

LICUACIÓN DE SUELOS DURANTE EL SISMO PISCO-PERU-2007

A. Carrillo Gil, Dr. Eng., P.E., F. ASCE
Unidad de Investigación, Facultad de Ingeniería
Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú
L. Alcayhuaman A., Dr. Eng.
Decano de la Facultad de Ingeniería
Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú

RESUMEN

El sismo del 15 de Agosto del 2007, ocurrido al sur de Lima, Perú: ha originado graves daños debido al desarrollo del fenómeno de licuación en extensas áreas industriales y de vivienda, apoyadas sobre suelos arenosos saturados. Se comentan una serie de soluciones diseñadas después de ocurrido el terremoto en base a estudios de campo y aplicación de experiencias y tecnología que evalúa el potencial de licuación de los suelos subyacentes al área crítica más afectada. Se establece que ocurrió una considerable disminución de la capacidad portante en las cimentaciones existentes, mostrándose soluciones diseñadas para mitigar el efecto post licuación que pueda ocurrir en el área.

Palabras claves: terremotos, licuación, cimentaciones

ABSTRACT

The Pisco-Peru-2007 Earthquake, occurred to the South of Lima, has caused serial damages due to the development of liquefaction phenomena through wide industrial and residential areas founded on saturated sandy soils. In this paper the authors discuss about a series of solutions designed after the occurrence of the earthquake, based on field surveys and application of experiences and technologies, in order to evaluate the liquefaction potential of the underlying soils on the most impacted critical area. It is established that a significant decrement of the bearing capacity took effect on the existing foundations, showing solutions designed to mitigate the post-liquefaction effect that could happen in the area.

Keywords: earthquake, liquefaction, foundation

1. INTRODUCCION

Después de ocurrido el terremoto Pisco-Perú-2007, hemos realizado una serie de estudios, observaciones y evaluaciones geotécnicas en la zona del desastre más afectadas por este evento sísmico, considerándose principalmente las ciudades de Ica, Pisco, Chincha y Tambo de Mora, en el departamento de Ica, Perú.

Los trabajos de investigación en el sitio se han venido desarrollando desde el 16 de Agosto del 2007, esto es, al día siguiente de ocurrido el sismo habiéndose obtenido valiosa información de campo con evidencias gráficas, exploración de suelos con mapeo de grietas, fotografías y caracterizaciones del material geotécnico subyacente a las áreas más afectadas, considerándose que el sismo, que llegó a magnitud cercana a 8.0 Mm, ha originado los mayores daños debido a la generación del fenómeno de licuación de las arenas, sueltas y saturadas donde se apoyaban una gran cantidad de edificaciones de todo tipo y equipos industriales y de comunicación, generándose la pérdida de capacidad portante, desplazamientos y empujes laterales, surgencia de agua por el agrietamiento y juntas de losas del pavimento, así como algunos pequeños giros y hundimientos como consecuencia del desarrollo temporal de presiones intersticiales muy altas generadas por el movimiento sísmico..



Figuras 1 Evidencia de licuación de suelos



Figura 2 Levantamientos y deformación del suelo

2. ASPECTOS SÍSMICOS

La sismicidad del Perú se debe a eventos producidos por la subducción interplaca como resultado de la ruptura de la zona de contacto de la placa de Nazca y la placa Sudamericana suprayacente y eventos intraplaca que ocurren dentro de las dos placas.



Figura 3. Localización del sismo

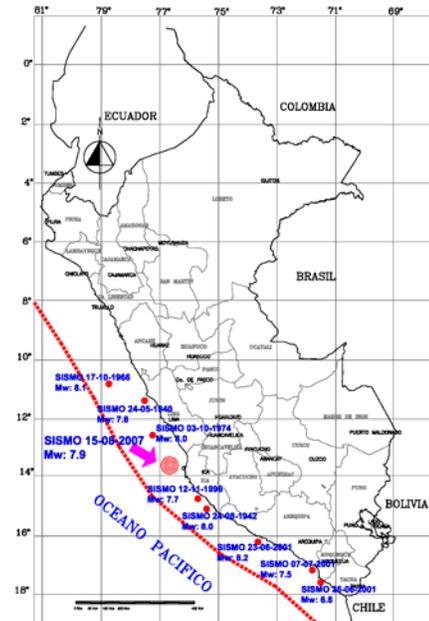


Figura 4. Datos del IGP y del USG para el terremoto Pisco-2007

De acuerdo a la profundidad del foco sísmico (40 km) y a la solución obtenida para la orientación de la fuente, el sismo de Pisco-Perú 2007 tuvo su origen en el mecanismo de fricción de las placas de Nazca y Sudamericana dentro del proceso de convergencia. La solución obtenida para la fuente sísmica es similar a los mecanismos para otros sismos ocurridos en 1940, 1942, 1966, 1974, 1996 y 2001, todos ellos de magnitud mayor a 7.5Mw.

