

Tanques GNL en el puerto de Barcelona. Tratamientos del terreno

JOSÉ ANTONIO LEIRA VELASCO (*)

RESUMEN La ampliación de la planta de regasificación de GNL del puerto de Barcelona, incluye la construcción de cuatro tanques de almacenamiento de contención total de 150.000 m³. Su cimentación es una losa de 86 m de diámetro que transmite una tensión uniforme de 255 kPa en prueba hidráulica y 175 kPa en servicio. El perfil del terreno está formado por rellenos antrópicos de 7 a 10 m de profundidad sobre arenas finas medianamente densas, intercaladas con niveles de arcillas medianamente firmes de potencia métrica. Para controlar los asentamientos diferenciales de la losa y bajo la pared del tanque se emplearon varias técnicas de tratamiento del terreno. La caracterización inicial del terreno se comprobó y ajustó con los resultados del control del tratamiento. Los asentamientos totales y diferenciales en prueba hidráulica, así como los asentamientos diferenciales remanentes una vez vaciado el tanque, fueron del orden de los estimados.

LNG TANKS AT BARCELONA'S HARBOUR. SOIL IMPROVEMENT

ABSTRACT *The expansion of the LNG plant at Barcelona's Harbour includes the construction of four storage tanks capable for 150000 m³. The tanks foundation is an 86 m diameter slab, which transfer 255 KPa at hydrotest and 175 KPa during operation. Soil profile comprises a first layer of uncontrolled reclamation fill 7 to 10 m deep, followed by medium dense fine sands merged with metric layers of medium to stiff clays up to 25 m depth. In order to control the differential settlements of the slab and under the tank wall, soil improvement was adopted. Soil characterization was based on soil investigation and treatment results feed back was used for verification. Total and differential settlements during hydrotest, and remaining settlements once the tanks were emptied, were on the order of the estimated ones.*

Palabras clave: Tratamiento del terreno, Sustitución, Compactación dinámica, Precarga, Ensayos "in situ", Control deformaciones.

Keywords: Soil improvement, Soil replacement, Dynamic compaction, Preload, "In situ" testing, Deformation control.

1. INTRODUCCIÓN

FCC Construcción, en UTE con Felguera-IHI, ha construido recientemente para Enagas, 3 tanques de GNL de 150.000 m³ de capacidad que están en funcionamiento; dos en el Puerto de Barcelona y uno en el Puerto de Escombreras en Cartagena. Actualmente está construyendo dos tanques similares de 150.000 m³ en el Puerto de Barcelona. Estos proyectos se adjudican "llave en mano", incluyendo la tecnología, el diseño y la construcción.

En la presente comunicación se va a describir la cimentación de los dos primeros tanques construidos en el muelle de inflamables del puerto de Barcelona, denominados TK 3000 y TK 3001.

El gas natural (GN) es una mezcla de gases que tiene como compuesto principal el metano, con más del 80% en volumen. El resto de componentes son hidrocarburos ligeros y otras sustancias disueltas sin interés comercial que deben ser separa-

das. El gas natural se emplea como combustible industrial y doméstico así como de materia prima en la fabricación de plásticos y otros usos químicos.

En transporte mayorista del gas natural desde los países productores hasta los consumidores, se puede realizar en estado gaseoso, mediante gasoductos o conducciones a alta presión (hasta 70 atm.) o en estado líquido a baja temperatura (GNL) mediante buques metaneros. El transporte mediante gasoductos supone conexión física, entre el punto de producción y el de consumo y las infraestructuras que necesita son las conducciones y las estaciones de compresión. El transporte mediante buques implica unas infraestructuras portuarias de licuación mas carga en origen y descarga más regasificación en destino, así como barcos metaneros específicos. Los dos medios son adecuados para el transporte y pueden ser complementarios, teniendo el transporte por barco una mayor garantía de suministro al poder disponer de diferentes puntos de suministro y no depender de un único suministrador como con el gasoducto.

El gas natural licuado (GNL) es el gas enfriado hasta la temperatura de condensación (-161°C a 1 atm). En esas condiciones el volumen del líquido es del orden de 600 veces menor que en forma de gas, lo que permite que los barcos actuales de

(*) Ingeniero de Caminos Canales y Puertos. Jefe del Departamento de Geotecnia. Servicios Técnicos FCC Construcción.



FIGURA 1. Situación de los tanques en el puerto de Barcelona.

100.000/150.000 m³ de capacidad de GNL, transporten 60 a 90 millones de m³ de gas natural una vez regasificado en destino, lo que facilita y economiza el transporte.

En todas las instalaciones que intervienen en este proceso, todos los equipos y materiales que estén en contacto con el GNL, requieren propiedades criogénicas para que soporten adecuadamente las bajas temperaturas.

Los tanques de almacenamiento de GNL más evolucionados y seguros actualmente, son los denominados “full containment” o de contención total, en los que los requisitos de calidad y seguridad son muy elevados, contemplándose los escenarios accidentales del sismo, explosión, incendio y fuga mayor del tanque interior, en los cuales se tiene que garantizar su comportamiento como contenedor y como estructura.

Este tanque consta fundamentalmente de dos recipientes concéntricos, el interior es metálico (acero al 9% Ni) y contiene directamente al GNL a una temperatura de -164°C, el exterior es un recipiente secundario de hormigón armado y pretensado. Ambos tanques son capaces de retener tanto el GNL líquido como su vapor. El espacio entre los dos recipientes está ocupado por material aislante con objeto de minimizar las pérdidas térmicas.

La capacidad actual de estos tanques es de 150.000 m³, equivalente al volumen transportado por un buque, aunque ya está desarrollándose tanques de 200.000 m³.

Su plazo de ejecución es de unos 30 meses, empleando unas 625.000 horas-hombre en su construcción, con unos picos de trabajo de más de 200 trabajadores, sin contar las instalaciones de conexión con la planta, ni las de descarga de barcos metaneros.

