



Uso innovador de geosintéticos en columnas encamisadas con geotextil para cimentaciones en diques sobre suelos blandos

Innovative use of geosynthetics in geotextile-clad columns for foundations in dikes on soft soils

CARLOS MAURICIO RODRÍGUEZ GUEVARA¹ - LIZETH ARDILA MOLINA²

1. MSSCE. Geotechnical Engineering, MIC Civil. HUESKER Group. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6648-4218>.

2. Máster en Geotecnia. Máster en Infraestructura Civil. HUESKER Group. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1571-7413>.

crodriguez@huesker.com - Lizeth.ardila@HUESKER.com.br

Recibido: 15/02/2025 Aceptado: 27/03/2025

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

En este artículo se analiza el uso de columnas encamisadas con geotextil como una solución innovadora para el mejoramiento del terreno en suelos muy blandos, con aplicación particular en obras de infraestructura lineal y de contención. Se describen los principios de funcionamiento del sistema, el papel del geosintético en la confinación del material granular y los criterios generales de diseño que gobiernan su comportamiento mecánico. A partir de un caso de estudio representativo, se evalúa el desempeño de esta técnica en materia de estabilidad global, control de asentamientos y capacidad portante, considerando condiciones reales de carga y construcción.

Los resultados evidencian que las columnas encamisadas con geotextil constituyen una opción eficiente y sostenible frente a métodos tradicionales de mejoramiento del suelo, especialmente en contextos en los que se requiere minimizar deformaciones y optimizar los procesos constructivos.

El trabajo aporta una visión aplicada basada en la experiencia profesional, relevante para el diseño y la ejecución de soluciones geotécnicas en suelos de baja resistencia.

Palabras claves: geosintéticos, columnas encamisadas con geotextil, mejoramiento del terreno, suelos blandos y cimentaciones especiales.

Abstract

This article analyzes the use of geotextile-encased columns as an innovative solution for soil improvement in very soft soils, with application in linear and retaining infrastructure works. The operating principles of the system, the role of geosynthetics in confining granular material, and the general design criteria governing its mechanical behavior are described. Based on a representative case study, the performance of this technique is evaluated in terms of overall stability, settlement control, and bearing capacity, considering actual load and construction conditions.

The results show that geotextile-encased columns are an efficient and sustainable alternative to traditional soil improvement methods, especially in contexts where deformation must be minimized and construction processes optimized.

The work provides an applied vision based on professional experience, relevant to the design and execution of geotechnical solutions in low-strength soils.

Keywords: geosynthetics, geotextile-encased columns, soil improvement, soft soils, special foundations.

INTRODUCCIÓN

El sistema de cimentación con columnas encamisadas con geotextil (GEC, por su sigla en inglés) se desarrolló específicamente para estructuras de terraplén construidas sobre suelos de muy baja resistencia. Este sistema se compone de columnas dispuestas uniformemente, conformadas por material granular no cohesivo y encapsuladas en una funda geosintética tejida en forma circular, que permite la transmisión de las cargas estructurales hacia el estrato de soporte.

Las cargas globales y las concentraciones de esfuerzo sobre las cabezas de las columnas inducen esfuerzos horizontales radiales dirigidos hacia el exterior. La particularidad del sistema GEC radica en que estos esfuerzos no solamente son contrarrestados por la presión interna ejercida por el suelo blando circundante, sino también —y de manera más relevante— por la resistencia radial proporcionada por la funda geotextil de alta rigidez a tracción. Las fuerzas circunferenciales de tracción generadas en el geotextil de encamisado brindan soporte radial a las columnas y garantizan el equilibrio del sistema, lo que permite su uso incluso en suelos extremadamente blandos, turbas y lodos con soporte radial despreciable ($S_u < 2 \text{ kPa}$ (figura 1).