El sismo produjo daños importantes en un gran número de viviendas de la ciudad de Pisco (aproximadamente el 80%) y menor en las localidades aledañas, llegándose a evaluar una intensidad del orden de VIII en la escala de Mercalli Modificada (MM). Este sismo presentó su epicentro y réplicas entre las áreas de ruptura de los terremotos ocurridos en Lima en 1974 (7.5 Mw) e Ica en 1996 (7.7 Mw), Fig. 4. Asimismo, este sismo originó un fuerte maremoto cercano a un tsunami que se produjo frente a las localidades ubicadas al sur de la península de Paracas. (IGP- Tavera et al., 2007).

Por otro lado, la distribución espacial de las réplicas del sismo ocurridas entre el 15 y 21 de Agosto 2007, todas con magnitudes mayores a los 3 ML, se muestra en la Figura 5, obsérvese la presencia de tres agrupamientos importantes que sugieren el desarrollo de un proceso complejo de ruptura. El mecanismo focal para el sismo de Pisco es coherente con el tipo de deformación presente en el borde occidental del Perú. Así mismo, se observa que los mayores daños por efectos de licuación se han producido en el sector litoral de Chíncha definiendo una franja de 150 m a 300 m entre la línea de playa y el frente de los acantilados o la gran duna de “Pampa de Ñoco”. Esta franja de falla por licuación incide sobre un ancho de 40 m aproximadamente, tal como se muestra en la figura 6.

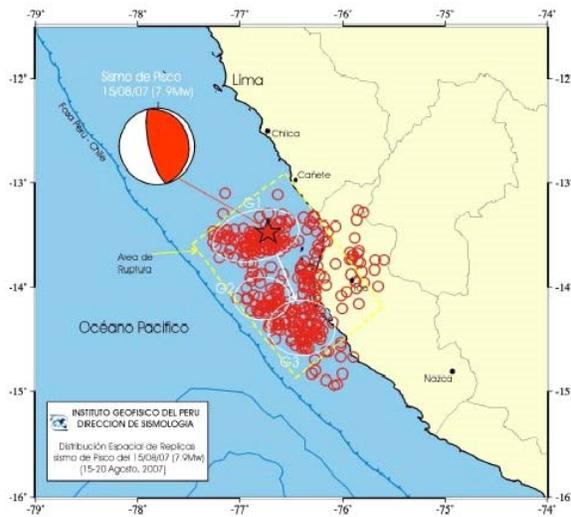


Figura 5. Distribución de Réplicas



Figura 6. Sector afectado en el litoral de Chíncha

3. DAÑOS ESTRUCTURALES

Los daños estructurales a consecuencia del terremoto Pisco-Perú-2007 han dejado en evidencia que no se ha tomado en cuenta el comportamiento mecánico del suelo en el diseño de la cimentación de las estructuras. De la evaluación efectuada en las construcciones antiguas de adobón, adobe y quincha se observa que el 80% han colapsado o han sufrido daños severos, en la zona de desastre. La ocurrencia del fenómeno de licuación de los suelos granulares finos saturados ha producido daños estructurales en edificaciones importantes como el Penal de Tambo de Mora, la plataforma de la Carretera Panamericana Sur en los tramos cercanos al litoral como en el sector Jahuay-Chíncha, edificaciones de playa y las instalaciones industriales de empresas pesqueras. Debido al maremoto posterior al terremoto, la acción del agua afectó a las edificaciones cercanas al litoral, destruyendo los muros perimetrales (Figuras 7 y 8).



Fig. 7. Falla estructural y hundimiento, ciudad de Ica



Fig. 8. Hundimiento 2 pisos y colapso de la edificación de concreto armado

4. MECANISMO DE LICUACIÓN

La licuefacción del suelo es uno de los temas más interesantes y complejos de la geotécnica de terremotos. Normalmente se presenta en los suelos granulares finos sueltos, en los que el espacio entre partículas individuales es rellenado con agua. Como consecuencia de los poros cubiertos totalmente con agua, se ejerce una presión sobre las partículas del suelo circundante. Cuando un terremoto afecta al suelo, las partículas del suelo tienden a reagruparse hacia un estado compacto causando que el agua ejerza una fuerte presión para empujar afuera los espacios vacíos que estaban ocupados. Debido a que el promedio de movimientos es, por lo general, rápido así como el promedio por el cual el agua puede salir o escapar del suelo, la presión del agua en los espacios se incrementa (exceso de presión de agua) tendiendo a empujar las partículas del suelo unas con otras. Debido a que las partículas ya no se encuentran en estrecho contacto unas con otras, la resistencia del suelo decrece, produciéndose una falla en el caso que el suelo no pueda soportar mas la carga impuesta. Bajo tal tensión en las fallas y el tiempo para disipar este exceso de presión de agua, las partículas colapsan al interior de una formación compacta mientras que el exceso de agua fluye por un camino hacia la superficie. Esto sucede en simultáneo con el asentamiento que logra el depósito por el estado de densidad luego de la falla.

