

## Retaining Wall with Synthetic Sheet Piling system and construction of pavements using geogrids and EPS Geofom in the Cartagena to Barranquilla Highway, Colombia.

William Ricardo Quintero López, TDM Tecnología de Materiales Colombia SAS., Bogotá, Colombia.  
Carlos Antonio Centurión, Grupo TDM, Ciudad de México, México.

### ABSTRACT

The present project is part of the Cartagena - Barranquilla road corridor, managed until that moment by the Cartagena Barranquilla S.A.S Coastal Concession, on the shores of the Caribbean Sea in northern Colombia. This ambitious, fourth-generation project includes a large viaduct with 5.5 km in length, which seeks to reduce travel time between Cartagena and Barranquilla to 20 minutes, through the extension of the existing road to two lanes.

The Colombian government placed a series of restrictions on the use of construction technologies, seeking a minimum alteration to the local mangrove ecosystem, for that reason, for the conformation of the embankments over soft soils needed to achieve the final levels of the new road, was decided to use the technology of sheet piles, which offer structural support with simple construction processes and with minimum actions, however, the sheet pile system selected was the ULTRACOMPOSITE® fiber reinforced polymer sheet piling, above the conventional steel sheet piles, for the purpose of ensuring the properties of resistance throughout the life of the project, despite its constant exposure to the marine environment and not presenting any problem of corrosion or chemical and / or biological degradation.

In addition, the area of mangroves that crosses the project is characterized by very soft and saturated soils, made up of clays and silts with high compressibility potential. For this reason, with the proposal to reduce the possible differential settlement along the containment project, as well as reduce the thrust against the walls of the synthetic sheet piles, lightened padding technology is used in the back of the synthetic sheet piles. This lightened filler consisted of expanded polystyrene blocks (EPS), supported directly on a multi-directional polypropylene geogrid type TRIAX®.

Finally, the wall with synthetic sheet piles was designed as a structure anchored in its upper part, making it possible to reduce the placing depth, limiting their total length to a maximum of 11.38 m. This completes a proposal that was the best technical and economic solution analyzed by the consortium, fully aligned with the interest of the Colombian government in protecting the local ecosystem

### RESÚMEN

El presente proyecto forma parte del corredor vial Cartagena - Barranquilla, administrado hasta ese momento por la Concesión Costera Cartagena Barranquilla S.A.S, a orillas del mar Caribe en el norte de Colombia. Este ambicioso proyecto, de cuarta generación, incluye un gran viaducto con 5,5 km de longitud, que busca reducir en 20 minutos el tiempo de viaje entre Cartagena y Barranquilla, a través de la ampliación de la vía existente a dos carriles.

El gobierno colombiano colocó una serie de restricciones en el uso de tecnologías constructivas, buscando garantizar una mínima alteración al ecosistema de mangle local, por esa razón, para la conformación de los rellenos necesarios para alcanzar las cotas finales de la nueva vía, se decidió usar la tecnología de tablestacas, las cuales ofrecían soporte estructural con procesos constructivos simples y con intervenciones mínimas, sin embargo, el sistema seleccionado fue el tablestacado sintético de polímeros reforzados con fibra de vidrio ULTRACOMPOSITE®, por encima de las tablestacas de acero, con la finalidad de garantizar las propiedades de resistencia a lo largo de la vida útil de la obra, a pesar de su exposición constante al ambiente marino, al no presentar ningún problema de corrosión o degradación química y/o biológica.

Adicionalmente, la zona de mangle que atraviesa el proyecto se caracteriza por presentar suelos muy blandos y saturados, conformados por arcillas y limos con alto potencial de compresibilidad. Por tal motivo, con la finalidad de reducir los potenciales asentamientos diferenciales a lo largo del proyecto de contención, así como reducir el empuje contra las paredes de las tablestacas sintéticas, se usó la tecnología de relleno aligerado en el trasdós de las tablestacas sintéticas. Este relleno aligerado estuvo conformado por bloques tipo EPS, apoyados directamente sobre una geomalla multidireccional de polipropileno de tipo TRIAX®.

Finalmente, el muro con tablestacas sintéticas se diseñó como una estructura anclada en su parte superior, tornando posible la reducción en la profundidad de clavado, limitando la longitud total de las mismas a máximo 11,38 m. Con esto se completó una propuesta que constituyó la mejor solución técnico y económica analizada por el consorcio, alineada completamente con el interés del gobierno colombiano en proteger el ecosistema local.

## 1. INTRODUCCIÓN

Cartagena está localizada en el norte del departamento de Bolívar a orillas del mar Caribe. Se encuentra a 10° 25' 30" latitud norte y 75° 32' 25" de longitud oeste. Limita al oriente con los municipios de Santa Catalina, Clemencia, Santa Rosa, Turbaco y Turbaná; al norte y al occidente con el mar Caribe; y al sur con el municipio de Arjona.

La localización específica del proyecto es en el sector de la Boquilla, donde se conecta el retorno del Viaducto gran manglar con la calzada derecha de la vía que conduce de Cartagena hacia Barranquilla. En la Figura 1 se puede apreciar la localización del proyecto obtenida del Google Earth.