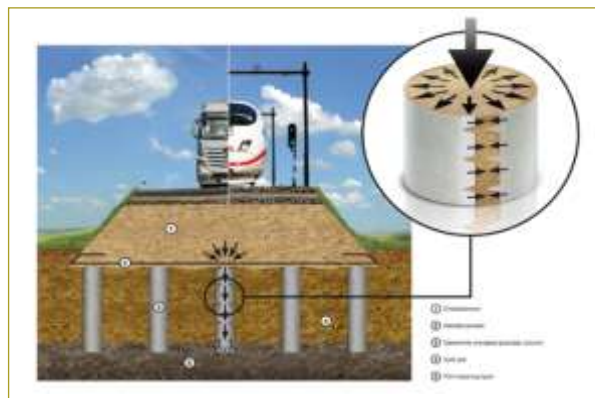


Figura 1. Sección transversal de GEC

Fuente: Figura adaptada de material técnico de Huesker Geosynthetics (2020).

La movilización de las fuerzas anulares requiere una cierta deformación radial de la encamisada (por lo general, en el rango de 2 a 5 % de deformación), lo que provoca una ligera expansión radial de las columnas granulares y, en consecuencia, un asentamiento vertical en la parte superior de la columna; por lo tanto, el sistema GEC no es completamente libre de asentamientos.

Sin embargo, la mayor parte del asentamiento ocurre durante la etapa de construcción y se compensa con un incremento en la altura del terraplén. Finalmente, se alcanza un estado de equilibrio, garantizado por la resistencia y rigidez del material granular, la contrapresión radial del suelo blando y la fuerza anular de confinamiento ejercida por el geotextil de encamisado.

Las columnas GEC suelen disponerse en un patrón de malla triangular. Los diámetros típicos de las columnas son de 600 mm u 800 mm, con una separación axial de entre 1,7 m y 2,4 m, lo que resulta en una proporción de tratamiento del terreno que oscila entre el 10 % y el 20 % del área intervenida.

La disposición de las columnas encamisadas con geotextil genera un sistema de cimentación dúctil, inmune al pandeo bajo las cargas aplicadas sobre las columnas. El empleo de GEC ayuda a reducir significativamente tanto los asentamientos absolutos como diferenciales, al tiempo que mejora la estabilidad estructural durante la construcción y en la fase de servicio. Además, dado que las columnas actúan como megadrenes con estabilidad frente a la filtración, aceleran el proceso de asentamiento y consolidación. Los asentamientos posteriores, por ejemplo, los inducidos por cargas de tráfico, son bajos y se pueden compensar, si es necesario, mediante la adición temporal de sobrecarga.

INTRODUCTION

The geotextile-encased column (GEC) foundation system was developed specifically for embankment structures constructed on soils with very low strength. This system consists of uniformly spaced columns made of non-cohesive granular material and encapsulated within a circular woven geosynthetic sleeve, which allows structural loads to be transmitted to the supporting strata.

The global loads and stress concentrations acting on the column heads induce outward radial horizontal stresses. The distinctive feature of the GEC system is that these stresses are resisted not only by the internal pressure exerted by the surrounding soft soil but also more importantly by the radial resistance provided by the high tensile strength geotextile sleeve. The circumferential tensile forces developed in the casing geotextile provide radial confinement to the columns and ensure system equilibrium, allowing the technique to be used even in

extremely soft soils, peat, and mud with negligible radial support ($S_u < 2$ kPa, see Figure 1).

