

HOMOGENEIZACION DE LAS PROPIEDADES DE UN TERRENO DE CIMENTACION POR MEDIO DE INCLUSIONES RIGIDAS

SANTIAGO DE LA FUENTE (*)

JOSE A. JIMENEZ SALAS (**)

RESUMEN. El terreno de cimentación de un tanque de 100.000 m³ para almacenaje de gas licuado natural, en Huelva, consiste en arena fina densa, pero se detectó un lentejón de forma irregular consistente en arena floja limosa, con conchas. El problema se resolvió por medio de un claveteado de dicho lentejón con inclusiones rígidas. Estas inclusiones consisten en columnas de jet-grouting cuya distribución en planta y en profundidad se calculó para obtener un material compuesto de la arena limosa y las columnas inyectadas que tuviera las mismas propiedades mecánicas que la arena densa que lo rodeaba, tanto en compresibilidad (asientos) como al esfuerzo cortante (respuesta al sismo). Se indica el proceso de cálculo. Además del efecto de claveteado de las columnas inyectadas se ha detectado por medio de una campaña de penetración con cono estático una considerable mejora de las propiedades de la arena limosa a causa del tratamiento.

ABSTRACT. *The foundation ground for a 100.000 m³ liquid natural gas storage tank, in Huelva, Spain, consists of dense sands, but an irregularly shaped lense of loose silty sand containing shells was detected. The problem was solved by nailing the said lense with rigid inclusions. These inclusions were made up of jetgrouting columns whose layout and depth were calculated so as to obtain a material consisting of silty sand and injected columns containing the same mechanical properties as the surrounding dense sand, both in compressibility (settlements) and shear stress (seismic response). The calculation process is indicated. In addition to the nailing effect on the injected columns, as a result of the treatment, a considerable improvement in the properties of the silty sand has been detected through penetration tests with a static cone.*

1. INTRODUCCION

Cerca de Huelva, en el sudoeste de España, se está construyendo un gran tanque criogénico de 100.000 m³ de cubida para gas natural licuado propiedad de ENAGAS. Muy próximo a este tanque existe otro de 60.000 m³ con el mismo objeto, construido hace tres años y propiedad de la misma firma.

El nuevo tanque está cimentado sobre una losa de 62 m de diámetro y de 0,7 m de espesor, con un anillo externo de 4,6 m de ancho y de 1,10 m de espesor. El tanque tiene 32 m de altura.

La firma IBERINSA llevó a cabo la investigación geotécnica del solar por medio de seis sondeos con ensayos de SPT y muestras inalteradas, 30 ensayos de penetración de cono estático, ensayos de CROSS-HOLE y UP-HOLE y diagráfias. Estos reconocimientos revela-

ron que el perfil del suelo es muy uniforme en dirección lateral y consiste en varias capas de arena fina densa y limo arenoso margoso muy firme, pero se detectó en la primera capa de arena un lentejón de arena limosa floja de forma irregular, conteniendo restos de conchas. Esta capa de escasa densidad no se había encontrado en la cimentación del otro tanque. Teniendo en cuenta las condiciones sísmicas del lugar y las importantes presiones de trabajo se procedió a clavetear el indicado lentejón con inclusiones rígidas construidas por medio del sistema de jet-grouting monojet, cuya distribución fue calculada de forma que se obtuviese un nuevo terreno compuesto, es decir, un conjunto de arena limosa con columnas inyectadas cuyas propiedades mecánicas fueran similares a las de la arena densa que lo rodeaba, tanto en compresibilidad (asientos) como respecto al esfuerzo cortante (respuesta sísmica). Los cálculos se hicieron por medio del método de elementos finitos (para la respuesta dinámica) y con el método de Jiménez Salas y Lorente de No (2) para el efecto de las inclusiones rígidas frente a las cargas estáticas. Después del trata-

(*) Ing. Caminos Canales y Puertos, Iberinsa.

(**) Profesor Emérito de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid.

