

# Aplicación y verificación del Método Modificado de Expansión de Cavidades (MMEC), en el diseño de las inyecciones de compactación para la mitigación del potencial de licuación

Application and verification of the Modified Method of Cavity Expansion (MMCE) in the design of compaction grouting to reduce the liquefaction potential

**Iván Henríquez Pantaleón.** Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos  
EPTISA (antes GEOCISA). ihenriquez@eptisa.com

**Carlos Oteo Mazo.** Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos  
Catedrático de la Universidad A Coruña. carlosoteo@telefonica.net

**Gustavo Armijo Palacio.** Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos  
Geotecnia y Cimientos S.A. (GEOCISA). garmijop@geocisa.com

**Resumen:** La inyección de compactación es una técnica de mejora del terreno donde convergen muchas variables, algunas propias del terreno a mejorar, otras correspondientes al proceso de inyección, así como al material inyectado propiamente dicho. Estas variables, muy difíciles de manejar en todo su conjunto han hecho que el diseño de estos tratamientos, se haya basado en criterios empíricos e hipótesis simplificadas, que muchas veces no se cumplen en la realidad. En el año 2007, se publica un nuevo método de diseño para inyecciones de compactación, con finalidad de mitigar el peligro de licuación (Henríquez, tesis doctoral 2007), basado en el Método Modificado de Expansión de Cavidades (MMEC).

En este artículo se presenta un caso real, en el cual se ha aplicado el método de diseño, comentado previamente, y se han contrastado los resultados teóricos del método de diseño con los datos reales obtenidos de campo y finalmente, se verifica la eficacia del tratamiento mediante la evaluación de los resultados obtenidos en el tratamiento masivo con inyecciones de compactación llevado a cabo en el proyecto "Reconfiguración de la Refinería Lázaro Cárdenas de Río, en Minatitlán (Estado de Veracruz), México".

**Palabras Clave:** Licuación; Arenas sueltas; Inyecciones de compactación; Mitigación peligro de licuación

**Abstract:** Compaction grouting is a technique to improve the soil which is subject to many variables, some pertinent to the soil to be improved, others corresponding to the grouting process, and others to the grout itself. These variables are very difficult to consider in their entirety and has meant that the design of these treatments has tended to be based on empirical criteria and simplified hypotheses that do not always reflect the reality. In 2007 a new method for the design of compaction grouting was published in order to mitigate the danger of liquefaction (Henríquez, doctoral thesis 2007), based on the Modified Method of Cavity Expansion (MMCE).

This article presents a real case in which the said design method was applied and where calculations were made of the losses of pressure produced by the circulation of the grout through the casings and where the theoretical results of the design method were compared with the real data obtained in-situ and where the efficiency of the treatment was verified by evaluating the results obtained during massive treatment by compaction grouting performed during the work on the "Remodelling of the Lázaro Cárdenas de Río Refinery, in Minatitlán (Veracruz), Mexico".

**Keywords:** Liquefaction; Loose sands; Compaction grouting; Liquefaction mitigation

## 1. Introducción

La inyección de compactación es una técnica de mejora del terreno donde convergen muchas variables, algunas propias del terreno a mejorar y otras correspondientes al proceso de inyección, así como al material inyectado propiamente dicho.

Estas variables, muy difíciles de manejar en todo su conjunto, así como de tomarlas en cuenta en los métodos de diseño, han obligado a recurrir, durante mucho tiempo, a métodos de diseños empíricos, basado en hipótesis simplificadas, que muchas veces no se cumplen en la realidad. En el año 2007, se publica un nuevo método de diseño para inyecciones de compactación, con finalidad de mitigar el peligro de licuación (Henríquez, tesis doctoral 2007), con aplicación práctica y basado en el Método Modificado de Expansión de Cavidades (MMEC).

En este artículo se presenta un caso real, constituido por un campo de pruebas y tratamiento masivo con inyecciones de compactación, en cual se ha aplicado el método de diseño, con el objetivo de:

1. Cuantificar las pérdidas de presión en las tuberías de acero y las mangueras de goma, materiales típicos utilizados en las conducciones en este tipo de tratamiento, a partir del establecimiento de coeficientes de fricción para cada uno de estos materiales.
2. Determinar en campo, las vinculaciones entre la presión de inyección (medida en el equipo de bombeo) y volumen neto inyectado en arenas potencialmente licuables, para su posterior comparación con los resultados teóricos obtenidos a partir del método de diseño basado en MMEC.
3. Verificar la separación óptima entre los taladros inyectados, definida a partir del MMEC.
4. Verificación del tratamiento masivo con inyecciones de compactación en la mitigación de potencial de licuación en el proyecto "Reconfiguración de la Refinería Lázaro Cárdenas de Río, en Minatitlán (Estado de Veracruz), México".

## 2. Campo de pruebas

El campo de pruebas, se podría definir, como una zona localizada dentro del emplazamiento a tratar o adyacente a él, en donde se perforarán e inyectarán

los primeros taladros del tratamiento, con el objetivo de verificar las hipótesis de partida de diseño del tratamiento, y además, calibrar los parámetros de ejecución.

El emplazamiento este campo debe cumplir una serie de requisitos, los cuales se nombran a continuación:

- a) Debe ser un lugar representativo del resto de la zona a tratar, en cuanto a las propiedades geotécnicas del terreno. Lo anterior significa, que se puedan extrapolar los resultados obtenidos en éste al resto de la zona donde se aplicará el tratamiento.
- b) El lugar debe estar bien caracterizado en lo referente a las propiedades del terreno, estratigrafía y profundidad del nivel freático.
- c) En la zona del campo de pruebas debe haberse realizado algún tipo de reconocimientos, de tal forma que se conozcan las características del terreno en su estado inicial, para luego ser comparada con el estado final después del tratamiento.
- d) Esta zona debe permitir la entrada, circulación y operación de los equipos de inyección, excavación y de reconocimiento.
- e) En caso de ser necesario, el lugar deber permitir las operaciones de extracción de los taladros inyectados.

## 3. Pruebas de campo en el proyecto "Reconfiguración de la Refinería General Lázaro Cárdenas" en Minatitlán, Veracruz México

En un emplazamiento localizado al sureste de la ciudad de Minatitlán, en el estado de Veracruz (México), se está construyendo en el momento de redacción de este artículo, el proyecto de "Reconfiguración de la Refinería Gral. Lázaro Cárdenas" (Figura 1).

El proyecto mencionado comprende la construcción de nueve plantas de proceso nuevas, todas ellas articuladas para incrementar la capacidad instalada de procesamiento en la refinería existente.

Para materializar el proyecto, se requirió la urbanización de un total de 72 hectáreas de terreno hacia la única dirección de posible expansión de la propia refinería, que se encuentra limitada al oriente y al norte por la zona urbana de Minatitlán y al sur por el río Cuátzacalcos (Foto 1).

El terreno en el sitio corresponde a la secuencia estratigráfica típica de las llanuras de inundación de los ríos seniles divagantes de la vertiente del golfo de Mé-



Zona de la reconfiguración

Fig. 1. Localización del proyecto de "Reconfiguración Refinería Lázaro Cárdenas del Río, en Minatitlán (Veracruz), México".

xico, presentando una alternancia de arcillas blandas a muy blandas (con porcentajes variables de materia orgánica), con arenas más o menos finas de compactación suelta a media. Los estratos más competentes se encuentran a profundidades superiores a los 25 m y, eventualmente, a profundidades superiores a los 40 m, con registros de número de golpes en la prueba de penetración estándar (SPT) superiores a 50.

En este orden de ideas, los problemas geotécnicos identificados en el sitio, donde se desarrolla el proyecto se resumen en:

Foto 1. Vista aérea de la ciudad de Minatitlán, la refinería existente y la zona de la actual ampliación.



Zona de actual Ampliación

- 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, pero nunca superando los 20 m de profundidad.
- b) Capas de arcillas blandas y muy blandas con alto contenido de materia orgánica y muy compresibles.

Dentro del proceso de diseño de este proyecto, se tuvo la oportunidad de liderar en el diseño, control y validación de los tratamientos para mitigar el potencial de licuación en tres de las nueve plantas (unidades) a construir, las cuales se detallan a continuación:

- Unidad Combinada.
- Unidad Catalítica.
- Unidad Hidrodesulfuradora de Diesel.

