

Tres casos de estudio de terraplenes sobre suelos blandos fundados en columnas granulares encamisadas con geotextil

Three case studies of embankments on geotextile encased granular columns in soft soils

Dimiter Alexiew

HUESKER Synthetic GmbH, Alemania

dalexiew@huesker.de

Graham Thomson

HUESKER Asia Pacific, Singapur

grahamt@huesker.sg

Edwin Fernando Ruiz

HUESKER Sudamérica, Colombia

fernando@huesker.com.br

Resumen

El sistema de fundación para terraplenes sobre suelos blandos con columnas granulares encamisadas (conocido con GEC por sus siglas en inglés) fue desarrollado hace 20 años y constituye hoy por hoy el estado del arte en términos de tecnologías de fundación para suelos extremadamente blandos. El sistema consiste en columnas granulares compactadas (en arena o grava) similares a la columnas convencionales, contando con un confinamiento adicional provisto por un cilindro geotextil de alta rigidez a la tracción (encamisamiento) que promueve un desempeño superior en términos de capacidad de carga y deformabilidad, además de hacer viable su construcción en suelos de fundación muy blandos. En el presente artículo son presentados tres casos de estudio seleccionados de proyectos donde esta técnica fue aplicada como solución de fundación en los últimos años. Las condiciones geotécnicas particulares a cada caso, los procedimientos y requerimientos de diseño utilizados así como la experiencia constructiva son igualmente discutidos. Finalmente la información más relevante obtenida de programas de monitoreo e instrumentación tanto en la fase constructiva como operacional de cada uno de los es brevemente presentada.

Abstract

The Geotextile Encased Columns (GEC) foundation system for embankments on soft soils was introduced some 20 years ago and is now considered State-of-the-art among extremely soft soils technologies. The GECs system consists of compacted granular columns (sand or gravel as fill) with one decisive difference: they are confined in a high-strength woven geotextile “cylinder” (encasement) controlling their behavior in terms of bearing capacity and deformability. Consequently, they can be installed properly even in extremely soft soils. This paper focuses on some selected case studies where this solution was applied as main foundation system. For every project a short description is given, the geotechnical environment, design philosophy and procedure applied, final solution inclusive of the parameters of the geosynthetic encasements used and construction experience as well. The most important results from short- and long-term measurement programs are briefly shown.

1 INTRODUCCIÓN

Las Columnas granulares Encamisadas con Geotextil (GECs por sus siglas en inglés) componen un sistema de fundación para la ejecución de terraplenes, diques y diversas estructuras de tierras sobre suelos de baja capacidad de soporte (suelos blandos), considerado hoy por hoy como el Estado-del-Arte a nivel global. Su desarrollo tecnológico se dio inicio 20 años atrás, bajo la premisa de incorporar a columnas de grava convencionales un confinamiento adicional provisto mediante el uso de un geotextil tejido tubular de alta rigidez a la tracción de forma de “cilindro” (encamisamiento) que controla el comportamiento mecánico del conjunto. Dicha inclusión, hizo viable la construcción de las columnas inclusive en suelos extremadamente blandos ($S_u < 15 \text{kPa}$), permitiendo la consideración de una gran variedad de materiales granulares para la conformación de la misma (inclusive arena). Un amplio número de investigaciones académicas fueron desarrolladas en Alemania para analizar dicho sistema en los años noventa (Raithel 1999, Alexiew et al 2012, Alexiew & Thomson 2013) al igual que en otras partes del mundo como Asia o Suramérica en los años subsecuentes de manera intensiva (Yoo & Kim 2009, Gniel & Bouazza 2009). Durante este período, avances significativos tanto en el diseño como en los procedimientos de instalación tuvieron lugar. En la actualidad, métodos de dimensionamiento verificados (EBGEO, 2011) y técnicas de instalación ajustadas se encuentran disponibles, contando con un número importante de proyectos ejecutados con dicha solución.