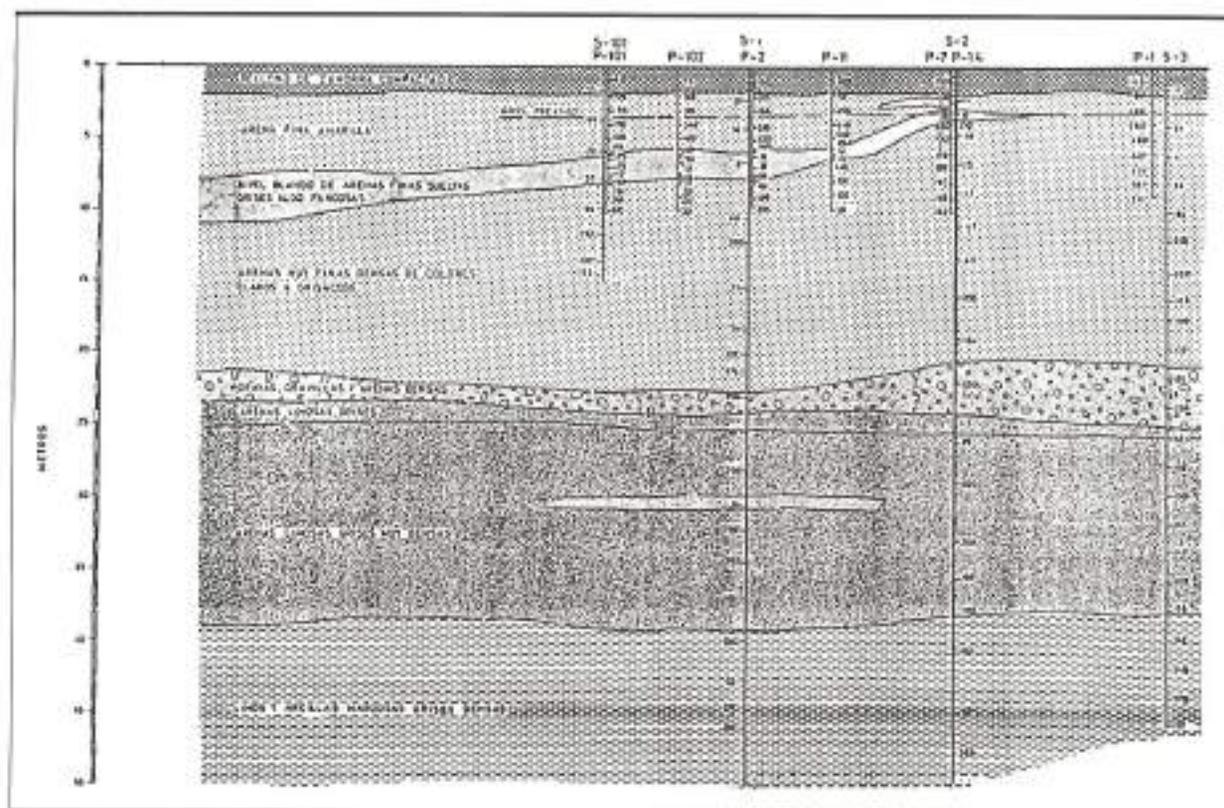


FIGURA 1.

miento se llevaron a cabo nuevos ensayos de penetración con cono estático, los cuales permitieron comprobar una considerable mejora de las propiedades de la capa floja, pero una pequeña perturbación en las propiedades de la arena densa situada por encima de la misma.

2. CARACTERIZACION DEL TERRENO

El terreno se caracterizó con ensayos de laboratorio e *in situ*. Un perfil medio se representa en la figura 1.