Figura 1. Localización detallada del proyecto. Fuente: google.com

Definida la solución de tablestacado como la contención ideal para el proyecto, los dos principales problemas que se presentaban en los elementos convencionales metálicos era tanto garantizar la durabilidad frente a problemas de corrosión, así como los altos costos de mantenimiento por medio de arenado a alta presión (sandblasting) y aplicaciones de pinturas anticorrosivas con alto contenido de metales pesados. Esto último, el gobierno colombiano en su esfuerzo por mantener la fragilidad del ecosistema intacto, lo identificaba como un riesgo potencial de ataque al ecosistema local. La preocupación en este proyecto por la conservación del ecosistema local fue tal, que la nueva vía se proyectó en un gran viaducto elevado que permitió intervenir lo menos posible tanto la dinámica marítima costera como la zona de manglar.

Aun cuando el tablestacado metálico es una alternativa técnicamente viable, no lo es su mantenimiento, puesto que el hecho de tener que cambiar la pintura con cierta periodicidad por efecto de la corrosión en el medio marino, genera que las partículas de pintura provenientes del arenado, contaminen la zona de mangle, por ello se optó por un sistema de tablestacado sintético, que además de resultar más económico y fácil de instalar, se convierte en la solución ideal al no ser susceptible a procesos corrosivos y tener una mayor vida útil.

## 2. PROPUESTA DE INTERVENCIÓN

El proyecto consiste en la construcción una estructura de contención tipo tablestaca, elaborada a partir de un polímero reforzado con fibra FRP (TDM, 2014), la cual dará soporte a la ampliación de la calzada en el sector del retorno al gran viaducto elevado.

Esta estructura de contención soportará los empujes provenientes de las cargas de tráfico y del relleno en la parte posterior de las tablestacas. Este último, dadas las condiciones geotécnicas de los depósitos de manglar como baja resistencia y elevada compresibilidad, fue proyectado como un relleno aligerado compuesto por bloques de poliestireno expandido tipo EPS.

Por su parte, las cargas vivas actuantes sobre el tablestacado estuvieron dadas, durante el proceso constructivo, por un (1) nivel de contenedores para campamento ( $q_L=1\text{Ton}/\text{m}^2$ ) entre las estacas k5+870 y k5+900, y el transporte de elementos prefabricados de concreto (ver Figura 5) para la construcción del retorno "La Boquilla" cuya carga uniformemente distribuida fue de aproximadamente  $q_L=2\text{Ton}/\text{m}^2$ . Dado que la carga viva vehicular recomendada por AASHTO para estructuras de contención es del orden de  $q_L = 1,2\text{Ton}/\text{m}^2$ , hubo consenso en que las cargas producidas

por el transporte de los prefabricados durante la construcción del puente retorno La Boquilla serían las que gobiernen el diseño.

Finalmente, producto de implantar el eje del tablestacado proyectado entre el existente “Puente Cañón” y el retorno de La Boquilla en la estaca k5+910, se obtienen dos secciones de análisis para construcción, un sector de altura libre h=5m entre k5+780 – K5+795 y k5+855 – K5+910, con una longitud de desarrollo de contención de 73m, y un sector entre k5+795 y k5+855 con altura libre h=3m con una longitud de desarrollo de contención de 60m.

### 3. PERFIL ESTRATIGRÁFICO

En general, las obras proyectadas se localizaron sobre unos depósitos de manglar que supera los 30m de profundidad, el cual se compone de una serie de arcillas y limos de consistencia muy blanda, en los cuales subyacen niveles de arenas y gravas líticas provenientes de las arcillolitas de la formación rocosa subyacente.

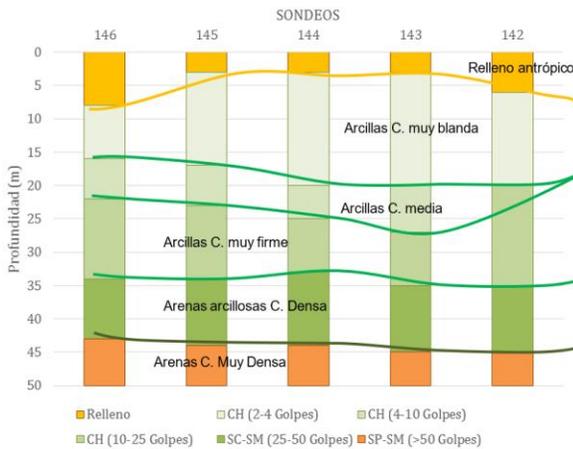


Figura 2. Perfil estratigráfico promedio para cada una de las perforaciones (ROTHERM, 2015)

Tabla 1. Perfil estratigráfico y parámetros geotécnicos (ROTHERM, 2015)

| Profundidad            | Descripción   |
|------------------------|---|
| 0.00m – 3.0/8.0m       | Relleno antrópico conformado por arenas y limos de color café   |
| 3.0/8.0 – 16.0/20.0m   | Arcillas con presencia de limos, de color gris verdoso, de consistencia muy blanda. Nspt: 2-4 golpes/pie<br>Wn (%): 13-91, wL (%): 21-132, Wp (%): 16-62, IP (%): 5-90. USCS: CH, γt (KN/m³): 14.0-17.0. C (KPa): 12-25. φ (°): 12-20. qu (KPa): 14-79  |
| 16.0/20.0 – 22.0/27.0m | Arcillas con presencia de limos, de color gris verdoso, de consistencia media. Nspt: 4-10 golpes/pie<br>Wn (%): 21-60, wL (%): 29-105, Wp (%): 19-38, IP (%): 7-51. USCS: CH, MH, γt (KN/m³): 16.0-19.0. C (KPa): 3-65. φ (°): 12-17. qu (KPa): 58-225. |
| 22.0/27.0 – 34.0/35.0m | Arcillas con presencia de limos, de color gris verdoso, de consistencia muy firme. Nspt: 10-25 golpes/pie<br>Wn (%): 15-35, wL (%): 25-75, Wp (%): 15-27, IP (%): 7-51. USCS: CH, CL, SM, γt (KN/m³): 19.0. C (KPa): 65.0. φ (°): 17.0. qu (KPa): 83.0. |
| >35.0m                 | Arenas arcillosas y gravas hacia los 45.0m. De color habano a café. Nspt: >30 golpes/pie<br>Wn (%): 12-37, wL (%): 25-69, Wp (%): 12-31, IP (%): 9-38. USCS: SP-SM, SC, γt (KN/m³): 19.0  |

