Mejora de terreno mediante columnas de grava y mechas drenantes. Cimentación de tanques de petróleo en Chiriquí Grande (Panamá)

JUAN BALDERAS-MECA (*), JEAN MARC DEBATS (**), GREGORY SCHARFF (***) y JOHN REYNOLDS (****)

RESUMEN Este artículo describe el tratamiento de mejora del terreno realizado por Rodio Swissboring Panamá (filial de Rodio Kronsa) para permitir la cimentación de 5 tanques de crudo de petróleo en Panamá, en las proximidades de la Laguna de Chiriquí. Presenta la solución técnica adoptada: combinación de mechas drenantes, columnas de grava y precarga. Enumera la secuencia de trabajo empleada y describe el procedimiento de instalación de las mechas drenantes y de ejecución de las columnas de grava por el método de vía húmeda empleado. Suministra información relativa al tipo y número de equipos empleados, así como los rendimientos medios obtenidos y la duración total de los trabajos. Presenta los resultados y conclusiones del análisis de los datos de la instrumentación de la precarga realizada después del tratamiento de mejora del terreno.

GROUND IMPROVEMENT BY STONE COLUMNS AND WICK DRAINS. CRUDE OIL TANKS FOUNDATION IN CHIRIQUI GRANDE (PANAMA)

ABSTRACT *This paper describes the ground improvement carried out by Rodio Swissboring Panama (subsidiary of Rodio Kronsa) for the foundation of five crude oil tanks in Panama near to the "Laguna de Chiriquí". The paper presents the technical solution applied: combination of wick drains, stone columns and pre-load. The works sequence is listed and the method statement for the wick drains installation and the wet method stone columns performed are described. The paper also provides information regarding to the type and number of equipment used as well as average production rates achieved and the total duration of the works. The results and analysis of monitoring data recorded during the preload carried out after the ground improvement are presented.*

Palabras clave: Tratamiento del terreno, Columnas de grava, Vía húmeda, Mechas drenantes, Precarga, Licuefacción.

Keywords: Ground improvement, Stone columns, Wet method, Wick drains, Preloading, Liquefaction.

1. INTRODUCCIÓN

El proyecto, que es objeto del presente artículo, está ubicado en Panamá, el Océano Atlántico (Laguna de Chiriqui), inmediatamente al Norte de el Canal Margarita. Consiste en cinco tanques de almacenamiento de petróleo (fase 2: Tanques T503 al T507). Existen dos tanques (tanques T501 y T502) que fueron construidos en el 2008 en una fase previa (fase 1) al este de la actual fase. El contratista principal del proyecto es CBI Américas Ltd y la propiedad Petroterminal de Panamá S.A

Los tanques proyectados tienen un diámetro de 76,2 m y una altura de 20,4 m, tienen un techo interior flotante y un techo exterior de forma cónica y la altura de almacenamiento prevista es de 18,9 m.

El tratamiento de mejora del terreno era necesario para proporcionar la capacidad portante requerida al terreno (200 kPa con un coeficiente de seguridad mínimo de 3) reducir asientos totales y diferenciales (de acuerdo a las estrictas especificaciones técnicas del proyecto de diseño de los tanques) y mitigar el riesgo de licuefacción en caso de terremoto.

La mejora del terreno realizada por Rodio Swissboring Panamá (filial de Rodio Kronsa) consistió en una combinación de tratamientos que incluye la instalación de mechas drenantes, columnas de grava y precarga.

(*) Ingenerio de Caminos Canales y Puertos. (Granada, 1999). Ph.D (Doctor of Philosophy) (University of Sheffield, UK. 2004). Delegado de Operaciones Internacionales. RODIO KRONSA. Email: jbalderas@rodiokronsa.es

(**) Ingénieur Civil des Mines (Paris, 1967). Master of Science - Geotechnical Engineering - University of California at Berkeley, 1970. Contracts Manager, THE VIBROFLOTATION GROUP. Email: jmdebats@vibroflotation.com

(***) Geotechnical Engineer, ISTG (Polytech'Grenoble, geotechnical division 2006). Geotechnical Engineer, THE VIBROFLOTATION GROUP. Email: gregory.scharff@soletanche-bachy.com - gregory.scharff@vibroflotation.com

(****) Project Manager. CBI AMERICAS LTD. Email: jdreynolds@CBI.com

Las principales unidades del proyecto fueron:

- 1.383.000 ml de mechas drenantes. (tipo Coldbond CX-1000, diámetro equivalente 50 mm).
- 124.590 ml de columnas de grava (profundidad máxima 18 m y diámetro medio 1.06 m).
- Instrumentación durante la precarga.

La duración total de los trabajos principales, mechas drenantes y columnas de grava, fue de 4,5 meses.

El inicio de los trabajos tuvo lugar a principios de Enero de 2010 y la finalización a mediados Mayo 2010, a excepción de la instrumentación que se extendió hasta la finalización de las precargas de cada uno de los tanques.

Las figuras 1a y 1b muestran la localización del proyecto.

La vista general de las áreas a mejorar y la ubicación de los ensayos previos se presentan en la Figura 2.

La información geotécnica disponible en la fase de estudio se basa en los ensayos previos realizados:

- 8 Ensayos SPT (Standard Penetration Tests).
- 35 Ensayos CPT (Cone Penetration Tests).

La Figura 3 presenta la media de los resultados de los ensayos CPT en el centro de cada tanque.

Teniendo en cuenta el resultado de los ensayos realizados in situ y los resultados de los ensayos laboratorio, las condiciones del suelo se pueden describir de la siguiente manera:

– **Desde la elevación 0.00 hasta –18.00 m**
  – Arena limosa con presencia de capas de arena y limo arenoso.
  – Resistencia en punta media entre 1 y 2 MPa.
  – Coeficiente de rozamiento de 1.5% de media.