La estratificación consiste en cinco formaciones principales:

- Formación 1: Rellenos andrójicos heterogéneos de 2 m de espesor de arena arcillosa con algo de grava. CPT en el rango de 6,3-24,5 MPa.
- Formación 2: Arena densa con algo de limo de un espesor medio de 21 m. SPT en el rango de 35 hasta rechazo y CPT en el rango de 23,5-36,6 MPa. En algunos puntos se llegó al rechazo. Entre las profundidades de 5,5 a 8,5 m se detectó una capa de forma irregular de arena limosa floja con espesores entre 0,4-2,0 m con SPT en el rango de 3-15 y CPT en el rango de 2,9-11,4 MPa.
- Formación 3: Grava arenosa y arcillosa muy densa de 1,4 m de espesor dando rechazo al SPT.
- Formación 4: Arena limosa muy densa con espesor de 14 m. CPT en el rango de 39 hasta rechazo.

- Formación 5: Limo margoso y arenoso firme de espesor desconocido. CPT en el rango de 66 hasta rechazo y q_u en el rango de 0,58-1,4 MPa, según los ensayos triaxiales.

3. CONDICIONES INICIALES

Los cálculos preliminares demostraron la necesidad de mejorar el suelo respecto a los asentamientos diferenciales y al comportamiento heterogéneo desde el punto de vista dinámico entre las áreas en donde existía el lentejón flojo respecto aquellas en las que éste no se presentaba, y ello tanto bajo las cargas estáticas como las dinámicas (solicitud sísmica). Dicho lentejón podría licuarse bajo la acción del terremoto, aun cuando es dudoso que este riesgo pueda presentarse en la realidad, ya que el porcentaje de partículas que pasa a través del tamiz ASTM núm. 200 está en el rango de 1,7-28 %.

Los asentamientos admisibles se fijaron en 1/1.000 para el anillo de cimentación y 1/250 para la losa de fondo. Por otra parte, el lugar está en la zona más sísmica de España, con posibles desplazamientos importantes del terreno para los sismos OBE y SSE.

Se estudiaron dos posibles alternativas para la mejora del suelo, ambas basadas en inclusiones rígidas funcionando como pilotes pasivos. Este tipo de cimentación consiste esencialmente en construir dentro del suelo pi-

lotes rígidos (de acero, hormigón, grava, etc.) situados debajo pero sin contacto con la estructura. Esta descansa sobre un colchón de material no coherente limpio. La transmisión de las cargas se lleva a cabo por carga directa sobre las cabezas de los pilotes, ya que están incluidas en el colchón citado y también por fricción negativa transmitida al fuste de los pilotes por la consolidación del suelo.

Este método de mejora ha sido empleado previamente en distintos puntos, tales como el bedding en la Siderúrgica de Avilés (España, 1954), dique seco de Veracruz (Méjico, 1980), muelle del Batán (Sevilla, 1983) y estación de mercancías de Málaga (1986).

Las alternativas estudiadas fueron las de utilizar para la finalidad indicada columnas de grava o bien columnas de jet-grouting. Este último procedimiento fue el seleccionado, ya que permite la construcción de masas inyectadas en el interior del terreno inestable de forma controlada y rápida. Por otra parte, las columnas de jet-grouting tienen una gran resistencia y pequeña deformabilidad tanto bajo cargas estáticas como dinámicas.

Las columnas de grava fueron desechadas en el proyecto final, ya que su comportamiento dinámico no es igualmente adecuado para reducir los asentos producidos por el terremoto o para conservar las características de la capa arenosa densa situada por encima de la inclusión de escasa densidad. Las columnas de grava tienen, por otra parte, un gran asiento de grupo de difícil cuantificación (Mitchell, 3).

Por último, señalemos que la operación de claveteado solamente afectó al área donde el lentejón blando había sido detectado.