Específicamente para el sitio en estudio, a partir de los registros de plan exploratorio y la interpretación de los resultados de laboratorio, se ha logrado tipificar el perfil estratigráfico, según se describe en la Figura 2 y Tabla 1. Las profundidades se encuentran referenciadas al nivel actual del terreno.

### 4. ANÁLISIS DE INGENIERÍA

Las diversas cargas que actúan sobre la estructura de contención pueden causar, en caso de superar las condiciones de equilibrio, una rotación de cuerpo rígido (Figura 3), fallas por flexibilidad en las tablaestacas (Figura 4), o también, considerando la estructura propuesta para el presente proyecto, una falla en el sistema de anclaje (Figura 5).

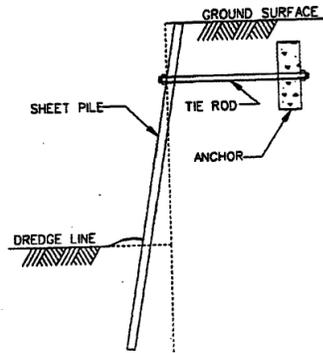


Figura 3. Modo de Falla Rotacional Interna (rotación de cuerpo rígido) por empotramiento y/o condiciones de anclaje inadecuadas

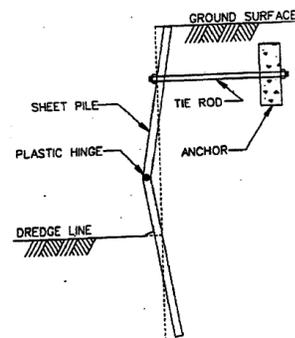
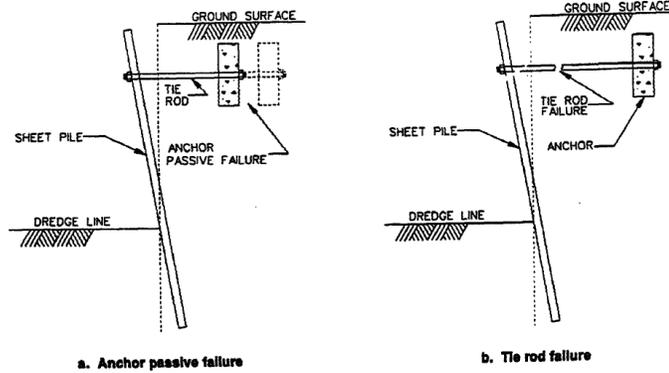


Figura 4. Modo de Falla a flexión por articulación plástica en tablestaca.



**Figura 5.** Modos de Falla en el anclaje. a) Falla pasiva del anclaje. b) Ruptura del tensor.

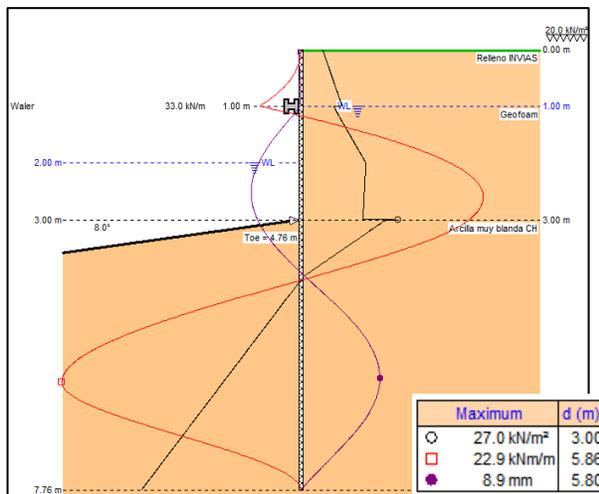
Este tipo de fallas pueden prevenirse, en el caso de un sistema anclado, a través de una combinación adecuada de la profundidad de empotramiento de las tablaestacas con la posición, longitud y capacidad del anclaje.

Esta combinación adecuada entre profundidad de empotramiento con la posición, longitud y capacidad de anclaje se pueden calcular, según el manual del Cuerpo de Ingenieros, a partir de una de las siguientes metodologías:

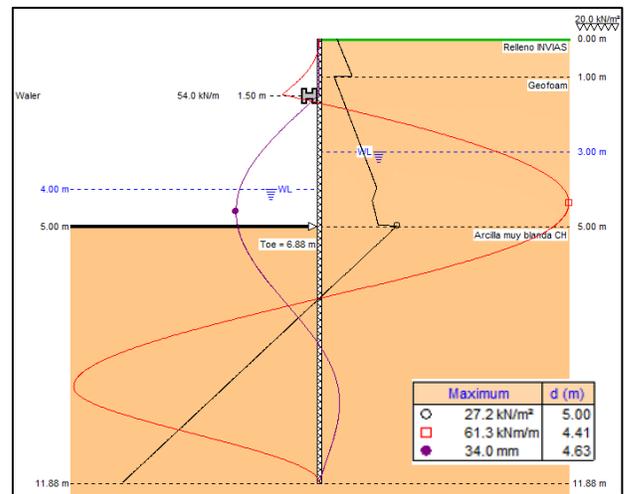
- Método de Extremo libre (*free-earth method*)
- Método de Extremo fijo (*fixed-earth method*)
- Método de Interacción Suelo – Estructura (*Soil – Structure Interaction (SSI) Method*) por elementos finitos.