El presente artículo se enfoca en tres casos de estudio destacados, incluyendo el primer proyecto ejecutado en la historia en el año de 1993 en Alemania para la construcción de una ferrovía de alta especificación. El segundo caso aborda el tratamiento con columnas de un antiguo relleno de comportamiento geotécnico bastante heterogéneo, sobre el que se apoyó una línea ferroviaria de alta velocidad en Holanda. Ya el último caso describe una obra desarrollada recientemente en la que se instaló la columna GEC con mayor longitud hasta ahora en el marco del proyecto de renovación de la Autopista A2 en Polonia.

Para cada uno de los proyectos una corta descripción es presentada, mostrando los parámetros geotécnicos más relevantes de cada caso, la filosofía de diseño y procedimiento de

cálculo aplicado, la solución final implementada, selección del tipo de encamisamiento geosintético, así como la experiencia constructiva obtenida junto con los resultados de monitoreo correspondientes.

2 TERRAPLÉN FERROVIARIO EN WALTERSHOF (ALEMANIA), 1993

Cerca de Waltershof en la región de Hamburgo, Alemania, el corredor ferroviario de alta sollicitación (transporte de mineral de hierro) que funcionaba como principal vía de conexión con que el Puerto de Hamburgo tenía que ser ensanchado y rehabilitado debido al significativo incremento de tráfico previsto. Dicha ferrovía había sido apoyada sobre un terraplén de 5 m de altura construido en áreas con presencia de suelos de fundación de baja capacidad portante. Este subsuelo consistía en arcillas y limos blandos saturados de cerca de 5 a 6 m de espesor, presentando un módulo de compresión edométrico promedio de $E_s = 0.6 \text{ MN/m}^2$ y ángulos de fricción interna en la condición drenada entre $\phi' = 20\text{-}24^\circ$. El conjunto de parámetros geotécnicos determinados para cada uno de los estratos que estos suelos blandos fueron presentados en detalle en Alexiew & Raithel (2015). Dicho terraplén de 5 m de altura existente había asentado a lo largo de la operación de la ferrovía entre 1.2 a 1.5 m.

Debido a diversas razones logísticas el proyecto de mejoramiento de la ferrovía fue dividido en dos tramos independientes. El Tramo 1 tenía que ser ejecutado en tan solo un mes. El tiempo máximo permitido para el proceso de consolidación previo a la entrada del tráfico debía de ser de cuatro meses. En contraste, para el Tramo 2 algunos meses de construcción resultaban aceptables. De esta forma, se decidió que el nuevo terraplén previsto para el primer tramo fuera diseñado sobre columnas granulares encamisadas con geotextil, mientras que para el Tramo 2 fue adoptada una solución convencional de estabilización mediante la instalación de drenes verticales prefabricados.

Esta obra correspondió al primer proyecto en escala real usando el sistema GEC como solución de fundación sobre suelos blandos. En tal época (año de 1993), un método de diseño que incluyera el análisis el estado de servicio de la estructura (Estado límite de servicio) de manera adecuada no estaba disponible. Por consiguiente, se tuvo que recurrir a la elaboración de un procedimiento de cálculo simplificado desarrollado con base en

procedimientos aplicables para columnas granulares convencionales (sin encamisamiento). Adicionalmente, un análisis numérico de elementos finitos fue llevado a cabo para analizar el comportamiento del encamisamiento y de todo el sistema tanto para el estado límite último como para el estado de servicio. Detalles adicionales sobre esta modelación pueden ser consultados en Kempfert (1996) y Raithel (1999).

En la Figura 1 un esquema simplificado del Trecho 1 soportado por columnas GEC es presentado. Las columnas fueron diseñadas con un diámetro de 1.54 m. Fue considerada un área de cobertura de columnas (en relación con el área total de la zona tratada) en un rango de 20 a 30%. El encamisamiento geotextil fue confeccionado a partir de un geocompuesto especial (tipo Comtrac® 200/50 B30) que presenta una resistencia a la tracción nominal en la dirección radial de 200 kN/m y un módulo de rigidez de $J=1800$ kN/m en la misma dirección. Dicho geocompuesto combinaba la función principal de refuerzo (en la dirección radial) con otras funciones accesorias de separación y filtración. Este material fue seleccionado para este proyecto debido a la falta de experiencia e poca disponibilidad de ensayos de laboratorio en aquel momento. El encamisamiento geotextil exhibía una costura vertical realizada en fábrica, una vez que la tecnología sin enmiendas fue desarrollada sólo años más tarde. Información más detallada relacionada puede ser encontrada en Alexiew & Raithel (2015). El denominado “método de sustitución” para la instalación de las columnas fue aplicado en este proyecto (Alexiew et al 2012).

