



Recomendaciones generales para la protección de orillas ribereñas y taludes portuarios mediante el uso de encofrado geotextil para hormigonado como alternativa a sistemas de enrocado

F. Ruiz y D. Fernández

fernando@huesker.com.br; daniel@huesker.com.br

Huesker Ltda.

A. Curiel

info@america.com.uy

América Tecnología y Servicio

RESUMEN: La utilización de encofrados geotextiles en proyectos de ingeniería costera como solución de protección y control de erosión frente a solicitaciones hidráulicas naturales tales como corrientes u oleajes, así como las generadas por la operación de embarcaciones de diversos tipos (de propelas, a chorro, con impulsores de proa), ofrece ventajas desde el punto de vista técnico y económico, en el sentido optimizar el uso de materiales (i.e. enrocado), minimizar o evitar por completo la realización de trabajos de dragado y/o movimiento de tierras, reducir costos de construcción, impactos ambientales y facilitar los procedimientos de instalación inclusive bajo agua. Un dimensionamiento adecuado de este tipo de revestimientos deberá incluir la verificación de su estabilidad mediante el análisis de varios mecanismos potenciales de falla, incorporando las características propias de la operación de las embarcaciones y parámetros hidráulicos típicos tales como la velocidad de flujo o la altura significativa de ola. Con el objetivo de abordar estos aspectos y ofrecer recomendaciones generales para emplear en diseño, este artículo presenta los principales elementos técnicos a ser analizados en este tipo de obras y las metodologías de cálculo comúnmente adoptadas. Algunos proyectos desarrollados recientemente con este sistema son brevemente presentados (p.ej. Terminal Saipem Brasil).

Palabras clave: ENCOFRADO GEOTEXTIL - PROTECCIÓN DE ORILLAS - TALUDES - ATRACADEROS

ABSTRACT: The use of geotextile flexible formwork in coastal engineering provides several economical and technical advantages such as the optimization of construction materials, the possibility to minimize or avoid the dredging and earth movement activities, the reduction of costs and environmental impacts and ease of installation even in underwater conditions. Geotextile formwork can be subjected to natural occurring hydraulics actions such as currents and waves as well as against the actions resulted of the operation of a variety of vessels (propeller, jet and bow thrusters). An adequate design of this type of scour protection must be included in the stability analysis of various potential failure mechanisms, taking into account the characteristics of vessels operation as well as a set of typical hydraulic parameters such as flow velocity and significant wave height. In order to discuss these aspects and to

describe some general recommendations to be considered in design, this article presents the main technical fundamentals to be analyzed in this kind of jobs, including the methodologies commonly employed. Some projects recently developed with this technique are briefly presented (e.g Saipem Terminal, Brazil).

KEY WORDS: GEOTEXTILE FORMWORK - RIVERINE PROTECTION - SLOPES – WHARVES

1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento comercial global experimentado en las últimas décadas ha promovido la imposición de nuevas exigencias logísticas y de navegación a nivel mundial, generando modificaciones importantes en las especificaciones técnicas de las embarcaciones fluviales y marítimas convencionales, además de convertir en imperiosa la necesidad de mejoramiento y renovación de la infraestructura portuaria. En un intento de adaptarse a dichos cambios, se han desarrollado embarcaciones con calados cada vez mayores provistos de nuevos sistemas de propulsión más potentes (e.g. new Panamax), exponiendo a lechos y taludes de estructuras de atracación componentes de esta infraestructura a solicitaciones de socavación más intensas no consideradas en el pasado.

Dentro de los diversos sistemas de protección contra la erosión proyectados con el objetivo de evitar o minimizar daños potenciales en dichos lechos y taludes se pueden listar de manera general:

- Sistemas de enrocado convencionales (rip rap – armaduras)
- Revestimientos de concreto hormigonado in-situ
- Revestimientos de bloques de concreto prefabricados
- Colchones de gabiones
- ‘Colchones’ geosintéticos

La utilización de los encofrados geotextiles (i.e. ‘colchón’ geosintético para hormigonado) para la conformación de dichos revestimientos como alternativa a los sistemas convencionales puede ofrecer importantes efectos beneficios desde el punto de vista económico y ambiental, posibilitando la construcción de sistemas de protección en situaciones con indisponibilidad de material rocoso o en las que el tamaño de los elementos proyectado se torne inviable desde el punto de vista práctico.

