

Protección de ribera en la obra de toma de la central térmica de ciclo combinado “Manuel Belgrano”, Campana (Buenos Aires, Argentina)

Coastal protection of the combined cycle thermal plant “Manuel Belgrano” water intake, city of Campana (Buenos Aires, Argentina)

Ignacio Lobo Gutiérrez. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.
Duro Felguera Energía (Gijón, España), ilobo@ciccp.es

Maximiliano Schwerdfeger. Ingeniero Hidráulico por la Universidad de Buenos Aires,
Master of Science por la Universidad IHE de Delft (Holanda)
Excel Consult (Buenos Aires, Argentina), excelconsult@fibertel.com.ar

Resumen: La obra de toma de la Central Térmica de Ciclo Combinado que está construyendo Duro Felguera para el fideicomiso argentino TMB, en Campana, provincia de Buenos Aires, tiene su aducción en una curva pronunciada del río Paraná, en un predio formado por suelos muy blandos hasta 25 m de profundidad. Para prevenir la erosión de esos suelos, se ha diseñado una protección flexible con mantas conformadas por bloques de hormigón unidos a una base de polipropileno, que acompañan dinámicamente la deformación de la costa hasta llegar a un punto de equilibrio. Esta solución presenta claras ventajas frente a la defensa tradicional con tablestacas rígidas.

Palabras Clave: Geomanta; Tablestaca; Obra de toma; Defensa costera

Abstract: The Combined Cycle Thermal Plant which is being built by Duro Felguera Energía S.A. for the Argentine Fideicomiso Termoeléctrica “Manuel Belgrano” (TMB) in the city of Campana, province of Buenos Aires (Argentina), has its water intake at the right margin of a very closed meander of the Parana River in a field formed by very soft soils till 25m deep. To control the future analyzed erosion phenomenon, a flexible revetment was designed, formed by concrete blocks joined to a very high resistance polypropylene geotextil, which follows the dynamic deformation of the coast to reach a final equilibrium position. This solution presents clear advantages compared to the traditional rigid sheetpiles.

Keywords: Geotextile; sheetpiles; water intake; Coastal protection

1. Introducción

Duro Felguera Energía S.A. está construyendo para el Fideicomiso Termoeléctrica Manuel Belgrano (TMB) una Central Térmica de Ciclo Combinado en Campana, provincia de Buenos Aires (Argentina), en la orilla derecha del río Paraná de Las Palmas. El consorcio encargado del proyecto y construcción llave en mano de la CTCC está liderado por Siemens Power Generation, autor de la ingeniería básica y proveedor de las turbinas y otros equipos especiales, e integrado por Duro Felguera Ener-

gía (DFE) y Soluciones Energéticas Argentinas (SEASA), empresa constituida por Duro Felguera y Electroingeniería al 65-35%. El desarrollo de la ingeniería de detalle es responsabilidad de Duro Felguera, y la construcción de la CTCC –obra civil y montajes industriales– está repartida entre DFE (suministros off-shore) y SEASA.

La termoeléctrica se ubica en el partido de Campana, 75 km al noroeste de Buenos Aires.

La CTCC consta de dos turbinas de 278 Mw diseñadas para funcionar con gas natural, pero dotadas de quemadores para funcionar alternativa-

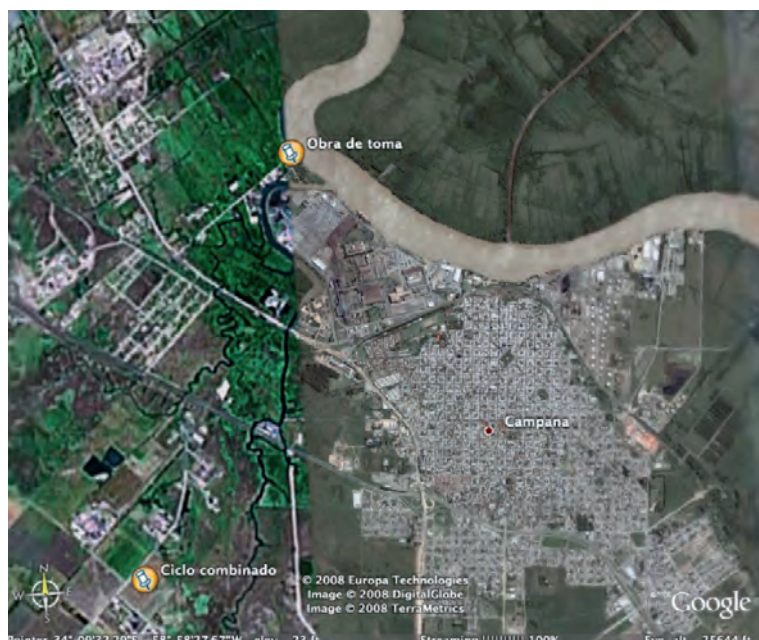


Fig. 1. Situación de la Termoelectrica y la obra de toma.

mente con gasoil. Los gases de la combustión, a una temperatura de 540° , se conducen a sendas calderas de recuperación, donde su calor se aprovecha para generar vapor de agua en ciclo cerrado; la temperatura de los gases después del intercambio se rebaja hasta 150° y a esta temperatura se arrojan a la atmósfera. El vapor generado en las calderas de recuperación mueve una turbina de 271 Mw.

La potencia total del ciclo combinado es pues de 828 Mw, casi el doble que la Central Nuclear de Santa María de Garoña (466 Mw) y próxima a la potencia de un grupo de Almaraz (980 Mw), y superior a todas las centrales de ciclo combinado construidas hasta la fecha en España.

Para refrigerar la turbina de vapor, regular el funcionamiento de las turbinas de gasoil y usos varios, se precisa un caudal de agua de $1.520 \text{ m}^3/\text{hora}$, que se toman en un predio del río Paraná, a 7,6 km de la termoelectrica. El agua se toma del río por gravedad y se bombea hasta la CTCC por una conducción integrada por dos tuberías de fundición de 600 mm de diámetro, como se aprecia en la planta general de la figura 1.

La conducción (*acueducto* en Argentina) discurre en zanja, salvando un desnivel de 12 m desde la cántara de bombeo hasta el clarificador de una planta de pretratamiento construida en la CTCC. El

agua de reposición del circuito de refrigeración, la de incendios y la de usos varios se clarifica sencillamente; el agua de inyección en las turbinas de gasoil debe ser también desmineralizada.

En la figura 2 se muestra una planta general del *acueducto*, cuyos puntos singulares son tres cruces bajo carreteras de distinta importancia, un cruce bajo el ferrocarril y un cruce bajo un arroyo. Todos los cruces especiales se realizaron con hincas parabólicas teledirigidas, en las que se sustituyó la fundición por PVC. En paralelo a las tuberías para bombeo de agua, se instaló una conducción eléctrica para una alimentación de 6,6 kV, que garantiza un suministro alternativo para la toma, cuya alimentación prioritaria se toma de una línea aérea.