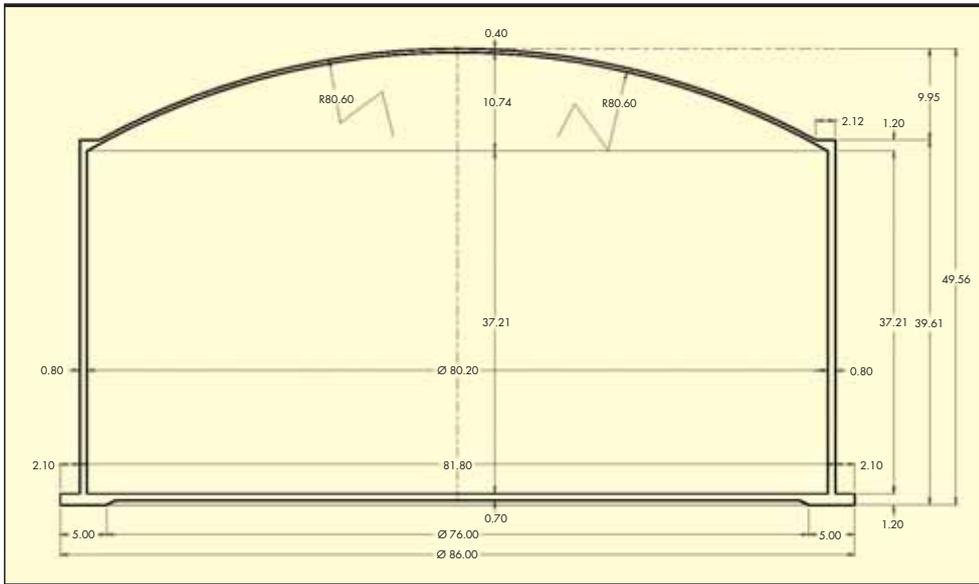


FIGURA 2. Geometría del tanque exterior de hormigón.

2. DESCRIPCIÓN DEL TANQUE

El tanque exterior de hormigón tiene 80 m de diámetro y 37 m de altura y una pared de 0,80 m de espesor. Está pretensado tanto vertical como horizontalmente. Se cubre con una cúpula monolítica de hormigón armado de 80 m de radio, 10 m de altura y 0,40 m de espesor. El tanque interior es un cilindro metálico de 76 m de diámetro y 37 m de altura con una cubierta plana.

La base del tanque exterior es una losa de 86 m de diámetro de hormigón pretensado. La sección central de la losa de 76 m de diámetro tiene un canto de 70 cm. Se completa con un anillo perimetral de 5 m de anchura y 1,20 de canto.

La losa transmite una tensión media de 175 kPa en servicio y 255 kPa en prueba hidráulica. El anillo perimetral transmite una tensión de 240 kPa.



FIGURA 3. Armado de la losa.



FIGURA 4. Tanque exterior y encofrado de la cúpula.

3. PERFIL DEL TERRENO

Los tanques apoyan a cota +2,50. El terreno estaba formado por rellenos antrópicos vertidos directamente al mar, que apoyan sobre depósitos deltaicos del Llobregat. El perfil del terreno de techo a muro está formada por (figura 5):

1. Rellenos heterogéneos, formados mayoritariamente por suelos granulares con contenido variable de arcilla en su masa y bolsadas arcillosas. Se encontraron restos de demoliciones. Si bien no se reconocieron restos de materia orgánica, residuos industriales o grandes huecos, no se podía descartar totalmente su presencia. El muro bajo el TK. 3000 estaba comprendido entre las cotas -4,5 y -6, lo que suponía entre 7 y 8,5 m de relleno. En el TK. 3001 el espesor total estaba comprendido entre 9 y 10 m.
2. Nivel granular superior, es el primer nivel del sustrato, formado por arena fina con contenido variable de limo en su matriz y abundantes vetas centimétricas de limo y arcilla. En general, es medianamente densa y ocasionalmente densa. A muro se presenta interestratificada con niveles de limo y arcilla de gran continuidad, que se han agrupado en el nivel 3. Se ha reconocido hasta las cotas -18 a -20.
3. Nivel cohesivo superior, formado por estratos cohesivos interestratificados con el nivel superior y por al-

gundo más de gran potencia y continuidad subyacente a la arena. Están formados por limo y arcilla poco plásticos con contenido variable de arena en su matriz y vetas arenosas centimétricas intercaladas. Están normalmente consolidadas y su consistencia es moderadamente firme a firme. El conjunto del nivel tiene una potencia de 4 a 8 m y su cota inferior es la -22.

4. Nivel granular intermedio, formado por arena con indicios de algo de limo y escasas pasadas centimétricas de limo-arcilla, de compacidad densa a muy densa. Su potencia varía entre 18 y 28 m.
5. Nivel cohesivo inferior, a partir de las cotas -40 a -46 se reconocen limos y arcillas con contenido variable de arena y presencia de lentejones arenosos, de consistencia firme a muy firme. Su potencia varía entre 5 y 10 m acuñándose hacia el sur. Intercalado con el nivel granular subyacente se han reconocido dos subniveles similares de 2 m de potencia.
6. Nivel granular inferior formado por arenas muy densas que, en principio, alcanzan el nivel de gravas de base del cuaternario.

En la tabla 1 se describe el perfil de diseño adoptado. Los niveles cohesivos se subdividieron y se intercalaron con los niveles granulares correspondientes. En las tablas 2 y 3 se resume la caracterización geomecánica del terreno.