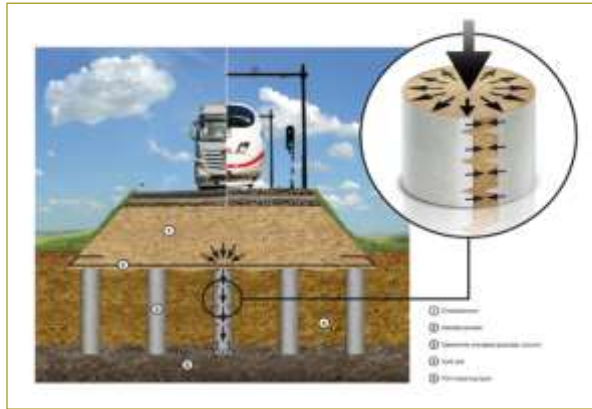


Figure 1. Cross section of GEC

The mobilization of the circumferential tensile forces requires a certain radial deformation of the casing (usually between 2% and 5%), which produces a slight radial expansion of the granular columns and, consequently, vertical settlement at the column head. Therefore, the GEC system is not completely settlement-free. However, most of the settlement occurs during the construction stage and is typically compensated by increasing the height of the embankment. Ultimately, an equilibrium state is reached, governed by the strength and stiffness of the granular material, the radial counterpressure of the soft soil, and the circumferential confinement force exerted by the casing geotextile.

GEC columns are generally arranged in a triangular grid pattern. Typical column diameters are 600 mm or 800 mm, with center-to-center spacing between 1.7 m and 2.4 m, resulting in a soil treatment ratio ranging from approximately 10% to 20% of the treated area.

The arrangement of geotextile-encased columns forms a ductile foundation system that is resistant to buckling under the loads applied to the columns. The use of GEC significantly reduces both total and differential settlements while improving structural stability during construction and service conditions. In addition, because the columns act as large vertical drains with filtration stability, they accelerate settlement and consolidation processes. Subsequent settlements, such as those induced by traffic loads, are generally small and can be compensated, if necessary, by temporarily applying additional load.

BASES DEL DISEÑO

A lo largo de los años, se han desarrollado diversos métodos para el diseño y cálculo de columnas encamisadas con geotextil (GEC); en la actualidad, se dispone tanto de procedimientos analíticos como de soluciones numéricas. Van Impe (1989) propuso los primeros enfoques en el cálculo, mientras que Raithel (1999) y Raithel y Kempfert (2000) desarrollaron posteriormente modelos analíticos más precisos y soluciones numéricas.

Raithel (1999) presentó un procedimiento analítico de diseño, basado en métodos previos de compactación por desplazamiento vibratorio desarrollados por Priebe (1995) y Ghionna y Jamiolkowski (1981). Los procedimientos de Raithel incluyen una fuerza de confinamiento en la dirección anular del encamisado, basada no solo en la resistencia a la tracción última (“fuerza”), sino en el comportamiento completo de esfuerzo-deformación del geosintético, definido por el módulo de rigidez a tracción J [kN/m]. Como resultado de esto, a partir de la deformación anular es posible calcular la expansión radial de la GEC y el asentamiento vertical resultante en la parte superior de la columna, el cual será equivalente al asentamiento promedio del terraplén (para más detalles sobre el procedimiento de diseño, se recomienda revisar Raithel [1999]).

Vale la pena destacar que el comportamiento esfuerzo-deformación del encamisado es el elemento clave para el desempeño del sistema. En numerosos proyectos, mediciones *in situ* han confirmado la validez y aplicabilidad de este método de diseño.

El comportamiento portante de las GEC es complejo. Estos elementos son más rígidos que el suelo circundante y, por consiguiente, atraen una mayor concentración de carga proveniente del terraplén; a su vez, la presión sobre el suelo adyacente disminuye, lo que conlleva una reducción general en los asentamientos totales. El procedimiento de diseño se basa en el concepto de unidad de celda (figura 2). La tensión vertical promedio producida por el terraplén (σ_0) actúa sobre el área hexagonal de influencia de una columna individual (AE). Esta tensión se distribuye en la tensión más alta impuesta sobre la columna ($\sigma_{v,c}$) al actuar en el área de la columna (AC), y en la tensión vertical menor ($\sigma_{v,s}$), que actúa sobre el área del suelo adyacente (AE-AC).

La diferencia de tensiones verticales entre la columna ($\sigma_{v,c}$) y el suelo adyacente ($\sigma_{v,s}$) genera una diferencia en los esfuerzos radiales horizontales (σ_h) tanto en la

columna como en el suelo circundante, la cual induce una fuerza de tracción en anillo dentro del geotextil de encamisado, que compensa el déficit de fuerza en el sistema para alcanzar el equilibrio. La magnitud de esta fuerza de confinamiento depende no solo de los esfuerzos horizontales y sus diferencias, sino también de las deformaciones por medio del módulo de tracción en anillo J . De hecho, esta dependencia de la deformación con el equilibrio es una característica particular del sistema y del procedimiento de diseño correspondiente.