El objetivo en cualquiera de estos métodos es determinar la profundidad de empotramiento bajo la cual se alcance un estado de equilibrio a nivel del anclaje, tanto en fuerzas como en momentos. De esta condición de equilibrio se obtiene la fuerza en el sistema de anclaje, necesaria para determinar las características de la barra o tensor y del contrapeso final o *deadman*.

En este estudio se utilizaron tanto las teorías clásicas (extremo fijo y extremo libre), como el método de interacción Suelo – Estructura. Los análisis clásicos de equilibrio de la tablestaca se realizaron empleando la herramienta comercial PILEBUCK SPW911 V2.40 y parámetros de Mohr-Coulomb para el relleno EPS (geofoam) así como el perfil estratigráfico antes descrito, con el fin de tener un punto de partida para el análisis de esfuerzos-deformaciones que se describirá más adelante, buscando de esta manera la compatibilidad de deformaciones, presiones de material retenido, y fuerzas en el anclaje considerando la flexibilidad del tablaestacado, naturaleza del relleno y el anclaje propiamente dicho.



**Figura 6.** Análisis de equilibrio para Tablestaca UC-50, Sección k5+855. (TDM, 2017)



**Figura 7.** Análisis de equilibrio para Tablestaca UC-75, Sección k5+875. (TDM, 2017)

Con el PILEBUCK SPW911 V2.40 fue posible determinar los esfuerzos cortantes, momentos flectores y deflexiones a lo largo de la tablestaca, así como el esfuerzo de tensión actuante en el tensor que transfiere esfuerzos al anclaje. La

consideración de la flexibilidad del muro y del anclaje permite establecer con mayor precisión la profundidad de empotramiento requerida.

Con el objeto de definir la longitud de tablestaca por sector se realizó el análisis de las tablestacas en polímero reforzado con fibra de vidrio UC-50 con una anclaje para la sección crítica en el tramo de estudio (k5+855) y de la tablestaca UC-75 con una línea de anclaje de longitud variable para la sección crítica (k5+875), tomando el perfil estratigráfico típico definido, obteniendo como salida los diagramas de desplazamiento y fuerzas internas (momento flector y presión) vs profundidad presentados en las Figuras 6 y 7.

Con los resultados obtenidos se verifica la estabilidad del sistema de tablaestacas frente a longitudes y momentos flectores:

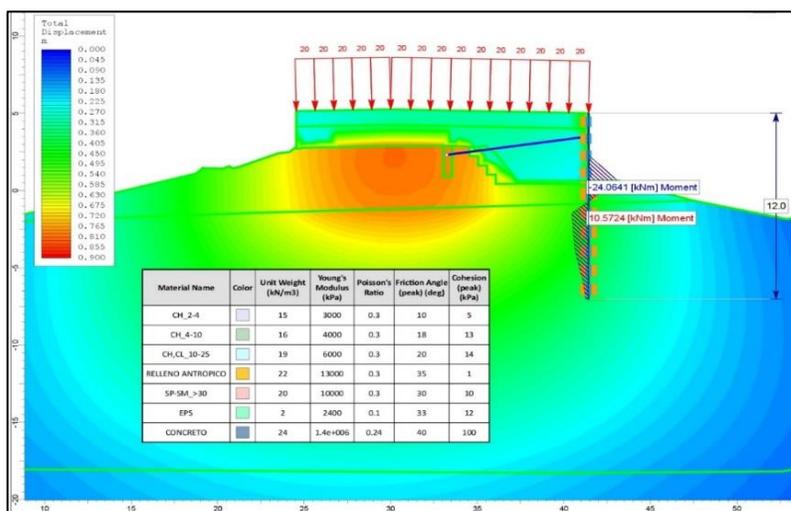
**Tabla 2.** Verificación longitud y estabilidad a momentos flectores

| Propiedades            | UC-50         | UC-75          |
|------------------------|---------------|----------------|
| Longitud de Tablestaca | 7.90m (26 ft) | 11.60m (38 ft) |
| M <sub>adm</sub>       | 77.1 kN.m     | 140.9 kN.m     |
| M <sub>max</sub>       | 22.9 kN.m     | 61.3 kN.m      |
| FS a la flexión        | 3.40          | 2.30           |

A partir del diagrama de presiones se establecen las condiciones de diseño del sistema de anclaje, el cual, como se mencionó previamente, debe ser estable frente a posibles fallas por ruptura en el tensor y a fallas de tipo pasivo.

#### 4.1. Sección K5+870

En la Figura 8 se presenta la sección topográfica utilizada en los análisis, así como el resultado de la modelación para la etapa final, luego de conformado el relleno en EPS y con la carga de tráfico.