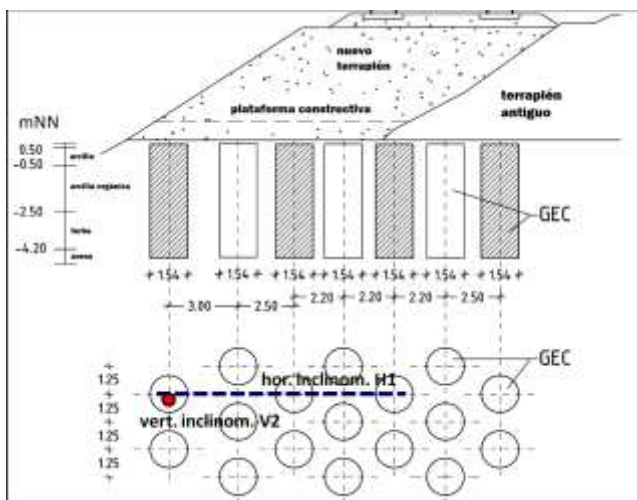


Figura 1. Esquema típico del terraplén ferroviario sobre Columnas GECs en Waltersshof.

Un programa monitoreo fue implementado incluyendo inclinómetros horizontales y verticales, celdas de presión (dispuestas entre y sobre las columnas GECs) y piezómetros dentro de los estratos de suelos blandos. En la Figura 2 son mostrados los resultados de las medidas de asentamientos correspondientes al inclinómetro horizontal H1, cuya ubicación en planta es indicada en la Figura 1. La indicación de ‘deformación final’ en la Figura 2 hace referencia a las medidas obtenidas luego de tres años bajo tráfico operacional intenso. Notar que los asentamientos mayores corresponden a la zona del terraplén original no estructurada (sin columnas) localizada a la derecha del inclinómetro H1 (Figura 1).

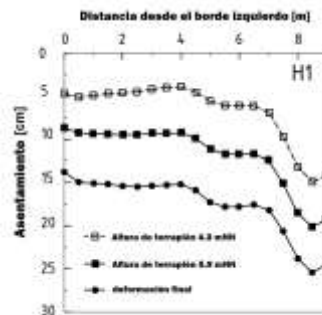


Figura 2. Asentamientos correspondientes al inclinómetro horizontal H1.

La Figura 3 permite observar una comparación interesante entre los asentamientos a lo largo del nuevo terraplén entre el Trecho 1, ejecutado sobre columnas GECs, y el sector no estructurado (Trecho 2), en el que fueron instalados drenes verticales solamente. En este caso, ‘asentamientos finales’ representan la situación de la estructura ‘al final del tercer año’ de operación de la ferrocarril rehabilitada, tal y como es mostrado en la Figura 2. Vale la pena resaltar que la geometría, subsuelos, cargas etc. para los dos trechos del proyecto fueron prácticamente idénticos. La única diferencia consistió en que el período de construcción del Trecho 2 demoró algunos meses más debido a las etapas de espera requeridas para

el desarrollo de la consolidación (construcción más lenta del nuevo terraplén).

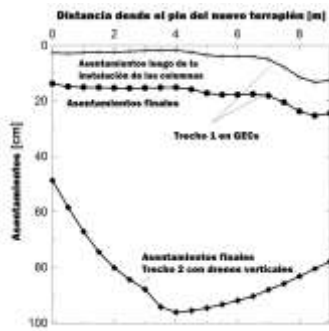


Figura 3. Comparación de asentamientos del Trecho 1 (sobre GECs) y el Trecho 2 (con drenes verticales solamente).