El desarrollo de nuevos métodos de cálculo ajustados a las nuevas configuraciones de embarcaciones sumado al amplio número de experiencias exitosas realizadas con esta opción de revestimiento en los últimos 50 años ha contribuido a su creciente utilización. De esta forma, el presente artículo describe las características principales de este tipo de revestimiento junto con los elementos de dimensionamiento básicos para su consideración como sistema de protección de fondo y talud en estructuras de atracación. Algunos casos de obra son igualmente presentados, describiendo en mayor detalle la solución de protección adoptada para el muelle principal del Terminal Portuario de Saipem, localizado el municipio de Guarujá, Brasil.

2. SISTEMAS DE ENCOFRADO GEOTEXTIL

Los denominados 'colchones' geotextiles consisten en estructuras tridimensionales que funcionan como encofrado perdido. Están constituidos por dos capas de tejidos sintéticos de alta tenacidad conectadas por cintas espaciadoras. Luego de su llenado (con concreto fino o mortero fluido), es conformada una estructura de revestimiento, sellado y control de erosión de espesor determinado por la longitud de estos hilos internos. Gracias al desarrollo tecnológico de los últimos años la manufactura de colchones con diferentes características geométricas (espesor), hidráulicas (permeabilidad) y mecánicas es posible, disponiendo de una diversidad de tipos dependiendo de la aplicación y de las solicitaciones a las que estará expuesto el revestimiento.



Figura 1. Colchones geosintéticos para hormigonado (*Geotextile concrete mattress*).

De manera general, los colchones son típicamente conformados mediante el bombeo de microconcreto producido con una relación arena-cemento de 2:1 en una mezcla de 35 N/mm² de resistencia a la compresión. Además de su función de vinculación estructural, los geotextiles que conforman el encofrado impiden pérdidas importantes de la mezcla durante el llenado por lavado de cemento (abertura de poros apropiada). Las juntas constructivas entre los diferentes paños de material geotextil necesarias para conformar megapanes de instalación son formadas mediante cremalleras o costuras especiales que garantizan una apropiada vinculación entre los módulos a ser hormigonados. De igual forma, en el caso de suelos de apoyo con alto potencial de asentamientos, juntas especiales de movimiento pueden ser fácilmente incorporadas.

2.1. Principales tipos

Existen diversos tipos de encofrados geotextiles dependiendo de las condiciones hidráulicas locales y del tipo de aplicación necesaria para conformar la protección (Ver Figura 2). A continuación se presenta una breve descripción de las principales configuraciones:

2.1.1. Colchón de sellado

Presenta un espesor constante y uniforme en toda su sección transversal. Es normalmente utilizado en lechos portuarios y taludes sumergidos de forma permanente (nivel de agua constante). Este tipo de revestimiento es apto para resistir altas velocidades generadas por propelas y chorros con espesores relativamente bajos en comparación con sistemas de enrocado. Los espesores típicos varían entre 10 y

60 cm, teniéndose un valor mínimo recomendable de 20 cm para protecciones de fondo en lechos de muelles.

2.1.2. Colchón Flexible

Consiste en una matriz de módulos intermedios articulados por aristas de corte que le proveen cierta flexibilidad. Adicionalmente presenta múltiples puntos de drenaje y filtración en su estructura. Es empleado mayoritariamente para conformar coberturas altamente resistentes a cargas hidrostáticas elevadas, pudiendo eventualmente sustituir corazas de roca en espigones y rompeolas.

2.1.3. Colchón Puntos filtrantes

Su configuración es indicada para promover una rápida reducción de presiones hidrostáticas a través de puntos de drenaje. De igual forma, la permeabilidad de los geotextiles constituyentes permite su colocación en taludes sometidos a variaciones en el nivel de agua, pudiendo resistir variaciones de mareas con alturas significativas de ola de hasta 1,5 m. En algunas ocasiones se incorporan capas geotextiles en la parte posterior del colchón para aumentar la eficiencia de la protección en aplicaciones de largo plazo.

2.1.4. Colchón de vegetación

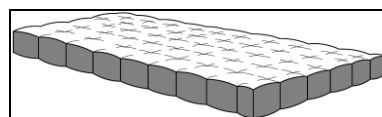
Consiste en una forma para hormigonado en malla tubular con zonas centrales vacías para facilitar el crecimiento de vegetación. Su utilización típica es la protección de las zonas superiores de taludes y orillas por encima del nivel de agua característico del cuerpo de agua.