Las figuras siguientes (9 y 10) muestran las evidencias del desarrollo del fenómeno de licuación en la zona del desastre del sismo Pisco-Perú-2007.



Figura 9. Tipo de suelo y posición del nivel de agua en las zonas críticas de licuación



Figura 10. Características de la Arena saturada limpia con alto potencial de licuación

5. POTENCIAL DE LICUACION

La medida del potencial de licuación como consecuencia de un terremoto es un problema complejo. Son bien conocidos los factores o los parámetros en diversos suelos y las características sísmicas que influyen en este problema. Dichos factores incluyen la intensidad y duración de los terremotos, la ubicación de la tabla de agua subterránea, el tipo de suelo, la densidad relativa del suelo, la gradación del tamaño de las partículas, la forma de las partículas, el entorno de los depósitos del suelo, las condiciones de drenaje, la presión de confinamiento del suelo, la duración del sismo y la cementación de los depósitos.

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 Ishihara (1990), 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 ha sido de gran importancia en la Zona de de la catástrofe, 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 de las cimentaciones por efectuarse en el área.

El análisis del potencial de licuación en este trabajo 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; a fin de obtener un mejor estimado de este parámetro.

Es un principio generalmente aceptado que el potencial de licuación de estratos arenosos puede evaluarse utilizando correlaciones entre datos de resistencia a la penetración (SPT) y la resistencia cíclica del material movilizado durante una fuerte excitación vibratoria. En este estudio se utilizaron datos de los ensayos SPT efectuados y la resistencia cíclica caracterizada por la relación de esfuerzo cíclico (CSR) definiéndolo como el esfuerzo cortante promedio actuante en un estrato normalizado por el esfuerzo efectivo de sobrecarga.

Tres métodos han sido utilizados en este trabajo, considerándose el primero de Seed & Idris, el segundo de Tokimatsu & Yoshimi y el tercero de Iwasaki & Tatsuoka. La base de cada uno de ellos se indica a continuación:

SEED E IDRIS.

En base al sismo ocurrido en Nigata en 1964 y muchos otros datos históricos y resultados de laboratorio en arenas limpias sometidas a ensayos triaxiales cíclicos, propusieron un método simple para estimar la resistencia a la licuación de las arenas tomando en cuenta la densidad relativa derivada del ensayo S.P.T. Finalmente esta información se complementó al presentar un nuevo criterio donde se establece la importancia del contenido de finos en la resistencia a la licuación de las arenas.

TOKIMATSU Y YOSHIMI.

En base a los resultados de ensayos de laboratorio de licuación de arenas saturadas, indicaron que los efectos de movimientos sísmicos que causan licuación pueden ser representados por dos parámetros: la aceleración horizontal del terreno y el número de ciclos de movimientos significativo, dichos parámetros son agregados a las formulas dadas por anteriores investigadores, como factores de corrección en términos de la profundidad y la magnitud del terremoto respectivamente, donde dichos parámetros incluyen a su vez la profundidad en metros y la magnitud del sismo.

IWASAKI Y TATSUOKA.

En base al trabajo realizado por Seed e Idriss (1971), la carga dinámica inducida en el elemento de suelo por un movimiento sísmico puede ser estimada agregando un factor de reducción del esfuerzo de corte dinámico para tomar en cuenta la deformación elástica del terreno, que además es función de la profundidad donde se encuentre el estrato.

Para una evaluación general se ha efectuado la aplicación de los programas de cómputo mencionados bajo condiciones probables de ocurrencia del fenómeno en el área de la catástrofe. Esto es, considerando en primer lugar condiciones similares a las ocurridas en las zonas críticas de fuerte licuación que ha originado los mayores daños reportados y verificados después del terremoto de Pisco-Perú-2007. Luego se han estimado los peligros de licuación en la zona de menores daños. Tomando en cuenta que los resultados obtenidos son teóricos y por lo tanto ajenos a cualquier evento singular de la naturaleza que pueda ocurrir en el futuro, en cada caso se ha determinado el Factor de Seguridad contra la Ocurrencia de Licuación en el sitio, a fin de establecer los mejores criterios de seguridad y mitigación del fenómeno de licuación que pueda presentarse en el lugar de estudio.

Los cálculos efectuados por los tres métodos mencionados se muestran en las Figuras 11 y 12, tomándose terremotos con magnitudes de 7.5 (IGP) a 8.0 Mw (USGS), y aceleración de 0.48g (IGP). En el análisis efectuado se observa que para la Zona Crítica la licuación puede producirse entre 1.60 m hasta 2.30 m de profundidad en promedio, y presenta bajo Factor de Seguridad, por lo que se confirman los mayores daños reportados y por lo tanto debe descartarse ubicar en ella cualquier estructura importante.