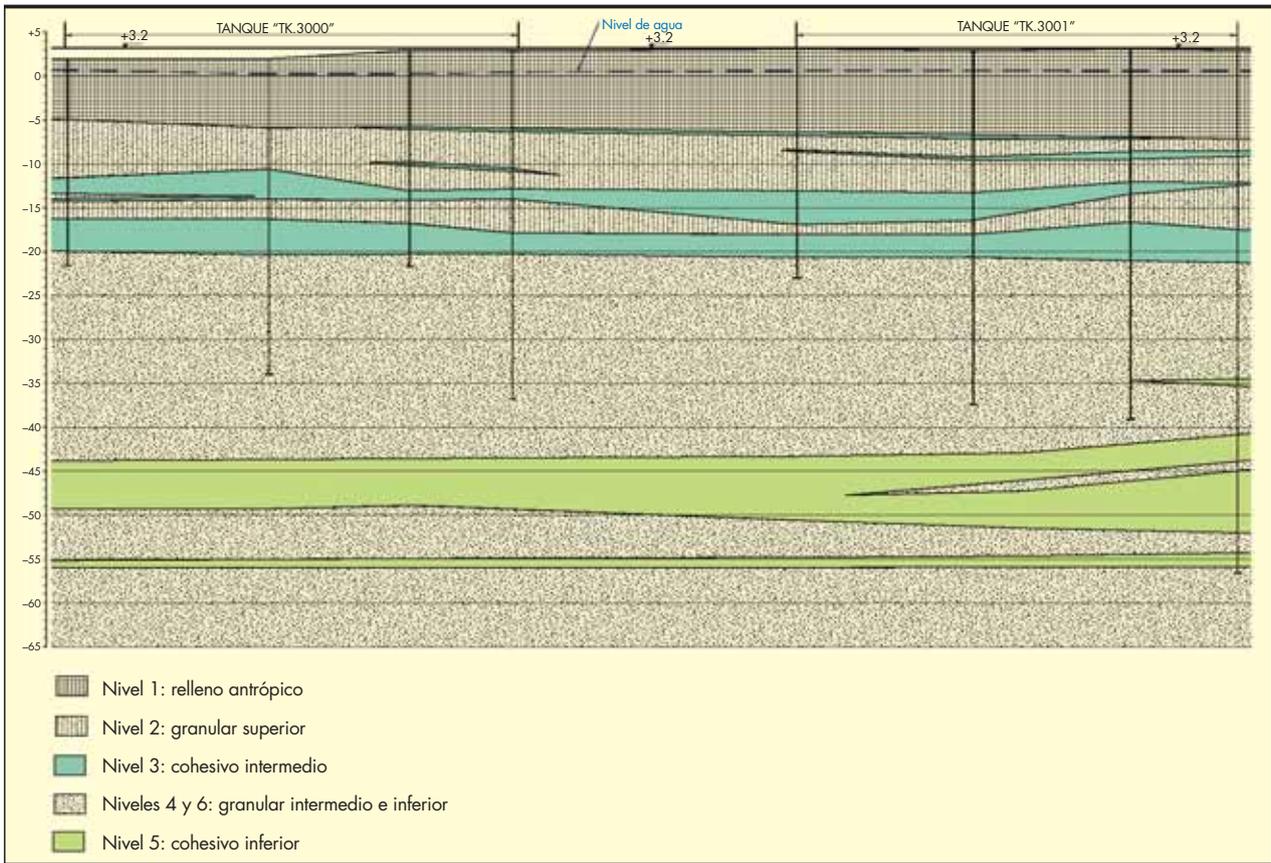


FIGURA 5. Perfil geológico del terreno.

Nivel	Descripción	Cota	
		Techo	Muro
1	Relleno	+2,5	-4,5/-7
2	Granular superior	-4,5/-7	-16
3	Cohesivo superior	-12	-14
		-16	-20
4	Granular intermedio	-20	-43
5	Cohesivo inferior	-43	-50
		-79	-91
6	Granular inferior	-50	-100

TABLA 1. Perfil de diseño.

Nivel	γ_d (kN/m ³)	w (%)	Paso #200 (%)	LL	IP
2	16,3	23,3	33	-	-
3	15,1	28,1	80	30	10
4	16,7	19,9	10	-	-
5	15,7	26,4	66	28	7
6	16,6	18,2	31	-	-

TABLA 2. Características.

Nivel	E_{noval}	E_{recarga}	C_v (cm ² /día)	2 H (m)
2	49 σ_v'	375 σ_v'	–	–
3	14 σ_v'	115 σ_v'	600	3
4	84 σ_v'	560 σ_v'	–	–
5	13 σ_v'	125 σ_v'	600	3
6	57 σ_v'	450 σ_v'	–	–

TABLA 3.
Deformabilidad.

4. DISEÑO DE LA CIMENTACIÓN

Debido a las dimensiones de la estructura y la rigidez del terreno, el diseño de la cimentación está gobernado por sus deformaciones. Estas deben cumplir, tanto en servicio como en prueba hidráulica, las especificaciones de deformaciones diferenciales admisibles de la BS 7777:

Distorsión angular radial	1:300
Distorsión angular perimetral	1:500
Desplome	1:500

El apoyo directo de la losa del tanque induciría en el terreno en su estado original deformaciones totales y diferenciales inadmisibles.

Una cimentación profunda debería estudiarse como un grupo de pilotes, de dimensiones similares en planta a la losa del tanque y empotrados a partir de la cota -50. La profundidad resultante del grupo, para obtener deformaciones admisibles, hacía inviable la solución.

En cambio, los asientos estimados considerando la deformabilidad en recarga del terreno cumplían los límites de deformabilidad admisibles. Por lo que una precarga era la solución de cimentación más sencilla.

El posible inconveniente de esta solución era el plazo de consolidación de los niveles cohesivos normalmente consolidados. Se había reconocido la presencia de pasadas y lentes arenosas de gran continuidad lateral en los niveles cohesivos que podían actuar como drenes horizontales, limitando el espesor drenante a un máximo de 3 m. Así, a partir de la caracterización del terreno se podría prever un plazo de consolidación de 6 a 12 semanas.

El relleno antrópico superior requería una consideración específica. A pesar de su naturaleza principalmente granular, su heterogeneidad y deformabilidad no hacían recomendable apoyarse en él. Por tanto, se decidió su sustitución por un material de granulometría controlada que proporcionara la rigidez necesaria.

La sustitución realizada en cada uno de los tanques fue diferente. En el TK 3000 el relleno se excavó hasta la cota -4,5 y se sustituyó por material granular bien graduado con tamaño máximo comprendido entre 10 y 20 mm y un porcentaje de finos inferior al 5%. La cota de excavación dejaba un relleno remanente de 1,5 m de potencia máxima. Tanto el material de sustitución como el relleno remanente se densificaron mediante compactación dinámica. En cambio, en el tanque TK 3001 se excavó hasta la cota -6 y se sustituyó el terreno por un material granular grueso uniforme comprendido entre 30 y 10 cm. Este relleno no fue tratado.