A causa de este comportamiento interactivo complejo, los procedimientos de cálculo son iterativos y requieren el empleo de software computacional para alcanzar el estado de equilibrio final del sistema.

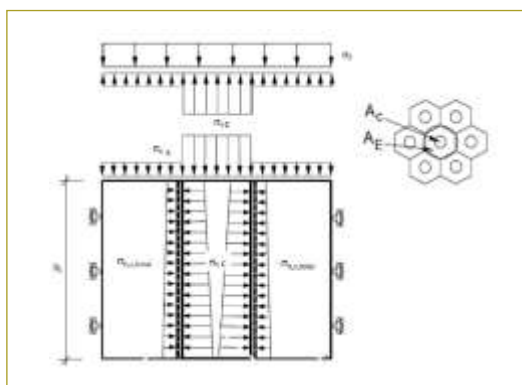


Figura 2. Representación del modelo analítico de la unidad de celda

Fuente: Adaptado de Ebge. *Recomendaciones para el diseño y análisis de estructuras de tierra reforzadas con geosintéticos* (Sociedad Alemana de Geotecnia, DGGT).

CASO DE ESTUDIO: AMPLIACIÓN DE PLANTA EADS BAJO RECLAMACIÓN DEL TERRENO EN HAMBURGO-FINKENWERDER (ALEMANIA)

La mayoría de los proyectos en los que se ha utilizado el sistema de columnas encamisadas con geotextil (GEC) corresponden a la construcción de carreteras y ferrocarriles. No obstante, también se han implementado en proyectos de infraestructura hidráulica de gran envergadura, como la cimentación de un terraplén en un embalse sometido a actividad sísmica en Turquía (Guler y Detert, 2020). Sin embargo, el proyecto más reconocido en el que se ha empleado esta tecnología es la ampliación del área de producción de EADS en Hamburgo-Finkenwerder, el cual se describe en detalle a continuación.

En el marco de la cooperación europea para la producción del Airbus A380, fue necesario expandir las instalaciones existentes en Hamburgo mediante un proceso de recuperación de tierras. Para esto, se delimitó un área de aproximadamente 140 ha mediante la construcción de un dique de 2,4 km de longitud, relleno después hidráulicamente (figura 4).

El dique se tuvo que construir sobre suelos extremadamente blandos, con espesores de capa que oscilaban entre 4 y 14 m antes de alcanzar un estrato portante competente. Para la cimentación del dique se implementó el sistema GEC, que permitió instalar unas 60.000 columnas encamisadas con geotextil, con un diámetro de 80 cm, bajo la base del dique.

Además de actuar como elemento de confinamiento para la recuperación de tierras, el dique desempeña una función clave como barrera de protección hidráulica de la instalación de producción. Así mismo, se emplearon otras 10.000 columnas encamisadas para la reubicación de un dique existente.

A renglón seguido se muestra en qué condiciones estaba el suelo en el sitio del proyecto (figura 3).

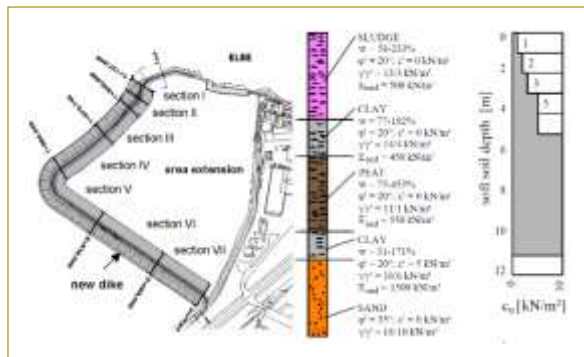


Figura 3. Concepto de recuperación de tierras mediante la construcción de un dique y condiciones geotécnicas típicas del suelo

Fuente: Adaptado de M. Raithel, A. Kirchner, C. Schade y E. Leusink (1999). *Foundation of constructions on very soft soils with geotextile encased columns. State of the art.* Kempfert + Partner GmbH, Kassel, Alemania.