Dentro del análisis efectuado para cada una de las áreas estudiadas se ha observado que es superficial y el espesor del estrato potencialmente licuable (arena limpia pobremente graduada), es distinto ya que mientras en el área crítica tiene un espesor promedio de 4.00 m, en la zona de menores daños, este estrato presenta un espesor promedio de 2.50 m. Así mismo, las características granulométricas que describen al estrato arenoso indican que en el primero se detecta un contenido de finos promedio de 2.05% con un $D_{50} = 0.50$ mm, mientras que en segundo el porcentaje de finos promedio es de 4.23% para un $D_{50} = 0.40$ mm.

A continuación se muestran los resultados de cálculos y diagramas correspondientes a la aplicación del método en cada caso.

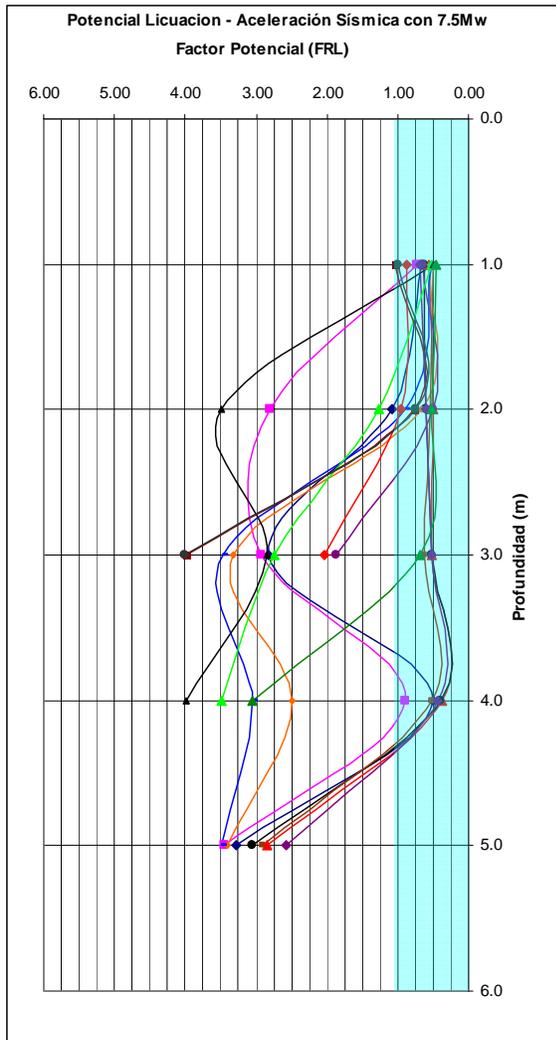


Figura 11. Diagrama de resultados de Factores de Seguridad a la licuación a una profundidad promedio de 1.0 m a 4.0 m en Tambo de Mora – Pisco

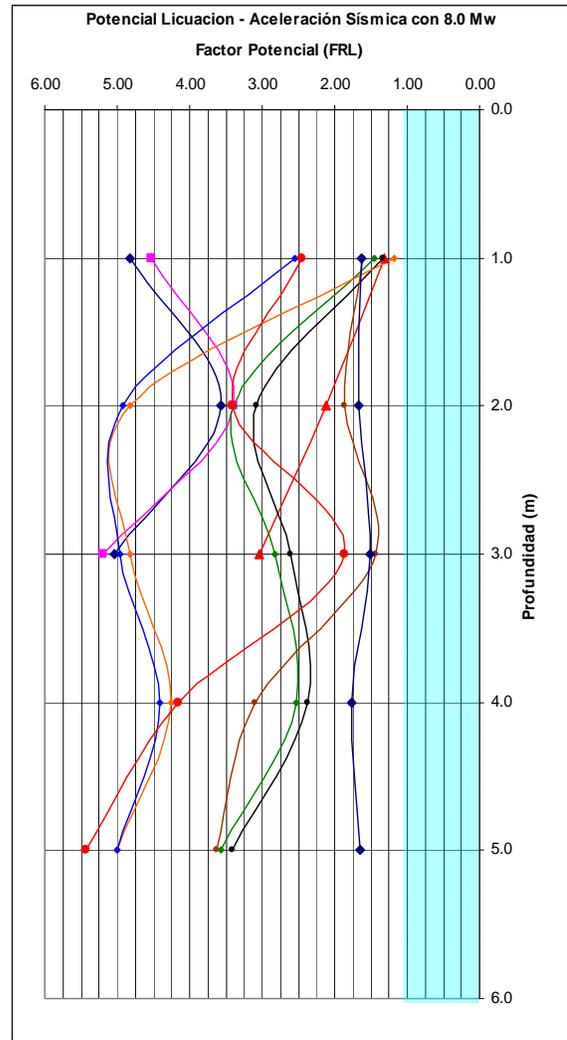


Figura 12. Factor FRL evaluados en sectores de bajo potencial de licuación en Tambo de Mora Pisco, Perú.