**Figura 8.** Resultado del análisis numérico (momentos sobre la tablestaca UC-50) para la sección K5+870. Etapa final.

El análisis de la Figura 9 se realizó para las tres tipologías de tablestaca, y los resultados se reportaron en términos de momentos y cortantes sobre la estructura. Se obtuvieron los resultados para las tres etapas finales, las cuales son en su orden:

1. Colocación del relleno aligerado (ETA\_5)
2. Colocación del relleno convencional (1m) en la parte superior (ETA\_6)
3. Condición con carga de tráfico vehicular (ETA\_7)

Se observó en los análisis que la magnitud de los efectos sobre las tablestacas es muy similar, esto debido a que el relleno aligerado de manera inmediata no ejerce empujes activos sobre las estructuras. El efecto del relleno sobre la estructura se esperaba después de la aparición de los primeros asentamientos.

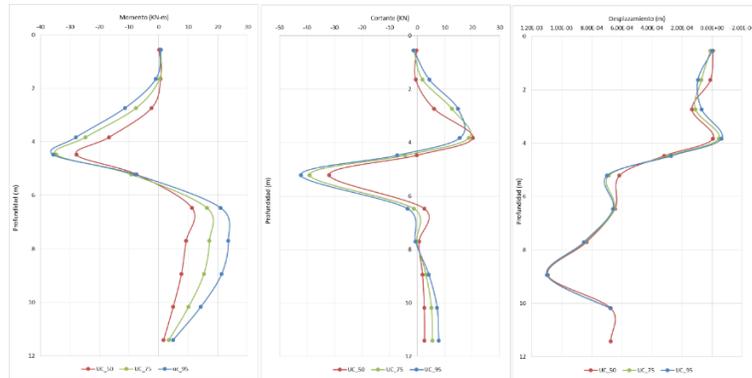


Figura 9. Momentos, cortantes y desplazamientos sobre las tres tipologías de tablestaca.

En la Figura se presentan los resultados comparativos de las tres tipologías de tablestaca, con lo cual se evidencia que el efecto inmediato es igual para las tres; sin embargo, a mediano y largo plazo se debe prever el aumento de las sollicitaciones sobre la estructura.

Se observa que los efectos sobre las tres tipologías de tablestaca son similares. También es evidente que los desplazamientos se dan mayormente en la zona que está sometida a empujes pasivos, lo cual es consecuente con los empujes que ejerce el poliestireno sobre la estructura, los cuales son bajos dado el peso de este.

#### 4.2. Sección K5+875

La sección topográfica del K5+875 resulta ser la más alta (en términos de rasante y altura libre de la tablestaca). Los resultados del análisis numérico para esta sección se presentan en la Figura 10.

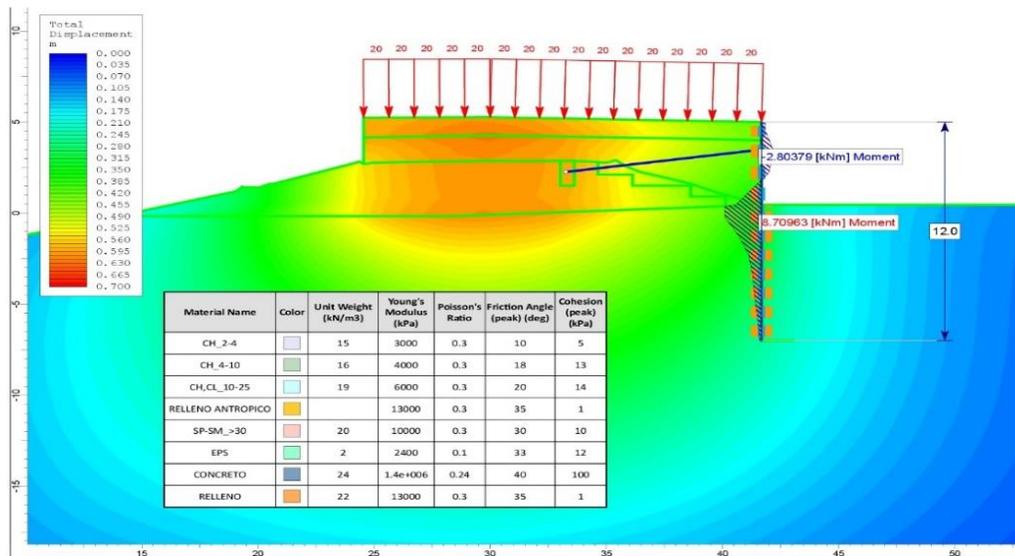


Figura 10. Resultado del análisis numérico (momentos sobre la tablestaca UC-50) para la sección K5+875. Etapa final

Se realizaron los análisis para las tres tipologías de tablestaca, en las etapas finales del proceso constructivo.

En el caso de la sección K5+875 es notable el hecho de que la etapa final es la más crítica, y es en ella donde se generan los mayores efectos sobre la estructura, debido a la mayor altura libre de la tablestaca en este análisis.

A continuación se presentan los resultados comparativos de las dos tipologías de tablestaca, en la etapa final del análisis, la cual resulta ser la más crítica.