Los tratamientos diseñados y llevados a cabo, han consistido en una compactación dinámica en los estratos superiores e inyecciones de compactación para los estratos profundos.

Dentro de los trabajos de inyecciones de compactación, se ha tenido la oportunidad de realizar una serie de pruebas y ensayos, convencionales y especiales (estos últimos, específicamente en la Unidad Hidrodesulfuradora Diesel), cuyos resultados han permitido contrastar un método teórico de diseño, específicamente el desarrollado por Henríquez (tesis doctoral, 2007).

### **3.1. Ensayo de pérdida de carga en las tuberías durante el proceso de inyección**

En los tratamientos con inyecciones de compactación, las presiones registradas en los puntos de control, como puede ser la salida del equipo de bombeo, no se corresponde con las presiones realmente producidas en el punto de inyección, debido a las pérdidas de presión ocurridas en el sistema, al circular el mortero desde el punto de bombeo al punto de inyección (ver Figura 2).

En el "Método de diseño de inyecciones de compactación como mitigación del potencial de licuación, basado en el método modificado de expansión

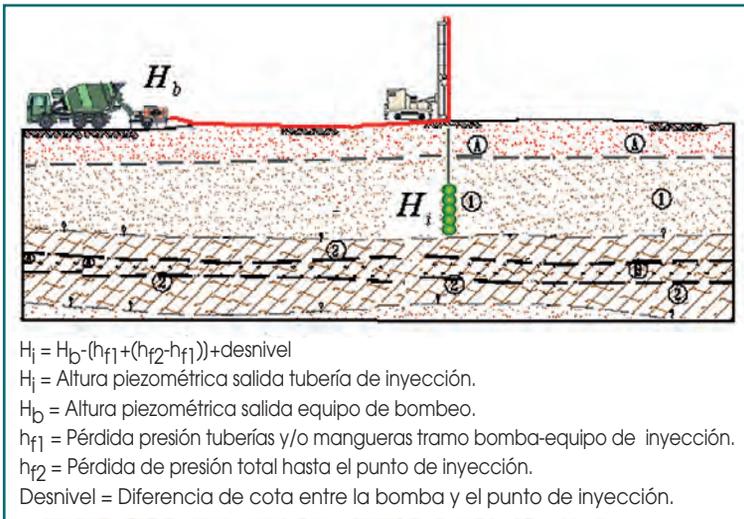


Fig. 2. Esquema tratamiento con inyecciones de compactación.

de cavidades (MMEC) (Henríquez, tesis doctoral, 2007)", se presentaron una serie de ábacos simplificados de diseño, uno de estos correspondiente a la presión en el punto de inyección (Figura 3).

Como resulta complicado tener registros de la presión en punto de inyección, se suele controlar la misma, en manómetros instalados en el equipo de bombeo y/o en la boca de los taladros, haciendo necesari-

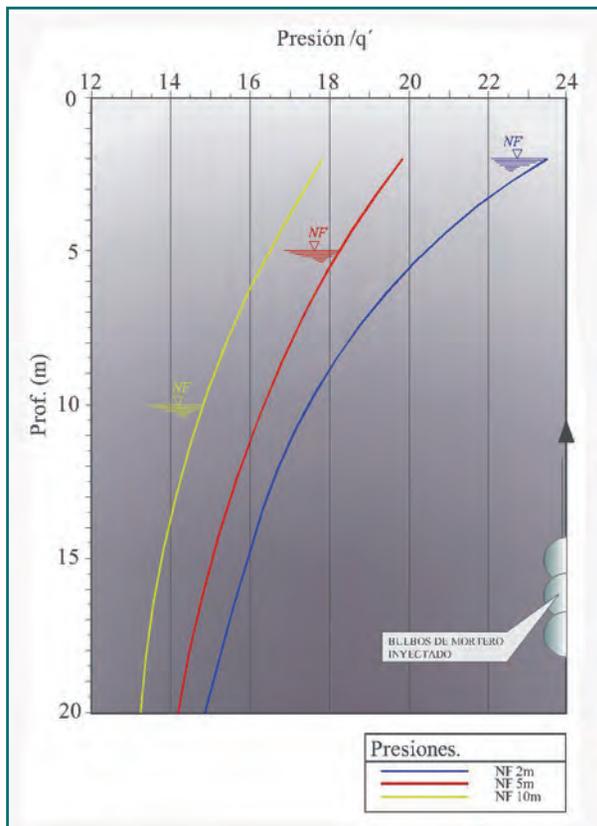


Fig. 3. Presión máxima de la cavidad expandida normalizada con el esfuerzo efectivo medio ( $q'$ ), en función de la profundidad.

rio la estimación de las pérdidas de presión en las conducciones, para poder completar el diseño aplicando el ábaco de diseño de la Figura 3.

En la bibliografía, no se han encontrado expresiones, ni parámetros que relacionen la pérdida de carga (presión) con la distancia a la bomba, para los morteros típicos de este tipo de tratamiento y las distintas conducciones utilizadas.

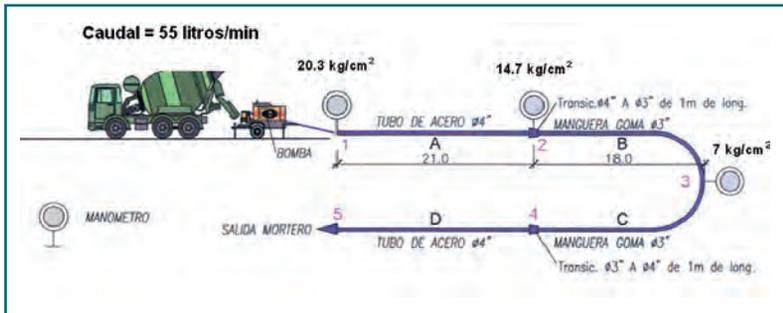
Con el objetivo de establecer las pérdidas de presión, se han realizado ensayos de campo, que permitan determinar de manera aproximada los valores de los coeficientes de fricción, en las tuberías de goma (mangueras) y acero, utilizadas normalmente en este tipo de tratamiento para conducir el mortero.

Hay que resaltar que los valores de los coeficientes de fricción obtenidos representan un orden de magnitud, debido a que el mortero utilizado en este tipo de tratamiento, es un fluido no newtoniano y reológico. A causa de lo anterior, dichos valores podrían variar en función de los materiales que lo componen, el cono de Abrams del mismo, el estado de las tuberías y la temperatura.

Las pruebas realizadas han consistido, en hacer circular mortero por un sistema de mangueras y tuberías controladas mediante manómetros (Figura 4). Los componentes utilizados han sido: un camión hormigonera con capacidad de 6 m<sup>3</sup> de mortero, una bomba de pistón capaz de alcanzar presiones de hasta 100 kg/cm<sup>2</sup>, dos tramos de tuberías de acero de 4" (101.6 mm) de diámetro interior y 21 m de longitud cada uno (tramos A y D de la Figura 4), dos tramos de manguera de goma de 3" (76.2 mm) de diámetro interior y 18 m de longitud cada uno (tramos B y C, Figura 4), 3 manómetros de glicerina (puntos 1, 2 y 3) y piezas de transición de 3" a 4" de 1 m de longitud (puntos 2 y 4, Figura 4). Las tuberías se han colocado en la superficie horizontal del terreno y el mortero bombeado, a la salida de la misma (punto 5), ha sido recogido y llevado a vertedero.

El mortero utilizado tenía un cono de 4.5 cm (Foto 2) y una resistencia característica, a los 28 días, de 30 kg/cm<sup>2</sup>. La arena utilizada cumplía con las especificaciones de granulometría (Figura 5), las tuberías y mangueras se encontraban en excelentes condiciones. Durante el bombeo se mantuvo un caudal constante de inyección de 55 litros/min, el cual es el habitual en este tipo de tratamientos.

Para obtener una resistencia a la compresión simple de 30 kg/cm<sup>2</sup>, se ha utilizado el siguiente diseño de mezcla (expresado en porcentaje de peso):



- Cemento : 7%
- Arena : 80%
- Agua : 12%
- Bentonita : 1%

Fig. 4. Esquema ensayo de pérdida de presión.

La temperatura era de 29° Celsius y la humedad ambiental del 70%.