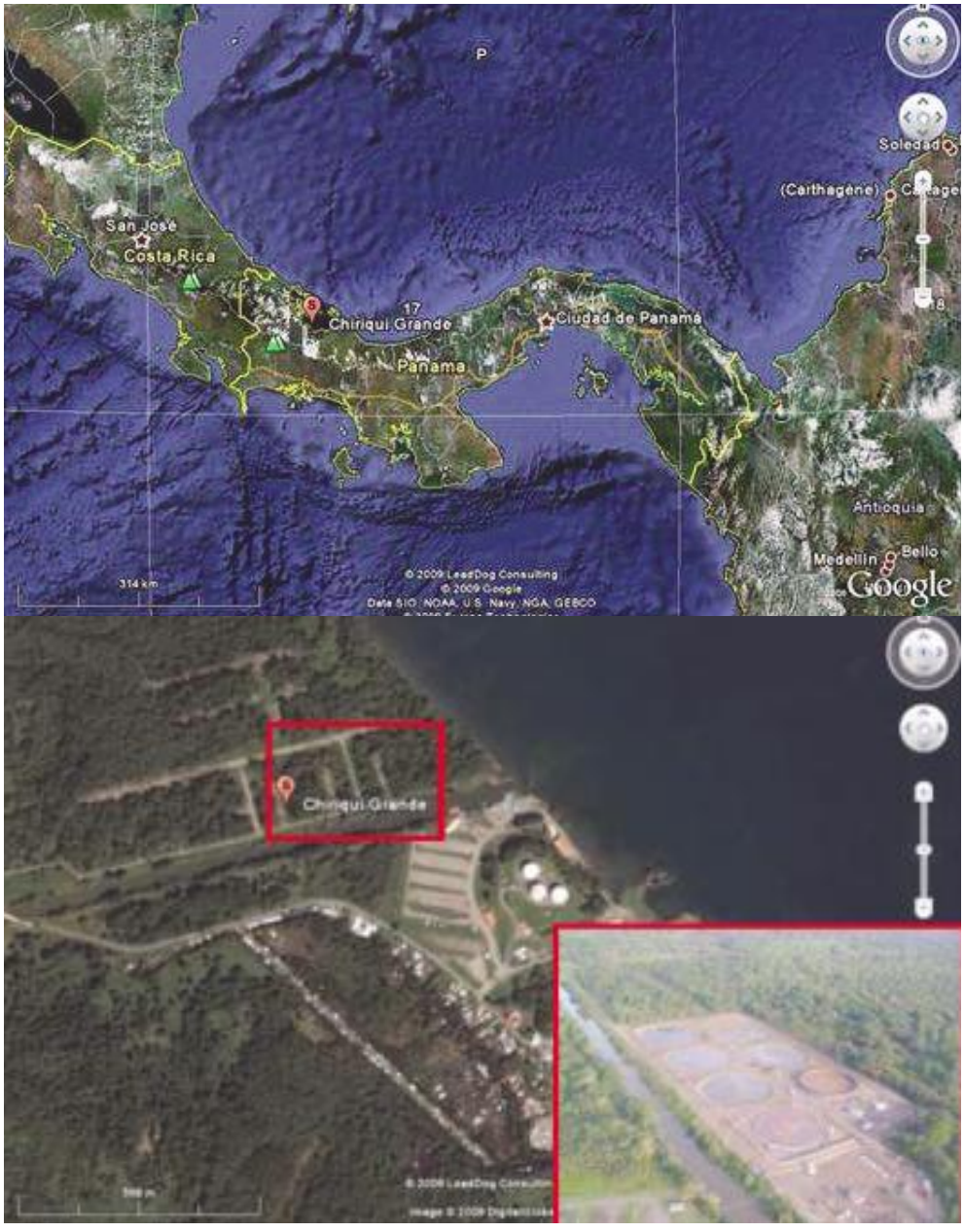


FIGURA 1A y 1B. Localización del proyecto. (Google Earth, fotografía fechada 04/12/2007)

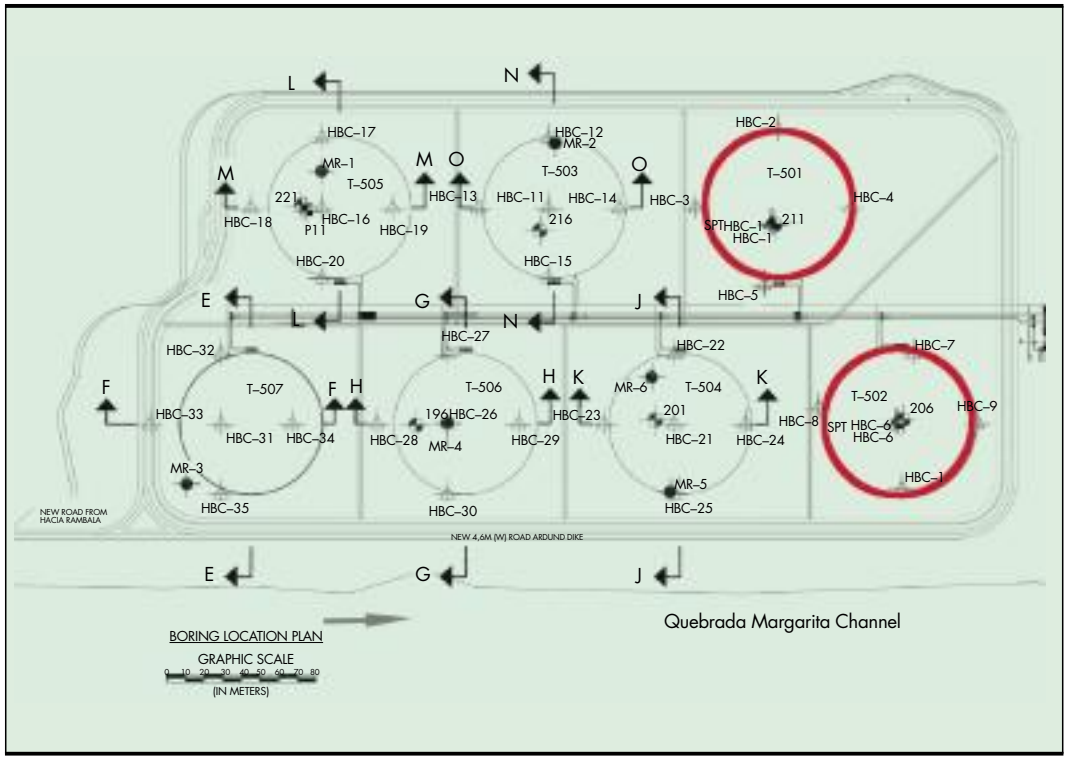


FIGURA 2. Planos de localización de tanques y ensayos. (Getechnical Data Report Proposed Tanks 503-507 Chiriqui Grande, Panama. Mueser Rutledge Consulting Engineers (2008)).

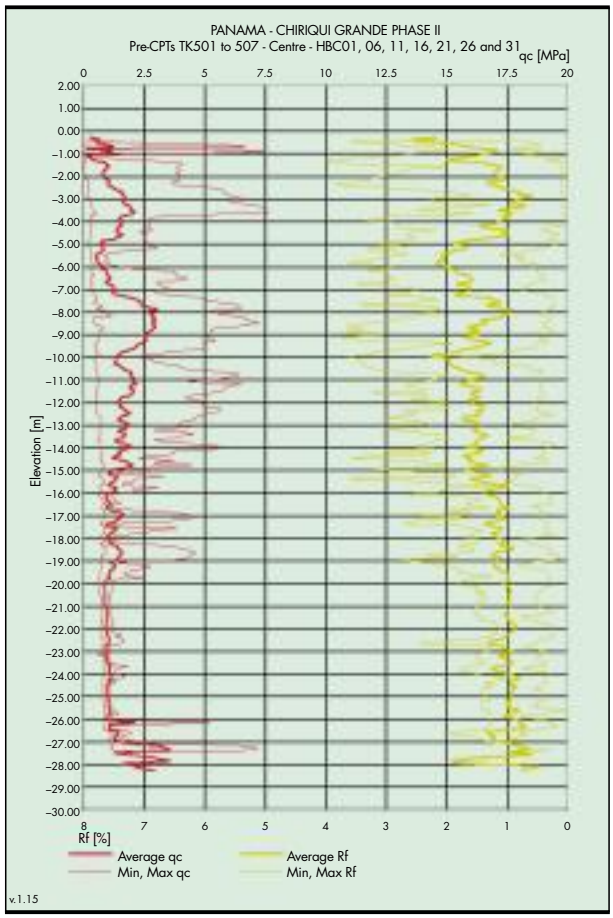


FIGURA 3. Media Pre-CPTs TK501 a T507 (en el centro de los tanques).

– Coeficiente de compresibilidad ($C_c/(1+e_0)$ basado en la correlación de Lamb and Whitman) entre 10 y 20%.

– **Desde la elevación –18.00 hasta –26.00 /–28.00 m**
  – Limo arcilloso muy blando.
  – Resistencia en punta media entre 1 y 1.25 MPa.
  – Coeficiente de rozamiento de 1.0% de media.
  – Coeficiente de compresibilidad ($C_c/(1+e_0)$ basado en la correlación de Lamb and Whitman) entre 20 y 30%.

– **Por debajo de la elevación –26.00 /–28.00 m**
  – Gravas y arena muy densa ($N_{SPT} > 50$).
  – La elevación del nivel freático se sitúa entre –1.00 m y –0.50 m.