Una vez realizada la sustitución y el tratamiento correspondiente, el terreno en ambos tanques se precargó hasta la tensión de la prueba hidráulica. Para estimar los asientos

Carga	Media	Máxima
Servicio	1:930	1:430
Prueba hidráulica	1:910	1:370

TABLA 4. Distorsiones angulares estimadas.

del tanque se adoptó el perfil de deformabilidad del terreno de la tabla 3. El material de sustitución se caracterizó a partir de los ensayos que se describen en apartados posteriores. Para la estimación de deformaciones se empleó un modelo integral del terreno y la estructura mediante el programa ABAQUS. Las distorsiones angulares radiales media y máxima estimadas se recogen en la tabla 4.

La distorsión media se mide entre el centro al perímetro de la losa. La distorsión máxima se mide bajo la losa perimetral. En el modelo también se comprobó la distorsión perimetral y el desplome considerando el rango de variación de la potencia de los niveles del terreno. En todos los análisis las deformaciones obtenidas eran admisibles.

Las deformaciones medidas bajo la precarga permitieron ajustar el perfil de cálculo del terreno y comprobar la bondad del mismo. El diseño de la cimentación se fundamenta en la correcta caracterización del terreno y en el control de las deformaciones en todas las etapas constructivas para confirmar y corregir las hipótesis de partida.

5. SUSTITUCIÓN Y TRATAMIENTO DE LOS RELLENOS PORTUARIOS

La compactación dinámica del terreno de sustitución y del relleno remanente bajo el TK 3000 se dimensionó a partir de los resultados de un campo de pruebas.

Se disponía de una energía de 300 tm por golpe, conseguida por una maza de 15 t lanzada desde 20 m de altura, que permitía alcanzar una profundidad comprendida entre 7 y 9 m.

En el campo de pruebas se ensayaron mallas de golpeo de diferentes lados, con número variable de pasadas y de golpes por andanada. Finalmente, se adoptó una malla de 5 m de lado y una única pasada de 8 a 12 golpes por andanada (figura 6). La energía media aplicada fue de 120 tm/m². Este corresponde a un valor medio dentro del rango de energía habitualmente empleado.

En el campo de pruebas se hicieron ensayos SPT, penetrometros estáticos, CPTu, y presiometros tipo Menard, MPM, antes y después de la compactación, en el propio punto de golpeo, en el centro de los lados y en el centro de la malla. Los resultados medios se recogen en la tabla 5. La disposición del campo de pruebas se puede ver en la figura 7.

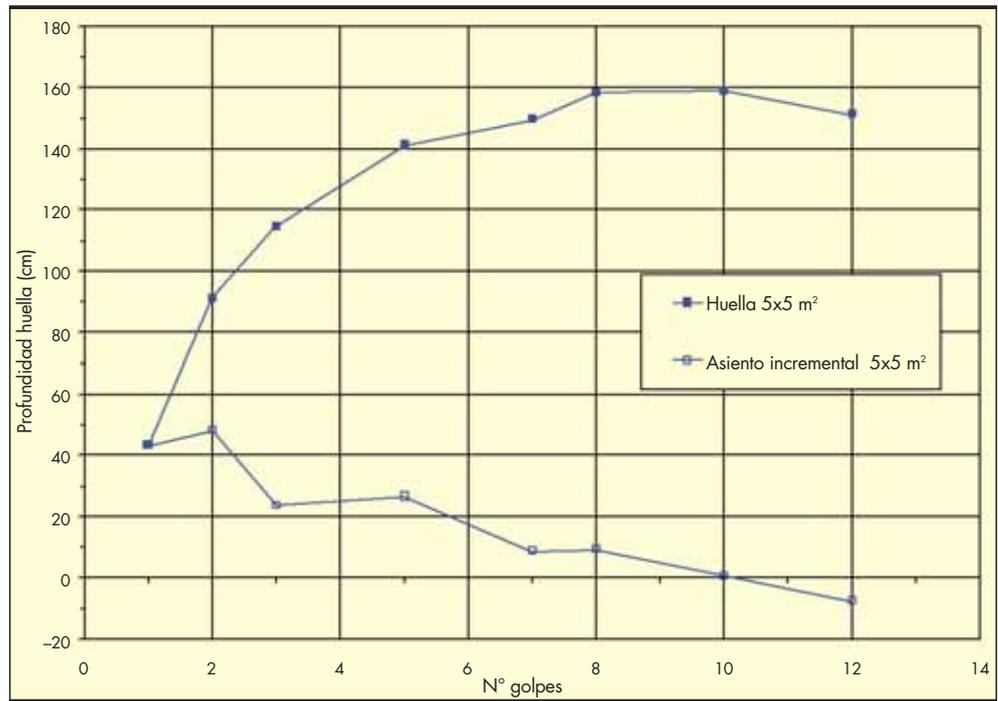


FIGURA 6. Control del número óptimo de golpes en una andanada.