Con el esquema anteriormente descrito e ilustrado con las fotos 3, 4 y 5, se iniciaron varios ciclos de bombeo del mortero a través de las tuberías, con la toma continua de datos. Los resultados obtenidos, se especifican en la misma Figura 4 y se detallan a continuación:

- Presión media medida a la salida de la bomba: 20.3 kg/cm<sup>2</sup>.
- Presión media medida en el segundo manómetro, localizado al final del primer tramo con tubería de acero (21m): 14.7 kg/cm<sup>2</sup>.
- Presión media medida en el tercer manómetro, localizado al final del primer tramo con manguera de goma (de 18 m de longitud): 7 kg/cm<sup>2</sup>.

Con el objetivo de estimar los coeficientes de fricción para cada uno de los materiales empleados y las condiciones existentes en los mismos, se ha utiliza-

Fig. 5. Curva granulométrica de la arena empleada en la prueba de pérdida de presión y el huso granulométrico especificado para este tipo de tratamiento (según Bandimere, 1997).

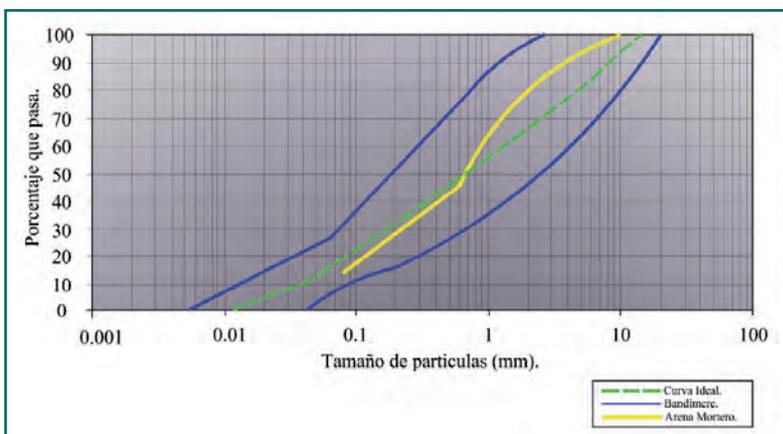


Foto 2. Prueba de control del mortero (cono de Abrams de 4.5 cm).



Foto 3. Camión hormiguera y bomba utilizada en el ensayo.



Foto 4. Tuberías de acero utilizadas en el ensayo.



Foto 5. Tuberías de acero y mangueras de gomas utilizadas en el ensayo.

do la fórmula de Manning, escrita en función del caudal, el diámetro de la tubería, coeficiente de fricción y las pérdidas de carga, medidas a partir de los diferentes manómetros:

$$\Delta h = \frac{l \cdot \eta^2 \cdot 2^{\frac{20}{3}} \cdot q^2}{\pi^2 \cdot \phi^3} \quad \text{Ec.1}$$

Siendo:

$\Delta h$  = Pérdida de carga en metros columnas de mortero.

$l$  = Longitud de la tubería en m.

$\eta$  = Coeficiente de fricción (adimensional).

$q$  = Caudal en m<sup>3</sup>/seg.

$\phi$  = Diámetro de la tubería en m.

Despejando el coeficiente de fricción ( $\eta$ ) en la Ec.1, se obtiene:

$$\eta = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot \Delta h \cdot \phi^3}{l \cdot 2^{\frac{20}{3}} \cdot q^2}} \quad \text{Ec. 2.}$$

Convirtiendo las pérdidas de presión obtenidas en alturas piezométricas (metros columnas de mortero, para un peso específico del mismo de 2.4 ton/m<sup>3</sup>) y despreciando las pérdidas localizadas en las piezas de transición de un diámetro a otro (debido a la baja velocidad de inyección y el carácter gradual en que se produce el cambio de sección), se determinaron los coeficientes de fricción, para cada uno de los materiales, de las tuberías utilizadas.

De acuerdo con el procedimiento descrito anteriormente se han obtenido unos coeficientes de fricción ( $\eta$ ) de 0.88 para las tuberías de acero y de 0.56 para las mangueras de goma. Tomando en cuenta los diferentes diámetros de las conducciones, se puede concluir que en la tubería de acero (diámetro de 4") se produce una pérdida de carga de aproximadamente 1/4 de bar por metro de tubería, mientras que la manguera de goma (diámetro de 3") se produce una pérdida de 1/2 bar por metro de manguera.

### 3.2. Ejecución, excavación y extracción de taladros de prueba

Con el objetivo de verificar los resultados teóricos esperables, a partir del diseño con el MMEC, se llevó a

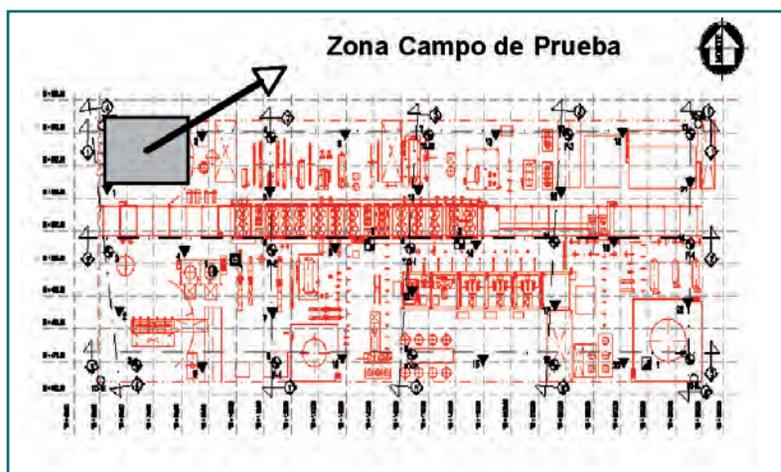


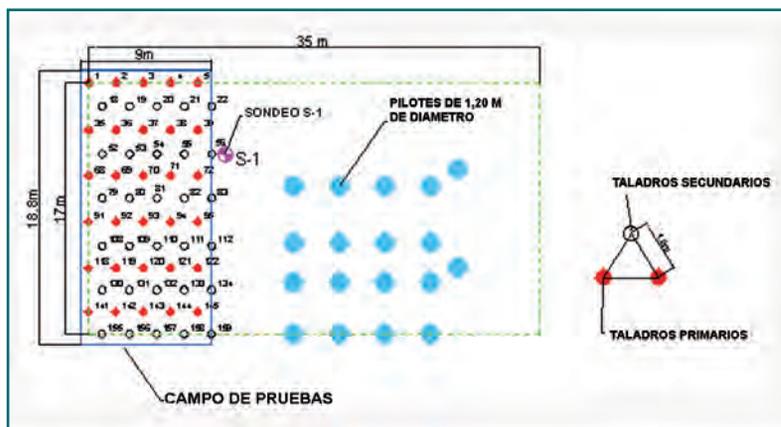
Fig. 6. Localización en planta del Campo de Pruebas.

cabo la inyección de unos taladros en la zona de prueba, para su posterior extracción.

Para esta finalidad se seleccionó un emplazamiento, cuya localización se encuentra señalada en la Figuras 6 y 7. Debido a que en dicha zona, se localizaba el mayor espesor de la capa de arenas sueltas superficiales (unos 8 m), lo cual permitiría realizar los taladros sin riesgo de producir levantamientos en la superficie, hecho que podría reducir la efectividad de la inyección. Al mismo tiempo, los 8 m representaba la profundidad límite en que se podría excavar con medios mecánicos convencionales (retroexcavadora) disponible en la obra.

El terreno existente en la zona donde se ejecutaron los taladros, se ha caracterizado a partir de una campaña geotécnica previa. En la Figura 8, se muestra el perfil estratigráfico correspondiente al sondeo S-1, realizado en el área del campo de pruebas y en la misma figura se señala la zona donde se han inyectado y excavados los taladros de prueba.

Fig.7. Detalle en planta del Campo de Pruebas.



A pesar de que el tratamiento con inyecciones de compactación se había previsto para tratar las arenas profundas (las cuales se encontraban a más de 10 m de profundidad), se optó con realizar estas pruebas en un estrato de arena superficial, específicamente entre 6 y 8 m de profundidad, para facilitar la ejecución y extracción de los taladros inyectados. Posteriormente a estas pruebas, todos los estratos de arenas superficiales, susceptibles a sufrir licuación, fueron tratados mediante compactación dinámica.