6. MITIGACIÓN DEL FENÓMENO

Para la zona crítica de emergencia se detectó una significativa disminución de la capacidad portante del suelo. De los ensayos de campo y las evaluaciones efectuadas se establece que en la condición actual de muchas cimentaciones y de acuerdo con la magnitud de las cargas se alcanza una presión neta de 0.85 Kg/cm² y el suelo actual sólo presenta una capacidad admisible de carga de 0.43 Kg/cm² a la profundidad actual de cimentación (Figura 13). Por ello, fue necesario ampliar el área de apoyo de la cimentación, con el fin de que la presión aplicada por lo menos sea igual a la capacidad de carga actual del suelo de apoyo después de ocurrida la licuación en el sitio..

El detalle de las recimentaciones practicadas en las obras industriales de la zona crítica se muestra en las Figuras 14 al 16, las mismas que sirvieron para el diseño estructural y reconstrucción de las mismas, tomando en cuenta las siguientes recomendaciones generales:

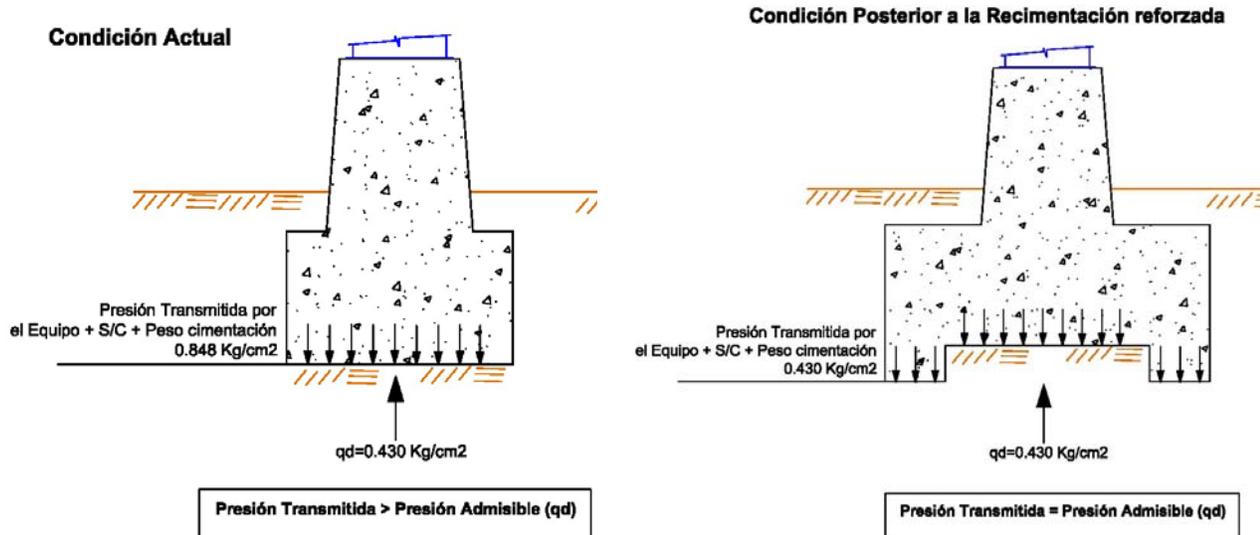


Figura 13. Reducción de la Capacidad de soporte por falla de resistencia al esfuerzo cortante

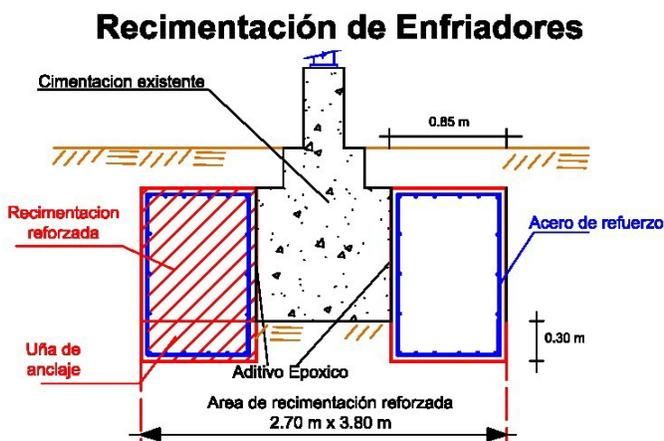


Figura 14. Procedimiento para la recimentación de equipos industriales existentes