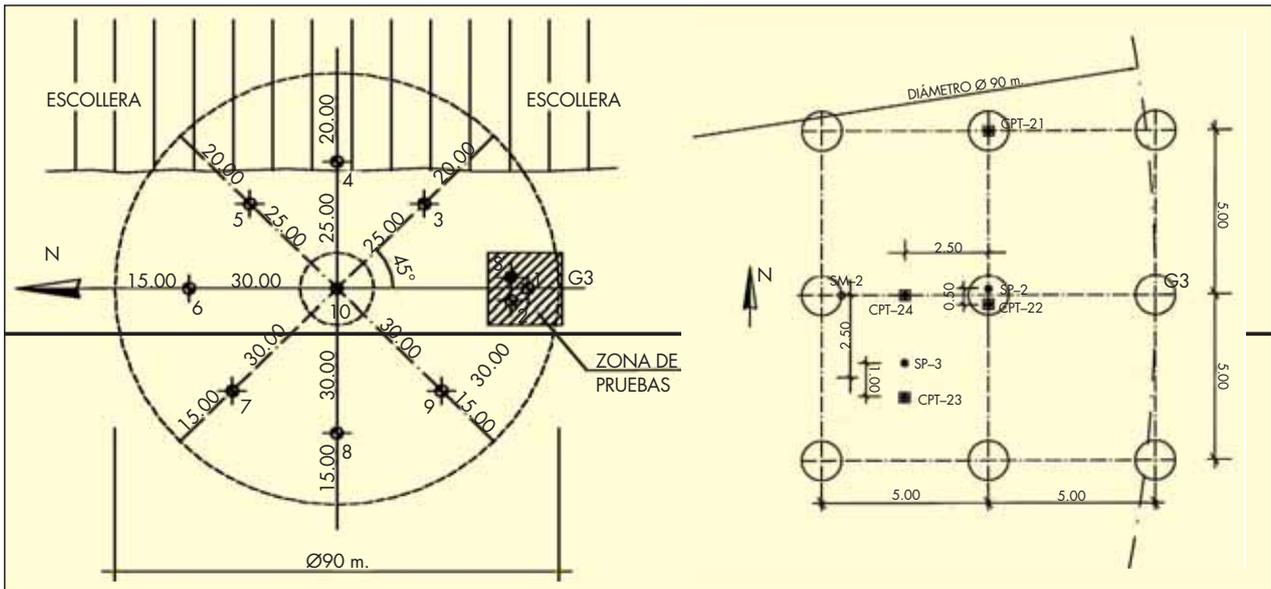


FIGURA 7 Compactación dinámica. Ensayos "in situ" en campo de pruebas y en el área de tratamiento durante la ejecución.

Ensayo	Antes	Después
N_{SPT}	4	14
q_c (MPa)	2 a 3	4 a 8
E_{MPM} (MPa)	3,7	7,5
p_i^* (kPa)	550	850

TABLA 5. Resultados ensayos campo de pruebas.

En la figura 8 se puede comprobar el incremento de la densidad relativa a partir de los ensayos SPT y CPT. El incremento medio de densidad relativa fue del 200% en el material de sustitución, y del 170% en el relleno remanente. El incremento medio del módulo presiométrico fue del 200% (figura 9).

El módulo de deformación en recarga (figura 9) se estimó con correlaciones habituales a partir del penetrómetro estático (Baldi) y del presiómetro (Menard). Se adoptó un módulo de deformación recarga variable con la profundidad entre 50 y 80 MPa.

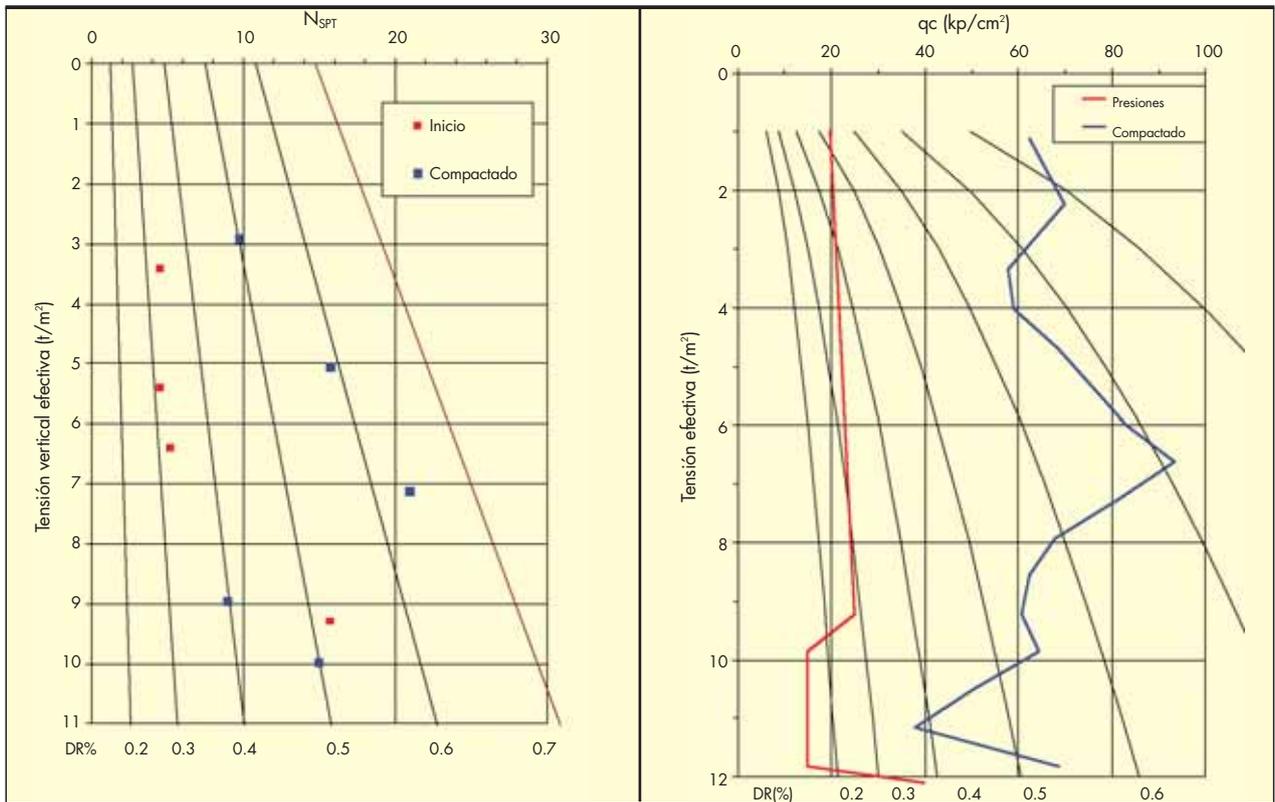


FIGURA 8. Resultados del campo de pruebas.