En la figura 3 se muestra una fotografía aérea de las obras de la Termoelectrica en construcción. En primer término aparecen los tres tanques de almacenamiento de gasoil para funcionamiento alternativo de las turbinas del ciclo simple, con 7.500 m^3 de capacidad cada uno; el consumo a plena carga de cada turbina es de $60 \text{ m}^3/\text{hora}$. Al fondo se divisa la subestación eléctrica, de donde parten las líneas de conexión a la red de transporte, de 500 kV.

2. Entorno geotécnico e hidrológico

Por condicionantes de proyecto, el predio concedido para ubicar la toma se encuentra aguas arriba de la desembocadura del arroyo de la Cruz e inmediatamente aguas abajo de la curva del Paraná de Las Palmas denominada "vuelta del este", aproximadamente en el km 100 de la hidrovía Santa Fe – Océano.

El perfil geotécnico del predio presenta un primer nivel de arcillas y limos arenosos de baja plasticidad y consistencia media, de 5-6 m de potencia, por debajo del cual hay un nivel de limos y arcillas de plasticidad variable y consistencia muy blanda. A partir de los 26 m de profundidad aparece un horizonte de arenas finas, densas o muy densas, que es donde se cimentaron los edificios de la toma. La cota del terreno es aproximadamente +2,50 m sobre el nivel del mar (IGM), y el nivel medio del río es el +1,00 IGM (permanencia del 99% del tiempo). El nivel de máxima crecida en la avenida de 100 años es +4,50 m IGM, razón por la cual la solera de los edificios se dispuso a la cota +4,65 IGM.

ACUEDUCTO TOMA DE AGUA

Planta esquemática general, octubre 2008

Termoeléctrica MANUEL BELGRANO

SEASA



Fig. 2. Planta esquemática de la impulsión.

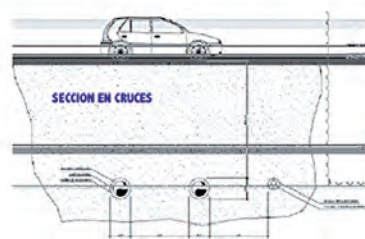




Fig. 3. Vista general de las obras en julio de 2008.

En la figura 4 se adjunta un perfil geotécnico de la zona, compuesto por la integración de tres sondeos.

El río Paraná de Las Palmas es uno de los brazos principales de la desembocadura del río Paraná, cauce amplio y sinuoso, de márgenes relativamente estables. 20 km aguas abajo de la toma confluye con el río Uruguay, tras el pintoresco delta de Tigre, para formar el río de la Plata, que baña las ciudades de Buenos Aires y Montevideo. En la zona de estudio la dinámica fluvial está dominada por la presencia del meandro denominado “Vuelta del Este”, que se extiende en una longitud de 2 km con un radio de curvatura de aproximadamente 450 m. En la figura 5 se muestra la planta actual del río en la zona de la toma, y en la figura 6 se muestra una fotografía aérea del río, que en la actualidad es navegado por buques Pánamax de hasta 230 m de eslora, convoyes de empuje de hasta 236 m de eslora y 50 m de manga, y buques menores.

En las figuras 7 y 8 se muestra un perfil transversal del río enfrente de la toma y una planta general de la batimetría en las inmediaciones de la toma. Como puede apreciarse, el río tiene una anchura de unos 400 m y la profundidad llega a los 42 m. La segunda figura muestra una amplia fosa de erosión que se extiende aproximadamente entre las progresivas 100,6 y 100,2 de la hidrovía y se sitúa desplazada del centro del cauce hacia la orilla externa del meandro; la máxima profundidad de esta fosa alcanza la cota -42,76 IGM a unos 120 m de la margen.

El caudal medio del río Paraná de Las Palmas es de 4.594 m³/s, correspondientes a un nivel IGM de 1,22 m; en la avenida extraordinaria de 1998, de recurrencia próxima a los cien años, se aforaron 10.000 m³/s, con una elevación de 3,03 m sobre el nivel medio del mar. En la figura 9 se representa la distribución espacial de velocidades en aguas medias, en las inmediaciones de la Vuelta del Este. En la curva del meandro el agua tiende a desplazarse hacia el exterior del mismo, donde será mayor su efecto erosivo, mientras los sedimentos se decantan en la margen convexa de la curva. En los últimos 20 años se ha estimado una velocidad de erosión en el exterior de la curva de 1 m anual.

Como puede apreciarse en la figura 9, las líneas de flujo en el exterior de la curva se comban y vuelven ha-

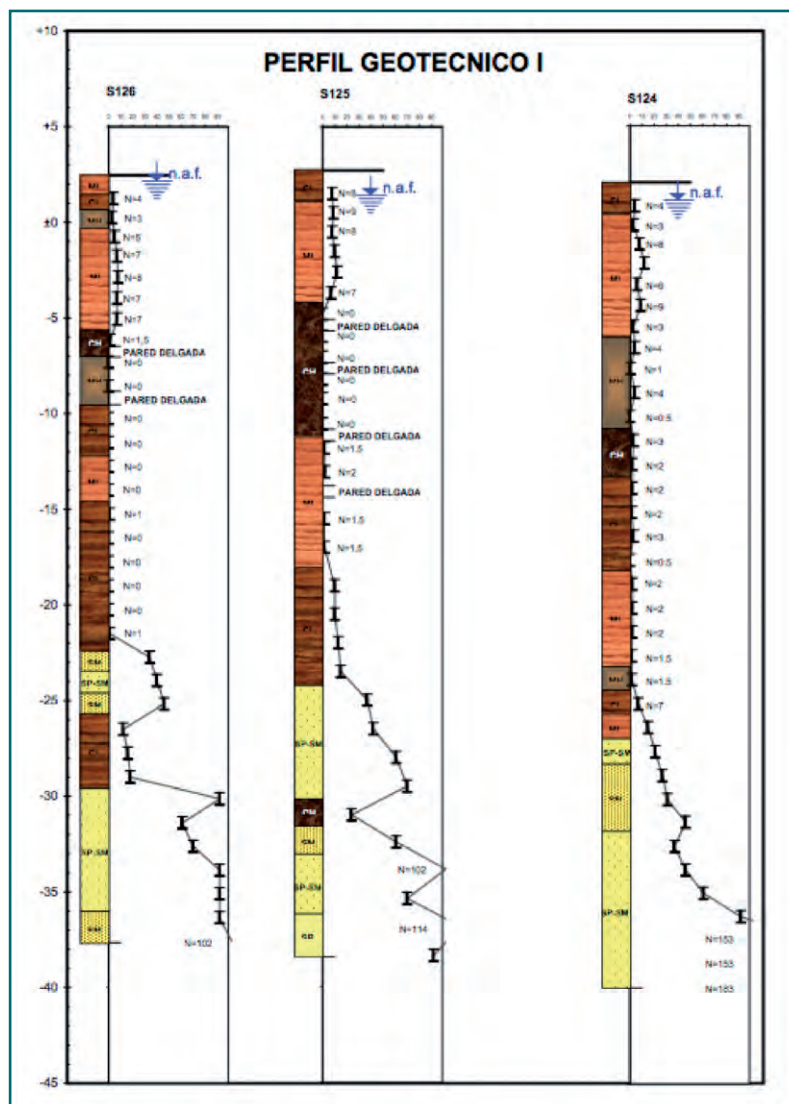
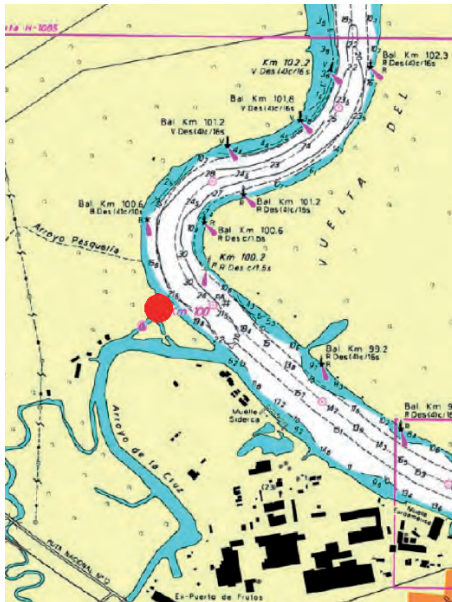