En general el suelo a tratar consiste en 28 metros de arena limosa suelta y mal graduada, arenas arcillosas y limos. La mayor parte del cual está incluido en la zona D de la siguiente gráfica de compactabilidad por vibro-compactacion (vibroflotacion pura, sin alimentacion de piedra). (Figura 4).

Donde se representan las siguientes zonas:

- Zona A: Los suelos de esta zona son suelos muy bien compactables.
- Zona B: Los suelos de esta zona son adecuados para Vibro Compactación. Tienen un contenido de finos menor al 8 ó 10%.
- Zona C: Compactable. Alimentación (relleno) de piedra es necesaria si el contenido de finos es mayor al 10%
- Zona D: Columnas de grava son una solución para la cimentación en estos suelos. El resultado es un aumento de la capacidad portante y una reducción de los asientos totales y diferenciales.

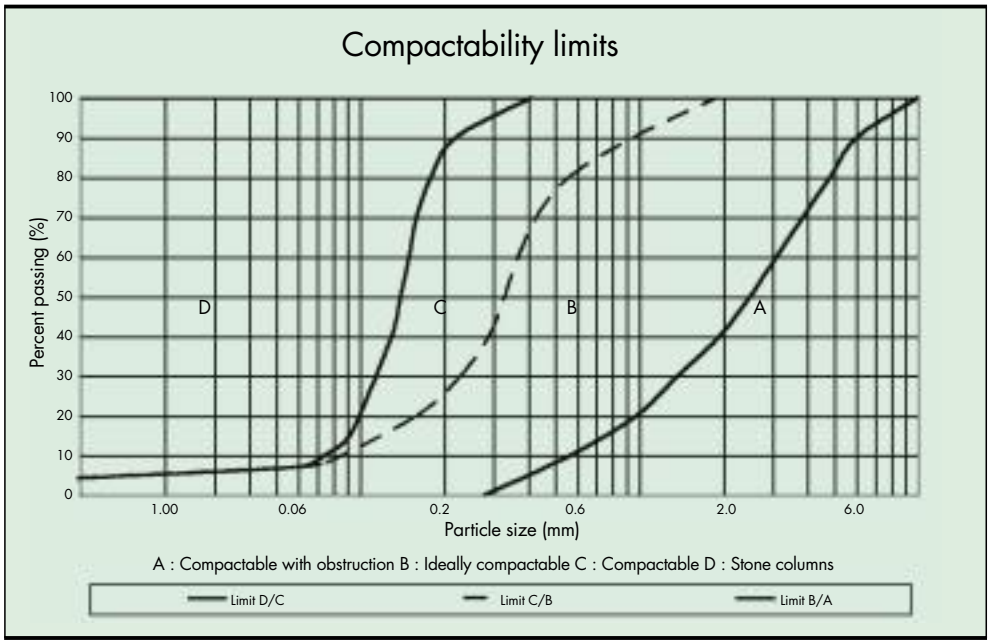


FIGURA 4. Tabla de compactabilidad de suelos (similar a la utilizada por Johnson et al (2002)).

2. ESPECIFICACIONES DEL PROYECTO

- El asiento total uniforme; El asiento total uniforme del anillo de cimentación del tanque deberá estar limitado a 8 pulgadas (200 mm) o menos.
- Inclinación lateral (Dishing settlement): La inclinación del borde al centro del fondo del tanque deberá estar limitada a 6 pulgadas (150 mm) o menos. Este asiento debe ocurrir en una configuración plana sin cambios abruptos en la pendiente del fondo debidos a puntos duros o blandos.
- Asientos diferenciales: Asientos fuera de plano del depósito no deberán exceder los 3/8 pulgadas (10 mm) en un arco de 80 pies (24.38 m).
- El método de mejora del terreno seleccionado deberá obtener una capacidad portante del suelo de 200 kPa, con un factor de seguridad mínimo de 3.

3. ESQUEMA DE TRATAMIENTO DE MEJORA DEL TERRENO REALIZADO

3.1. SECUENCIA DE LOS TRABAJOS

Para cumplir con los requisitos de las especificaciones se usaron dos técnicas de mejora del terreno en combinación con la pre-carga del terreno después de la mejora: Mechas drenantes y columnas de grava.

La secuencia general de los trabajos fue la siguiente:

- Eliminar las capas superiores de material orgánico (Foto 1) y sustituirlas por arena limpia y grava (Foto 2), proporcionando para cada tanque una plataforma de trabajo a la elevación +0.50m. Este trabajo fue realizado por otros.
- Pre-perforaciones(Pre-drilling) en la parte superior del terreno (Foto 3) e instalación de las mechas drenantes (Fotos 4 y 5) (Colbond CX 1000- diámetro equivalente 50 mm) a una profundidad de 28 m. La malla utilizada fue triangular de 3 píes (0.91 m) para una zona de tratamiento circular de 95 m de diámetro para cada tanque.
- Construcción de las columnas de grava (Fotos 6 y 7) para conseguir aproximadamente un factor de inclusión de valor medio 17.1% hasta la profundidad de 18 m mediante columnas de grava con un diámetro medio 1.06 m espaciadas en planta 2.44 m en malla triangular para una zona de tratamiento circular de 95 m de diámetro para cada tanque.
- Pre-carga a 285 kPa (Foto 8): La instalación del material de precarga tuvo lugar durante un periodo de 3 a 4 semanas, y la pre-carga, una vez completada, se mantuvo de 7 a 9 semanas.

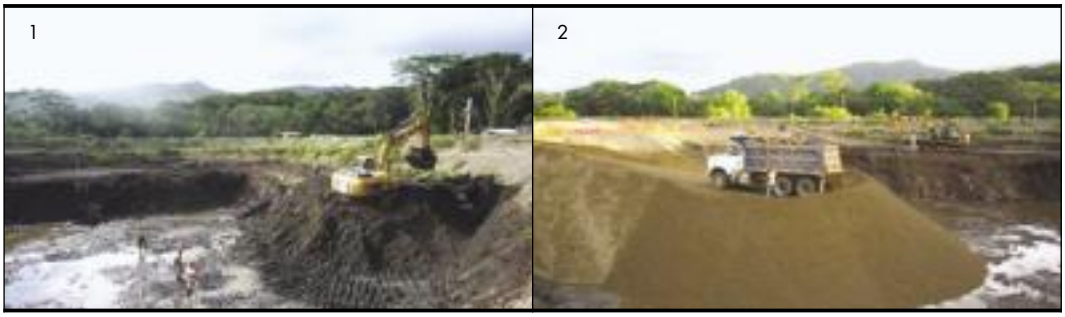


FIGURA 5. Fotos de los trabajos. (Fotos 1 y 2).

FIGURA 5
Continuación. Fotos de los trabajos. (Fotos 3 a 8).

FIGURA 6. Mástil de 31 m.

FIGURA 7. Instalación mechas drenantes.

4. INSTALACIÓN DE LA MECHAS DRENANTES

4.1. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

Cada equipo de instalación de mechas drenates estaba compuesto por:

- 1 Grúa de 90 Ton de capacidad.
- Equipada con un mástil (ALLIMAK) para la instalación de drenes de hasta 31m. (Figura 6).
- Mandril de acero con sección en forma de diamante (140 x 63 mm) diseñado para obtener el mínimo efecto de distorsión durante la instalación del dren.
- Unidad automática de registro de parámetros (profundidad, tiempo de instalación y producción total durante el turno) tipo Lutz Lutin.