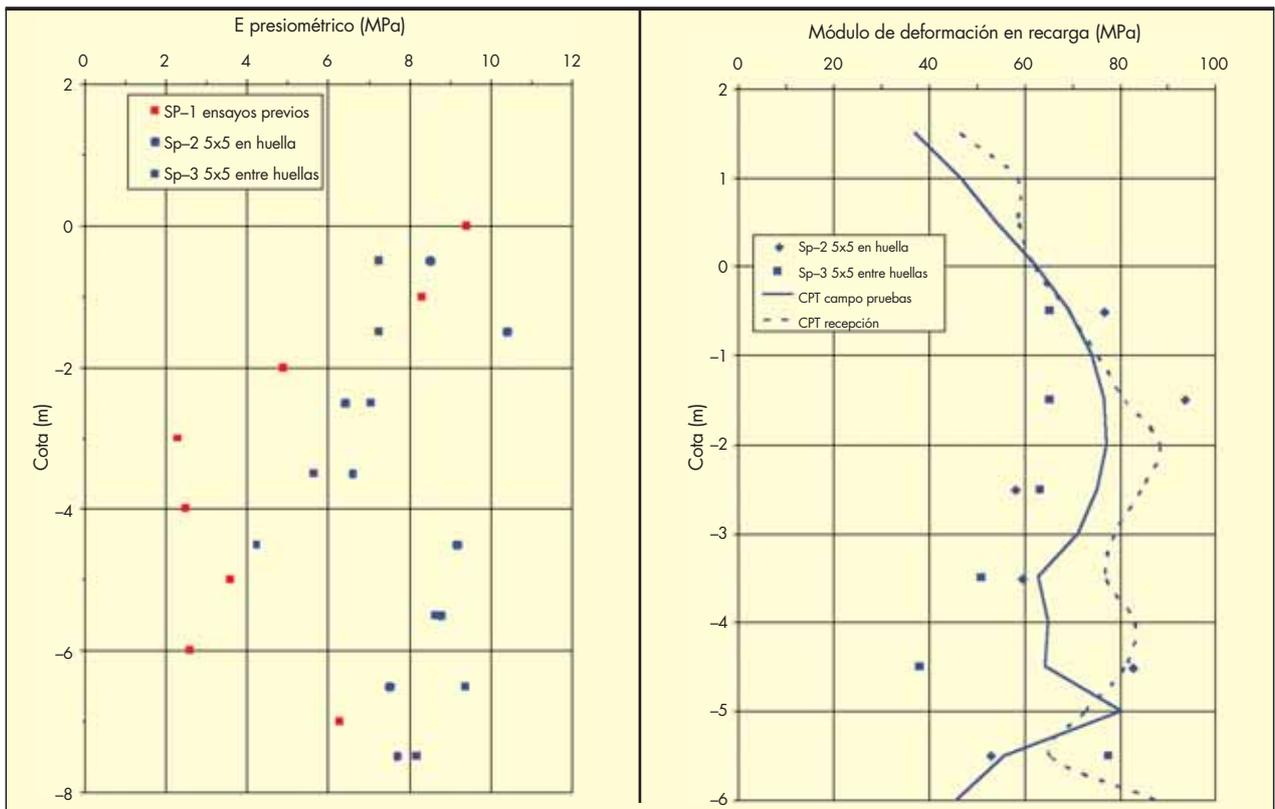


FIGURA 9. Resultados presiómetro y estimación del módulo en recarga.



FIGURA 10. TK-3000 Ejecución de la compactación dinámica.

El tratamiento se controló mediante penetrómetros estáticos realizados antes y después de la compactación, según la malla de la figura 3. El valor medio de la resistencia por punta, q_c , fue de 7 MPa en un rango comprendido entre 6 y 9,5 MPa. En la figura 9 se incluye el valor del módulo en recarga estimado a partir de los valores medios obtenidos en estos ensayos.

La deformabilidad del material de sustitución del TK 3001 se determinó mediante una prueba de carga realizada con un terraplén de 4 m de altura y 4 m de diámetro superior. A partir de los asientos se calculó un módulo de deformación noval

de 20 MPa. Para el cálculo de la cimentación se estimó un módulo de 80 MPa.

6. PRECARGA

La precarga de ambos tanques consistió en un terraplén tronco-cónico de 14,5 m de altura, 62 m de diámetro superior y 125 m de diámetro en la base. El relleno se pisó lo necesario para poder colocarlo, alcanzando una densidad media de 18 kN/m^3 , de manera que transmitía una tensión a cota de apoyo de 260 kPa.

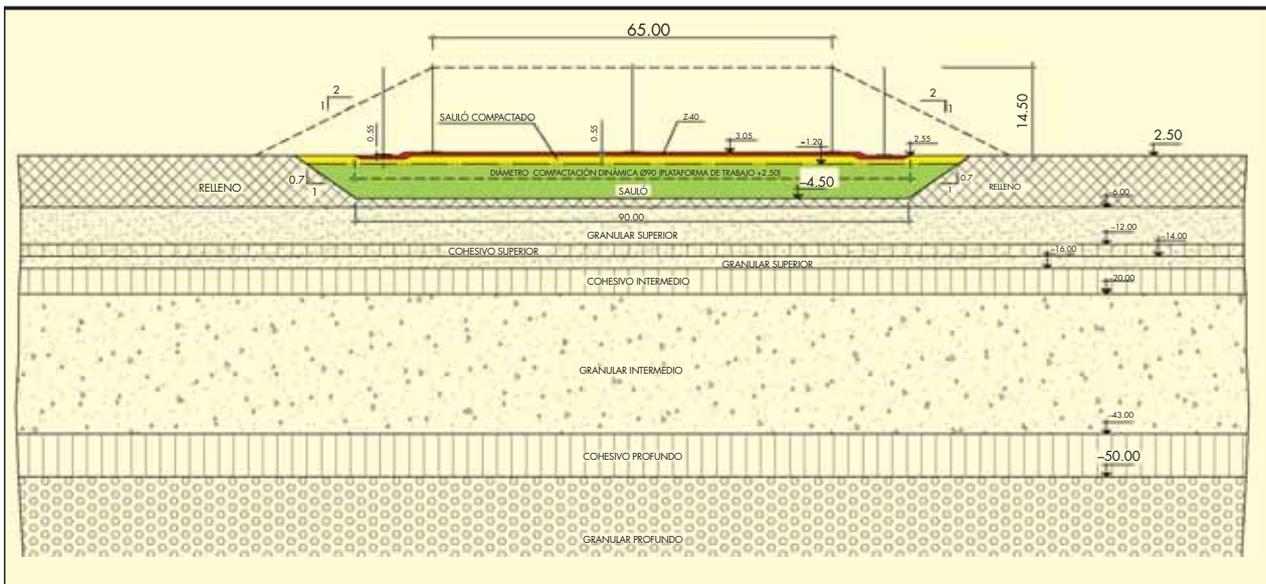


FIGURA 11. Geometría de la precarga.