2.2. Principales aplicaciones

Las principales funciones de los encofrados geotextiles para concretado son la protección y el control de erosión en obras fluviales y costeras sujetas a elevadas cargas hidráulicas naturales y artificiales, dentro las cuales se incluyen revestimiento de taludes y fondo de canales, revestimiento márgenes de ríos, diques, ataguías, rompeolas y espigones, conformación de sistemas de control de flujo (impermeabilización), revestimiento de lagos y reservorios, protección de lechos fluviales y marítimos (muelles), tanques de tormenta (amortiguación) y embalses de retención secciones de avenidas en presas – aliviaderos.

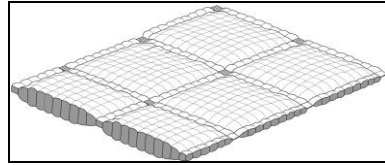


- Espesor final Constante
- Sellado (Impermeabilización)

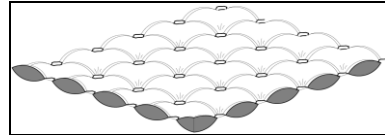




- Módulos flexibles
- Aristas articuladas drenantes



- Múltiples puntos de drenaje



- Formato tubular en grilla
- Aperturas centrales para vegetación

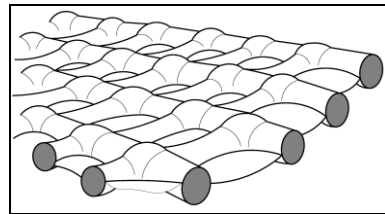
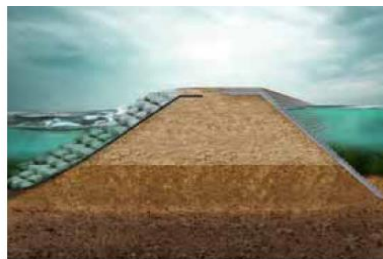


Figura 2. Principales tipos de encofrados geotextiles para hormigonado – De arriba para abajo: Colchón de sellado, colchón flexible, colchón de puntos filtrantes y colchón para vegetación.



Protección de márgenes



Canales



Protección de lecho

Figura 3. Principales aplicaciones de los colchones geosintéticos para concretado.

2.3. Ventajas técnicas, económicas y ambientales

Los colchones geotextiles se han mostrado especialmente versátiles para la protección de lechos y taludes en estructuras portuarias tales como muelle de atracación, donde el impacto erosivo del tránsito de embarcaciones es significativo. A continuación se listan algunas de las ventajas de este sistema en dicha aplicación:

- Facilidad de instalación in-situ bajo agua
- La instalación de textiles livianos es más segura para equipos de buceo comparada con la colocación de sistemas pesados prefabricados
- Conformación de 'placas' de concreto robustas e íntimamente interconectadas con diferentes grados de rigidez (flexibilidad)
- Al contrario de armaduras de enrocado, no sufre desplazamientos por deslizamiento o volteo
- Alta resistencia a oleaje y corrientes artificiales (embarcaciones) – hasta 12,5 m/s
- Alta durabilidad (mayormente dependiente la mezcla de concreto y de las condiciones ambientales locales)
- Permite reducir trabajo de dragados y optimizar la configuración de fundaciones y tablestacados
- Fabricación a medida de los paneles necesarios
- Fácil adaptación a la geometría del terreno (fluidez del mortero)
- Mínimo mantenimiento

Los colchones geosintéticos de concreto tienen un espesor relativamente pequeño comparados con otros sistemas de protección, mostrándose una solución efectiva en términos de costos en situaciones con poca disponibilidad de materiales rocosos o de alto valor. La Figura 4 muestra de manera gráfica la comparación de los espesores de protección necesarios para tres sistemas de revestimiento en función de la velocidad generada por propelas de embarcaciones a nivel de fondo (lecho).

De igual forma, un menor espesor en la protección implica un ahorro económico significativo en la concepción de estructuras de contención portuarias mediante la optimización de pilotes y tablestacados, así como la reducción de volúmenes de dragado (Ver Figura 5).

Los encofrados geotextiles son el único sistema que permite la protección de taludes de pendientes pronunciadas (sloping protection) mediante una instalación in-situ que hace viable la construcción de apropiados sistemas de protección contra fenómenos de socavación en su parte inferior (pie de talud).