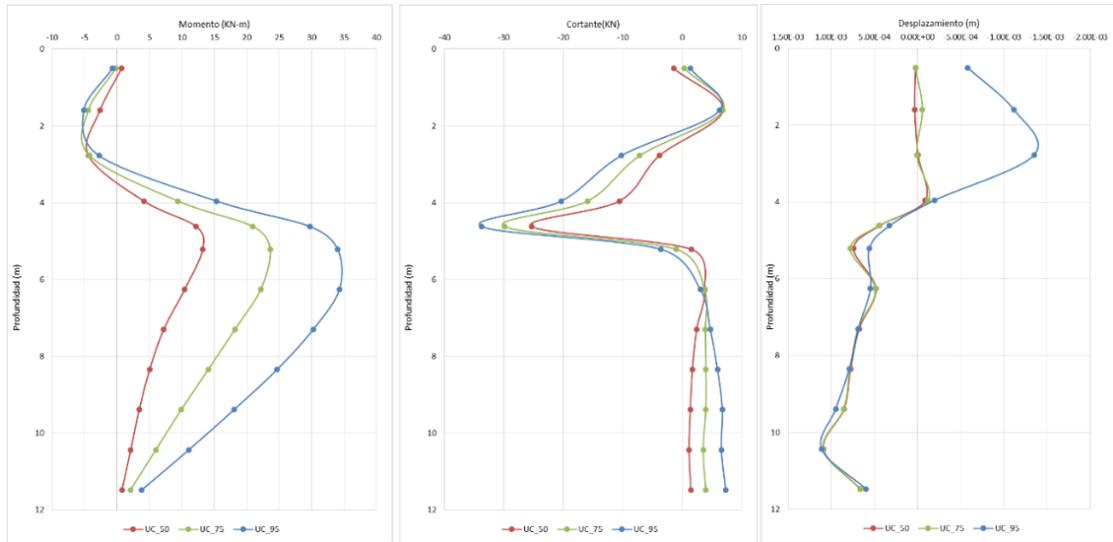


Figura 11. Momentos, cortantes y desplazamientos sobre las tres tipologías de tablestaca.

Nuevamente la magnitud de los efectos sobre la tablestaca es similar en los tres casos, siendo mayor para la estructura UC-95 incluso en términos del desplazamiento en la zona libre de la tablestaca, pero con un valor muy por debajo del máximo admisible.

Se resalta nuevamente el hecho de que las solicitaciones van a aumentar en la medida que el relleno se consolida, ya que las deformaciones traerán consigo empujes activos sobre la estructura.

4.3. Sección K5+855

Esta sección corresponde a la zona número 2 de la sectorización por alturas que se plantea para el proyecto, donde el valor máximo asciende hasta 3m de altura libre. La sección topográfica del K5+855 tiene una altura de 3m aproximadamente y en ella se plantea el análisis para una tablestaca UC-50. Los resultados del análisis numérico para esta sección se presentan en la Figura 12.

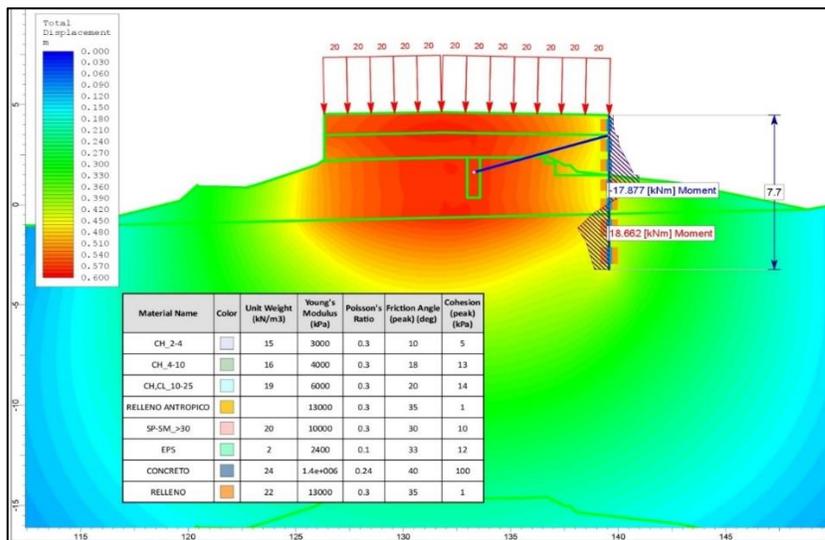


Figura 12. Resultado del análisis numérico (momentos sobre la tablestaca UC-50) para la sección K5+855. Etapa final

En la siguiente figura se presentan los resultados en términos de los momentos, cortantes y desplazamientos sobre la tablestaca.

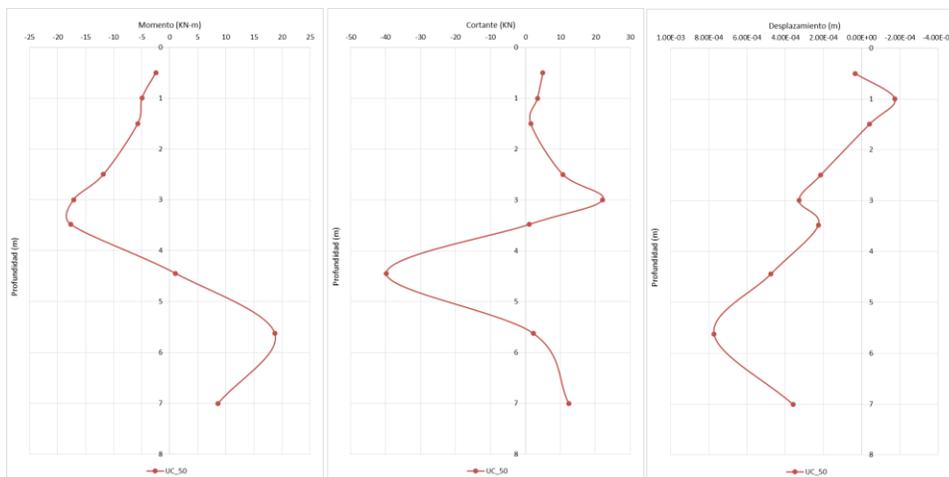


Figura 13. Momentos, cortantes y desplazamientos sobre las tres tipologías de tablestaca.