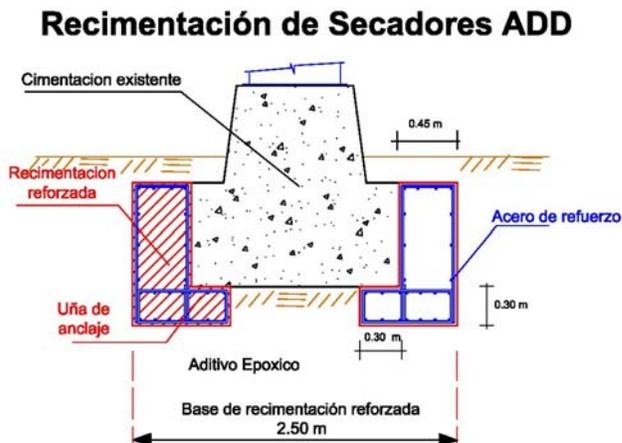


Figura 15. Recomendaciones para la recimentación de las estructuras

- 1- Previo a la construcción de la ampliación de la base de las cimentaciones, se efectuó un proceso de compactación adecuado en las zonas de apoyo de cada equipo.
- 2- En toda el área adyacente a éstas recimentaciones donde se han levantado las losas dañadas por el sismo, se recomendó practicar un proceso de compactación conveniente por medio de planchas vibrantes u otro método que permita lograr la densificación adecuada del sitio.
- 3- Debe colocarse aditivos epóxicos convenientes en las partes de unión entre el cemento antiguo y la obra nueva, con el fin de lograr la mayor adherencia entre ellos y resulte una cimentación completamente monolítica.
- 4- En todos los casos se efectuó un trabajo de recimentación muy cuidadoso y supervisado por ingeniero geotécnico competente.

Para mitigar los efectos destructivos de la licuación originada por eventos sísmicos futuros se tomó en consideración la experiencia de adoptar medidas para evitar su ocurrencia por medio de soluciones que se basan en drenar y densificar el terreno.

No obstante, en el caso de nuestros países, la aplicación de las técnicas de vibroflotación y compactación dinámica masiva, además de generar efectos debido a las vibraciones y al ruido, los equipos para ejecutarlas no son disponibles en nuestro mercado local lo que supone traerlos de fuera y asumir costos elevados para su ejecución.

Sin embargo, los métodos de compactación dinámica rápida pueden ser ejecutados con equipos disponibles y a menor costo, pero su profundidad de influencia es limitada. Esto obliga a la construcción de rellenos de ingeniería por medio de rodillos lisos de compactación con vibración que existen en nuestro medio de diferentes tamaños y energías de compactación