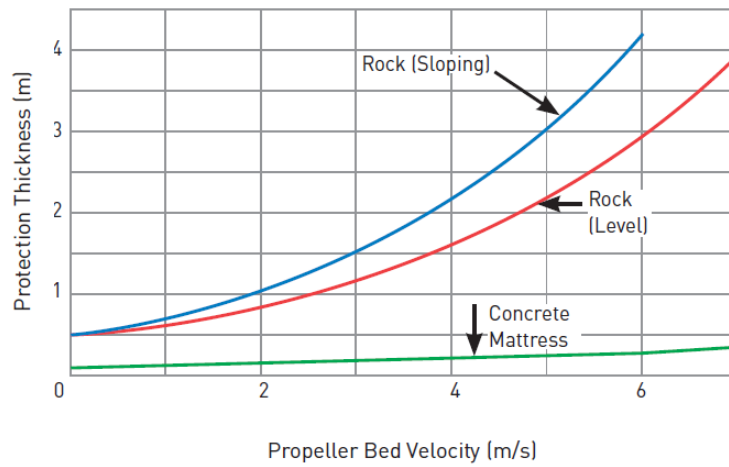


Figura 4. Espesores de protección vs. Velocidad de propelas en el fondo (lecho) para enrocados y colchones de concreto. De Hawkswood et al. (2014).

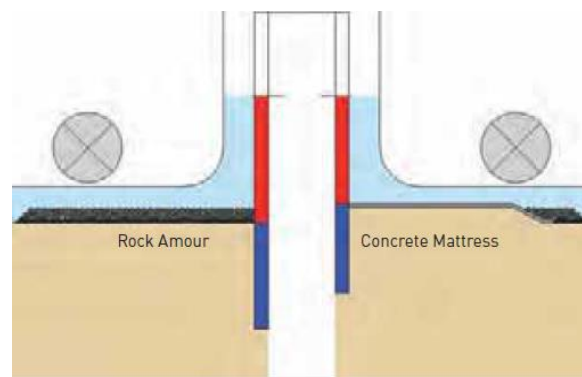


Figura 5. Enrocado vs. Colchones de concreto: Profundidad de tablestacados, espesor, protección de socavación.

La Figura 6 presenta una referencia de los costos de instalación aproximados de revestimientos de enrocado típicos en comparación con el uso de colchones de concreto como elemento de control de erosión en lechos sometidos a la operación de embarcaciones impulsadas por propelas.

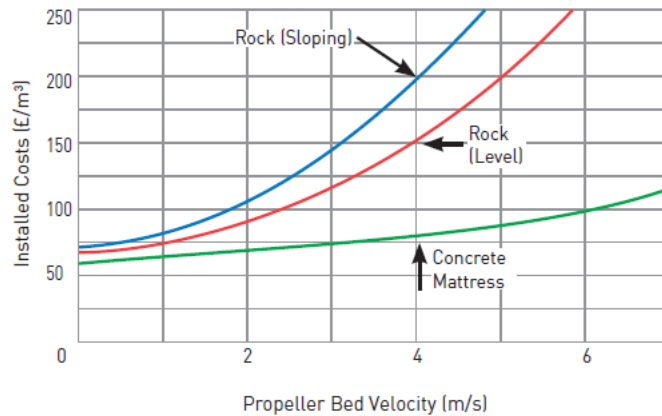


Figura 6. Costos de instalación vs. Velocidad de propelas en el fondo (lecho) para enrocados y colchones de concreto. De Hawkswood et al. (2014).

3. ASPECTOS GENERALES DEL DIMENSIONAMIENTO

Para el diseño de colchones geosintéticos de concreto existen diversos métodos de dimensionamiento bien consolidados para la evaluación de solicitaciones tanto de flujos hidráulicos en ríos y canales artificiales, así como solicitaciones de olas. Wellicome (1981) propuso un método de diseño para sistemas de revestimiento con baja permeabilidad sometido a tales solicitaciones. Marin (2014) demostró la magnitud de las solicitaciones de un flujo altamente turbulento en el lecho de una estructura de atracación. En Hawkswood et al. (2014) es presentada una compilación de los principales aspectos de análisis de revestimientos considerando la operación de embarcaciones modernas. A continuación se presenta una breve descripción de las principales verificaciones estabilidad y de los parámetros mayormente involucrados en dicha evaluación.