La descripción geotécnica del estrato inyectado, definido a partir de la campaña geotécnica realizada (que incluye el sondeo comentado previamente), presenta este estrato como arena fina color gris, de compacidad muy suelta a compacta, con un golpeo en el ensayo de penetración estándar (SPT) que oscila entre 3 y 20, y un contenido de finos entre el 9 y el 20%. Durante la ejecución del taladro, el nivel freático se localizó a 2m de profundidad (Figura 8).

El mortero empleado en esta prueba, ha sido el mismo que el utilizado para el ensayo de pérdida de carga (Foto 2), por lo cual las especificaciones del mismo y sus componentes se encuentran descritos en el apartado 3-1.

El procedimiento seguido para la ejecución de cada uno de los taladros ha consistido en:

- Se colocó la perforadora (Foto 6) en el emplazamiento fijado, verificando que el mástil se encontraba en posición vertical.
- Se colocó una tubería de 6" (152.4 mm) de diámetro exterior y 4.5" (114.3 mm) interior, mediante una hincia por vibración y una puntaza perdida en la punta del taladro, hasta 8m de profundidad. Mediante este procedimiento de perforación se induce una muy leve mejora al terreno (antes de iniciar el tratamiento), por el desplazamiento lateral producido durante la hincia, la cual se ha despreciado en este estudio.
- Inicio del proceso de inyección (utilizando la misma tubería de perforación como tubería de inyección), de manera ascendente y en tramos de 0.50m.
- Los criterios de cese de inyección han sido:

a) Por presión, cuando la presión de inyección, registrada en el equipo de bombeo, alcanza un valor superior a 40 kg/cm<sup>2</sup>.

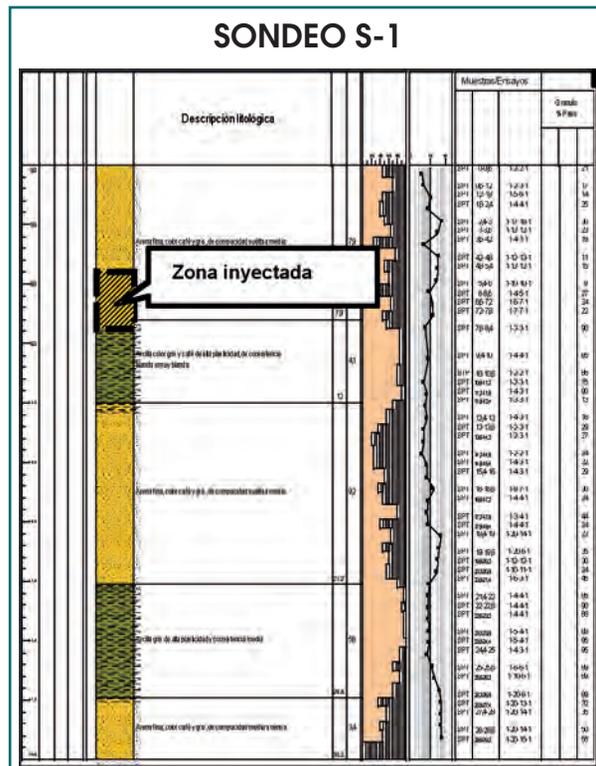


Fig. 8. Registro sondeo S-1.

b) Por volumen, para el cual se han fijado umbrales variables, es decir 150 litros por cada fase (0.50 m de longitud) de 8 a 7 m de profundidad, 100 litros entre 6.5 y 7 m, y 60 litros entre 6 y 6.5 m de profundidad. Todo esto último, con el objetivo de estudiar la sensibilidad al parámetro "volumen".

Durante todo el proceso, se llevó a cabo un control continuo de presiones y volúmenes.

- Se finalizó el proceso de inyección a una profundidad de 6m. Es decir, se ha inyectado y controlado un tramo de 2m (de 6 a 8m de profundidad).
- Se dejó un plazo de 4 días antes de excavar y extraer el taladro inyectado.

Los componentes del sistema de inyección utilizados en esta prueba han sido los mismos que los empleados en la prueba de pérdida de carga (presión). No obstante, la distribución de las conducciones entre la bomba y el punto de inyección ha sido diferente, disponiéndose de la siguiente manera:

- Tramo 1: Tubería de acero de 4" (101.6 mm) de diámetro interior y 21 m de longitud.

Foto 6. Equipo utilizado para la perforación e inyección de mortero.



- Tramo 2: Manguera de goma de 3" (76.2 mm) de diámetro interior y 18 m de longitud.
- Tramo 3: Tubería de acero de 3.5" (88.9 mm) de diámetro interno y 4 m de longitud.
- Tramo 4: Manguera de goma de 3" (76.2 mm) de diámetro interior y 12 m de longitud.
- Tramo 5: Tubería de perforación e inyección de 4.5" (114.3 mm) de diámetro interior y 19 m de longitud. Este tramo, es parte del mástil del equipo (no es desmontable por partes) y la altura en que se conecta el mismo con la tubería de goma es variable, según la profundidad en que se realiza la inyección.
- Todos estos tramos se encuentran controlados por 2 manómetros de glicerina, localizados en la salida de la bomba y al final del segundo tramo de tubería de acero.
- Las diferentes conexiones entre tuberías de diferentes diámetros, se han realizado de manera gradual y los codos utilizados han sido de amplio radio, de tal forma que no se produzcan obstrucciones y que las pérdidas de cargas sean mínimas (debido a la baja velocidad de inyección).

Durante el proceso de ejecución de las pruebas, los ceses de inyección fueron por volumen en todas las fases, a excepción de la primera fase en donde se cumplieron simultáneamente los criterios de presión y volumen.

En los dos primeros tramos inyectados (de 7 a 8m de profundidad), se alcanzaron las presiones máximas (medidas en la salida de la bomba), cercanas a los 40 kg/cm<sup>2</sup>, mientras que en los dos restantes la misma se mantuvo en valores inferiores. En el manómetro instalado al final del tramo de 3.5" de diámetro (88.9 mm), se registraron presiones en torno a la mitad de las registradas en el equipo de bombeo.

Las columnas se excavaron mediante una retroexcavadora, una vez transcurrido el tiempo de fraguado establecido (4 días). Por limitaciones de la maquinaria utilizada y de estabilidad de la excavación, solo fue posible recuperar 1.50 m de los 2 m inyectados en todos los taladros. No obstante, se pudo observar que los tramos de 0.50 m, no extraídos (entre 7.5 y 8m de profundidad), eran sensiblemente parecido al tramo inmediatamente superior extraído.

Los resultados obtenidos en el taladro seleccionado como representativo, se ilustran en las Fotos 7.

Los bulbos, una vez excavados, fueron identificados y medidos. Obteniéndose los siguientes diámetros medios:

- 60 cm, en el tramo localizado entre 7-7.5 m, en donde previo a la ejecución de la inyección se había registrado un golpeo en el ensayo SPT de 14 y un contenido de finos del 22%.
- 46 cm, en el tramo localizado entre 6.5-7 m, en donde antes de la ejecución de la inyección se



Foto 7. Bulbos de mortero obtenido en el taladro excavado.

había registrado un golpeo en el ensayo SPT de 13 y un contenido de finos del 24%.

- 40 cm, en el tramo localizado entre 6-6.5 m, en donde antes de la ejecución de la inyección se había registrado un golpeo en el ensayo SPT de 9 y un contenido de finos del 22%.

Estos diámetros crecientes con la profundidad se deben al hecho de que, en esta prueba, las admisiones de mortero fueron incrementadas a los valores comentados previamente.

En cuanto a las presiones registradas, se ha llevado a cabo un análisis de las mismas, evaluando las pérdidas de carga registradas en los diferentes tramos, para el caso específico del tramo de inyección localizado entre 7 y 8 m de profundidad, donde se alcanzaron de manera simultánea los criterios de cese de inyección por presión y volumen. Para este objetivo, se han utilizando los coeficientes de fricción determinados en el apartado anterior (3-1), el caudal de inyección (mantenido constante en 55 litros/min), la presión máxima medida en la bomba (40 kg/cm<sup>2</sup>, es decir 166.67 metros columna de mortero), las longitudes y diámetros de los distintos tramos, además de los distintos desniveles entre la bomba, el mástil de la perforadora y el punto de inyección. A partir de la ecuación 2, se estimaron las pérdidas de carga de cada uno de los tramos, las cuales se detallan a continuación:

- Tramo 1: 28 metros columna de mortero (mcm).
- Tramo 2: 45 mcm.
- Tramo 3: 11 mcm.
- Tramo 4: 45 mcm.
- Tramo 5: 13.5 mcm.

