $M_w = 8.0$ y $PGA = 0.3g$.

En la perforación P-01 se obtuvieron altas probabilidades de licuación (hasta 90%) en las capas superficiales hasta una profundidad de 7 metros (excepto a 3 m). Esta capa fue la que probablemente licuó durante el sismo de 2007. La perforación efectuada en la zona por el CISMID (2010) muestra arenas aún más sueltas, por lo que esta área parece ser susceptible a licuación en caso de un sismo importante. Debido a la profundidad de la napa freática, en las perforaciones P-02 y P-03 se encontraron probabilidades de licuación de suelos casi nulas. Esto contrasta con la observación de un gran desplazamiento lateral y deformación vertical en esa zona. En la perforación P-04 se encontró una alta probabilidad de licuación en las capas superficiales hasta los 3 m de profundidad. En las perforaciones P-05 y P-06, efectuadas en una de las zonas de mayor destrucción debido a licuación en el suelo en Tambo de Mora, se obtuvieron altas probabilidades de licuación (70-90%) en capas superficiales hasta los 2 metros de profundidad. La perforación P-07, efectuada en una zona donde se observó licuación severa durante el sismo de 2007, también muestra una zona superficial con probabilidades de licuación de 100% y luego probabilidad de

licuación de 30% a los 3.5 m de profundidad. En la perforación P-08, que se efectuó en una zona donde no había evidencias de licuación, los resultados sólo muestran una capa superficial con 30% de probabilidad de licuación y casi nula probabilidad de licuación hasta 15 m. Las perforaciones P-10 y P-11 muestran altas probabilidades de licuación en las capas superficiales (entre 70 y 100%). Las perforaciones P-12 y P-13 muestran que debajo de la grava encontrada hay capas de arenas finas muy limpias, que podrían estar sujetas al fenómeno de licuación con probabilidades de licuar de hasta 90%.