3.1. Diseño ante la acción de flujo hidráulico

Para el diseño de colchones geosintéticos cuando sometidos a un flujo (corriente) donde la velocidad es conocida o puede ser calculada con exactitud, la formulación de Pilarczyk (2000) puede ser empleada para determinar la estabilidad del revestimiento, la cual es definida mediante la siguiente relación:

$$\Delta D = 0,035 \frac{\Phi K_T K_h u_{cr}^2}{\psi K_s 2g} \quad (1)$$

donde:

D es el espesor promedio del revestimiento [m],

Δ es la densidad relativa entre el colchón y el agua [-],

Φ es el parámetro de estabilidad [-],

Ψ es el parámetro crítico de Shields [-],
 K_T es el parámetro de turbulencia [-],
 K_h es el parámetro de profundidad [-],
 K_s es el parámetro de estabilidad en el talud/orilla [-],
 u_{cr} es la velocidad crítica [m/s],
 g es la aceleración de la gravedad [m/s²].

El parámetro de profundidad, K_h , es dependiente de la profundidad, del desarrollo del perfil de velocidad y de la rugosidad del revestimiento. Así, este parámetro puede ser definido como sigue:

- Perfil desarrollado

$$k_h = \frac{2}{\left(\log\left(\frac{12h}{k_s}\right)\right)^2} \quad (2)$$

- Perfil no desarrollado

$$k_h = \left(\frac{h}{k_s}\right)^{-0.2} \quad (3)$$

- Flujo muy turbulento ($h/k_s < 5$)

$$k_h = 1,0 \quad (4)$$

dónde:

h es la profundidad de la agua [m],

k_s es la rugosidad equivalente de acuerdo con Nikuradse [m].

La estabilidad del revestimiento es dependiente de la relación entre el ángulo de fricción interno del material de llenado y el talud en el cual está apoyado. El parámetro de estabilidad del talud, K_s , lleva en consideración este efecto, siendo definido por:

$$K_s = \sqrt{1 - \left(\frac{\sin \alpha}{\sin \theta}\right)^2} = \cos \alpha \sqrt{1 - \left(\frac{\tan \alpha}{\tan \theta}\right)^2} \quad (5)$$

donde:

α es la inclinación del talud a ser revestido [°],

θ es el ángulo de fricción interna del material de llenado [°].

PIANC (2015) recomienda valores para los parámetros de estabilidad, crítico de Shields, de inclinación del talud y de turbulencia. Para el caso de flujo muy turbulento inducido por propulsores de embarcaciones los parámetros propuestos no son validados.

3.2. Diseño ante la acción de oleaje

De forma similar la estabilidad cuando es sometido a un flujo, la formulación unificada de Pilarczyk (1990) puede ser aplicada para el caso de acción de oleajes. Sin embargo, el único parámetro adimensional de estabilidad pasa a ser adoptado. De esta forma, la estabilidad del revestimiento puede ser obtenida a través de:

$$\frac{F}{\xi_{op}^{2/3}} = \frac{H_s}{\Delta D} \quad (6)$$

donde:

H_s es la altura significativa del oleaje [m],

Δ es la densidad relativa entre colchón y el agua [-],

ξ_{op} es el parámetro de arrebentación de olas [-],

F es el parámetro de estabilidad del revestimiento [-].

3.3. Diseño ante la acción de propulsores de embarcaciones

Para el diseño de colchones geosintéticos para estructuras de atracación Hawkswood et. al. (2014) describe la sollicitación de succión debajo de propulsores de embarcaciones como siendo el principal mecanismo de falla. Se considera la protección contra socavación como un panel cuadrado con lado equivalente a 45 veces el espesor del colchón. El peso requerido y consecuente espesor del revestimiento pueden ser determinados a través de la siguiente relación:

$$D_{min} = \frac{FS A S_p J_q}{\gamma_d \Delta g} \quad (7)$$

dónde:

D_{min} es el espesor mínimo,

FS es el factor de seguridad considerado,

A es el factor de succión

S_p es la succión máxima por la operación de la embarcación,
 I_q es la ondulación local del colchón,
 Y_d es el factor de minoración del peso del colchón.