En adición, dos consideraciones relevantes pueden ser destacadas de las observaciones de campo realizadas: el asentamiento promedio medido en el Trecho 2 resultó aproximadamente cuatro veces más alto que el obtenido en el Trecho 1, mientras el valor máximo fue 5 veces mayor. Por otro lado, los asentamientos del Trecho 1 se mostraron bastante uniformes, en comparación con la amplia variabilidad del Trecho 2. Debido a restricciones de espacio, otros resultados importantes del programa de monitoreo no son incluidos en el presente artículo. No obstante, conclusiones adicionales puede ser consultadas en Alexiew & Raithel (2015).

El proyecto Waltershof fue terminado y puesto en operación atendiendo los tiempos de construcción establecidos así como los costos estimados previstos. El programa de monitoreo incluyó como parte fundamental del proyecto permitió por primera vez evaluar el desempeño del sistema de fundación de forma detallada durante un largo período de análisis. La realización de esta obra pionera con columnas GECs permitió verificar la mayoría de los aspectos técnicos del sistema en el sentido de filosofía y comportamiento geotécnico general (asentamientos fuertemente reducidos y uniformizados, rápida consolidación primaria, y deformaciones por creep altamente reducidas).

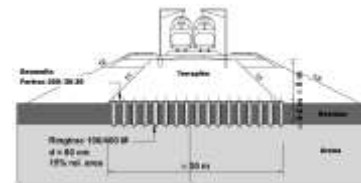
Esta experiencia positiva abrió la puerta a número importante de obras siguientes, impulsando al mismo tiempo un arduo trabajo de investigación académica en Europa direccionado al desarrollo de procedimientos de diseño más precisos y a la implementación venidera de técnicas de instalación más eficientes y procesos de manufactura de encamisamientos geotextiles más avanzados (Alexiew et al 2012, Alexiew & Thomson 2013). Las lecciones tecnológicas aprendidas llevaron por ejemplo, a la preferencia

por seleccionar diámetros de columna menores (en el rango de 0.6 a 0.8 m) para la mayoría de proyectos futuros.

3 CONEXIÓN FERROVIARIA DE ALTA VELOCIDAD PARÍS-ÁMSTERDAM, WESTRICK (HOLANDA), 2002

En un trecho cercano al municipio de Breda (Holanda) la nueva ferrovía de alta especificación planificada para conectar a París con Ámsterdam tenía que atravesar desde el kilómetro 42.6 al kilómetro 42.8 una antigua área de disposición de residuos sólidos conocida como Westrick. Este relleno consistía originalmente en una cantera de arena que luego fue utilizada desde el año 1947 al 1959 como lugar de disposición de residuos domiciliarios e industriales colocados sin mayor control técnico (sin compactación ni metodología de disposición definida). El espesor de residuos variaba el rango de 4 a 6 m seguido por estratos de arena intercalados por algunas capas intermedias de arcilla (Figura 4).

Figura 4. Ferrovía HSL Paris-Ámsterdam a la altura del relleno Westrick: Sección transversal típica.



Todos los materiales demostraron un alto grado de contaminación, incluyendo significativa presencia de hidrocarburos, PAC y metales pesados. Se detectaron también residuos de demolición y otros materiales de alta agresividad química. El valor de pH variaba de 9.0 a 10.5, lo que los caracterizaba como residuos altamente alcalinos. Como era de esperarse, la composición química, textura física y comportamiento geotécnico de estos residuos diferían enormemente, haciendo su proceso de caracterización bastante complejo.

Al inicio, dos opciones técnicas estaban bajo discusión como posibles soluciones para la construcción de este nuevo terraplén ferroviario de ~8 m de altura: un reemplazo completo de estos residuos por arenas limpias compactadas, sumado a la construcción de una losa de concreto reforzado apoyada en pilotes de 10 m de longitud. La segunda opción consistía en la implantación de columnas GECs (Figura 4) en la zona del relleno

como sistema de fundación para el terraplén. Luego de la realización de un conjunto de estudios técnicos adicionales, la segunda alternativa de estabilización fue seleccionada al comprobarse su viabilidad frente a diversos condicionantes ambientales, económicos y logísticos. Mayores detalles pueden ser encontrados en Nods & Brok (2003).