4.2. METODOLOGÍA DE INSTALACIÓN – MECHAS DRENANTES

Los drenes fueron instalados mediante el empuje estático del mandril hasta la profundidad requerida (28 m). Durante la fase de hincado la parte inferior del mandril está cerrada por un pieza de acero ensamblada a la banda de mecha drenante. Cuando el mandril es retirado, la pieza de acero actúa como un anclaje y evita que el dren ascienda con el mandril. Una vez que el mandril sale del suelo, la mecha drenante se corta aproximadamente 30 cm sobre la capa de drenaje (ó plataforma de trabajo) (Figura 7) y el equipo se traslada a un nuevo emplazamiento.

El material empleado para las mecha drenantes fue del tipo Colbond CX 1000 from Colbond Geosynthetics.

5. EJECUCIÓN DE COLUMNAS DE GRAVA POR VÍA HÚMEDA CON ALIMENTACIÓN SUPERIOR (WET TOP FEED)

5.1. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

Cada equipo de vibrocompactación, utilizado para la ejecución de las columnas por vía húmeda está compuesto por:

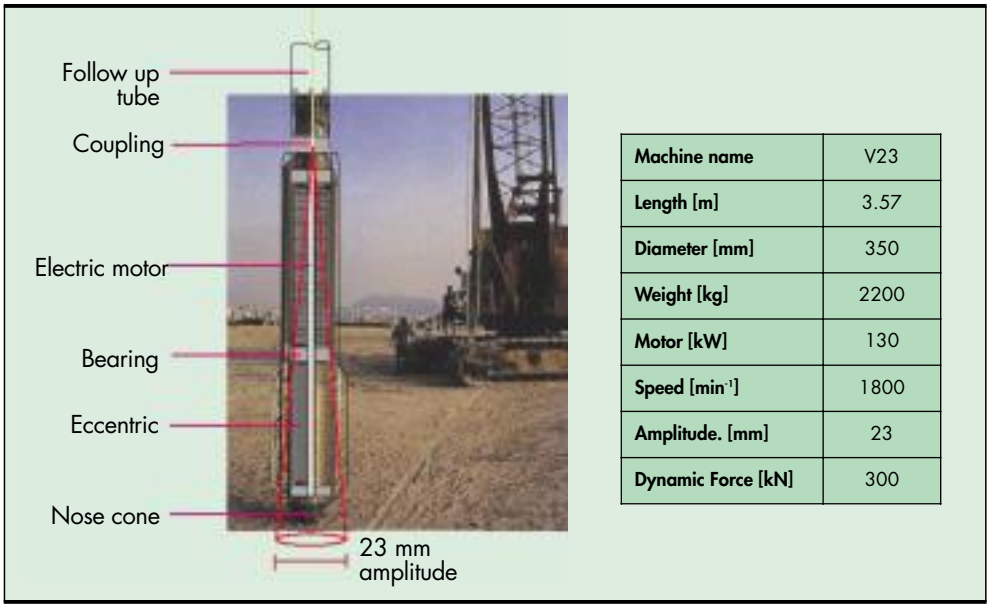
- 1 Grúa de 80 ton. Con 35 m de pluma.
- 1 Vibrador Vibroflotatio V23 (Figura 8), con prolongadores (longitud total 28m) para alcanzar la una profundidad de penetración máxima de 25 m.
- 1 Generador de 250 Kva.
- 1 Bomba de agua de alta presión (100 m^3/h a 1.2 MPa).
- 1 Compresor con capacidad para 21.000 l/min.
- 1 Sistema automático de registro de parámetros tipo Jean Lutz (LT3).
- 1 cargador frontal para suministrar la grava.

5.2. METODOLOGÍA DE INSTALACIÓN – COLUMNAS DE GRAVA VÍA HÚMEDA

Suspendido desde la grúa el vibrador se coloca sobre el punto de tratamiento.

Pasos del proceso de ejecución:

- La plataforma de trabajo se asume que está a la cota +0.50m aproximadamente +1.50 m sobre el nivel freático.



Machine name	V23
Length [m]	3.57
Diameter [mm]	350
Weight [kg]	2200
Motor [kW]	130
Speed [min^{-1}]	1800
Amplitude. [mm]	23
Dynamic Force [kN]	300

FIGURA 8. Características técnicas del V23 (The Vibroflotation Group brochure).

1. El vibrador penetra hasta la profundidad requerida bajo el efecto combinado de su propio peso, la vibración y la acción del agua o del aire a presión o de ambos a la vez. Si solamente se utiliza aire el suelo es desplazado hacia los lados. Si solamente se utiliza agua parte del material se lava y se extrae de la cavidad. Una vez que el vibrador ha alcanzado la profundidad requerida, un espacio anular libre y limpio se crea por una sucesión (generalmente una o dos) operaciones de lavado que consisten en subir el vibrador hacia la superficie y bajarlo de nuevo rápidamente hasta la profundidad máxima. Cuando el vibrador ha alcanzado de nuevo la profundidad máxima, la cantidad de agua que se descarga desde la punta del vibrador se ajusta de manera que el nivel de agua en la cavidad permanece alrededor de 1.5 m sobre el nivel freático o a nivel de la plataforma de trabajo. Esto asegura la estabilidad de la cavidad.

   Nota: La penetración se para a la profundidad de diseño o hasta rechazo en capas de arena muy densa o capas arcillosas muy firmes o grandes bloques.

   Rechazo se define de la siguiente manera: la intensidad en el motor eléctrico del vibrador alcanza valores por encima de los 200/250 A y/o la velocidad de penetración cae por debajo de 0.5 m por minuto, lo que ocurra antes.

2. El vibrador es elevado de 0.5 m a 1.0 m y la grava o piedra machacada es vertida en la cavidad. En este momento el vibrador se reintroduce un pequeña distancia de la profundidad previamente penetrada o se mantiene en la profundidad actual hasta que se alcanza el amperaje que es suficiente para producir el diámetro de columna medio especificado o compactación del suelo requerida. Las fuerzas radiales producidas por la acción del vibrador contra el material añadido y el suelo provocan la compactación de este.

   El proceso se repite hasta que el volumen requerido de piedra se ha introducido en la cavidad o el grado de compactación se ha alcanzado.

3. El ciclo compactación/ relleno es repetido en escalones ascendentes hacia la cota de la plataforma de trabajo o hasta la cota superior de las capas de terreno blando limoso. Durante esta operación se añade grava adicional o piedra en el agujero pero sin sobrellenarlo de manera que la grava se entrelace con el terreno circundante y lo densifique

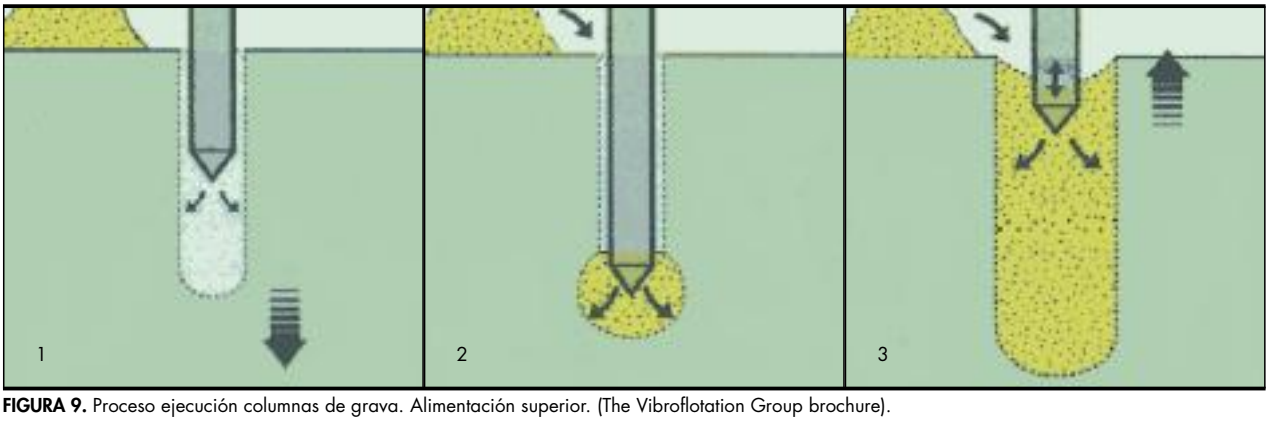


FIGURA 9. Proceso ejecución columnas de grava. Alimentación superior. (The Vibroflotation Group brochure).