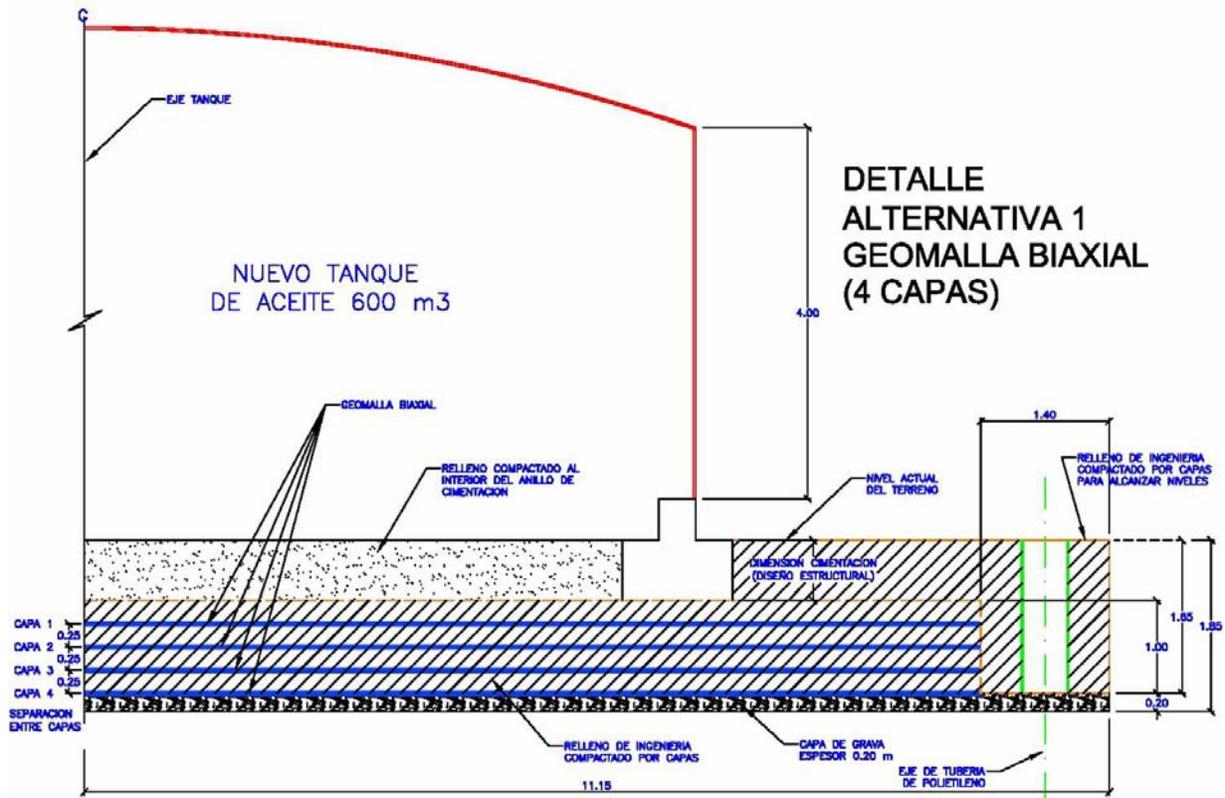


Figura 16. Alternativas para la recimentación de Tanque de aceite

Otro aspecto importante que se tomó en cuenta, es lograr la mitigación de los efectos de la licuación por medio de columnas de grava que resulta un sistema práctico y fácil de ejecutar que se practicó para la recimentación de tanques que almacenan productos de peso importante. A este tratamiento combinado con el efecto de densificación parcial inducido durante su ejecución y la acción drenante de las columnas de grava, se les puede adicionar la reducción del cortante tangencial cíclico por el efecto de inclusión flexible que la columna de grava introduce en el terreno tratado

Para ello, el sistema recomendado para disipar rápidamente las presiones intersticiales originadas por el fenómeno de licuación, aplicado a tanques, depósitos metálicos pesados, y otras estructuras especiales fue la instalación de columnas de grava cortas, dado al desarrollo superficial de la licuación, y combinado con un colchón o tapete de grava instalado a la profundidad conveniente (Figura 17). Este sistema implica la excavación hasta el nivel del suelo licuable en cada caso y la colocación de un colchón de grava conectado al exterior por medio de columnas llenas de grava. La disposición de estos elementos drenantes se dispuso estratégicamente de acuerdo a los lugares donde era necesaria la rápida salida del agua para disipar las presiones intersticiales acumuladas en los estratos licuables. En el caso de los rellenos se efectuó un refuerzo del suelo por medio del diseño conveniente por medio de capas de geomallas adecuadamente dispuestas (Figura 18 y 19).

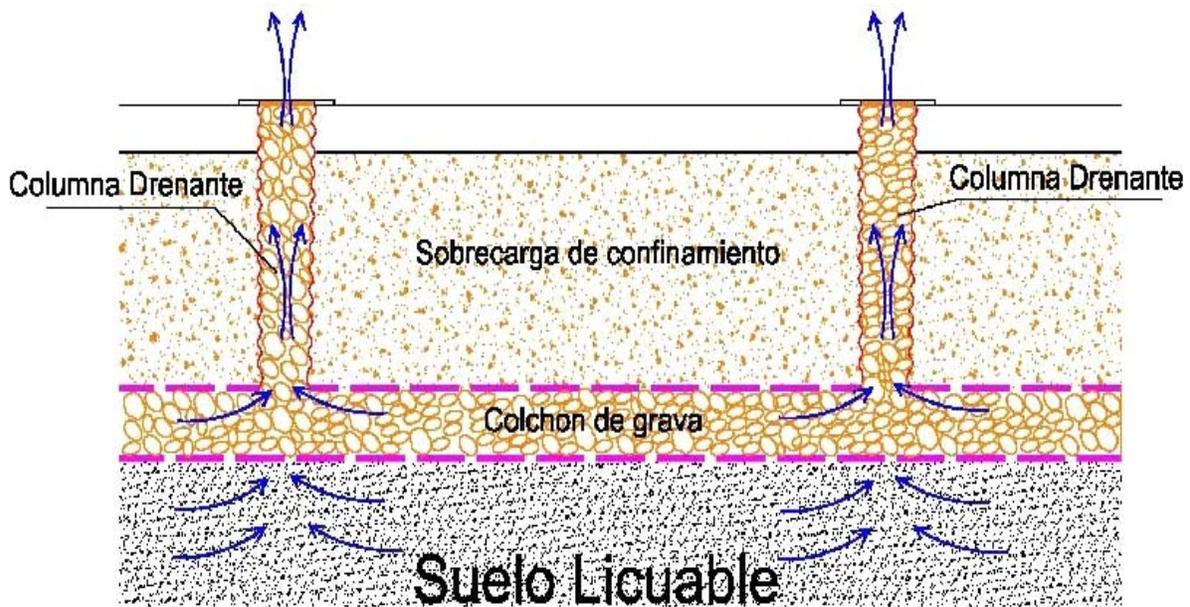


Figura 17. Sistema para disipación de las presiones para disminuir el efecto de la licuación de arenas saturadas aplicada en Tambo de Mora – Pisco



Figura 18. Procedimiento para la recimentación de equipos industriales existentes