El diseño del sistema de fundación fue relativamente conservador debido a la limitación de asentamientos dada por las condiciones operativas de la ferrovía, la extrema heterogeneidad de los residuos y el alto impacto químico a ser producido sobre cualquier material de construcción a ser considerado. Asimismo, por razones económicas se decidió no instalar columnas GECs bajo los taludes del terraplén - zona con una menor influencia de la sobrecarga propia de la ferrovía (Figura 4). Las columnas GECs fueron dimensionadas con un diámetro de 0.8 m y un área de reemplazo promedio de 15 %, presentando una resistencia nominal a la tracción en la dirección radial en su encamisamiento geotextil de 300 y 400 kN/m. Esta camisa geotextil tuvo que ser manufacturada en un polímero especial denominado Polivinil Alcohol (PVA) debido a dos requerimientos técnicos principales: la necesidad de alta resistencia química para este ambiente agresivo (en términos de pH); y la exigencia de alta rigidez a la tracción radial tanto en el corto como en el largo plazo (luego de deformaciones viscosas-creep) que garantizara un control más eficiente en términos de asentamientos (totales y diferenciales) de toda la estructura.

Adicionalmente, hubo tres exigencias de desempeño relacionadas con el control de los asentamientos en la zona tratada con columnas GEC: a) mantenerlos menores a 10 cm; b) garantizar el mayor nivel de uniformidad posible al margen de la extrema heterogeneidad de los residuos y; c) lograr un rápido desarrollo de los mismos (consolidación) durante y luego de la construcción del terraplén. Estas exigencias fueron superadas en la etapa de diseño mediante la consideración del encamisamiento geotextil especial de PVA, cuyo módulo de rigidez a la tracción es aproximadamente dos veces mayor que materiales de Poliéster de alta tenacidad que exhiben la misma resistencia nominal (Alexiew et al 2000, Alexiew & Thomson 2013).

Igualmente, para uniformizar los asentamientos y para incrementar la estabilidad global de la estructura, una geomalla de refuerzo basal de 300

kN/m de resistencia a la tracción nominal fue considerada en la parte superior de las columnas GECs (Figura 4).

Un total de 2.200 columnas GECs fueron instaladas entre Junio y Julio de 2002 usando arena como el material granular de llenado de las mismas. El denominado método de desplazamiento (Alexiew et al 2012) fue adecuadamente aplicado a pesar del carácter problemático de los residuos en los que fueron instaladas las columnas. La productividad de la instalación de las columnas varió de 40 a 80 columnas GECs por día dependiendo de la resistencia localizada de los residuos.

Un programa de monitoreo fue instalado en la obra usando inclinómetros flexibles horizontales dispuestos en la parte superior de las columnas con dos objetivos principales: registrar el desarrollo de los asentamientos y decidir el momento de inicio de la construcción del terraplén ferroviario superior. Algunos resultados de estas mediciones (realizadas en el borde lateral izquierdo del terraplén tanto en la zona tratada con columnas como la que no recibió tratamiento) son mostrados en las Figuras 5 y 6.