4. DISEÑO ESTÁTICO

Las estimaciones del asiento se efectuaron con la teoría elástica, con módulo de elasticidad aumentando uniformemente en las capas arenosas y con módulo de elasticidad constante en el limo arenoso margoso y en el colchón de grava densa. El espesor de este colchón se decidió para reemplazar el relleno antrópico heterogéneo y para alcanzar el nivel final fijado para la cimentación, con lo cual su espesor varía entre 2,4-1,7 m; los módulos de elasticidad empleados en el cálculo fueron los siguientes:

| | |
|--------------|-------------------------------|
| GRAVA | $E = 120 \text{ MPa}$ |
| ARENA | $E = 55 + 0,19 Z \text{ MPa}$ |
| LIMO MARGOSO | $E = 90 \text{ MPa}$ |

El módulo de elasticidad estático para la capa floja se determinó partiendo de la correlación de Schmertmann ($E = a \times q_c$ con $a = 2$), quedando entre 6 y 16 MPa.

Se calculó que sin mejora del terreno los asentos diferenciales entre las áreas que tenían el lentejón flojo y aquellas en las que éste no existía podrían llegar a ser entre 1,5-7,5 cm, con el riesgo de alabeos inaceptables del anillo y de asentos localizados de la losa del fondo,

que durante el ensayo con carga de agua llega a soportar una carga de 0,38 MPa.

Las características principales de las columnas de jet-grouting que se han utilizado en el proyecto han sido:

- Diámetro de las columnas: entre 0,7 y 0,8 m. Valor tomado en el proyecto: 0,75 m.
- Resistencia a la compresión simple de la mezcla arena limosa-lechada: 15 MPa.
- Coeficiente de elasticidad de esta mezcla: 362 veces dicha resistencia, según Lunardi (4): 5.400 MPa.
- Coeficiente de rozamiento negativo: $K_s = 0,18$.
- Empotramiento en la arena densa:
 - Por encima de la cara superior del lentejón de arena floja: 1,20 m.
 - Por debajo de la cara inferior de la misma: 2,40 m.
- Distancia entre los centros de las columnas adyacentes: 1,90 m.

Los cálculos desarrollados, teniendo en cuenta el efecto de las inclusiones rígidas, indicaron que los asentos diferenciales debidos a la existencia del lentejón de arena limosa floja pueden estar en el rango de 0,3-0,9 cm, lo que supone un factor de reducción entre 4,7 y 9,8 equivalente al 78-90 %.

Comparando el asiento total debido al terreno situado hasta la profundidad de 10 m en el área situada en el lentejón blando, se calculó que sin tratamiento pudiera estar en el rango entre 3,3-9,2 cm, mientras que con el tratamiento de inclusiones rígidas pudiera estar entre 2,0-2,5, con un factor de reducción entre 1,6 y 3,7.

Los asentos diferenciales entre la zona tratada y la no tratada pueden ser según los cálculos entre 0,12-0,36 cm.

Un cálculo semejante se hizo con respecto a los posibles asentos diferenciales del anillo que resultaron poder estar entre la zona tratada y la no tratada entre 0,16-0,44 cm.

Por último, las compresiones inducidas por las cargas directas y transmitidas por el fuste sobre las columnas de jet-grouting resultaron poder estar entre 2,7 y 3,4 MPa, con un factor de seguridad mínimo de 4,4 en comparación con la resistencia a la compresión simple, tomada como base del diseño.

5. DISEÑO DINAMICO

Para el diseño dinámico de las inclusiones rígidas se tomaron en cuenta dos aspectos principales:

- Riesgo de licuefacción del suelo tratado con jet-grouting bajo los esfuerzos cíclicos producidos por un sismo.
- El comportamiento dinámico del suelo reforzado en comparación con la arena densa circundante.

Los cálculos dinámicos han incluido los siguientes pasos:

- a) Después de las investigaciones geofísicas efectuadas en el lugar se aplicó el programa SHAKE tanto en la

hipótesis del sismo operativo básico (OBE) y en el de servicio seguro (SSE). Se efectuó el cálculo para las condiciones de campo libre y también considerando la masa y la frecuencia del primer modo de vibración del tanque, sin incluir la rigidización debida a su peso sobre la capa blanda, ya que éste se transmite en gran parte a las columnas de jet-grouting.