En total, se instalaron siete secciones transversales de medición para evaluar las variaciones en las condiciones del suelo. Mediante varios dispositivos, se monitorearon las presiones del suelo y del agua, así como el comportamiento de deformación tanto horizontal como vertical. En la figura siguiente se muestran los asentamientos del dique (figura 4). Gracias al sistema de cimentación con columnas encamisadas con geotextil (GEC), fue posible

construir el dique en un periodo de nueve meses, con una altura de 7 m para proporcionar protección contra inundaciones. En un plazo de quince meses, se elevó el dique a su altura final —de aproximadamente 10 m— y se lo recubrió con arcilla orgánica.

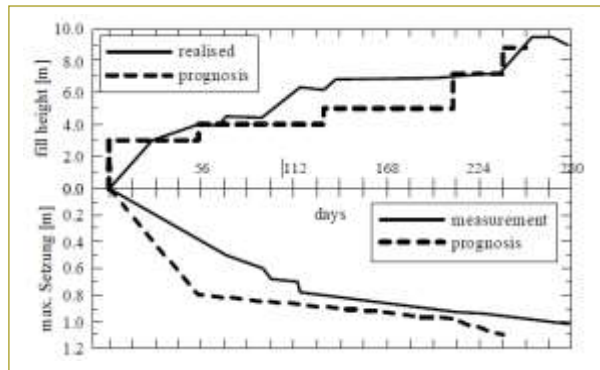


Figura 4. Resultados de los asentamientos

Fuente: Adaptado de M. Raithel, A. Kirchner, C. Schade y E. Leusink (1999). *Foundation of constructions on very soft soils with geotextile encased columns. State of the art.* Kempfert + Partner GmbH. Kassel, Alemania.

El dique reubicado, denominado Finkenwerder Vordeich, se cimentó parcialmente con GEC, mientras que el resto se realizó mediante drenes verticales prefabricados (PVD). A renglón seguido se presentan las mediciones de asentamiento en esta sección, en las que se puede observar con claridad, a partir de la magnitud de los asentamientos, qué sección se cimentó con GEC y cuál con PVD. Vale la pena señalar que el espesor de la capa de suelo blando en el área de GEC era de aproximadamente 7 m, mientras que en la zona de PVD era de 4,5 m.

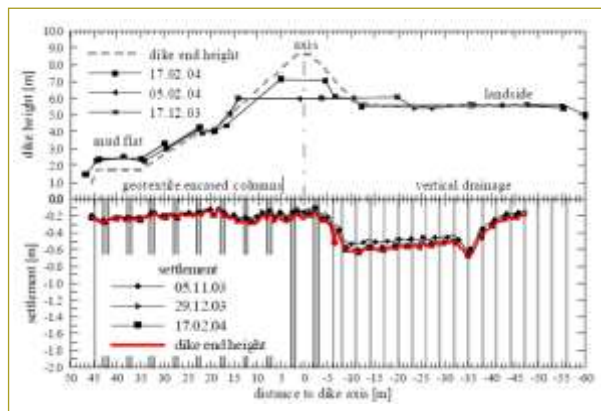


Figura 5. Resultados de los asentamientos a lo largo del dique

Fuente: Adaptado de M. Raithel, A. Kirchner, C. Schade y E. Leusink (1999). *Foundation of constructions on very soft soils with geotextile encased columns. State of the art.* Kempfert + Partner GmbH. Kassel, Alemania.

La flexibilidad del sistema durante las obras de instalación, combinada con la función de drenaje de las columnas, permitió la construcción progresiva del dique en capas sucesivas (para más detalles sobre este proyecto, se recomienda consultar a Raithel et al. [2002]).