Algunas consideraciones relevantes de este proyecto son resumidas a continuación: a) Los asentamientos de la zona no tratada resultaron -a pesar del bajo nivel de carga vertical- tres veces más altos que la zona apoyada sobre las columnas GEC, la cual recibió la totalidad de la altura de terraplén (Figuras 5 y especialmente Figura 6). b) El perfil de asentamientos en la zona con GECs no se mostró tan homogéneo (Figura 5); observándose una diferencia máxima absoluta de 15 cm. Este valor es razonable dada la alta variabilidad en el comportamiento geotécnico de los residuos. No obstante, esta diferencia no reviste de tanta relevancia técnica, teniendo poca influencia para las mayores alturas de terraplén (etapas finales de la obra) en las se reduce a menos de 10 cm (aunque la configuración general de la curva de asentamientos permanece casi igual), lo cual es un indicativo de un proceso de homogenización dependiente del tiempo. c) El proceso de consolidación (y uniformización) resultó ser muy rápido, especialmente en la zona tratada con columnas GEC (Figura 6): luego de tan sólo dos meses del inicio de la construcción del terraplén no se presentaron incrementos significativos en términos prácticos. d) El asentamiento total máximo en la zona tratada con GECs fue de 10 cm; valor bastante aceptable para las particularidades del proyecto.

Figura 5. Desarrollos de asentamientos desde el 04 de Julio (inicio de construcción del terraplén) hasta el día 22 Octubre de 2002 (último registro del monitoreo).

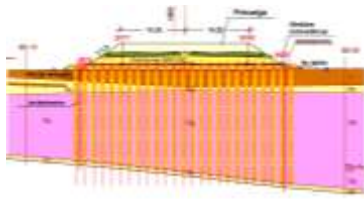
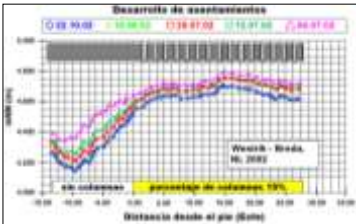


Figura 6. Evolución de asentamientos desde el 04 de Julio (inicio de construcción del terraplén) hasta el día 22 Octubre de 2002 (último registro del monitoreo).



Dos lecciones técnicas pueden mencionarse como resultado de la ejecución de este proyecto: las columnas GECs pueden ser instaladas en suelos bastante problemáticos (inclusive en residuos heterogéneos), y tanto los asentamientos totales como diferenciales pueden ser controlados convenientemente en la etapa de diseño; aunque estos últimos resultaron ser de difícil predicción en este caso.

4 TERRAPLÉN VIAL AUTOPISTA A2, JORDANOVO (POLONIA), 2010-2011



Figura 7. Perfil longitudinal del terraplén con precarga, km 60+225 - km 60+450.

La primera aplicación de las columnas GEC en Polonia fue llevada a cabo entre 2010-2011 en el marco del proyecto de construcción de la Autopista A2, conexión importante entre el oeste-oeste del país. Luego de la consideración de varias opciones de diseño, el sistema GEC fue seleccionado debido a su capacidad para controlar la compleja situación geotécnica presente en el

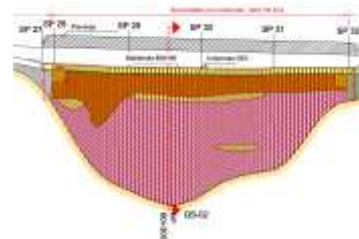
área cerca de la localidad de Jordanovo. La estratificación del subsuelo blando del área es



caracterizada por una capa superficial de turba de 5 m de espesor, seguida por un estrato de la denominada 'gyttja' (un tipo de arcilla problemática sensible) que suprayacía un estrato de suelo competente ubicado a una profundidad de ~28 m (Ver Figura 7). Mayores detalles sobre la información geotécnica recopilada puede ser encontrados en Sobolewski et al (2012).

La configuración geométrica final planeada para el terraplén vial fue relativamente plana. Consecuentemente, la carga 'muerta' responsable por el proceso de consolidación sería relativamente baja en relación con la sobrecarga operacional correspondiente al tráfico de vehículos. Esta circunstancia sumada al control y limitación bastante exigente de asentamientos posconstructivos de largo plazo asentamientos para la operación de la vía (velocidad de diseño de 130 km/h) resultó en la decisión de aplicar una precarga temporal con el objetivo de lograr un grado de consolidación más rápido en los suelos blandos de fundación (Figura 8).

Figura 8. Sección transversal del terraplén en el sector de Jordanovo, terraplén y precarga, km 60+300.