Dada la baja velocidad de inyección y el carácter gradual en que se producen los cambios de sección entre tuberías, se han despreciado las pérdidas localizadas en la transición del sistema.

Tomando en cuenta el desnivel existente entre el mástil de la perforadora y el terreno natural (11m, en el caso de la inyección a 8m de profundidad), y además de la densidad del mortero, se llega a conclusión que se obtiene una presión en el punto de inyección en torno a los 33 mcm (es decir, aproximadamente 8 kg/cm<sup>2</sup>) y en torno a 82 mcm (unos 20 kg/cm<sup>2</sup>) en manómetro colocado al final del tramo 3.

Estos resultados obtenidos han sido comparados con los que se podrían predecir, a partir del Método Modifi-

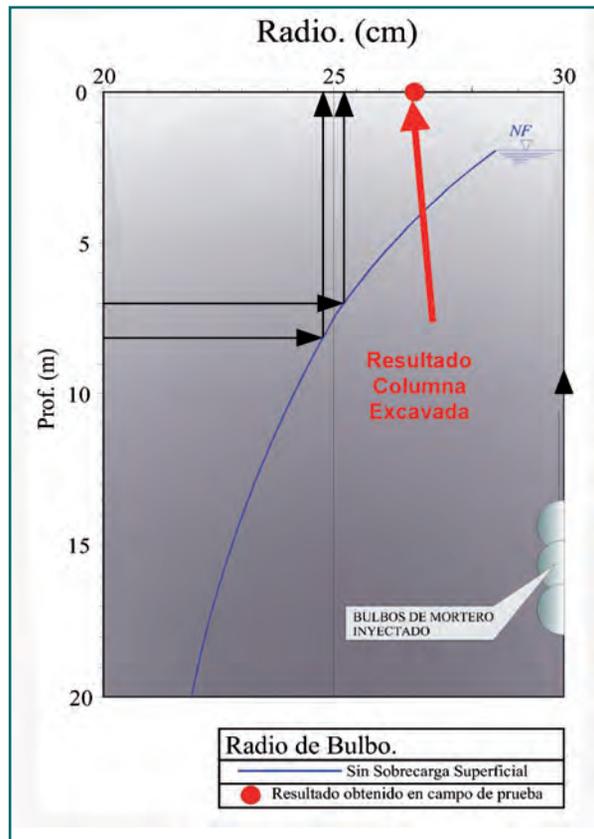


Fig. 9 Variación del radio de los bulbos inyectados en función de la profundidad, mediante el MMEC.

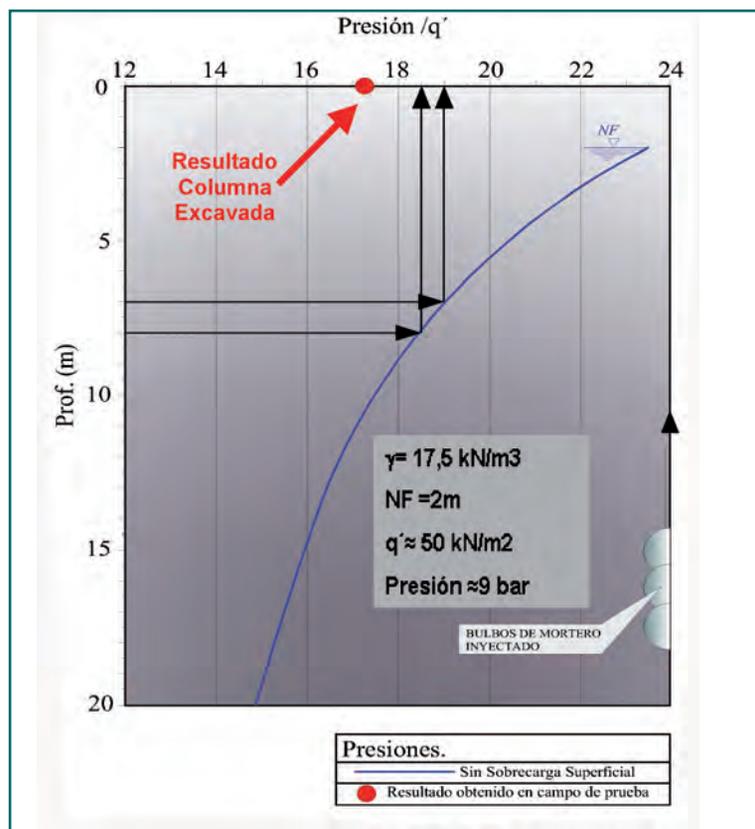


Fig. 10 Variación de la presión en el punto de inyección en función de la profundidad, mediante el MMEC.

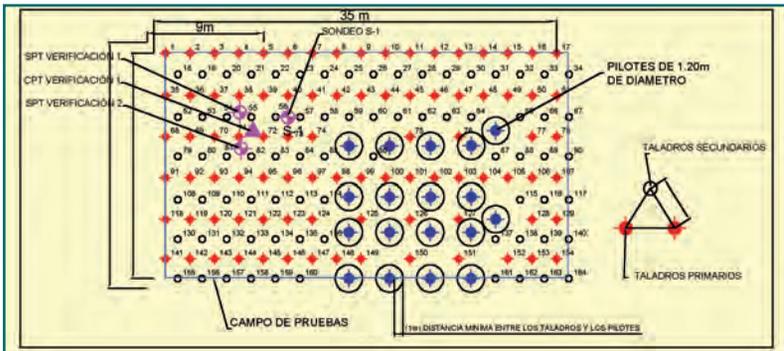
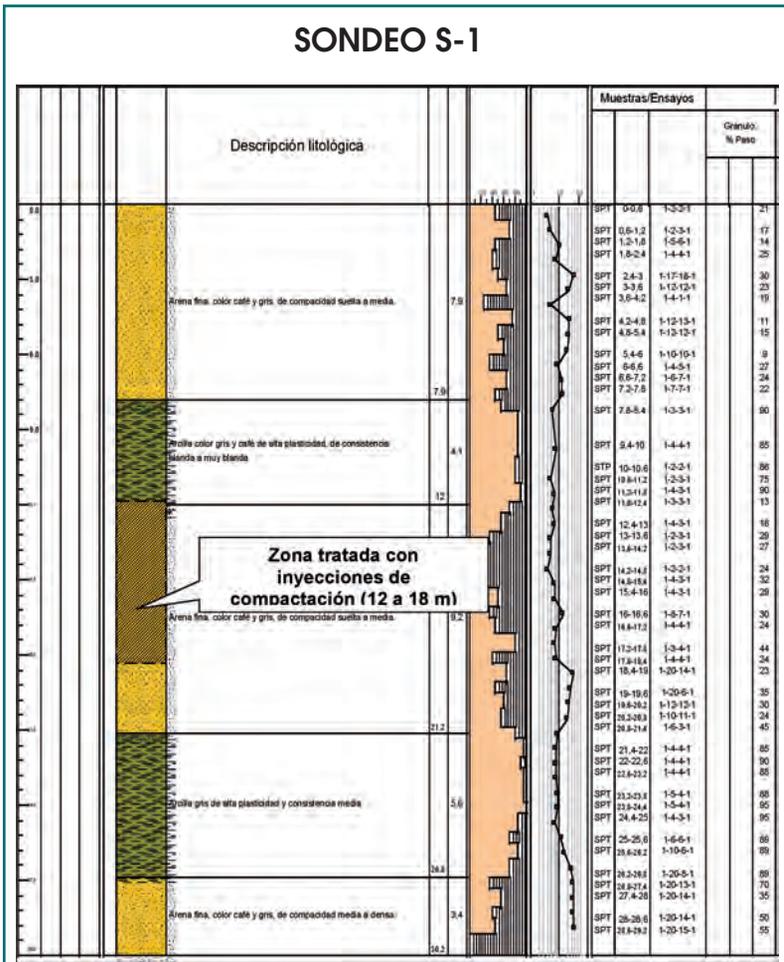


Fig. 11. Vista en planta del campo de pruebas.

cado de Expansión de Cavidades (MMEC), de acuerdo a como se puede observar en las Figuras 9 y 10.