Fig. 4. Perfil geotécnico del terreno en el predio de la toma.



Izda. Fig. 5. Vuelta del Este, en el río Paraná de Las Palmas.

Dcha. Fig. 6. Navegación frente a la toma del Ace Bulquer, buque de 170 m de eslora por 27 m de manga.

cia atrás, es decir, la erosión es regresiva, como se ha apreciado en distintas observaciones realizadas en la zona de la toma.

En la actualidad la zona de la toma y el balneario anexo se encuentra protegida por una pantalla de palos hincados en el lecho del río, que han detenido la erosión provocada por aguas medias y bajas. En las figuras 10 y 11 se aprecia la defensa actual de la ribera. No obstante, esta protección no puede considerarse suficiente para proteger las edificaciones de la toma, cuyo funcionamiento debe estar garantizado durante el 99% del tiempo, puesto que sin agua de refrigeración no es posible el funcionamiento de la turbina de vapor del ciclo combinado en la Termoeléctrica.

res, y de ella partían tres pasillos individuales, protegidos por rejillas de 35 mm de paso con limpiarrejillas automático por gradiente de presión, y compuertas de tajadera.

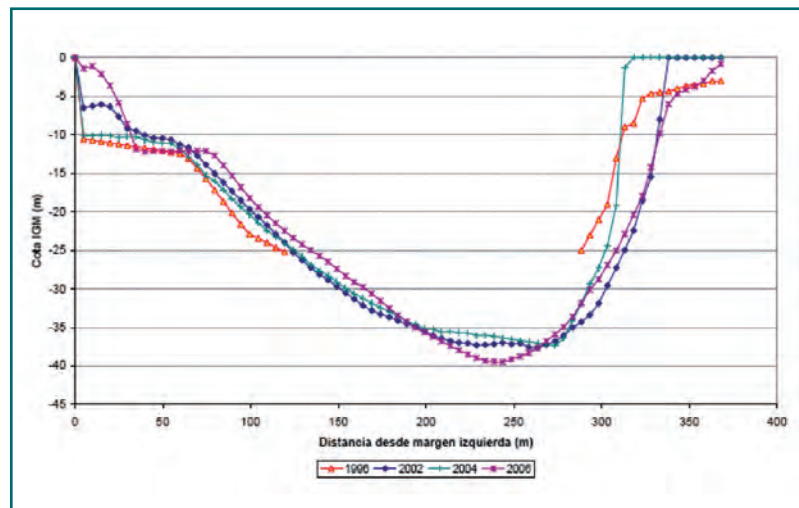
En cada pasillo se ubicaba una bomba de eje vertical, dimensionadas para bombear el caudal de cálculo con una sola bomba (1.520 m³/hora a 95 m de altura manométrica), con la sumergencia requerida por el fabricante (KSB). La aspiración de las bombas estaba protegida por una rejilla de 8 m de paso. La potencia nominal de las bombas es 550 kw y la tensión de alimentación es de 6.600 voltios.

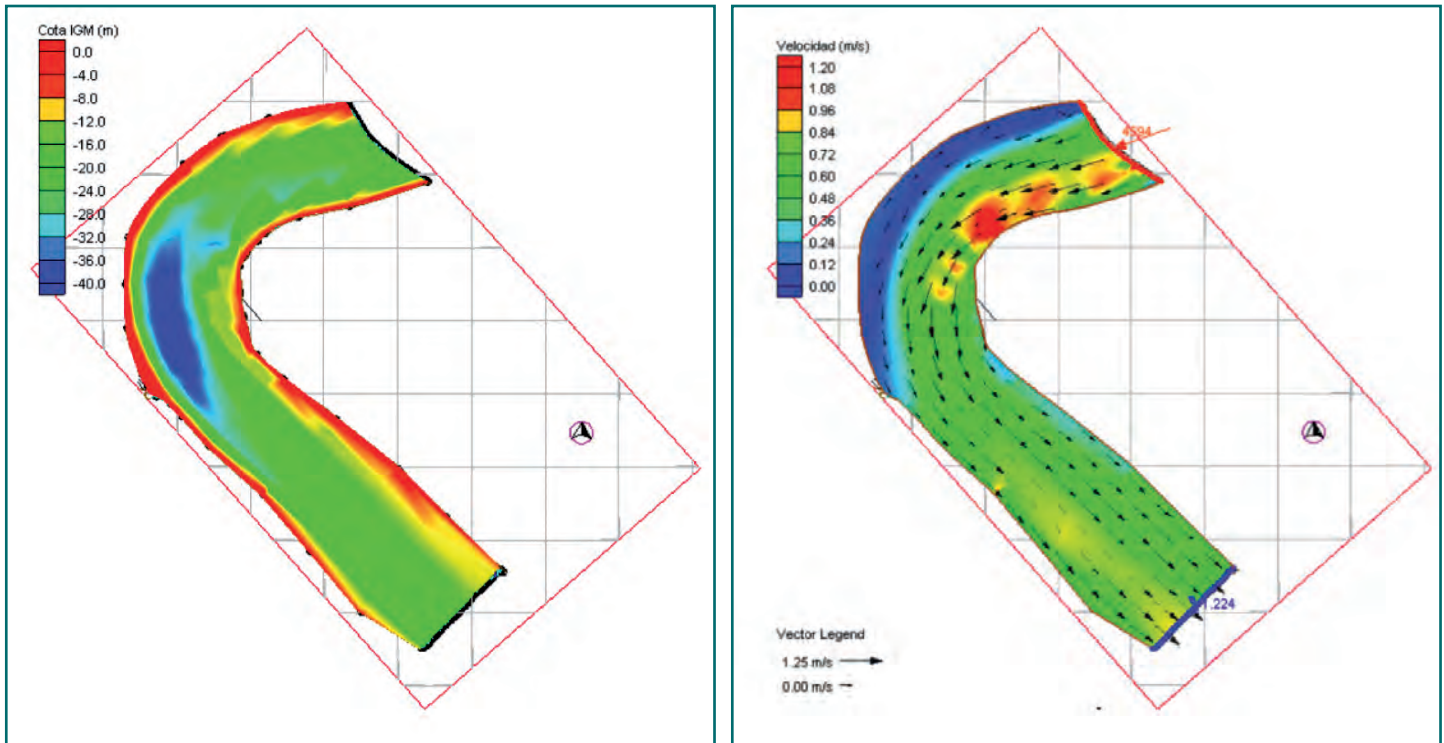
En la figura 12 se muestra una sección del sistema de toma previsto en la ingeniería básica.