Las columnas GEC fueron diseñadas y ejecutadas con diámetros de 0.8 m en un patrón triangular (espaciamiento axial de 1.97 m y área de cobertura de 15 %), totalizando 3400 columnas para todo el trecho tratado. Luego de la instalación de las columnas mediante la aplicación del método de desplazamiento, una capa de nivelación en arena de 0.3 m de espesor fue extendida en todo el área sobre un geotextil tejido de refuerzo basal

(tejido Stablenka® 800/100 con una resistencia a la tracción nominal de 800 kN/m).

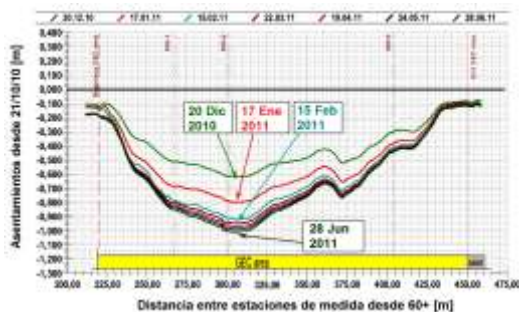
Algunos nuevos desarrollos tecnológicos fueron aplicados en esta obra debido a la longitud extremadamente significativa de las columnas GECs, de más de 29 m, siendo la mayor longitud instalada de columnas granulares encamisadas en el mundo hasta la fecha. La Figura 9 muestra algunas impresiones de la instalación mediante el uso de encamisamientos metálicos de una pieza y martillos vibratorios de anillo dimensionados a la medida del proyecto. Más detalles en Sobolewski et al (2012). Cabe resaltar que de manera reciente fueron desarrolladas nuevas técnicas para la instalación de columnas con longitudes inclusive mayores. Estos aspectos se escapan al propósito de este artículo.

El proyecto fue acompañado de un importante programa de instrumentación geotécnica para verificar los supuestos considerados en la etapa de diseño, permitiendo la comparación de las predicciones con el comportamiento real observado en campo, y más importante aún, para auxiliar en la toma de decisión relacionada con la remoción del terraplén de precarga.

Figura 9. Instalación de columnas GECs de ~30 m de profundidad.

La línea horizontal 0,000 marcada en la Figura 10 representa la configuración inicial del monitoreo, fechada el día 29 Octubre de 2010. Los 7 conjuntos de monitoreo adicionales muestran la base deformada del terraplén a lo largo de las líneas hidrostáticas instaladas. Como puede apreciarse, más del 80% de los asentamientos tuvieron lugar durante los primeros dos meses solamente. El asentamiento máximo medido el día 28 de Junio de 2011 correspondió a 1.05 m. El valor calculado como máximo en el diseño fue de 2.3 m, significativamente más alto que el observado en campo a través de las mediciones.

Figura 10. Asentamientos medidos en la base del terraplén – Perfil longitudinal.



Las divergencias en los resultados previstos y observados podrían deberse a una eventual subestimación del módulo de compresión del suelo blando en los ensayos geotécnicos, o a la adopción de un poco de conservatismo en el procedimiento de cálculo en términos del estado límite de servicio (SLS).

En cuanto a las condiciones de servicio de la obra, se requería por ejemplo, una diferencia máxima admisible de asentamientos posconstructivos ≤ 15 mm medida en una distancia de 10 m en un período de operación de 30 años. También se exigía que la totalidad de los asentamientos post-constructivos tenían que ser ≤ 0.1 m durante el mismo período. Basados en la detallada evaluación técnica efectuada y a la extrapolación conservadora de la información geotécnica recolectada, fue posible verificar que todos los requerimientos fueron adecuadamente cumplidos. La totalidad de este trecho de la autopista A2 entró en operación en la primavera europea del año 2011.