Con base a las 2 figuras anteriores, para un nivel freático a 2m de profundidad y una profundidad de inyección entre 7 y 8 m, se podría predecir la expansión de una cavidad del mortero (bulbo) con radió medio en torno a 0.27 m, siendo necesario aplicar una presión para alcanzar este radió entre 8.5 y 9.3 kg/cm<sup>2</sup>, para valores del esfuerzo efectivo medio del

Fig. 12. Columna estratigráfica sondeo S-1.



terreno "q" de 42 a 52 kN/m<sup>2</sup>, estimados a partir de  $\gamma = 17.5 \text{ kN/m}^2$ . Estos valores son del mismo orden de magnitud que los obtenidos en las pruebas, tomando en cuenta las simplificaciones realizadas (Figs. 9 y 10).

### 3.3. Campo de pruebas

Con el objetivo de verificar la separación óptima entre los taladros obtenida a partir del MMEC, se realizó un campo de pruebas, compuesto por 55 taladros, previo al inicio del tratamiento masivo con inyecciones de compactación previsto en esta obra. Este campo de pruebas se localizaba en una zona próxima al lugar donde se ejecutaron y extrajeron los taladros descritos en el apartado anterior (Figura 11). Las propiedades del terreno previo a la ejecución del campo de pruebas son las descritas en el Sondeo 1 (Figura 12), con la salvedad que el tramo tratado (con inyecciones) se localizaba entre 12 y 18 m de profundidad.

En el campo de pruebas, el estrato inyectado se ha definido a partir del Sondeo 1 (Figura VI-9), está constituido por arenas finas de compactación suelta a media y se localiza entre 12 y 18 m de profundidad. Los golpes en la prueba de penetración estándar (SPT) varían entre 4 y 8 golpes, y los contenidos de finos entre 13 y 32%.

El estudio de peligrosidad sísmica realizado en la zona, determinó que para un período de retorno de 500 años, el sismo esperable sería de magnitud 6.5 en la escala de Richter, el cual estaría acompañado por una aceleración máxima en la superficie del terreno de 0.3 g.

En el estudio de licuación llevado a cabo, con la información de partida aportada por el estudio de peligrosidad sísmica y el método de Henríquez (tesis doctoral 2007), convirtiendo los golpes del SPT a resistencias por punta equivalentes del CPT, mediante una relación  $q_c/N_{SPT} = 3$ , para un tamaño medio del grano ( $D_{50}$ ) en torno a 0.1mm. De acuerdo con este estudio, se determinó que existía una muy alta probabilidad de producirse licuación (Figura 13), ante las acciones sísmicas de diseño, en el estrato de arena señalado anteriormente (localizado entre 12 y 18 m de profundidad).

El diseño del tratamiento se realizó aplicando los ábacos de diseño basados MMEC (Figuras 14, 15 y 16). De acuerdo con éstos, los taladros se dispusieron en una malla triangular de 1.80 m de lado y el volumen de inyección se estableció en 0.20 m<sup>3</sup>/m (es decir, 200 litros por metro), incluyendo el factor de eficacia (en este caso entre 1,5 y 2).

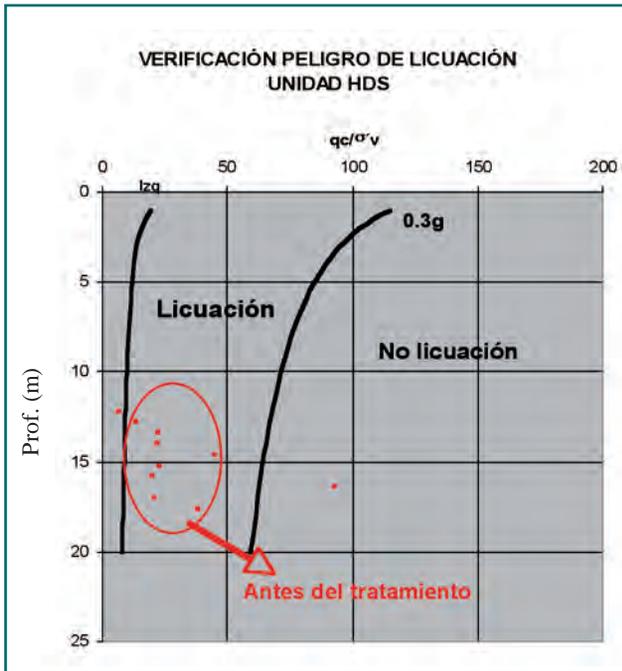


Fig. 13. Método de predicción del potencial de licuación basado en ensayos de CPT (Henríquez, tesis doctoral 2007).

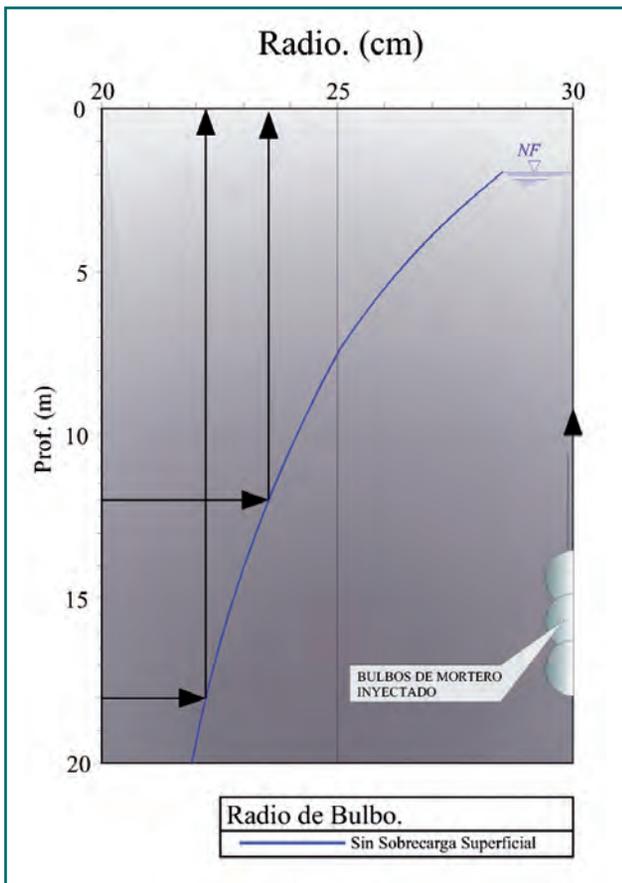


Fig. 14. Radio bulbo de inyección en función de la profundidad (aplicando MMEC).

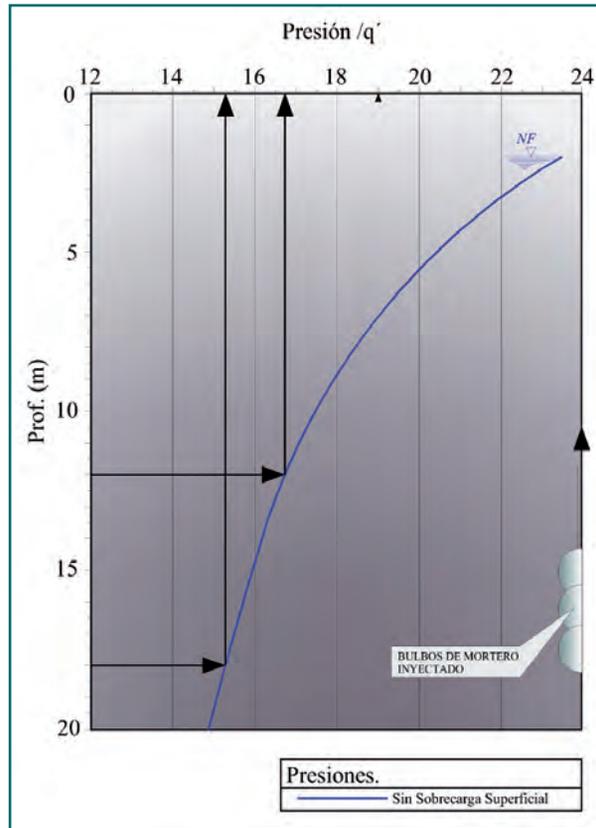


Fig. 15. Presión en punto de inyección normalizado con la tensión efectiva media, en función de la profundidad (aplicando MMEC).