La estabilidad del dique, tanto durante las etapas de construcción como en la fase final, se calculó utilizando parámetros efectivos de resistencia al corte (ϕ' y c'), considerando el exceso de presión de poros inducido por las cargas de cada etapa constructiva. Se analizaron varios mecanismos de falla y superficies de deslizamiento mediante métodos numéricos y analíticos en 2D y 3D, tomando en cuenta la contribución a la estabilidad proporcionada por las columnas granulares encamisadas.

Esta contribución, derivada de la presión de confinamiento del encamisado y la concentración de carga sobre las columnas, se consideró por medio de parámetros geotécnicos alternativos, de acuerdo con lo propuesto por Raithel (1999). Los cálculos de diseño determinaron la necesidad de un reforzamiento basal sobre las columnas con una resistencia a la tracción entre 500 y 1000 kN/m, el cual se instaló perpendicular al eje del terraplén.

CONCLUSIONES

El proyecto de recuperación de tierras en Hamburgo-Finkenwerder, mediante la implementación del sistema de columnas encamisadas con geotextil (GEC), representa un caso único en el ámbito de la ingeniería geotécnica aplicada a infraestructuras sobre suelos extremadamente blandos.

Optimización en el uso de materiales. La implementación de GEC redujo la cantidad de materiales de cimentación y minimizó la necesidad de remplazo masivo de suelos blandos.

Ahorro significativo en costos y tiempo de construcción. El sistema permitió la construcción acelerada del dique, logrando elevarlo hasta su altura de diseño en tan solo quince meses, en comparación con métodos convencionales que requerirían plazos significativamente mayores.

Mejor desempeño estructural y estabilidad a largo plazo. La interacción entre el confinamiento geotextil, la capacidad de drenaje de las columnas y la redistribución de esfuerzos permitió alcanzar un equi-

librio estructural eficiente, reduciendo asentamientos diferenciales y asegurando la funcionalidad del dique como barrera de protección hidráulica.

En este proyecto se demuestra la viabilidad y efectividad del sistema GEC en grandes obras de infraestructura, sistema que se convierte en un referente para futuras aplicaciones en entornos con condiciones de suelo desafiante.

Autoría

Carlos Rodríguez conceptualizó y diseñó el estudio, analizó los datos y redactó el texto. El caso de estudio se basó en textos e información previamente desarrollados por Huesker GmbH.

Conflicto de intereses

El autor manifiesta que no presenta conflicto de intereses alguno en relación con esta publicación.

REFERENCIAS

- Ghionna, V., & Jamiolkowski, M. (1981). Colonne di ghiaia. X Ciclo di conferenze dedicate ai problemi di meccanica dei terreni e ingegneria delle fondazioni metodi di miglioramento dei terreni. Politecnico di Torino Ingegneria, attidell'istituto di scienza delle costruzioni, n.º 507.
- Guler, E., & Detert, O. (2020). The application of geotextile encased columns (GEC) beneath water in a highly seismic area for the construction of an up to 22 m high embankment. GeoAmericas 2020, Brazil.
- Priebe, H. (1995). Die Bemessung von Rüttelstopfverdichtungen. *Bautechnik*, 72, 183-191.
- Raithel, M. (1999). Zum Trag-und Verformungsverhalten von geokunst stoffummantelten SandsÄ€ulen. *Schriftenreihe Geotechnik*, UniversitÄ€t Gh Kassel, Heft 6. Kassel.
- Raithel, M., & Kempfert, H.-G. (1999). Bemessung von geokunst stoffummantelten SandsÄ€ulen. *Bautechnik*, 76, Heft 11: 983-991.
- Raithel, M., & Kempfert, H.-G. (2000). Calculation models for dam foundations with geotextile coated sand columns. Proc. International Conference on Geotechnical & Geological Engineering GeoEng 2000, Melbourne.
- Raithel, M., Kempfert, H.-G., & Kirchner, A. (2002). Geotextile-encased columns (GEC) for foundation of a dike on very soft soils. Proceedings 7th ICG International Conference on Geosynthetics, Nice, France.