Fig. 7. Perfil transversal del río enfrente de la toma, mirando hacia Buenos Aires.

3. Descripción de la obra de toma

La ingeniería básica integrante de la documentación de licitación contemplaba una obra de toma tipo dársena, con una cámara de aducción enrasada con la línea de ribera y protección de ésta mediante pantalla anclada de tablestacas. La cámara de aducción, protegida por una reja de 150 mm de paso y compuertas de tajadera, estaba dividida en tres compartimentos, desde los cuales partían tres tubos de fibra de vidrio de 1000 mm de diámetro, hasta la cántara de bombeo. Esta cántara disponía de una antecámara en la que conflúan los tres tubos anterior-





Izda. Fig. 8. Batimetría del río en las inmediaciones de la Vuelta del Este. Dcha. Fig. 9. Distribución espacial de velocidades medias de flujo en condición de aguas medias.

El conjunto de edificios del bombeo comprende una nave construida sobre la cantara tripartita de bombeo, en la que se albergan los motores de las bombas, un puente grúa y el mecanismo de accionamiento del sistema limpiarregas; también dispone de un espacio para ubicar un contenedor de residuos. Junto a la nave de bombas se dispone un edificio independiente para sala eléctrica, con todos los armarios necesarios para la toma, y una playa con los tanques antiarriete. En un edificio independiente se ubicará el centro de transformación. El control de la estación de bombeo se efectuará desde la sala de control de la Termoeléctrica, para lo cual la impulsión lleva una línea de fibra óptica en la misma zanja de alimentación eléctrica. En la figura 13 se reproduce una infografía de los edificios de la toma, según la solución de la ingeniería básica.

4. Defensa costera en la obra de toma

La solución propuesta por la ingeniería básica consiste en una cámara de aducción ubicada sobre la margen derecha del río y una protección con pantallas de tablestacas empotrada en las arenas densas del fondo del río, apuntalada con una hilera de an-

clajes de gran tonelaje. En la figura 14 se adjunta una sección tipo de dicha solución.

Por su carácter de estudio preliminar, la solución propuesta por la ingeniería básica no respondía adecuadamente a los condicionantes de proyecto,



Fig. 10. Defensa actual del balneario anexo a la toma con una pantalla de palos hincados.

tanto como defensa contra choque de buques, como de resguardo de ribera y protección contra la erosión.

A mayor abundamiento, los estudios morfológicos efectuados durante la fase de proyecto concluyeron que la erosión previsible en la zona de la toma es muy superior a la estimada en un primer momento por la ingeniería básica, lo que obligaría a reforzar el perfil de tablestacas y sus anclajes hasta dimensiones fuera de toda lógica, y a ampliar sustancialmente su extensión en planta. En efecto, las conclusiones del estudio morfológico preveían que la hoya de erosión de 41 m de profundidad podría avanzar hasta situarse enfrente de la toma, y a esta erosión había que sumar 3,5 m erosión generalizada con motivo de la avenida de cálculo, lo que llevaba los niveles de erosión hasta la cota -45 IGM aproximadamente, como se muestra en la figura 15.

Por estos motivos se optó por una solución de defensa de ribera del tipo flexible, que permite proteger una zona mucho más amplia de la ribera con un coste razonable.



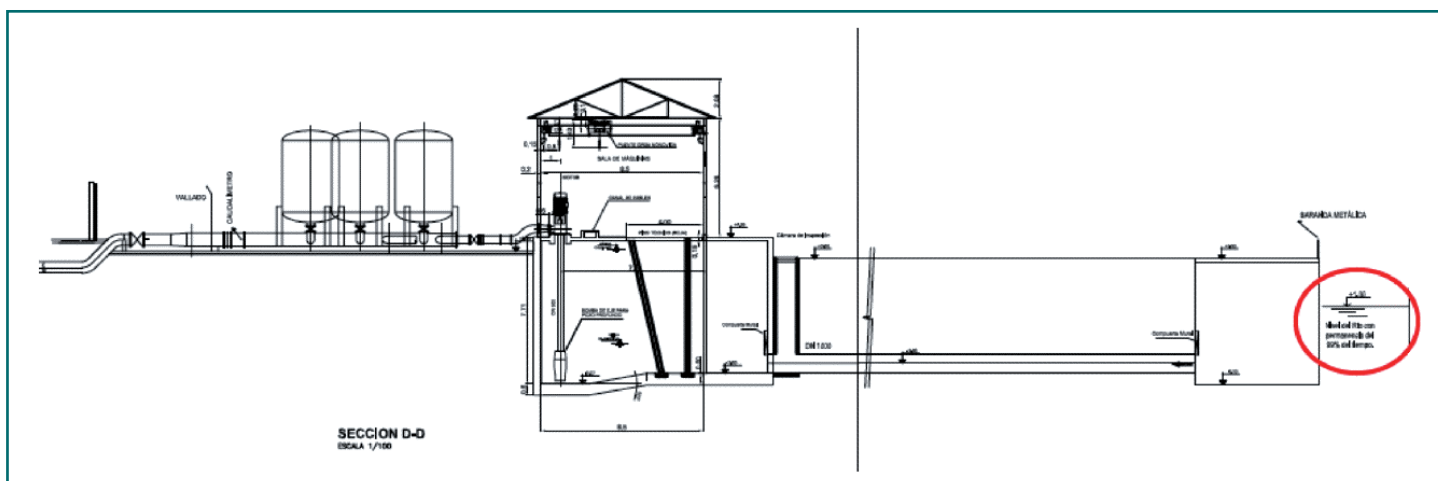
Figura 11 – Detalle de la pantalla de defensa de ribera en el predio de toma