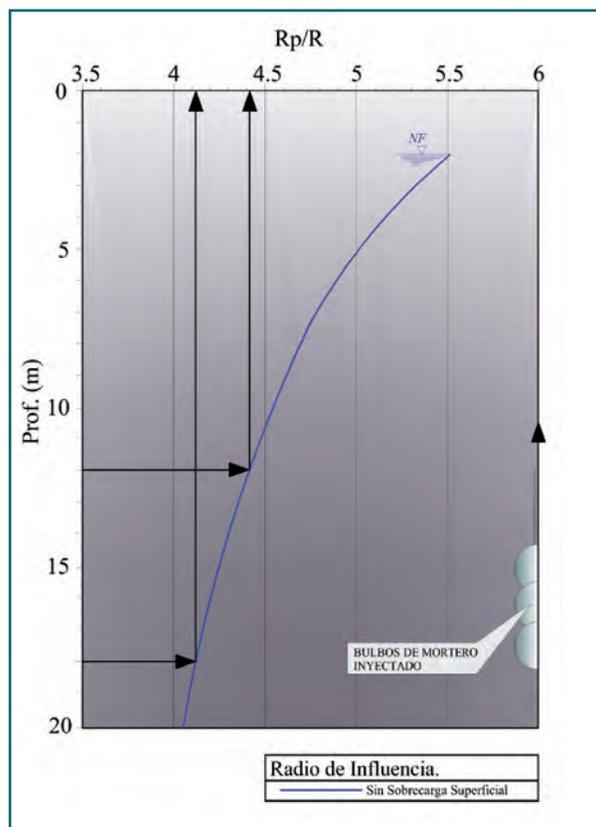
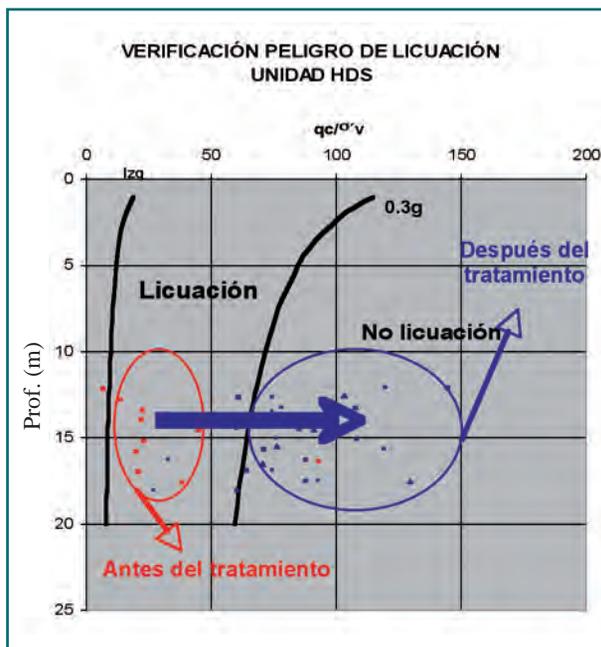


Fig. 16. Variación de la separación de los taladros de inyección en función de la profundidad (aplicando MMEC).

Fig. 17. Análisis de licuación antes y después de ejecutado del tratamiento con inyecciones de compactación.



Para la ejecución del tratamiento se ha empleado el mismo un mortero que el utilizado en el ensayo de pérdida de carga y en el taladro inyectado y posteriormente excavado.

Para la perforación e inyección del mortero, se ha utilizado el mismo equipo empleado en los ensayos descritos en los dos apartados previos y la configuración del mismo coincide con la empleada en los ensayos de inyección y extracción de los taladros de mortero.

La inyección del mortero se efectuó en fases ascendentes, retirando la tubería de inyección por tramos de 0.5 m. Al igual que en el apartado anterior, se ha utilizado la misma tubería para la perforación y la inyección.

El caudal de inyección se limitó a 55 litros/minuto, interrumpiéndose la inyección (en cada tramo de 0.5 m), cuando se presentó una de las condiciones siguientes:

- La presión de inyección fuese mayor o igual que 40 kg/cm<sup>2</sup>.
- El volumen de mortero inyectado superó los 200 litros/metro.

Una vez concluido el campo de pruebas, se ejecutaron los ensayos verificados del tratamiento, los cuales consistieron en ensayo de penetración estática (CPT) y ensayos de penetración estándar (SPT).

Los resultados del análisis de licuación, antes y después del tratamiento, se pueden observar en la Figura 17.

La evaluación del potencial de licuación posterior al tratamiento revela que se ha producido, prácticamente, una mitigación total del potencial de licuación existente previo al tratamiento. Todos los puntos azules localizados a la izquierda de la curva de 0,3g corresponden a estratos con relaciones de fricción (FR) superiores al 2,5%, por lo cual no tendrían riesgo de sufrir licuación.

Los aspectos anteriormente señalados muestran que el tratamiento realizado ha sido exitoso, cumpliendo todos los objetivos establecidos.

Con base en los argumentos expuestos, se puede concluir que con la separación de taladros, establecida a partir del MMEC, se cumplieron satisfactoriamente los objetivos fijados y por lo tanto, estos resultados validan la metodología propuesta.

### 3.4. Tratamiento masivo en la Unidad Hidrodesulfuradora de Diesel (HDS)

Una vez concluidos los ensayos del campo prueba, y analizado los resultados obtenidos, se decidió realizar el tratamiento masivo en la Unidad Hidrodesulfuradora de Diesel (HDS) utilizando la malla de taladros y las admisiones validadas por los ensayos comentados, es decir, una malla triangular de taladros de 1.80 m de lado, con unas admisiones medias de 200 litros por metro. En total se ha ejecutado un total de 3970 taladros, representando un área de 11,154.5 m<sup>2</sup>.

Los estratos de arenas sueltas, inicialmente susceptibles a sufrir licuación, se localizaban entre los 11 y los 20 m de profundidad, teniendo unos contenidos de finos variables entre el 10 y el 40%. En algunos casos, existían capas limosas de escaso espesor dentro de la masa arenosa.

La ejecución se llevó a cabo mediante el método ascendente y siguiendo una secuencia de inyección primaria y secundaria.

El análisis de licuación, antes del tratamiento, se realizó a partir de los 15 ensayos sondeos estratégicamente localizados, que formaban parte del reconocimiento geotécnico inicialmente llevado a cabo. El análisis de licuación, posterior a la ejecución del tratamiento; se ha realizado a partir de 16 sondeos, con ensayos de SPT continuos (cada 60 cm), en los estratos donde se había realizado el tratamiento, si-

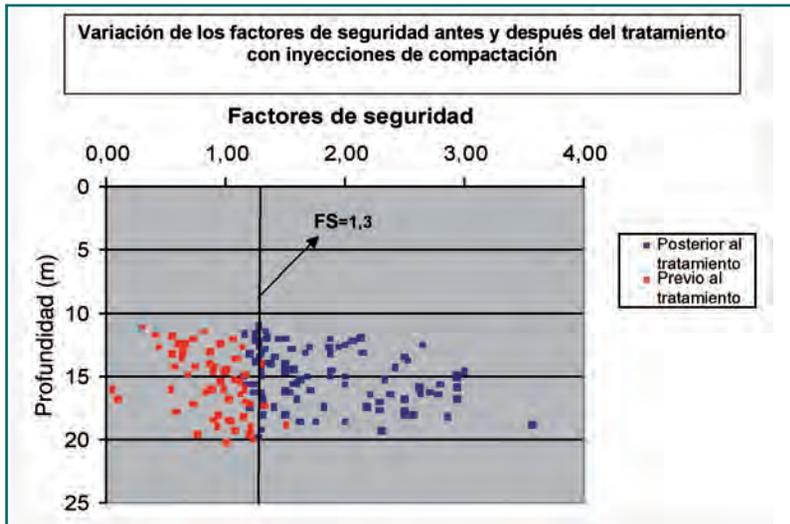


Fig. 18. Factores de seguridad frente a la licuación previos y posteriores al tratamiento con inyecciones de compactación en Unidad Hidrosulfuradora de Diesel (HDS).

guiendo los requerimientos establecidos en pliego del proyecto.

Los resultados obtenidos de los análisis de peligrosidad frente a la licuación, antes y después del tratamiento, se muestran en la Figura 18. El objetivo buscado, una vez terminado el tratamiento era llegar a un factor de seguridad mínimo de 1.3 (señalado en la citada figura).

En dicha figura se puede observar que los factores de seguridad iniciales (antes del tratamiento) eran bajos, oscilando entre 0.10 y 1.13 (en un punto aislado había un factor de seguridad de 1.51), con una media de 0.85.