6. EQUIPOS UTILIZADOS PARA LA REALIZACIÓN DE LOS TRABAJOS

6.1. PRE-FOROS (PRE-DRILLING)

- 1 Vagón perforador Soil Mec SM 505.
- 1 Equipo de pilotes Soil Mec CM 48.
- 1 Equipo de pilotes Soil Mec CM 70.
- 1 Equipo de pilotes Soil Mec R-625.

6.2. INSTALACIÓN DE DRENES

- 2 Mástiles de 31 m.
- 2 Grúas de 90 Ton.

6.3. EJECUCIÓN COLUMNAS DE GRAVA. VÍA HÚMEDA (WET TOP FEED)

- 4 grúas de 80 Ton.
- 8 Vibradores (4 + 4).
- 5 Generadores eléctricos de 250 Kva.
- 5 Bombas de agua de alta presión.
- Tanques y bombas para el abastecimiento y suministro de agua.
- Bombas para la limpieza y bombeo de lodos.

7. RENDIMIENTOS MEDIOS ALCANZADOS

- **Pre-drilling:** 100 puntos / equipo y turno.
- **Instalación de drenes:** Rendimiento medio = 5.800 ml/ equipo y turno (Rendimiento máximo = 9.367 ml/ equipo y turno).
- **Columnas de grava**: Rendimiento medio = 280 ml/ equipo y turno.

8. PROGRAMACIÓN CONTRACTUAL Y FECHAS REALES DE TERMINACIÓN

La duración inicial prevista de los trabajos era de 6 meses.

La finalización real de los trabajos se alcanzó 6 semanas antes de la fecha contractual. Tabla 1.

9. INSTRUMENTACIÓN

Durante la Pre-carga se llevó a cabo un programa de instrumentación con el objetivo de controlar la evolución de los asientos previstos y la disipación de las presiones intersticiales, con el objetivo de seguir y comprender la evolución de la consolidación que tuvo lugar durante este proceso.

Tanque	Hito Contractual	Fecha real de terminación
T 503	05/04/2010	08/03/2010
T 504	26/04/2010	23/03/2010
T 505	17/05/2010	12/04/2010
T 506	07/06/2010	21/04/2010
T 507	21/06/2010	08/05/2010

TABLA 1. Hitos contractuales y fechas reales de terminación.

El sistema de instrumentación implantado, en cada tanque, consistió en:

- 8 Placas de asiento colocadas de forma perimetral en las proximidades del borde de cada tanque y 1 placa de asiento situada en el centro de cada tanque. En total 9 placas de asiento para medir el asiento vertical del terreno.
- 3 Sensores de presión de agua alineados a lo largo del diámetro del tanque para medir el incremento y disminución de las presiones intersticiales durante la instalación y mantenimiento de la precarga. Es un indicador de la evolución del proceso de consolidación en el terreno. Un sensor de presión de agua adicional fue instalado en el tanque T503. Los sensores de presión de agua fueron instalados a la cota –16.00 m (18 m de profundidad) en la parte más limosa del perfil donde había instalados columnas de grava y drenes (zona WD-SC) y en la cota 23.00 m (25 m profundidad) en el centro de la capa inferior de limos donde solo había instaladas mechas dreenantes (zona WD).
- 3 Inclinómetros instalados en el borde perimetral del tanque separados aproximadamente 120° entre ellos con el objetivo de medir desplazamientos laterales horizontales en el terreno en los tanques T503 y T505 solamente. Desafortunadamente todos los inclinómetros fueron dañados por los movimientos de tierra durante la fase de instalación de la precarga.
- 3 Células de carga (presión de tierra). 2 Situadas sobre columnas de grava y 1 situada entre columnas de grava, solamente en los tanques 505 y 507 con el objetivo de comprobar la carga real aplicada en el terreno durante la precarga.

Nombre de las células de carga: CP-A (entre columnas), CP-B y CP-C (sobre columnas)

Las Figuras 10, 11 y 12 muestran (vistas en planta y sección transversal) muestran la localización de los distintos instrumentos y células de carga instaladas en relación con la profundidad y la geometría del proyecto.

10. RESULTADOS DE LA INSTRUMENTACIÓN DURANTE LA PRECARGA

10.1. PRECARGA CONSEGUIDA

La Figura 13 muestra el resultado de las mediciones obtenidas con las células de carga instaladas en el Tanque T 505. Las células de carga fueron instaladas como instrumentos de comprobación en los tanques T505 y T507. Todos los tanques se comportaron de manera similar.

10.2 ASIENTOS, CARGA Y EXCESO DE PRESIÓN INTERSTICIAL VS TIEMPO, DURANTE LA CONSOLIDACIÓN

En los cinco tanques (T503 a T507) se midió la evolución de los asientos y la presión intersticial.

La Figura 14 muestra el ejemplo de los resultados medido para el tanque T505.

10.3. ANÁLISIS HIPERBÓLICO DURANTE PRECARGA

Para el análisis de la consolidación primaria se utilizó el método hiperbólico basado en el modelo de consolidación de Terzaghi (Terzaghi and Peck, 1967). El método hiperbólico fue descrito en detalle por Tan et al (1991) y Tan S.A (1995) estableció que es aplicable para la estimación de asientos totales durante la consolidación primaria en terrenos tratados con

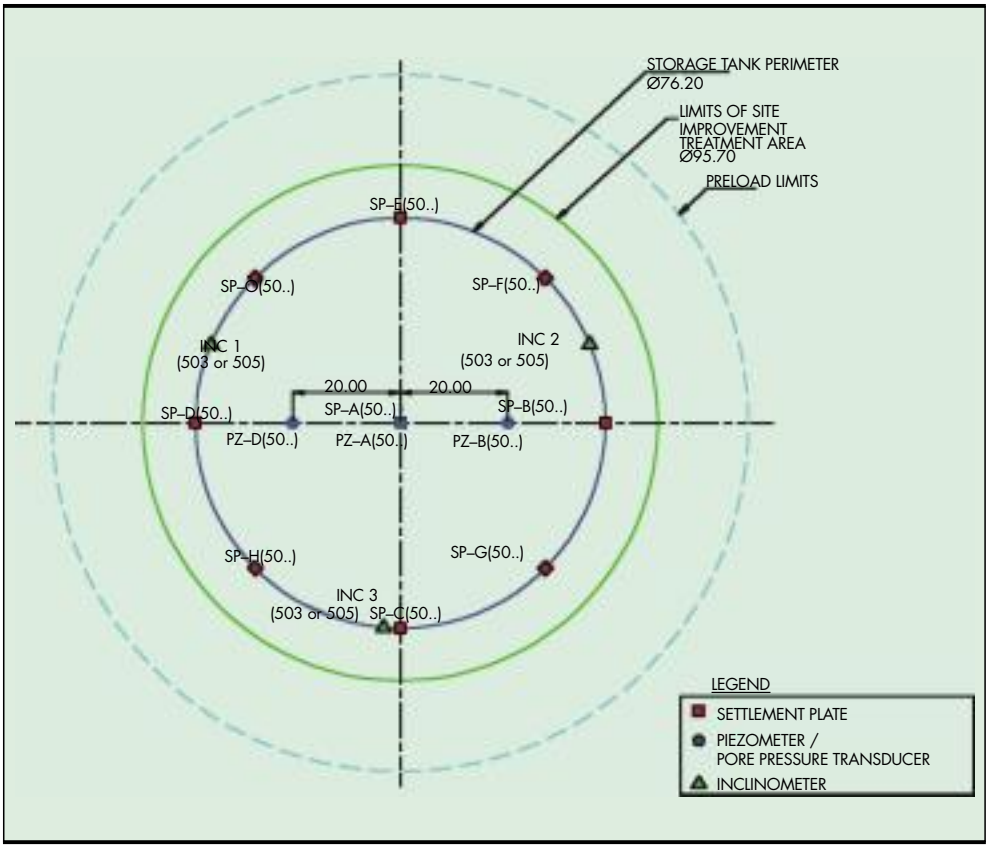


FIGURA 10. Localización de los traductores de presión intersticial.