Situación	Asientos (cm)	Recuperación (cm)
Centro	69	16,5
Perímetro superior precarga	57	15
Perímetro tanque	47	13

TABLA 6. Movimientos estimados en la precarga.

Situación	Asientos (cm)	Recuperación (cm)
Centro	124	11
Perímetro superior precarga	110	8.5
Perímetro tanque	109	5

TABLA 8. TK 3001, asientos medidos.

Situación	Asientos (cm)	Recuperación (cm)
Centro	72	13
Perímetro superior precarga	65	11
Perímetro tanque	52	9

TABLA 7. TK 3000, asientos medidos.

A partir del perfil de cálculo del terreno se estimaron los asientos y la recuperación del terreno en cada tanque que permitían controlar la evolución de ambas precargas.

Los movimientos durante las precargas se controlaron con placas de asiento situadas en el centro, perímetro superior de la precarga, perímetro del tanque, así como hitos de nivelación al pie de la precarga (figura 11).

Los asientos del TK 3000 fueron un 110% superiores a los previstos, mientras que la recarga fue un 20% más rígida que la estimación. Los asientos se estabilizaron en 6 semanas.

En el TK 3001, los asientos fueron un 65% superiores a los previstos y la precarga un 19% más rígida. La estabilización de los movimientos se produjo en 10 semanas. El tiempo total que se mantuvo la precarga fue superior al estrictamente necesario para su estabilización, ya que no era apremiante para el plazo de la obra su retirada (figura 13).



FIGURA 12. Precarga del TK-3000 y sustitución en el TK-3001.

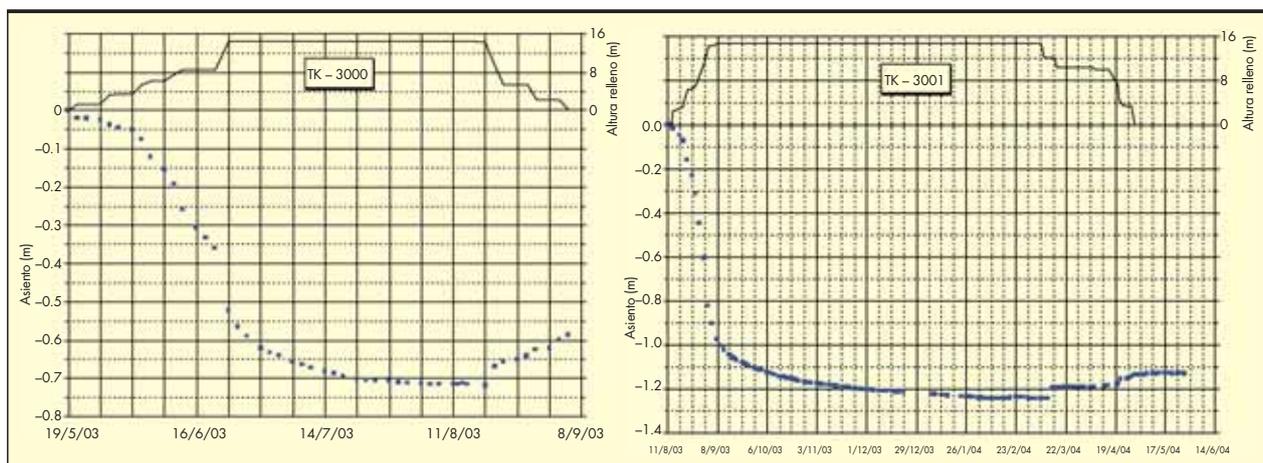


FIGURA 13. Asientos en el centro de la precarga de ambos tanques.

Asientos (cm)	TK 3000	TK 3001
Centro	7,7	6,5
Diferencial	3,8	3,4

TABLA 9. Asientos en prueba hidráulica.

Asientos (cm)	TK 3000	TK 3001
Centro	3,7	3,9
Diferencial	1	1,6

TABLA 10. Asientos remanentes tras el vaciado.

7. PRUEBA HIDRÁULICA

El primer llenado del tanque se realiza con agua al finalizar la construcción. Esta prueba hidráulica tiene como objetivo comprobar el comportamiento del tanque metálico, si bien, permite comprobar los asientos de la estructura. La prueba consiste en el llenado del tanque para una altura de agua que proporciona una tensión en la cimentación del 145% de la tensión de servicio.

Previamente a la prueba se estimaron los movimientos esperables a partir del perfil de deformabilidad del terreno ajustado con los resultados de la precarga.

Los movimientos del tanque exterior durante el llenado y el vaciado se controlaron con dos inclinómetros horizontales perpendiculares entre sí, que se dispusieron en el hormigonado de la losa. Así mismo, se situaron ocho referencias perimetrales exteriores en la losa para su control topográfico. Los inclinómetros permitirán controlar los movimientos durante la explotación de los tanques.

En la figura 14 se muestran para cada tanque los siguientes movimientos:

- Asientos absolutos en el centro medidos en los dos inclinómetros, ejes 2-6 y 4-8, (líneas de color continuas).
- Asientos diferenciales entre el centro y el perímetro, considerando el movimiento medio de los medidos en los cuatro extremos de los inclinómetros (líneas de color discontinuas).
- Estimación de asientos absoluto en el centro y diferenciales (líneas rojas).

Los valores medios los expresados en las tablas 9 y 10.

Los asientos de ambos tanques fueron similares. Los asientos absolutos medidos fueron aproximadamente el 80% del estimado y el diferencial del orden del 65%.

Las distorsiones angulares medidas fueron los mostrados en la tabla 11.

Distorsión angular	Media	Máxima
TK 3000	1:1100	1:420
TK 3001	1:1200	1:480

TABLA 11.

El asiento perimetral fue uniforme y el desplome despreciable.

Los asientos remanentes en el momento de vaciar los tanques fueron de 1 y 1,4 cm respectivamente. Una semana más tarde el asiento remanente del TK 3000 era de 0,6 cm.