5. Bases del Proyecto

Las bases del Proyecto se fundan sobre tres pilares principales:

- Estudio Hidrogeomorfológico: Estudio que infiere los procesos morfológicos observados a largo plazo, determina posibles erosiones y brinda información básica y decisiva sobre los aspectos a

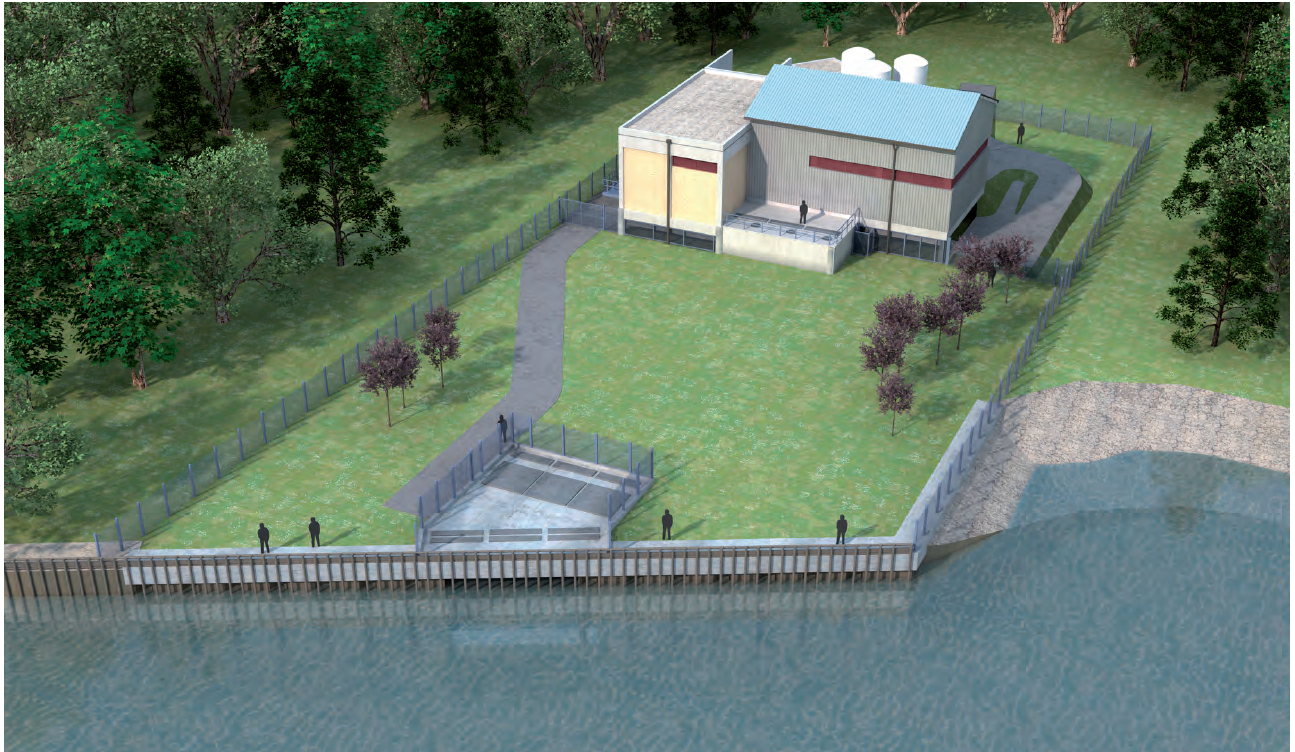
Fig. 12. Sección tipo del sistema de aducción previsto en la ingeniería básica.



tener en cuenta en el dimensionamiento de protecciones.

- Estudio Geotécnico: Estudio que se complementa íntimamente con el anterior, cubriendo aspectos como el estudio crítico de los parámetros de suelos, análisis de la estabilidad de taludes actual, descripción del fenómeno de rotura geotécnica por erosión y el estudio de distintas situaciones con distintas escalas de probabilidad de ocurrencia.
- Sistema de protección propuesto: Geomanta tipo "Flexmat", con boques de hormigón soldados a una manta de polipropileno que impide el paso de los finos del suelo.

Fig. 13. Infografía de la obra de toma en la ingeniería básica.



6. Características del sistema propuesto

El sistema de protección elegido posee el nombre comercial "Flexmat". Este es un sistema de protección continuo y flexible, realizado mediante la utilización de un geotextil estructural de alta resistencia a la tracción con bloques de hormigón adheridos uniformemente al mismo, en forma tal que constituyan una uni-

dad indivisible y homogénea; la resistencia a la tracción de este geotextil es de 80 kNw por metro lineal. La adherencia de los bloques de hormigón al geotextil base se realiza por medio de rulos o "loops" de fibra de polipropileno agregados al geotextil de base. La presencia de estos loops permite que la adherencia bloque-geotextil base sea uniforme y duradera. La durabilidad garantizada de este sistema frente a

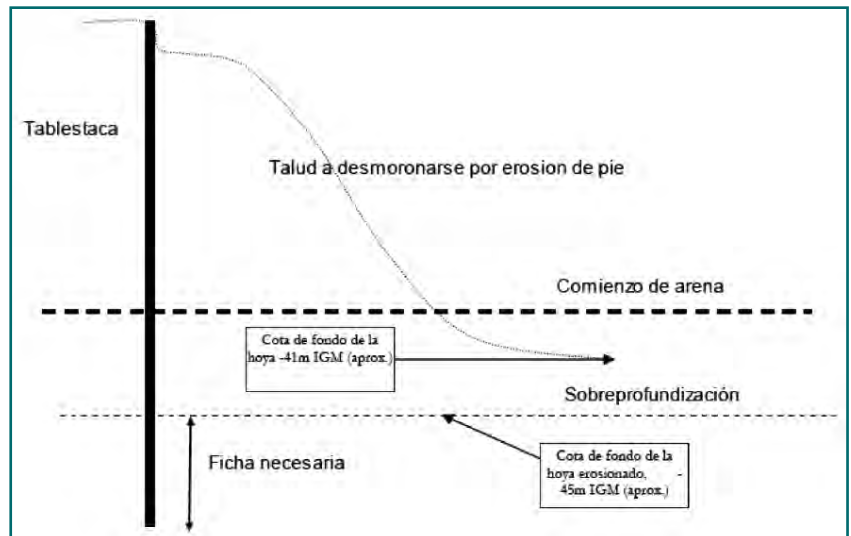
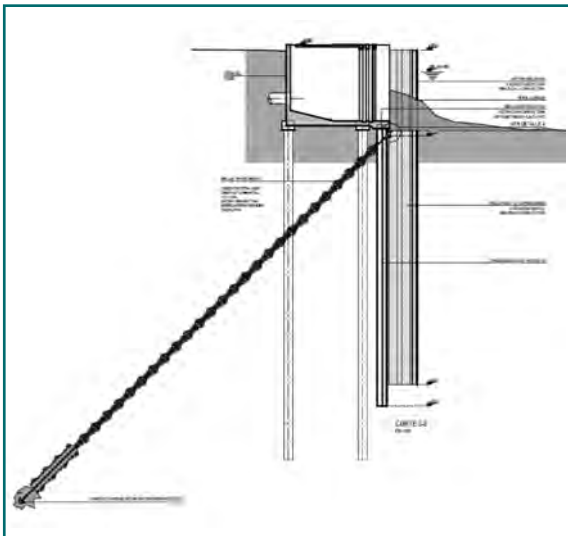