Figura 19. Recomendaciones para la recimentación de las estructuras

7. COMENTARIOS FINALES

1. Se ha establecido fehacientemente que los mayores daños originados por el sismo de Pisco-Perú-2007, ocurrido el 15 de Agosto del 2007, se han originado por el desarrollo de altas presiones intersticiales que produjeron licuación en los estratos superficiales del suelo arenoso saturado subyacente a obras de ingeniería de todo tipo que soportaron un terremoto de magnitud 8.0 Mw y aceleración que llegó hasta 0.48 g, según datos de las agencias oficiales peruanas.
2. De las investigaciones efectuadas se detectó una substancial disminución de la capacidad de carga del suelo licuado que llegó a superar el 50%. Para preservar a las estructuras de daños graves en caso de un sismo severo futuro se adoptaron procedimientos de mejoramiento convenientes para lograr una mejor performance en las cimentaciones reparadas para soportar cargas después del sismo. Las columnas de grava cortas también han resultado una solución eficaz y económica y se han instalado dentro de rellenos reforzados, cimentación en platea sobre rellenos compactados y otras estructuras especiales cimentadas sobre suelos débiles y licuables por sismo.

3. Finalmente, recomendamos tomar en consideración el efecto de post-licuación en caso de un terremoto severo, que los procesos de mitigación se efectúen antes que las obras de recuperación, y evitar la carencia de estrategias congruentes que no aprovechan la experiencia ni aprenden lecciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Berg G.V. y Husid R. (1973), “Structural Behavior in the 1970. Peru Earthquake”, 5th World Conference in Earthquake Engineering, Rome, Italy.
2. Carrillo Gil, A., 1970 “Algunas Apreciaciones acerca del comportamiento del Suelo en el Sismo de Ancash, 1970, Memorias del II Congreso Nacional de Mecánica de Suelos é Ingeniería de Cimentaciones, Lima.
3. Carrillo Gil, A., (1971) “The Perú Earthquake Soil Behavior”, Informal Technical Session- Fourth Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering - San Juan – Puerto Rico.
4. Carrillo Gil, A., (Set. 1972) “El Suelo y los Daños del Sismo del 3 de Octubre de 1974, en el Perú”, Memorias de la IV Reunión Argentina de Mecánica de Suelos é Ingeniería de Fundaciones, San Juan – Argentina.
5. Carrillo Gil, A., (1975) “Influencia del Suelo en los Daños por Sismo: Evaluación del Potencial de licuación de un Suelo”. Memorias de la 1ra. Reunión Andina de Seguridad Sísmica- Pontifica Universidad Católica-Centro Inter.- Universitario de Desarrollo Andino, Lima Perú.
6. Carrillo Gil, A., (Julio 1977) “Correlations of the Seismic Effects on the Soils of Perú”, Procc. Ninth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering., Vol.II Tokyo- Japón, pp. 201- 202.
7. Carrillo Gil, A., (Enero 1982) “Influencia de las condiciones Sísmicas del Suelo en el Desarrollo Urbano de Chimbote”, Memorias del Forum Chimbote – Año 2000, C.I.P., Chimbote Perú.
8. Carrillo Gil, A., (Agosto 2007) “La geotecnia y el manejo de las emergencias sísmicas y climáticas” , Universidad del Altiplano, Puno, Perú,
9. Carrillo Gil, A., (Octubre 2007) “El Sismo de Pisco-Perú, 2007 y sus Consecuencias” Universidad Central de Guayaquil, Ecuador.
10. Carrillo Gil, A., (Noviembre,2007) “Avances Tecnológicos y los daños del Terremoto Pisco-Perú, 2007” Facultad de Ingeniería, Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú.
11. Cluff L. S. (1971), “Perú Earthquake of May 31, 1970; Engineering Geology Observations”, Bulletin of the Seismological Society of America Vol 61, N° 3, pp. 511-534.
12. Dobry, R., Ladd, R.S., Yokel, F.Y., Chung, R.M. and Powell, D. (1982) “Prediction of Pore Water Pressure Buildup and Liquefaction of Sands During Earthquakes by the Cyclic Strain Method” National Bureau of Standards Publication NBS-138. July 1982
13. Finn, W.D.L. and Ledbetter, R.H. (1991) “Evaluation of Liquefaction Effects and remediation Strategies by Deformation Analysis” Proceedings of GEO-COAST '91. Yokohama, Japan, pp. 441-446
14. Ishihara, K (1990) “Evaluation of Liquefaction Potential and Consequent Deformations in Sand Fills” Proceedings of the Workshop on Seismic Issues. Port of Los Angeles, CA.
15. Seed, R.B. et al., 2003, “Recent Advances in soil liquefaction engineering: a unified and consistent framework”, 26 Annual ASCE Los Angeles Geotechnical Spring Seminar, Long Beach, California, USA.
16. Tavera et al.,2007., Informe Preliminar sobre el Sismo del 15 de Agosto 2007, Instituto Geofísico del Perú.

Autorización y Renuncia

Los autores autorizan a LACCEI para publicar el escrito en los procedimientos de la conferencia. LACCEI o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que esta expresado en el escrito

Authorization and Disclaimer

Authors authorize LACCEI to publish the paper in the conference proceedings. Neither LACCEI nor the editors are responsible either for the content or for the implications of what is expressed in the paper.