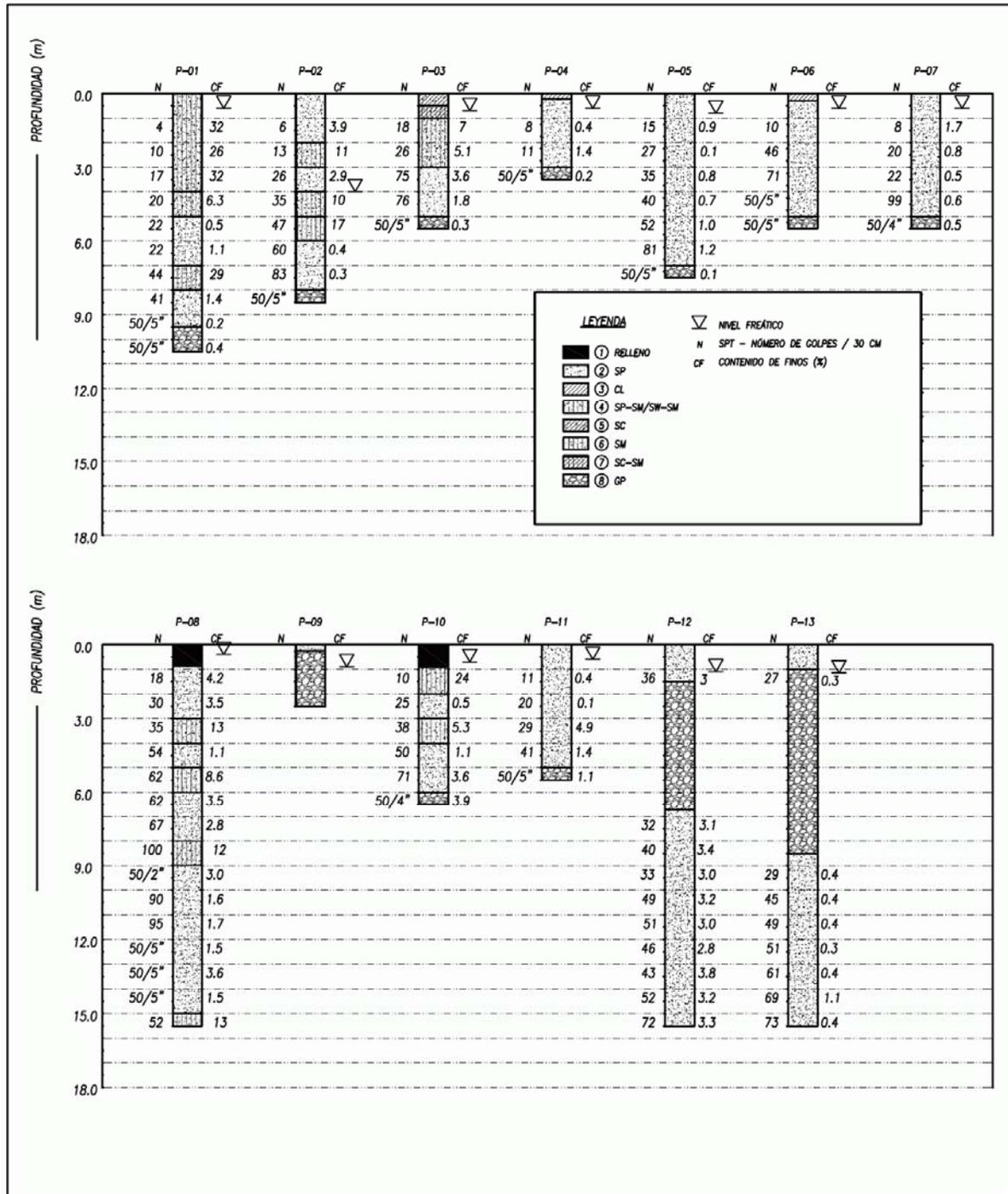


Figura 6: Perfiles de suelo, valores de SPT de campo (sin corrección) y contenido de finos.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El suelo en la zona estudiada de Tambo de Mora, donde se observó licuación severa, es bastante heterogéneo. La exploración mostró que hay áreas de rechazo (por presencia de grava) a poca profundidad en algunos lugares donde se encontró evidencias de licuación generalizada luego del sismo del 2007. Sin embargo, se puede decir que en general el suelo en esa zona se caracteriza por tener una napa freática casi superficial, y una capa superficial de arena suelta que tiene altas probabilidades de licuación en caso de un evento sísmico como el de agosto de 2007. En casi todas las perforaciones, excepto la P-08, se encontró grava a una profundidad variando entre 1 y 10 m. Los resultados del análisis muestran que la mayoría de los daños ocurridos en la zona en estudio probablemente han sido debidos a licuación de las capas superficiales de suelo. Sin embargo, en lugares donde existe grava cercana a la superficie también se encontró arena debajo de la grava, la cual podría estar sujeta a este fenómeno en caso de eventos sísmicos de magnitud como el ocurrido en agosto de 2007. Algunos de los daños y asentamientos del terreno mencionados podrían haberse debido a la licuación de dicha capa de arena, lo cual ocasionaría que la capa de grava pierda sustento y tenga un asentamiento significativo.

En general en la zona estudiada no es recomendable efectuar construcciones con cimentaciones superficiales, ya que otro sismo de la magnitud similar a la del 2007 podría producir daños similares a los producidos por dicho sismo. Aunque muchos ensayos muestran que la zona más propensa a licuación está situada desde la superficie hasta los dos metros de profundidad, algunos sondajes muestran que hay zonas a mayores profundidades que podrían estar sujetas a este fenómeno. Debido a esto, las cimentaciones más adecuadas para estructuras construidas en esta zona son cimentaciones profundas.

REFERENCIAS

- Cetin, K.O., Seed, R.B., Der Kiureghian, A., Tokimatsu, K., Harder, L.F., Kayen, R.E. y Moss, R.E.S. (2004). "Standard penetration test-based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction potential", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 130, No. 12, pp. 1314-340.
- CISMID (Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Prevención de Desastres) (2008). "Informe #3: Microzonificación Sísmica de las Ciudades de Tambo de Mora y Chíncha Baja", Universidad Nacional de Ingeniería.
- CISMID (Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Prevención de Desastres) (2010). "Collaborative Research: The M8.0 Pisco Peru Earthquake - A Benchmark Ground Failure Event for Remote Sensing and Data Archiving".
- Maggiolo, O. (1975). "Algunos aspectos de Mecánica de Suelos y comportamiento de construcciones durante el sismo del 3 de octubre de 1974", Reunión Andina de Seguridad Sísmica, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú.
- Olcese, M. y Zegarra, J. (2007). "Aspectos Geotécnicos del Sismo del 15 de Agosto en Pisco", *Publicación del Departamento de Ingeniería*, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú.
- Rodríguez-Marek, A., Alva Hurtado, J., Cox, B., Meneses, J., Montalva, G., Moreno, V., Olcese, M., Sancio, R. y Wartman, J. (2007). "Aspectos geotécnicos del sismo de Pisco, Perú del 15 de agosto del 2007", *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, Vol. 7, No. 2-3, pp. 239-258.
- Seed, R.B., Cetin, K.O., Moss, R.E.S., Kammerer, A., Wu, J., Pestana, J., Riemer, M., Sancio, R.B., Bray, J.D., Kayen, R.E. y Faris, A. (2003). "Recent advances in soil liquefaction engineering: a unified and consistent framework", keynote presentation, 26th Annual ASCE Los Angeles Geotechnical Spring Seminar, Long Beach, California.
- Seed, H.B. e Idriss, I.M. (1982). *Ground Motions and Soil Liquefaction During Earthquakes*, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California, EEUU, 134 pp.
- Youd, T.L., Idriss, I.M., Andrus, R.D., Arango, I., Castro, G., Christian, J.T., Dobry, R., Finn, W.D. L., Harder, L. F., Hynes, M.E., Ishihara, K., Koester, J.P., Liao, S.S.C., Marcuson, W.F., Martin, G.R., Mitchell, J.K., Moriwaki, Y., Power, M.S., Robertson, P.K., Seed, R.B. y Stokoe, K.H. (2001). "Liquefaction resistance of

soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 127, No. 10, pp. 817-833.