Posterior al tratamiento, los factores de seguridad se incrementaron hasta alcanzar valores entre 1.18 y 3, con un valor medio 1.63. Cabe señalar que existen algunos puntos con factores de seguridad inferiores a 1.3 (9 en total), debido a la presencia de intercalaciones de limos arcillosos, que por un lado minimizan la eficacia del tratamiento y por otro disminuyen el golpeo en la prueba de penetración estándar (SPT) realizada posterior al tratamiento.

A partir de los resultados mostrados en la Figura 18, se puede concluir en que el tratamiento con inyecciones de compactación fue exitoso, lográndose mitigar el peligro potencial de licuación en esta Unidad.

#### 4. Conclusiones

Con la finalidad de validar el "Método de diseño de inyecciones de compactación como mitigación del potencial de licuación, basado en el método modifi-

cado de expansión de cavidades (MMEC) (tesis doctoral Henríquez, 2007)", en este artículo, se han descrito y analizado una serie de ensayos, algunos de ellos llevados a cabo durante el campo pruebas y otros posteriores a la ejecución del tratamiento

Tanto el campo de pruebas, como los demás ensayos han sido realizados en el proyecto "Reconfiguración de la Refinería Lázaro Cárdenas de Río, en Minatitlán (Estado de Veracruz), México".

Se seleccionó emplazamiento correspondiente a la Unidad Hidrosulfuradora de Diesel (HDS), como representativa para realizar los ensayos que se detallan a continuación:

- *Ensayo de pérdida de carga (presión) durante el proceso de bombeo de mortero.*

Este ensayo permitió determinar las pérdidas de cargas producidas en las tuberías de acero y goma, al circular por su interior un mortero, con las características del utilizado para las inyecciones de compactación. En los ensayos realizados se obtuvieron unos coeficientes de fricción ( $\eta$ ) de 0.88 para la tubería de acero y de 0.56 para la tubería de goma. Estos coeficientes, han permitido establecer una correlación entre los valores de las presiones registrados en el equipo de bombeo y las realmente transmitidas al terreno que se pretende mejorar.

- *Ensayos de inyección, excavación y extracción de una serie de taladros inyectados.*

Estos ensayos se realizaron con el objetivo de comprobar, en campo, los resultados en cuanto a geometría de los bulbos, en función de las presiones y admisiones registradas durante el proceso de inyección. Para alcanzar esta finalidad, se analizaron los parámetros de inyección y los datos obtenidos directamente de los taladros extraídos, para posteriormente compararlos con lo predicho por el MMEC. Los datos obtenidos en el ensayo de prueba de pérdida de carga, han sido utilizados para determinar la presión en el punto de inyección. Los bulbos, una vez excavados, fueron identificados y medidos. Obteniéndose unos diámetros medios coherentes con el resultado esperado, establecido a partir del método de diseño.

Comparando los resultados esperables según el diseño, con los medidos directamente sobre el tala-

dro extraído y los calculados utilizando los coeficientes fricción en las tuberías (obtenidos en el ensayo de pérdida de carga), se llega a la conclusión de que ambos resultados (presión y volumen teóricos según diseño y los medidos en campo) son similares. Lo anterior valida el método de diseño propuesto en estos aspectos.

- *Campo de pruebas.*

Los ensayos comentados previamente, han sido utilizados para validar el método de diseño, en cuanto a los aspectos relacionados con el mortero y al proceso de inyección.

Con la finalidad de evaluar la eficacia del tratamiento en su conjunto, así como la validación de la separación entre taladros (determinada a partir del método de diseño propuesto), se ejecutó un campo de pruebas, acompañado de una serie de ensayos de SPT y CPT.

Con la información geotécnica disponible antes y después del tratamiento, se llevó a cabo un análisis de licuación, de tal manera que se pudiera evaluar la eficacia del tratamiento en cuanto a la separación óptima entre taladros.

- *Ensayos de verificación del tratamiento masivo con inyecciones de compactación.*

Estos ensayos se han llevado a cabo con el objetivo de verificar la eficacia de las inyecciones de compactación como el tratamiento masivo de las arenas profundas (entre 11 y 20 m) susceptibles a sufrir licuación

Lo anterior se ha realizado a partir de la información aportada por los 15 sondeos que forman parte del informe geotécnico inicial y los 16 sondeos verificados realizados posteriores al tratamiento. Los resultados confirman las conclusiones establecidas en el campo de pruebas previo. Por lo tanto, con base en los argumentos expuestos, en cuanto al mortero, volúmenes, presiones, separación de taladros, ejecución y verificación de los resultados, se puede concluir que el diseño realizado, en base al método propuesto en esta investigación cumplen satisfactoriamente el objetivo fijado (mitigar el peligro de licuación) y por lo tanto, se puede considerar validada la metodología propuesta.

## 5. Agradecimientos

A **Dragados Proyectos Industriales de México (DPIM)**, en las personas de Mariano Martín Elices, Eduardo Ortega García y Ricardo Hernández Espinoza de los Monteros. Así como, a **Petróleos Mexicanos (PEMEX)**, en la persona de Héctor Moreno Alfaro. ♦

### Referencias:

-1. Bandimere, S. "Low Mobility and Compaction Grouting, Application Review". Universidad de Houston, 1998.  
-2. Bandimere, S. "Compaction Grouting State of Practice 1997". Grouting: Compaction, Remediation and Testing. Proceedings of Geo-Logan'97 Conference. Utah 1997.  
-3. Boulanger, R., W., Hayden, R., F. (1995), "Aspects of Compaction Grouting of Liquefiable Soil". Journal of Geotechnical Engineering, Diciembre 1995.  
-4. Foundation Engineering Handbook, Second Edition. Van Nostrand Reinhold, 1991.  
-5. Henríquez Pantaleón, I., "Mejora de terrenos potencialmente licuables con inyecciones de compactación". Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Mayo 2007.  
-6. Henríquez Pantaleón, I., "Diseño de mezcla en inyecciones de compactación". Documento interno Geotecnia y Cimientos S.A. Junio 2002.

-7. Henríquez Pantaleón, I., "Ensayo de consistencia de mortero en inyecciones de compactación (ensayo de la pelota de Baseball)". Documento interno Geotecnia y Cimientos S.A. Junio 2002.  
-8. Henríquez Pantaleón, I. "Licuación de suelos". Seminario presentado en asignatura Dinámica de suelos, Universidad Politécnica de Madrid. 2002.  
-9. Henríquez Pantaleón, I. "Análisis de licuación para las Unidades Combinada, Catalítica (FCC-2) e Hidrodesulfuradora de Diesel, en la reconfiguración de la refinería Gral. Lázaro Cárdenas, en Minatitlán Ver. México". Documento interno Geotecnia y Cimientos S.A. Nov 2005.  
-10. Henríquez Pantaleón, I. "Campo de pruebas con inyecciones de compactación en la Unidad Hidrodesulfuradora de Diesel. Reconfiguración de la Refinería Gral. Lázaro Cárdenas, en Minatitlán Ver. México". Documento interno Geotecnia y Cimientos S.A. Abril 2006.  
-11. Henríquez Pantaleón, I. "Dictamen tratamiento con inyecciones de compactación en la Unidad Hidrodesulfuradora de Diesel. Reconfiguración de la Refinería Gral. Lázaro Cárdenas, en Minatitlán Ver. México". Documento interno Geotecnia y Cimientos S.A. Septiembre 2006.

-12. Henríquez Pantaleón, I. "Mejora de Terrenos Potencialmente Licuables con Inyecciones de Compactación". Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid. Mayo 2007.  
-13. Moreno Alfaro, H. "Reconfiguración de la Refinería Gral. Lázaro Cárdenas, en Minatitlán, Veracruz". Revista de la Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. May-Jun de 2004.  
-14. Schmetmann, J. "Guidelines for cone penetration test, performance and design". Report FH-WA-TS-78-209, Federal Highway Administration, Washington, D.C. 1978a.  
-15. Sola, P. (1987), "Guía Geotécnica para Cimentaciones en la Comunidad de Madrid".  
-16. Tecnosuelo. Informe de Mecánica de Suelos para la "Reconfiguración y Modernización de la Refinería Gral. Lázaro Cárdenas del Río, en Minatitlán Ver., México. Unidad Hidrodesulfuradora de Diesel (HDD)". 2005.