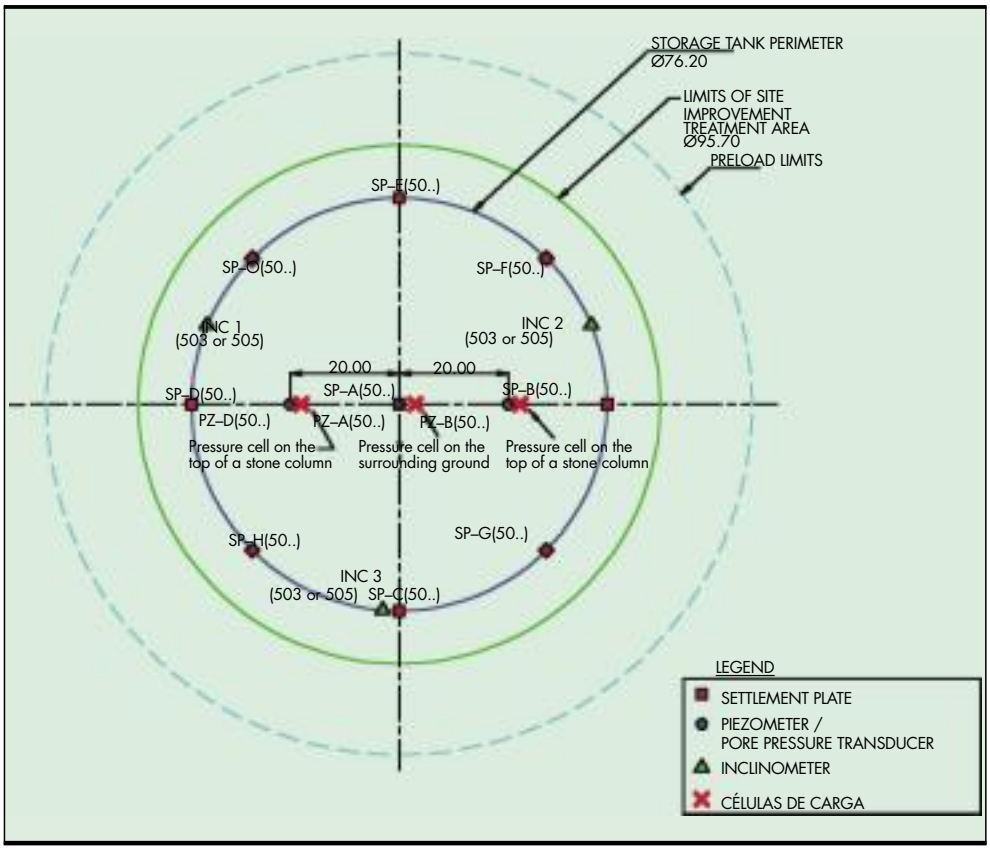


FIGURA 11. Localización de las células de carga (presión de tierra).

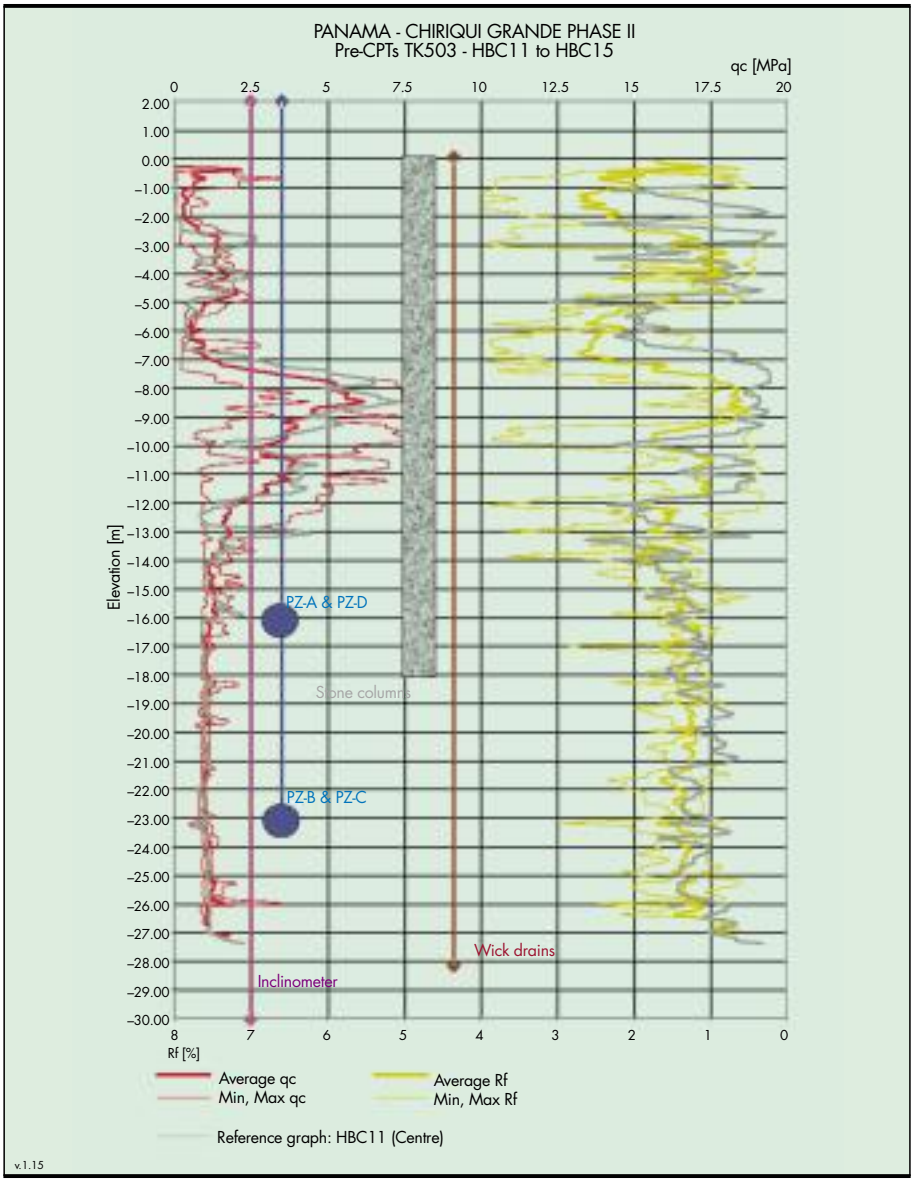


FIGURA 12. Localización de los traductores de presión intersticial en relación con la profundidad, columnas de grava y mechas drenantes.