- b) Por medio del programa de elementos finitos RHEO-STAUB se analizó el comportamiento de una columna de jet-grouting de 0,75 m de diámetro frente a los máximos esfuerzos tangenciales deducidos del análisis SHAKE en la capa blanda, incluyendo un coeficiente de seguridad 1,2, simulando el ablandamiento del sistema compuesto mediante un proceso iterativo y teniendo en cuenta las simetrías en la distribución de las columnas.

Como comparación se tuvo en cuenta el modelo de ablandamiento de la arena de SEED IDRIS con densidad relativa en el rango de 40-45 %. El modelo empleado en el programa fue de dos dimensiones y para tener en cuenta la diferencia en el volumen de suelo afectado se redujo la rigidez de las columnas. Los principales parámetros utilizados en los cálculos fueron:

- Módulo tangente inicial de la capa blanda $G_0 = 70$ MPa (5).
- Módulo de elasticidad dinámico de las columnas: 5.430 MPa.
- Distancia entre centros de las columnas: 1,90 m.

Las deformaciones producidas en la columna de jet-grouting bajo las cargas tangenciales del terremoto se representan en la figura 2.

Del modelo estudiado se deducen las siguientes conclusiones:

- Existe una gran interacción entre las columnas de jet-grouting y el terreno blando que las rodea, según se deduce de la comparación entre las deformaciones producidas por los esfuerzos cortantes en la capa blanda, con columnas y sin columnas. El suelo reforzado es cinco veces más rígido que el suelo original y sin claveteado.
- Aunque no se consigue un comportamiento dinámico totalmente uniforme entre el suelo blando claveteado y la arena densa que le rodea, la discontinuidad entre ambos se reduce en una gran proporción. La razón entre los módulos tangenciales de la arena densa y floja se reducen de 10,8 a 3,7, consiguiéndose, por tanto, un terreno de cimentación mucho más homogéneo para el tanque.
- El suelo reforzado es vez y media más rígido que el suelo blando una vez que hubiese sido rigidizado por el paso del tanque, lo cual, por otra parte, no se haría sin la producción de asentos por encima de lo admisible.
- Se calcula que se ha conseguido un factor de seguridad mínimo respecto a la licuefacción de 1,6, debido a:

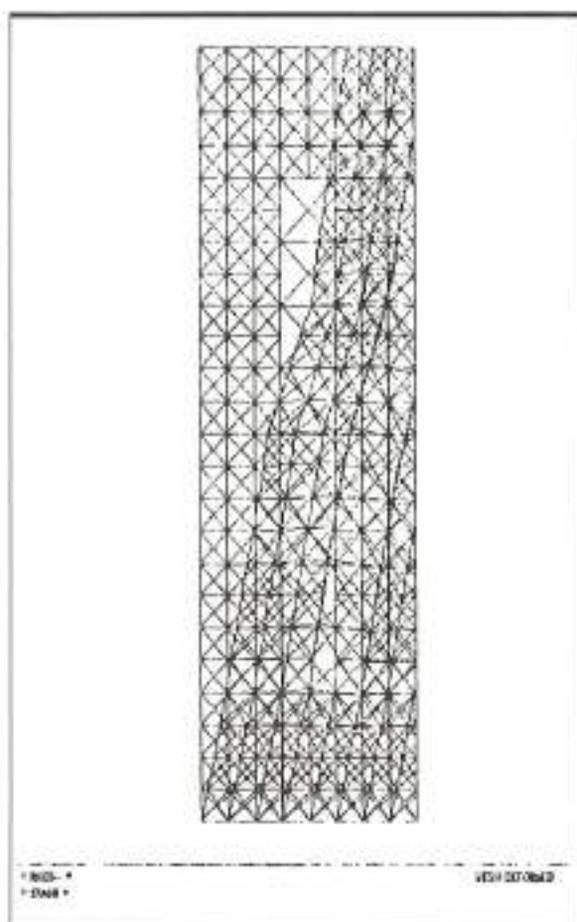


FIGURA 2.