Fig.14 . Defensa costera con tablestacas ancladas en la ingeniería básica. Fig. 15. Tablestacas necesarias según los estudios hidrodinámicos detallados.

agentes atmosféricos, agentes químicos disueltos en el agua, agentes bacteriológicos y rayos ultravioleta es superior a cien años.

La ventaja de un sistema flexible radica en que el mismo se adapta a las deformaciones del elemento que protege, hasta alcanzar finalmente una situación de equilibrio hidráulico y geotécnico.

Este sistema nació en Holanda, donde se está utilizando regularmente desde el año 1983. Hasta la fecha se han colocado en todo el mundo 6 millones de metros cuadrados de esta protección. En Argentina se emplea este sistema desde el año 1993 y se han colocado hasta la fecha 800.000 m².

En las figuras 16 y 17 se muestran dos de estas mantas colocadas en Argentina: la primera para defender la ribera del río de la Plata, en el puerto de Buenos Aires, y la segunda colocada como defensa de un estribo de uno de los 17 viaductos de la autovía Rosario-Santa Fe, sobre el río Paraná. En este segundo caso, los huecos entre bloques se han rellenado con vegetación, lo que propicia una integración total en el paisaje. El pie de esta manta llegó a bajar 14 m en las sucesivas fases de erosión del río, hasta alcanzar su posición de equilibrio.

La manta *Flexmat* se extiende sobre el talud natural del río, con una preparación somera en la parte superior, donde inciden las olas, para lograr un talud 1V:3H que suavice el rompimiento de las olas e impida el flameo de la protección. El pie de la manta queda libre y se irá ajustando a las erosiones del cauce, hasta lograr el punto de equilibrio. En cabeza se ancla a un muro pantalla de hormigón en masa, que impide el deslizamiento de la manta por el cauce del río.

Las mantas se fabrican en tramos de 6x2 m², que se unen entre sí mediante diez anclajes embebidos en el hormigón de los bloques y cables de acero inoxidable. Los distintos tramos pueden unirse en tierra para formar grandes superficies, que se colocan sobre el lecho del río desde pontonas, o pueden descenderse con grúa hasta el fondo del río, donde se cosen entre sí con la mediación de buzos.

7. Condicionantes del sistema

7.1. Función del sistema

La principal función de un revestimiento es proveer una interfase estable entre la vía navegable y el suelo



Fig. 16. Protección de la ribera en el puerto de Buenos Aires, con mantas superpuestas.

contenido en la vía navegable. Para cumplir esta función, el revestimiento debe cumplir ciertos requisitos básicos como:

- Estabilidad
- Flexibilidad
- Durabilidad
- Simplicidad de mantenimiento
- Seguridad durante la construcción
- Aceptación social y medio-ambiental

Fig. 17. Protección del estribo de uno de los puentes de la autovía Rosario-Victoria, con mantas cosidas.



7.2. Condiciones de borde hidráulicas

Los condicionantes hidráulicos que debe cumplir una obra de las características de la presente por su ubicación son:

a) Movimiento de agua causado por embarcaciones

- Corriente de retorno
- Depresión del nivel de agua
- Ola frontal
- Ola de popa transversal
- Aceleración de hélice

b) Otros movimientos de agua

- Cambios de nivel por mareas
- Corrientes naturales
- Efectos del viento

c) Morfología del río

En ríos como el Paraná existen otros fenómenos que tienen gran influencia sobre el revestimiento, como el transporte de sedimentos, la migración hacia aguas abajo de meandros y el continuo cambio de sección, fenómenos que fueron estudiados en forma amplia antes de la redacción del proyecto.

7.3. Condiciones de borde geotécnicas

El propósito de proveer una protección de márgenes es prevenir que la carga hidráulica generada por el movimiento del agua induzca mecanismos de rotura o falla en el suelo de la margen.

El tipo de suelo determina el tipo de falla posible. El suelo a su vez posee cierta resistencia disponible para soportar varios modos de falla. La función de la protección debe ser doble: reducir la carga hidráulica sobre el suelo y colaborar a estabilizarlo.

8. Solicitaciones sobre el sistema de protección

En el presente capítulo se discuten y determinan las distintas cargas o sollicitaciones que actuarán sobre el sistema de protección y que permitirán dimensionar la altura de la protección necesaria para evitar efectos de levantamiento y flameo de la protección flexible.



Fig. 18. Fabricación de geomantas en una planta de prefabricados. El polipropileno de base sobresale 50 cm para solaparse con el de las mantas contiguas.



Fig. 19. Colocación de geomantas desde pontona. El peso de las geomantas de la toma es de 500 kg/m².

8.1. Oleaje por viento

Se dispone de información histórica de vientos en las cercanías de la zona según las direcciones más comprometidas para la obra y los valores extremos para recurrencias de 50 años, plazo en que se estima la vida útil de la obra, aunque la manta está garantizada por más de cien años. La vida útil de la Termoelectrónica es de 25 años.

Se han determinado también los *fetch* correspondientes a cada una de las direcciones.

El cálculo de la ola prevista así como el periodo de la misma por viento, considerando profundidades promedio de 20 m, se determina según el criterio del Manual CUR - *Design manual for pitched slope protection*. En la tabla 1 se indican los resultados.

8.2. Acción de embarcaciones

Las acciones provocadas por el movimiento de agua producido por embarcaciones pasantes son:

- Acciones por oleaje (olas primarias y secundarias), producidas básicamente por las depresiones que genera la embarcación durante su paso.
- Corrientes, que pueden ser de retorno por paso de la embarcación y por acción de la hélice
- Impacto, que se corresponde con una posible colisión de las embarcaciones con la protección

En la Figura 20 se adjunta un esquema general de las acciones sobre márgenes ante el pasaje de embarcaciones.