5 CONSIDERACIONES FINALES Y AGRADECIMIENTOS

El sistema de fundación GEC ha alcanzado un estado de madurez. Un número importante de proyectos han sido exitosamente ejecutados a nivel mundial. Al menos un procedimiento de diseño verificado y codificado está disponible (EBGEO 2011). Asimismo, existen dos métodos de instalación bien establecidos y aprobados. Longitudes de columna de hasta 30 m han sido instaladas, no siendo esta la principal limitante de la técnica. Una gran variedad de materiales granulares para el llenado de las columnas puede ser considerada (inclusive arena, material más usado hasta ahora); lo cual puede significar una ventaja significativa en términos económicos (áreas bajas y/o líneas costeras, donde otros materiales son escasos o caros). Un amplio rango de encamisamientos geotextiles sin costuras de Poliéster o de PVA pueden ser considerados, presentando diámetros desde 40 a 100 cm. De esta forma, la consecución de una solución optimizada es muy posible para casi cualquier circunstancia técnica.

En todos los proyectos descritos en el presente artículo, muchas personas del más alto nivel (i.e. investigadores, consultores, diseñadores, contratistas, etc.) han participado y contribuido enormemente con el desarrollo tecnológico del

sistema. Debido al amplio número de proyectos realizados a los largo de los 20 años de historia de la técnica, ellas no pueden ser citadas una por una aquí. No obstante, su esfuerzo y compromiso son fuertemente agradecidos.

Case history report with monitoring data". Proc. 5th European Geosynthetics Congress, Valencia, 172-176.

Yoo, C., Kim, S.-B. (2009). "Numerical modelling of geosynthetic-encased stone column-reinforced ground". Geosynthetics International, Volume 16, Issue 3, 01 June 2009, 116 –126.

REFERENCIAS

Villalba, J. C. (1979). "Engineering design". Mexico City, Alamos Editores.

Alexiew, D., Sobolewski, J., Pohlmann, H. (2000). "Projects and optimized engineering with geogrids from "non-usual" polymers". Proc. 2nd European Geosynthetics Conference, Bologna, 239-244.

Alexiew D., Raithel M., Küster V., Detert O. (2012). "15 years of experience with geotextile encased granular columns as foundation system", Proc. Int. Symposium on Ground Improvement IS-GI, ISSMGE TC 211, Brussels, Vol. IV, IV-3.

Alexiew, D., Thomson, G. (2013). "Foundations on geotextile encased granular columns: overview, experience, perspectives". Proc. International Symposium on Advances in Foundation Engineering (ISAFE 2013), Singapore, 401-407.

Alexiew, D., Raithel, M. (2015). "Geotextile encased columns (GEC): Case studies over twenty years". Ground Improvement Case Histories. Vol. 1. Elsevier. Buddhima Indraratna, Chu Jian, Editors, (to be published).

EBGEO (2011). "Recommendations for Design and Analysis of Earth Structures using Geosynthetic Reinforcements". German Geotechnical Society (DGGT), Ernst & Sohn, Essen-Berlin.

Gniel, J., Bouazza, A. (2009). "Improvement of soft soils using geogrid encased stone columns". Geotextiles and Geomembranes, Volume 27, Issue 3, June 2009, 167–175.

Kempfert, H.-G. (1996). "Embankment foundation on geotextile-coated sand columns in soft ground". Proc. 1st European Geosynthetic Conference, Maastricht, 245-250.

Nods, M., Brok, C. (2003). "Geotextiel ommantelde zandpalen als fundering voor HSL bij Prinsenbeek". Geokunst 01/2003, 80-83.

Raithel, M. (1999). „Zum Trag- und Verformungsverhalten von geokunststoffummantelten Sandsäulen“. Schriftenreihe Geotechnik, Heft 6, Universität Gesamthochschule Kassel, Kassel, Germany.

Raithel, M., Alexiew, D., Küster, V. (2012). "Loading test on a group of geotextile encased columns and analysis of the bearing and deformation behaviour and global stability". International Conference on Ground Improvement and Ground Control (ICGI 2012), 30 Oct. - 2 Nov. 2012, University of Wollongong, Australia, 703-708.

Sobolewski, J., Raithel, M., Küster, V., Friedl, G. (2012). "A2 Highway embankment in Poland founded on geotextile encased columns (GEC) -