4. CASOS DE ESTUDIO

4.1. Terminal Saipem – Guaruja, Brasil

El emprendimiento de la empresa Saipem de Brasil localizado en el municipio de Guaruja (estado de San Pablo) está compuesto por una planta de fabricación de ductos para exploración de petróleo en aguas profundas. La principal dificultad enfrentada durante su construcción consistió en el transporte de materias primas y materiales acabados hasta el patio de fabricación, teniendo en vista las restricciones a la circulación de vehículos pesados impuestas por el municipio.

Para solucionar dicha problemática, fue implantado un terminal para atracación de balsas transportando camiones cargados. Los procedimientos de atracación y ‘desatracción’ de dichas balsas generan un flujo muy turbulento provocado por los propulsores de las mismas, el cual combinado a la pequeña distancia libre entre las hélices y el lecho del canal implicaba un gran potencial erosión en el fondo, exponiendo eventualmente al tablestacado de contención lateral proyectado para el muelle de atracación en el caso de que no fuera controlado. De esta forma, la empresa Saipem proyectó un sistema de protección contra la erosión consistente en colchones de concreto posicionados a lo largo de la estructura de atracación (Figura 7).

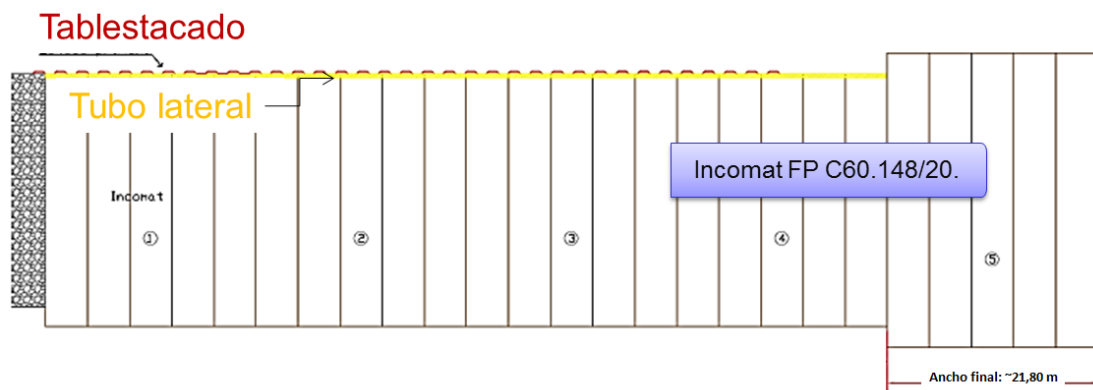


Figura 7. Esquema general de la solución de protección de fondo con colchones geosintéticos.

Como encofrado perdido fue utilizado un colchón geotextil de poliéster con puntos filtrantes, presentando un espesor promedio luego de su llenado de 17 cm. Los puntos filtrantes permitieron la consolidación del suelo del lecho y el alivio de presiones hidráulicas. Fueron utilizados paneles prefabricados en dos configuraciones diferentes, ambos con anchos de 25,0 m y longitudes variando entre 30,0m y 35,0m. Fue proyectado un tubo lateral de lastre (llenado con la misma mezcla de

concreto) para facilitar el hundimiento de los respectivos paneles durante el bombeo del concreto. Su configuración fue definida luego de llevar a cabo una prueba piloto de llenado en tierra (Ver Figura 8).



Figura 8. Prueba piloto en tierra – evaluación del tubo de lastre.

Mangueras flexibles para bombeo de mortero fino (microconcreto) fueron introducidas en los paneles a través de las bocas de llenado manufactureras con mantos geotextiles. Los paneles fueron entonces enrollados y posicionados para el llenado con mortero bombeado desde la orilla a través de un camión mixer convencional.



Figura 9. Preparación de las tuberías flexibles de llenado dentro del encofrado geotextil.



Figura 10. Preparación de los paneles en tierra.



Figura 11. Posicionamiento del encofrado mediante el auxilio de embarcaciones.



Figura 12. Llenado mediante bomba de concreto desde tierra.