8.2.1. Oleaje

El oleaje se divide en principal y secundario. Para la toma de Campana, debido al posible acerca-

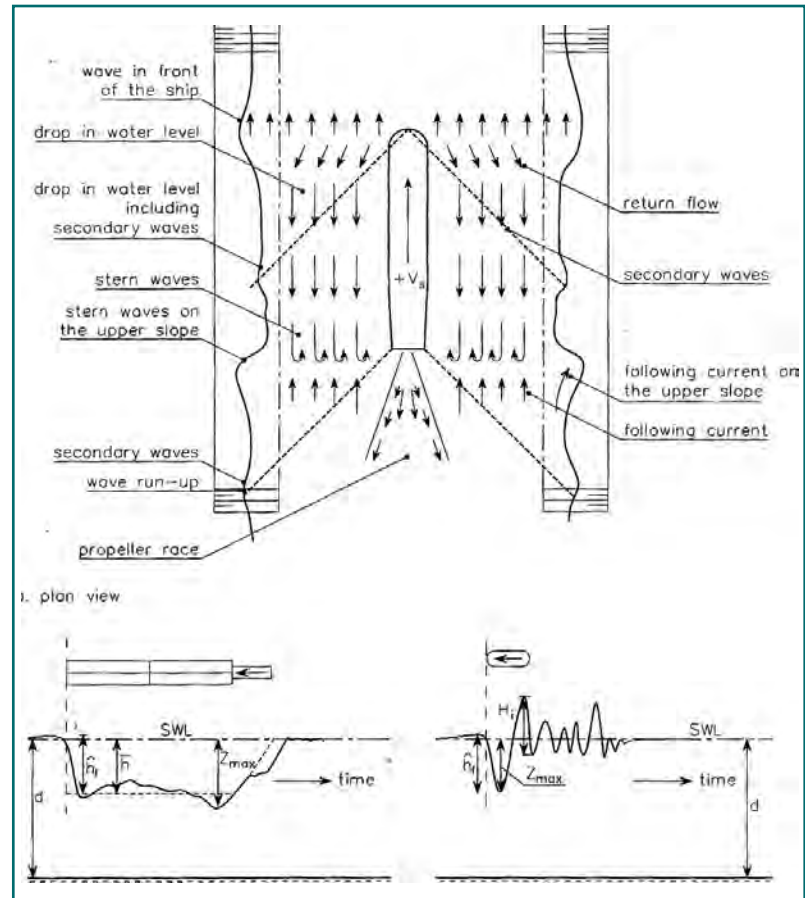


Fig. 20. Esquema general de efectos de embarcaciones (Fuente: CUR).

miento de las embarcaciones a la costa ambos casos son relevantes. No obstante es necesario aclarar que los efectos más desfavorables sobre la margen se producen por distintos tipos de embarcaciones, a saber:

- **Olas primarias:** Las embarcaciones convencionales y las de empuje son las causantes de la generación de las mayores amplitudes de olas primarias.
- **Olas secundarias:** Las embarcaciones pequeñas y de gran velocidad como pueden ser las lanchas "colectivo" o las embarcaciones de prefectura generan las mayores amplitudes en olas secundarias. Según especifica el CUR (*Centre for Civil Engineering Research and Codes*) en su manual "*Design manual for pitched slope protection*" en su página 88, estas olas pueden alcanzar mínimos de entre 0,25 y 0,5 m y máximos de 1m en canales angostos con periodos entre 2 y 3 seg.

En la tabla 2 se resumen los valores resultantes de alturas y periodos de ola:

Tabla 1				
Dirección	U m/s	Fetch m	H m	T seg
NE	16,2	1100	0,6	2,6
E	14,8	470	0,5	2,5
N	21,3	580	0,5	2,5

Tabla 2						
	Viento	Embarcación	Característica del suceso	Duración del evento	OLA	
					H (m)	T (seg)
Situación de proyecto talud 1:3 (máximo)	Máximo	ninguna	Eventual	continua	0,60	2,5
		Panamax		intermitente	0,91	2,5
		lancha		esporádico	1,37	2,5
	Medio	ninguna	Normal	permanente	0,35	2,5
		Panamax		intermitente	0,66	2,5
		lancha		esporádico	1,12	2,5

8.2.2. Corrientes

Las corrientes pueden ser de dos tipos; corrientes producidas por la embarcación y corrientes propias del río en estados de crecida.

Para el primer caso, el CUR (*Centre for Civil Engineering Research and Codes*) en su manual “*Design manual for pitched slope protection*” en su página 84, expresa que las olas son las que producen los mayores efectos sobre las costas debido a que las velocidades que se generan por embarcaciones (corrientes de retorno y velocidades de la hélice) no son superiores a los 2 m/s. Estas velocidades consideradas como acciones, en comparación con posibles olas de 1,37 m son irrelevantes para una protección de márgenes.

8.2.3. Impacto

La obra de toma se encuentra sobre la porción final de la denominada Vuelta del Este. Esta zona es comprometida desde el punto de vista de la navegación, particularmente debido al movimiento en dirección aguas abajo de las embarcaciones, las cuales tenderán a navegar por la zona de máximas corrientes, no sólo debido a que el canal encuentra su máxima profundidad hacia la margen derecha, sino también por efectos del arrastre de la embarcación contra esa margen. Por esto es posible prever colisiones de embarcaciones sobre la futura protección.

No obstante lo anterior, la particularidad de la protección flexible *Flexmat* de conformar una unidad (manta) de bloques adheridos firmemente a un geotextil base permite que la rotura de algún bloque por colisión de una embarcación no implique problema alguno. En estos casos los bloques podrán quebrarse o romperse, pero quedaran adheridos al geotextil de base. La ventaja fundamental de la Protección *Flex-*

mat es la de no poseer uniones geotextil-bloque puntuales sino que la presencia de “rulos de geotextil” como elementos de unión proporcionan un anclaje distribuido y duradero, con lo cual la función de protección de la margen queda asegurada.

En la figura 21 se aprecia el detalle de los rulos de unión entre polipropileno de base y bloques de hormigón.

9. Dimensionamiento del sistema

9.1. Altura de la Protección

Para el diseño del revestimiento flexible *Flexmat* se han seguido las directivas establecidas en el *Design Manual for pitched slope protection* del Ministry of Transport, Public Works, and Water Management - Ro-

Fig. 21. Detalle de unión de bloques de hormigón y polipropileno de base.



Tabla 3

	Viento	Embarcación	Característica del suceso	Duración del evento	OLA		h bloque (cm)	h bloque adaptado (cm)
					H (m)	T (seg)		
Situación de proyecto talud 1:3 (máximo)	Máximo	ninguna	Eventual	continua	0,60	2,5	10	17
		Panamax		intermitente	0,91	2,5	14	
		lancha		esporádico	1,37	2,5	17	
	Medio	ninguna	Normal	permanente	0,35	2,5	7	
		Panamax		intermitente	0,66	2,5	11	
		lancha		esporádico	1,12	2,5	16	

ad and Hydraulic Engineering Division - de acuerdo con el Reporte 155 del CUR/TAW preparado por el Technical Advisory Committee on Water Defenses del CUR-Centre for Civil Engineering Research and Codes, conjuntamente con el Manual "Guidelines for the Design of Flexible Revetments Incorporating Geotextiles in Marine Environment" del Permanent International Association of Navigation Congresses (PIANC).