El momento máximo que se presenta es menor al admisible para una tablestaca UC-50. De igual manera el desplazamiento máximo se presenta en la zona de empujes pasivos, toda vez que los empujes generados de manera inmediata por el poliestireno expandido son mínimos. Como en las dos secciones analizadas anteriormente, las solicitaciones van a aumentar en la medida que el relleno se consolida, por la generación de empujes activos debido a la consolidación del terraplén.

### 5. ANÁLISIS DE EQUILIBRIO LIMITE – ESTABILIDAD EXTERNA

Se analiza la estabilidad de la estructura en términos del equilibrio de fuerzas a partir de un análisis límite mediante el uso del software SLIDE V6 de ROCSCIENCE Inc.

Para determinar el cortante resistente de la tablestaca, se calcula el empuje pasivo por y debajo de la zona en voladizo y este valor se ingresa como el valor resistente de la estructura.

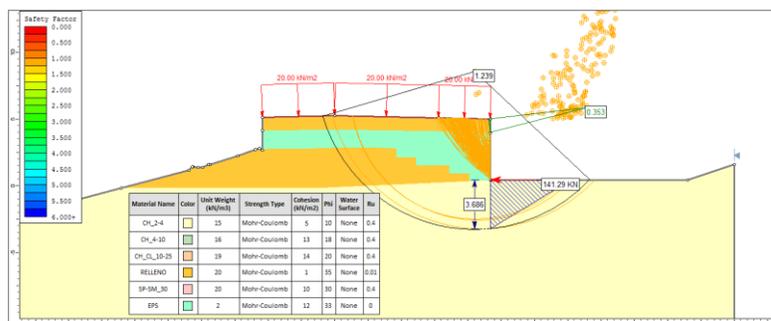


Figura 14. Fuerza resistente a partir del empuje pasivo para la sección K5+875 (ROTHERM INGENIERIA SAS)

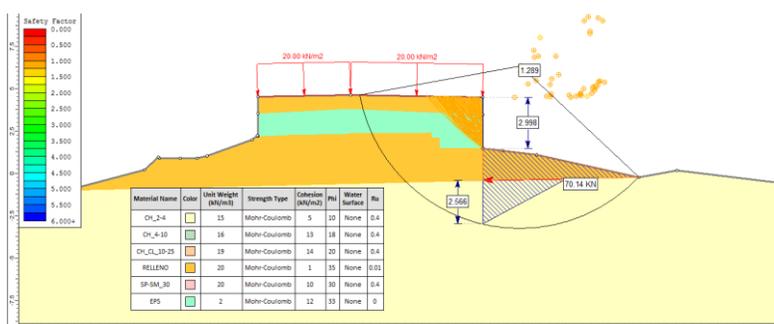


Figura 15. Fuerza resistente a partir del empuje pasivo para la sección K5+855 (ROTHERM INGENIERIA SAS)

Para el caso de la sección K5+855 se toma el aporte pasivo únicamente de la zona por debajo del relleno antrópico, dado que este material tiene características heterogéneas y es susceptible a erosionarse por acción del movimiento de la ciénaga.

### 5.1. Sección K5+875

Esta sección registra la mayor altura del proyecto. Los resultados del análisis límite en condición estática y pseudo estática se presentan a continuación:

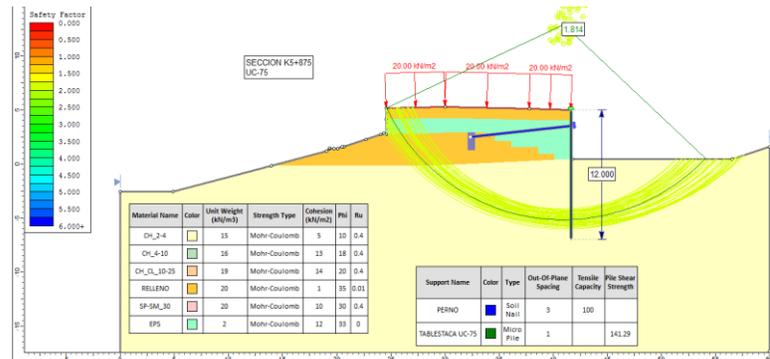


Figura 16. Análisis de equilibrio en condición estática sección K5+875. FS=1.814 (ROTHERM INGENIERIA SAS)

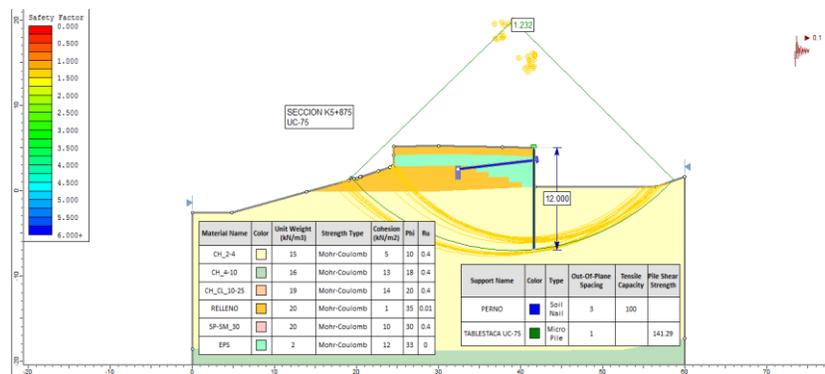


Figura 17. Análisis de equilibrio en condición pseudo estática sección K5+875. FS=1.232 (ROTHERM INGENIERIA SAS)

Se observa que el factor de seguridad obtenido en condición estática y pseudo estática es mayor que la recomendación mínima de la normativa colombiana, confirmando así la estabilidad de la estructura ante las solicitaciones del proyecto.