8. CONCLUSIONES

La cimentación de los dos tanques analizados está gobernada por las deformaciones del terreno. Las dos características fundamentales de éste era la presencia de rellenos portuarios de 7 a 10 m de potencia y la deformabilidad del sustrato cuaternario deltaico, formado por intercalaciones de niveles granulares y cohesivos normalmente consolidados al menos 50 m de profundidad.

En el tanque TK 3000 el relleno fue sustituido por una zorra y densificado por compactación dinámica. En el tanque TK 3001 se sustituyó por una escollera ligera y no se compactó. Una vez realizadas las sustituciones, el terreno se precargó. Los asientos y recuperaciones medidas fueron del orden de las estimadas a partir del perfil de diseño adoptado.

En las pruebas hidráulicas de ambos tanques los asientos diferenciales radiales fueron inferiores a los admisibles. El asiento perimetral fue uniforme y el desplome fue despreciable. Los asientos remanentes una vez vaciados los tanques, permiten prever que los asientos a largo plazo no superarán los admisibles en explotación.

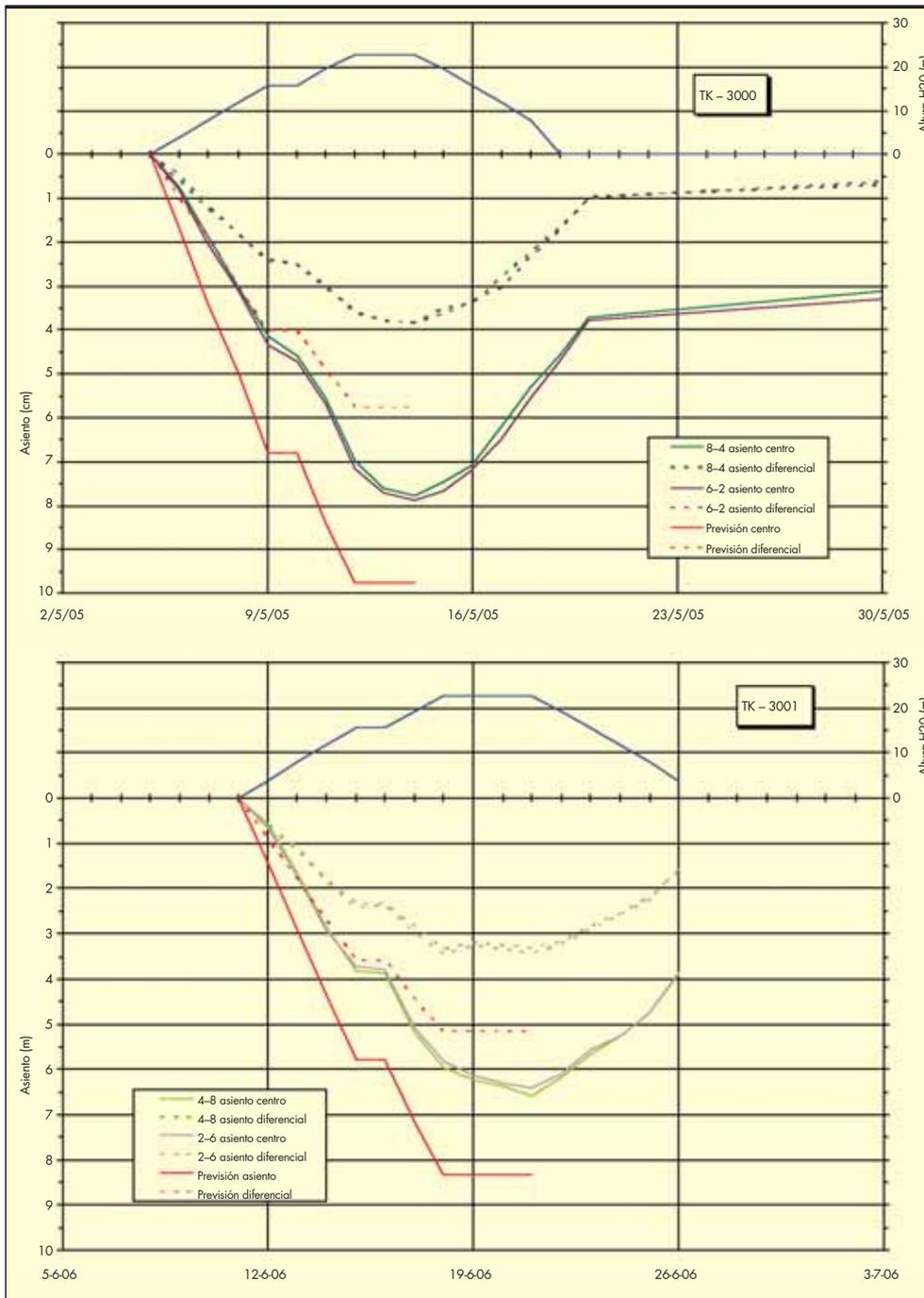


FIGURA 14. Asientos de ambos tanques en prueba hidráulica.

La cimentación de los tanques se fundamenta en la correcta caracterización de la deformabilidad del terreno y en el constante control de los movimientos en todas las fases constructivas, que ha permitido comprobar y corregir las hipótesis iniciales de diseño.

De esta manera se ha realizado con éxito una cimentación directa apoyada sobre un suelo precargado, tipología poco frecuente en tanques de GNL construidos en terrenos similares en los que se tiende a adoptar cimentaciones profundas,

El comportamiento descrito avala que en este momento se estén construyendo con igual tratamiento del terreno otros dos tanques contiguos a los analizados.

9. AGRADECIMIENTOS

El diseño y construcción de los tanques ha sido un proceso largo y complicado, que ha sido posible gracias al esfuerzo y dedicación de los técnicos de todas las partes implicadas. Los Servicios Técnicos de FCC quieren expresar su reconocimiento y agradecimiento a todas las personas que han colaborado y, en concreto, a ENAGAS por su total apoyo a lo largo del diseño y de la construcción de los tanques y a DM IBERIA por su constante y certero consejo. Así como a PRINCIPIA, MENARD e IGEOTEST por su colaboración.