4.2. Control de erosión en muelle Shell - Londres, Inglaterra

El muelle de atracación existente de Shell en la entrada fluvial a la ciudad de Londres fue profundizado con el objetivo de ser apto para recibir embarcaciones de mayor calado. Dicha mudanza requirió de un mejoramiento en el sistema de revestimiento antiguo de los taludes, siendo proyectado frente a la acción erosiva de nuevos impulsores de proa de gran potencia propios de embarcaciones modernas. Las condiciones de instalación eran bastante complejas con presencia de corrientes con velocidades de flujo de 1,6 m/s y una altura de ola de diseño de 1,1 m. Una nueva campaña de investigación geotécnica confirmó que los taludes originales estaban conformados por una capa superior de limos blandos hasta 1,5 m de espesor, altamente erosionables. Un encofrado geotextil de 150 mm de espesor fue utilizado para conformar un revestimiento de concreto en el sitio, el cual fue adecuadamente diseñado con juntas de control de movimiento para favorecer el desarrollo de grietas centrales y para acomodarse mejor a eventuales asentamientos. El tipo de colchón correspondió al provisto de puntos filtrantes en el rango de mareas vinculado a un geotextil adicional conectado mediante precosturado como elemento filtrante en la parte posterior del mismo. La parte inferior de los taludes sometida a la acción directa de los impulsores bajo agua (erosión por lavado) fue protegida con un colchón de sellado de sección uniforme y constante de 15 cm de espesor.



Figura 13.- Instalación del nuevo sistema de control de erosión en talud portuario - Muelle Shell.

Trincheras de anclaje de pie fueron adecuadamente proyectadas para proteger al revestimiento de socavación posterior. La instalación de los colchones fue planeada apropiadamente mediante la conformación de paneles de geometría específica, lo que favoreció su instalación alrededor de los pilotes existentes en tiempos de obra bastante cortos (períodos de buceo limitados a 1,5 horas).





Figura 14. Otros proyectos portuarios: Atracadero Puerto Tanjung Pelepas, Malasia, Año 2003 (Arriba) – Protección de fondo en Atracadero Puerto de Barcelona, España (Medio) – Puerto de Cotonou, Benin (Abajo).

5. CONCLUSIONES

Fueron presentados brevemente los principales aspectos técnicos de la aplicación de colchones de concreto como sistemas de protección en lechos y taludes de atracaderos abarcando la descripción de sus principales tipos, características y ventajas técnicas, así como la metodología general para su dimensionamiento y análisis como alternativas a sistema de enrocado tradicionales que, de manera general, se han mostrado inviables en términos prácticos cuando se diseñan frente a la acción de solicitaciones provocadas por el desarrollo de nuevas configuraciones de embarcaciones y sistemas de propulsión de mayor potencia. Igualmente, dos casos de estudio representativos fueron descritos presentando las problemáticas particulares y las correspondientes soluciones adoptadas incluyendo algunos detalles de sus desafíos constructivos.

Agradecimientos. Los autores agradecen el apoyo ofrecido por parte de las empresas Huesker Ltda. y América Tecnología y Servicio durante el desarrollo del presente trabajo.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CUR CUR 217: *Ontwerpen met geotextiele zandelementen*, Stichting CUR, Gouda. (2006)
- [2] CUR CUR214: Geotextiele zandelementen, Stichting CUR Gouda. (2004)
- [3] Delft Hydraulics Stability of geotubes and geocontainers, report for Nicolon b.v. Delft. (1994)
- [4] Marin. Testing of Hydrodynamic Bed Loadings From Propellers, Report to Proserve Ltd, Lafeber, F.H. (2014)
- [5] Hawkswood, M.G., Lafeber F.H, Hawkswood, G.M. Berth Scour Protection for Modern Vessels. PIANC World Congress. San Francisco. (2014)
- [6] Hawkswood M.G., P.J. Assinder. Concrete mattress used for berth scour protection, GeoAfrica 2013 Conference Proceedings. (2013)
- [7] PIANC Report no. 113 - 2011: The Application of Geosynthetics in Waterfront Areas, (2011)
- [8] Pilarczyk, K. Geosynthetics and Geosystems. Hydraulic and Coastal Engineering 1st ed., Rotterdam: Balkema. (2000)
- [9] Schiereck G.J., Introduction to bed, bank and shore protection, DUP Blue Print, Delft. (2004)
- [10] U.S. Army Corps of Engineers. Coastal Engineering manual (CEM), (2006)
- [11] U.S. Army Corps of Engineers. SPM: Shoreline Protection manual, Mississippi. (1984)
- [12] Wellicome, J.F. Bottom Suction Loads due to Propeller Scour Action and Ship Movements, www.proserveltd.co.uk, Report to Proserve Ltds. (1981)