- a) Mejora del suelo blando entre dos columnas producida por el proceso de jet-grouting.
- b) Fuerzas tangenciales resistidas directamente por las columnas.
- c) Descarga de la capa blanda, producida por las columnas, lo que hace que su razón de sobreconsolidación sea muy superior, con el consiguiente efecto beneficioso según Rolling y Seed (6).

6. DISTRIBUCION DE LAS COLUMNAS DE JET-GROUTING

Basándose en cálculos teóricos se proyectó la distribución de las columnas de jet-grouting, reforzando solamente el área correspondiente al lentejón blando. Los límites y el espesor de éste se precisaron con una segunda campaña de penetraciones de cono estático, además de la que se había efectuado para el informe geotécnico inicial. Se proyectaron también columnas adicionales, formando una aureola de transición más allá de los bordes de dicha área.

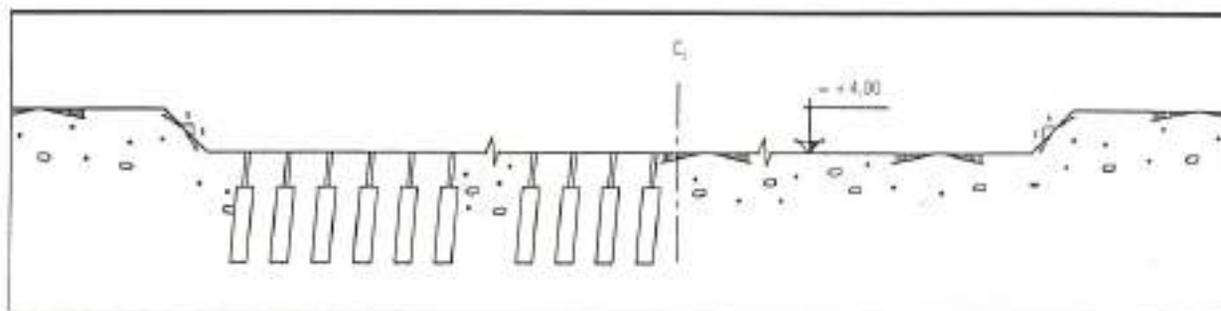


FIGURA 3. Mejora terreno dinámico.

La disposición de las columnas quedó con el aspecto de la figura 3.

7. DESCRIPCIÓN DEL TRATAMIENTO DE JET-GROUTING

Los parámetros de la inyección durante el proceso de jet-grouting se decidieron a partir de datos empíricos (Lunardi, 1986), pero se comprobaron por medio de cinco columnas de prueba construidas en el lugar antes del comienzo de los trabajos. Como consecuencia de los resultados se fijaron los siguientes parámetros, a emplear durante el jet-grouting, sistema monojet:

- Presión de inyección: 50 MPa.
- Velocidad de ascensión del monitor: 30 cm/m.
- Diámetro de la tobera: 1,8 mm. Monitor con dos toberas.
- Velocidad de rotación del monitor: 22,5 rpm.
- Densidad de la lechada de inyección: 1,6 g/cm³.

Estos parámetros se fijaron con el objeto de obtener columnas de diámetro entre 0,70-0,80 m, resistencia a la compresión simple mayor de 15 MPa y 250 litros de inyección neta descontado el rechazo, por m³ de suelo tratado. Los ensayos comprobaron que el diámetro de las columnas estaría entre 0,65-0,87 m, con un valor medio de 0,78 m en la arena densa por encima del lentejón blando. El diámetro en el lentejón blando no pudo ser medido, ya que queda por debajo de la capa freática y no fue posible la excavación.

Solamente un 5 % del total de columnas han tenido una admisión neta por debajo del valor especificado de 250 l/m³, aunque siempre han quedado por encima de los 200 l/m³.