### 5.2. Sección K5+855

Esta sección corresponde al segundo tramo de la sectorización por alturas que se hizo del proyecto y registra una altura máxima de 3.0m. Los resultados del análisis de equilibrio se presentan a continuación:

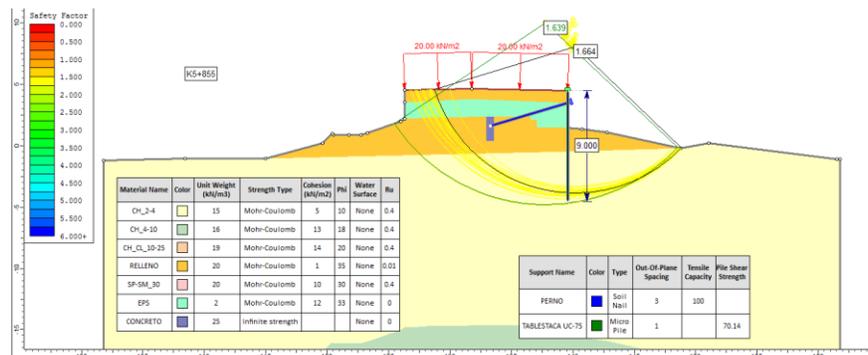


Figura 18. Análisis de equilibrio en condición estática sección K5+855. FS=1.639 (ROTHERM INGENIERIA SAS)

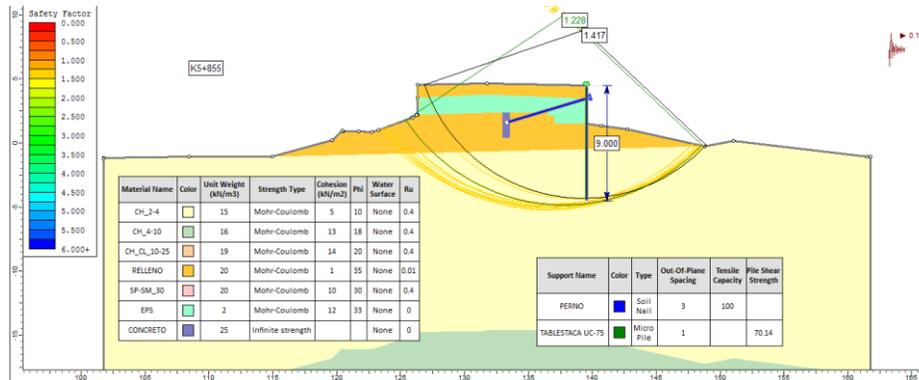


Figura 19. Análisis de equilibrio en condición pseudo estática sección K5+855. FS=1.228 (ROTHERM INGENIERIA SAS)

Nuevamente se confirma que el factor de seguridad en los dos escenarios es mayor a lo que recomienda la normativa colombiana. Sin embargo, fue necesario incrementar la longitud de la tablestaca para la sección K5+855 de 7.7m a 8.0m, con el fin de garantizar los factores de seguridad que establece la normativa adoptada.

## 6. ASENTAMIENTOS

Ya que la etapa crítica del comportamiento de la estructura resulta ser el mediano y largo plazo, luego de que se desarrollen las deformaciones del relleno, es importante determinar cómo es la evolución de los asentamientos con el tiempo.

Los parámetros elásticos y de compresibilidad fueron tomados de los resultados de laboratorio para las perforaciones adyacentes a la estructura proyectada. La altura de terraplén se toma como la mayor de las secciones transversales correspondientes al tramo a intervenir, la cual resulta ser de 5.0m. Adicionalmente se incluye la sobrecarga de tráfico con un valor de 20kN/m<sup>3</sup>

Se observa que el máximo valor de asentamiento es de 0.237m para un tiempo de 30 años. En los análisis se puede apreciar que el 75% de los asentamientos totales se presenta en el primer año de la estructura. Por su parte, para un periodo de 10 años ya se habrá desarrollado el 80% de las deformaciones.



Figura 20. Obra en funcionamiento

## 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

- Los sistemas de tablestacados sintéticos resultan una alternativa técnica y económicamente viable, con una vida útil prolongada en ambientes agresivos como los que se presentan en cercanías al mar.
- El uso de geosintéticos permite encontrar soluciones efectivas para proyectos de alta complejidad, en este caso el uso de relleno aligerado con EPS, permitió atender los asentamientos dentro de rangos tolerables para las cargas impuestas por las estructuras.
- Los tablestacados sintéticos, poseen poco mantenimiento comparado con los tablestacados metálicos, siendo amigables con el medio ambiente y siendo idóneo su uso en ecosistemas marinos.

## 8. REFERENCIAS

- Diseños ROTHEM Ingeniería SAS 2016, empresa proyectista de la obra.
- BOWLES, J. (1996), "Foundation Analysis and Design" 5th Edition, McGraw-Hill.
- DAS, B. (2001), "Fundamentos de Ingeniería Geotécnica", Thomson Learning.
- DAS, B. (2001), "Advanced Soil Mechanics", Taylor & Francis.
- KRAMER S. 1996 "Geotechnical Earthquake Engineering". Prentice Hall
- <http://cmisheetpiling.com/>