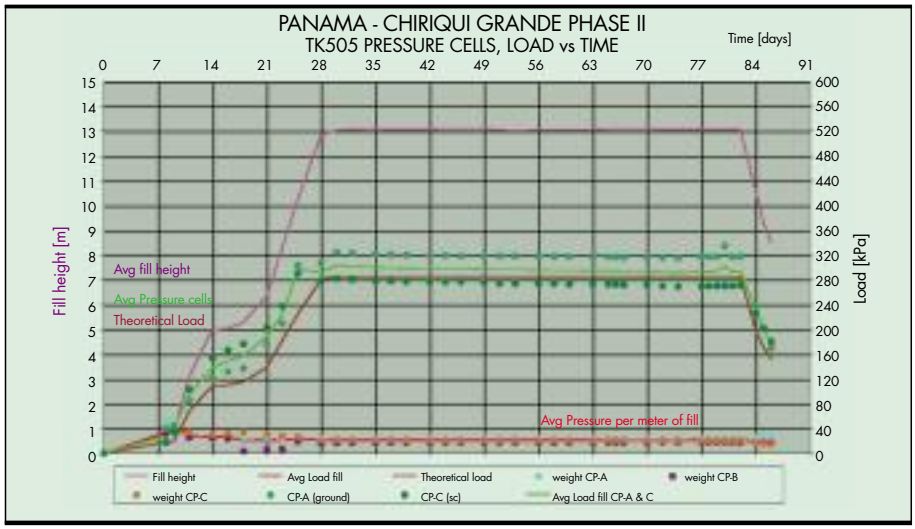


FIGURA 13. Valor de la precarga medida en T505.

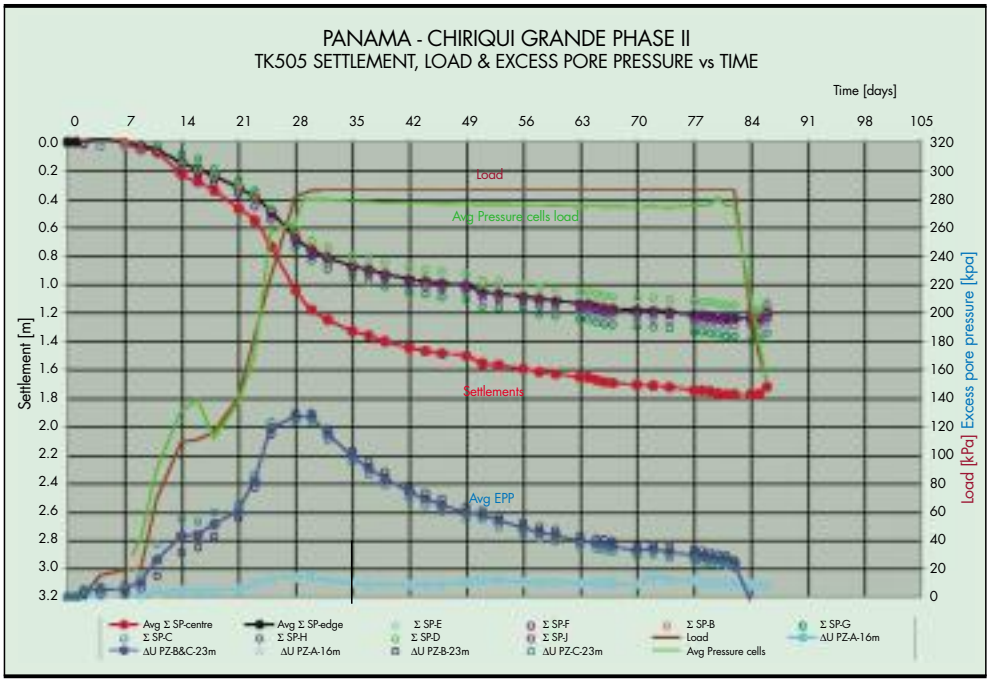


FIGURA 14. Asientos, carga y exceso de presión intersticial en T505.

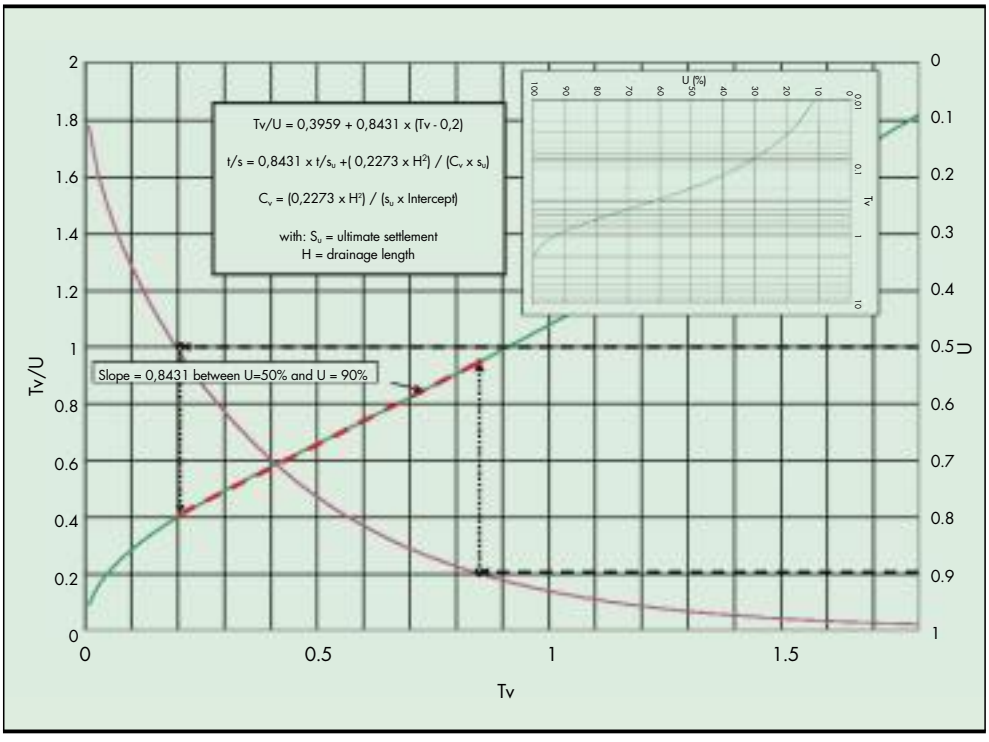


FIGURA 15. Gráfica del método hiperbólico.

drenes verticales y sobrecarga. El método ha sido ampliamente empleado y discutido por otros como Matyas et al (1996) y Arulrajah (2004). En este caso, el método hiperbólico conduce a asumir que los asientos de consolidación primaria son lineales en una gráfica (asiento/ tiempo vs tiempo) con un coeficiente de linealidad de 0.8431 que es el coeficiente de linealidad de una curva entre U= 50% y 90% de consolidación en la gráfica T_v/ U = F (T_v), como se muestra en la Figura15.

Los asientos últimos estimados mediante este método son los asientos debidos a la consolidación primaria y no tiene en cuanta la consolidación secundaria ("creep") que tendrá lugar a largo plazo.

Si la precarga se mantuviera durante 30 o 50 años, dicha consolidación secundaria provocaría asientos adicionales cuya magnitud dependería del comportamiento durante consolidación secundaria de las arcillas limosas.

Debemos tener en cuenta que hay tres fenómenos diferentes que tienen lugar durante la precarga y que también tendrán lugar después:

- Asientos debidos a la consolidación primaria puramente vertical.
- Asientos adicionales debidos a deformaciones laterales inducidas por consolidación primaria lateral → Están incluidos en el análisis hiperbólico porque son todavía consolidación primaria.
- Asientos debidos a consolidación secundaria, la mayor parte de los cuales tiene lugar a muy largo tiempo.

La aplicación del método hiperbólico proporciona una clara y consistente estimación de los asientos últimos de consolidación primaria (incluida la parte causada por las deformaciones horizontales del bloque de terreno sometido a la precarga).