La integridad y continuidad de las columnas se comprobó por medio de nueve sondeos efectuados después del tratamiento. Estos sondeos se hicieron para obtener muestras del material así creado: mezcla de arena limosa y lechada. Se efectuaron ensayos de laboratorio para determinar la resistencia a la compresión simple y la densidad de las muestras. Los resultados a los 7 y a los 28 días después del tratamiento de jet-grouting fueron los siguientes:

| EDAD (Días) | Ru (CAMPO) MPa | Ru (MEDIA) MPa | (CAMPO) g/cm ³ | (MEDIA) g/cm ³ |
|-------------|----------------|----------------|---------------------------|---------------------------|
| 7 | 5,8-38,7 | 12,7 ± 6,2 | 1,94-2,31 | 2,11 ± 0,09 |
| 28 | 6,8-40,8 | 15,9 ± 6,6 | 1,84-2,29 | 2,11 ± 0,09 |

NOTA: Las muestras inclían trazo de concho de gran tamaño.

El número de muestras ensayadas fue de 56.

8. MEJORA DEL SUELO DE ACUERDO CON LOS ENSAYOS DE PENETRACION DE CONO ESTÁTICO

Después del tratamiento efectuado sobre el suelo se llevaron a cabo 13 penetraciones con cono estático, con el fin de obtener datos sobre la posible mejora del suelo, entre las columnas. La comparación entre los CPT efectuados antes y después del tratamiento dieron a conocer los siguientes resultados en la formación 1:

ARENA Densa SOBRE LA CAPA BLANDA

Se midió una pequeña disminución la resistencia por la punta en la arena densa sobre el lentejón blando. Esta disminución está en el rango del 5 al 10 % de la resistencia inicial por la punta como media, aunque hay lecturas con incrementos o decrementos que llegan al 30 %.

La resistencia media a la punta del cono es de 22,6 MPa, después del tratamiento, muy próxima al valor inicial de 24,3 MPa.

CAPA FLOJA DE ARENA LIMOSA

En esta capa floja se ha comprobado un gran incremento en la resistencia a la punta del cono. Este incremento es de media igual al 100 %, con un campo de variación entre el 22 y el 181 %. Después del tratamiento la resistencia media por la punta es de 9,3 MPa, mientras que inicialmente el valor medio era de 4,7 MPa (figura 4).

Tan sólo con esta mejora, aun sin considerar el efecto de las columnas, no existe prácticamente riesgo de licuefacción en esta capa, en la cual, por otra parte, este riesgo siempre se consideró marginal a causa de su contenido en finos.

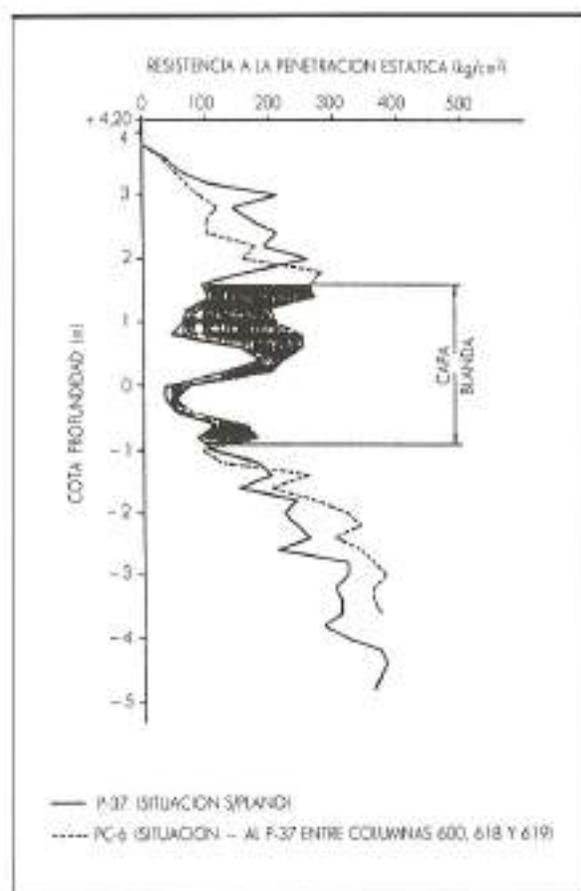


FIGURA 4.

CAPA DE ARENA DENSA POR DEBAJO DEL LENTEJON BLANDO

En esta capa se observó un ligero incremento en la resistencia a la punta del cono. Este incremento es del 12 %, si bien hay siete lecturas en las que se observó un decrecimiento del 6 %.

Estos datos sobre la mejora del terreno entre las columnas de jet-grouting son de gran interés, ya que aunque este fenómeno ha sido citado no hemos encontrado información bibliográfica precisa acerca del mismo. Esta fue la razón, por otra parte, que nos indujo a hacer una tercera campaña de ensayos de penetración con cono estático, después del tratamiento, para detectar estas posibles actuaciones.

9. CONCLUSIONES

La experiencia de varias cimentaciones proyectadas por los autores con inclusiones rígidas demuestra la eficacia

de este procedimiento para homogeneizar las propiedades de un terreno de cimentación bajo cargas estáticas. El procedimiento de jet-grouting es muy adecuado para construir estas inclusiones rígidas. Las principales ventajas son la posibilidad de tratar una capa blanda o floja situada por debajo de otra capa más densa o rígida con una pequeña perturbación de esta última y su construcción rápida y precisa.

En el caso estudiado se ha comprobado una considerable mejora de las propiedades de la capa floja después del tratamiento entre las columnas. El incremento medio de la resistencia a la punta del cono ha sido del orden del 100 %.

Los cálculos teóricos efectuados por medio de elementos finitos permiten esperar una gran homogeneización en la respuesta dinámica del terreno denso y del flujo así tratado, debido a la gran interacción entre las columnas de jet-grouting y el terreno que los rodea. El aumento previsible del módulo tangencial del material compuesto es muy notable.

10. AGRADECIMIENTOS

Los trabajos descritos en este artículo han sido patrocinados por ENAGAS, propietaria del tanque, y ECH, asociación temporal de CHICAGO BRIDGE IRON y ENTRECANALES Y TAVOR, S. A., contratistas principales de la obra civil. El tratamiento con jet-grouting se llevó a cabo por TECNILAND, S. A., bajo la dirección y supervisión de IBERICA DE ESTUDIOS E INGENIERIA, S. A.

Damos aquí las gracias a ENAGAS y ECH por su permiso para presentar aquí los datos obtenidos.

Queremos también hacer constar que el ingeniero don Carlos Sayago llevó a cabo los cálculos en elementos finitos y contribuyó con valiosos comentarios y sugerencias a la resolución del problema.

11. REFERENCIAS

- JIMENEZ SALAS, S. A. (1989). Introducción al proyecto de pilotes pasivos. Curso sobre proyecto y construcción de cimentaciones profundas. CEDEX. MOPU.
- LORENTE DE NO, Carlos (1986). Cimentaciones con pilotes pasivos. Curso sobre métodos modernos de mejora del terreno. CEDEX. MOPU.
- MITCHELL, J. K., y KATTY, R. K. (1983). Soil improvement, state of the art report VIII ESMCPE. Helsinki.
- LEONARDI, MONGILARDI y TORNAGHI (1986). Il pre-consolidamento jet-grouting nella realizzazione di opere in sottoterraneo. Int. Conf. Large Underg. Op. Firenze.
- BALDI, BELLOTI, GHIONNA, JAMIOLKOWSKI y PRETTI (1989). Modulus of sands from CPT'S and DMT'S. XII ICSMFE.
- ROLLING AND BOLTON SEED (1990). Influence of building on potential liquefaction damage. J. Geot. Eng. ASCE. 2:1990.
- ALLEN MARR, W.; RAMOS, J. A., y LAMBE, W. (1982). Criteria for settlement of tanks. J. Geot. Eng. ASCE-GT 8.