El método fue utilizado en los 5 tanques durante la instrumentación de la precarga. La Figura 16 muestra el ejemplo de la aplicación del método para el tanque T505 y la Tabla 2 recoge un resumen de los valores de los asientos y el grado de consolidación estimados durante la precarga.

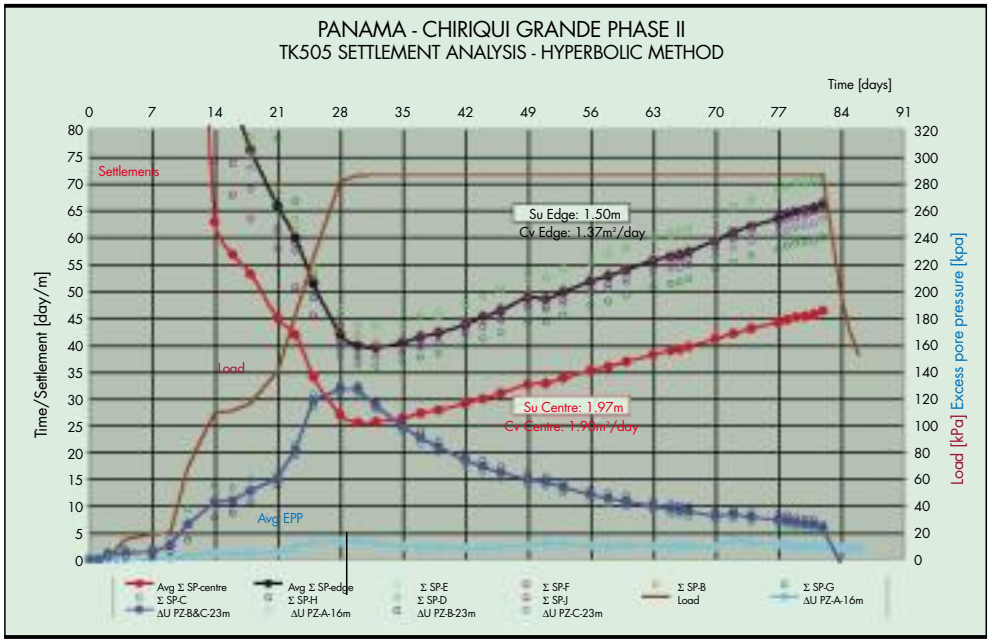


FIGURA 16. Gráfica método hiperbólico T505.

Changuinola - Oil Terminal - Tentative back analysis and creep prediction							
Tank #		503	504	505	506	507	Averages
Geometry	Treatment base elevation (m)	–27.0	–26.5 -	–27.0	–27.0	–26.5	–26.8
	Demucking base elevation (m)	–3.5	–4.0	–3.5	–4.0	–6.2	–4.2
Preload intensity		310 kPa	292 kPa	286 kPa	300 kPa	294 kPa	296.4
Primary consolidation prediction	Oedometric + lateral unde preload (ult.settlements hyperbolic method)	1.63	1.97	1.92	2.07	1.74	1.86
Settlements	Settlement at end of preloading (centre)	1.55	1.78	1.77	2.05	1.62	1.75
	Settlement at end of preloading (edge)	1.28	1.32	1.24	1.50	1.33	1.33
	Settlement ratio (edge/centre)	0.83	0.74	0.70	0.73	0.82	0.76
	Time elapsed since installation of half of the preload	76 days	70 days	61 days	73 days	71 days	70 days
Degree of consolidation achieved	From settlements	95%	90%	92%	99%	91%	94%
	From pore pressures	96%	96%	90%	91%	90%	93%

TABLA 2. Asientos y consolidación.

En general los asientos son bastantes homogéneos aunque:

- El tanque T503 asentó menos porque las condiciones del terreno son mejores (más arena).
- El tanque T507 también asentó menos que los otros tres tanques debido a que la operación de retirada de material orgánico fue más profunda. (6.2 m frente a los 3.5 a 4.0 m de los otros tanques).
- Asientos en los bordes perimetrales de los tanques son aproximadamente un 70% a 83% de los asientos en el centro de los tanques.
- El grado de consolidación alcanzado, basado en los asientos y reducción de presión intersticial, varía del 90% al 96% para un tiempo de consolidación entre 61 y 76 días (contados desde la instalación de la mitad de la precarga hasta el principio de la descarga).

11. CONCLUSIONES

Basados en el análisis de los resultados durante la precarga creemos que se ha implementado de manera exitosa la mejora del terreno y la precarga en los 5 tanques:

1. Los asientos de precarga requeridos se han alcanzado, proporcionando un grado de consolidación medio del 93% bajo un precarga que representa el 140% de la futura carga de servicio.
2. El asiento de precarga se ha alcanzado dentro del tiempo de precarga previsto, razonablemente de acuerdo con los parámetros de consolidación estimados.

Por otra parte un detallado análisis de los resultados de la precarga proporciona la siguiente información:

3. Cuanto más arenosa y compacta es la capa superior, menor es el asiento general, siendo las capas inferiores tratadas solamente con mechas drenantes el origen de asientos relativamente homogéneos.
4. Cuanto más arenosa es la capa superior, mayor es la mejora del terreno virgen alrededor de las columnas de grava, variando dicha mejora entre un 20% para las condiciones más limosas (tanques T505 y T506) hasta un 126% para las situación más arenosa (tanque T503), mientras que en los tanques T504 y T507 muestran un comportamiento intermedio con aproximadamente un factor de mejora del 50% en el terreno alrededor de las columnas.
5. El fenómeno de expansión lateral tiene un papel bastante significante y añade de un 10% a un 25% de asiento a los asientos puramente confinados.
6. Dicha variación es función de la combinación de la mayor rigidez de la capa superior (columnas de grava y mechas drenantes) y la menor rigidez de la capa inferior (solamente con mechas drenantes).

12. AGRADECIMIENTOS Y COLABORACIONES

Reconocemos y agradecemos su colaboración y participación junto a Rodio Swissboring (Grupo Rodio Kronsa) en este proyecto a:

- Petroterminal de Panamá S.A. la propiedad del proyecto.
- CBI Contratista principal.
- Balineau (colaboración para la instalación de mechas drenantes).
- The Vibroflotation Group (diseño, asistencia técnica y suministro de repuestos y personal especializado).
- Soldata (asistencia técnica en la instrumentación).

13. REFERENCIAS

- Arulrajah, A., Nikraz, H. and BO, M.W. (2004). Observational method of assessing improvement in marine clay. Ground Improvement 8, No. 151-169.
- Google Earth (fotografía fechada 4-12-07).
- Johnson, D. and Debats J.M.,(2002). Design, execution and assessment of the performance of vibrocompaction works at Penny´s Bay Hong Kong. Proc. 4th Int. Conference on Ground Treatment Techniques, March 2002, Kuala Lumpur, Malaysia, 785-794.
- Matyas, E.L and Rotherbarg, L..(1996). Estimation of total settlement of embankment by field measurements. Canadian Geothechnical Journal. Vol. 33.
- Mueser Rutledge Consulting Engineers (2008) Getechnical Data Report Proposed Tanks 503-507 Chiriqui Grande, Panama.
- Tan T.S., Inoue T, and Lee, SL. (1991) Hyperbolic method for consolidation analysis. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 117(11): 1723-1737.
- Tan S.A (1995) Validation of hyperbolic method for settlement in clay with vertical drains. Soil and Foundation, 35. No.1. 101-113.
- Terzahi K, Peck R.B (1967) Soil mechanics in engineering practice. Second edition. John Wiley and Sons, New York, 1967, 729 pages.
- The Vibroflotation Group brochure.