Ambos manuales han sido el resultado de estudios realizados bajo la dirección del Dr. Ingeniero Krystian W. Pilarczyk en su carácter de Director de Delft Hydraulics y Presidente de las comisiones redactoras de CUR y PIANC. Las normas referidas para el diseño de la estabilidad de las protecciones flexibles para taludes son generales y aplicables a diferentes sistemas de protección.

Teniendo en cuenta que los coeficientes que deben emplearse en los cálculos de estabilidad son dependientes del sistema de protección, Robusta Technical Fabrics requirió del Dr. Eng. K. W. Pilarczyk un análisis de la estabilidad de su sistema Flexmat y la posterior determinación específica del valor de los coeficientes que deben usarse para el diseño de este sistema de protección. El Dr. Eng. K. W. Pilarczyk emitió el informe titulado Flexmat (Robusta) -Stability approach and calculations under wave and current attack, en el que se recomienda el camino a seguir y los coeficientes a aplicar para el sistema Flexmat, cuando se usan las directrices de dimensionamiento arriba mencionadas, para el cálculo de la estabilidad del sistema.

El informe titulado Flexmat (Robusta) Stability approach and calculations under wave and current attack preconiza el uso de las fórmulas para el diseño y cálculo de protecciones sometidas al ataque preponderante de olas, tal como se ha determinado en párrafos anteriores. Con posterioridad y en base a los resultados obtenidos en las obras y ensayos de los la-

boratorios de Delft, Pylarczyk simplificó la fórmula recomendada por el PIANC y la denominó fórmula Black Box, la cual se expresa como:

$$D = \frac{H_s \times \xi^3}{F \times \Delta} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{H_s}{L_0}}} = \frac{\tan \alpha \times (1.25 \times T_m)}{\sqrt{H_s}}$$

Donde:

ξ: Parámetro de rompiente

Hs: Ola significativa (m)

F: Factor de estabilidad del revestimiento

D: Densidad relativa

Por lo tanto considerando que las solicitaciones extremas del apartado 7.2.1, estableciendo una pendiente del talud en la zona de rompiente de 1:3 y juntas abiertas entre bloques (F=5), resulta entonces lo señalado en la tabla 3.

La zona de rompiente de la ola es la zona que necesariamente debe revestirse con bloques de 17cm. Bloques de 17cm como los determinados permiten velocidades de hasta 3,7 m/s en estado muy turbulento y cerca de 5 m/s con turbulencia normal, velocidades muy por debajo de las determinadas en el estudio hidrogeomorfológico.

9.2. Alcance de la Protección

El alcance de la protección flexible sobre el lecho, tanto aguas arriba como aguas abajo, debe ser tal que al producirse el fenómeno de erosión, la protección se deforme hasta un punto tal que el sistema no sólo haya cubierto esa erosión, sino que también el talud final de la margen sea estable geotécnicamente.

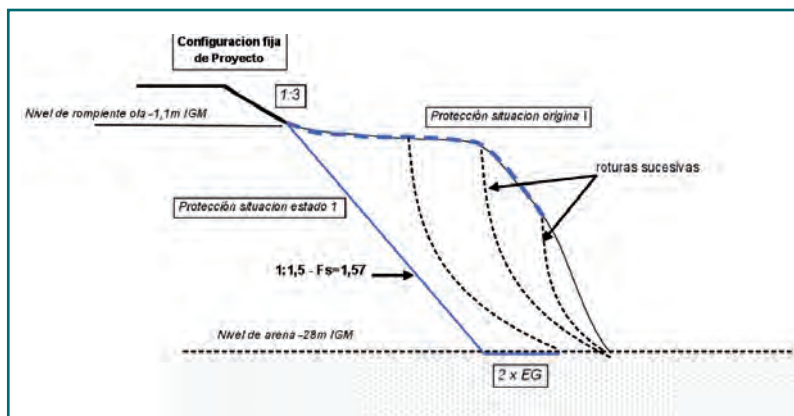


Fig. 22. Esquema general de afectos de embarcaciones, estado 1.

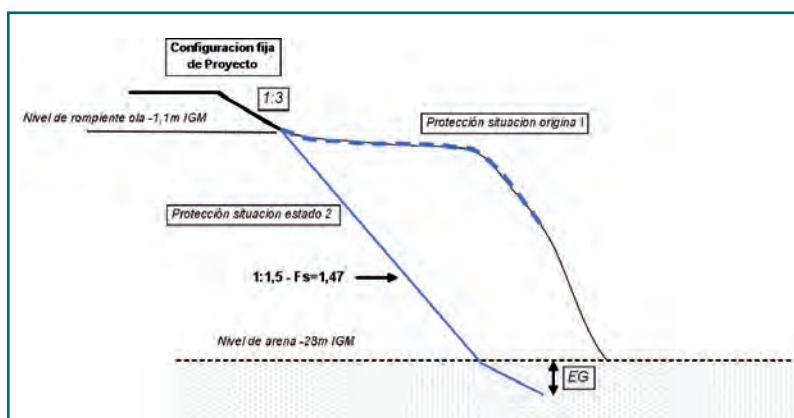


Fig. 23. Esquema general de afectos de embarcaciones, estado 2.

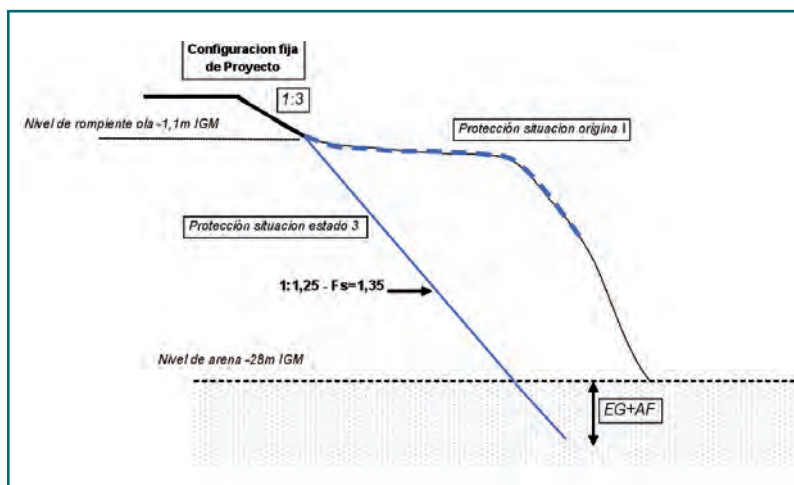


Fig. 24. Esquema general de afectos de embarcaciones, estado 3.

Siguiendo los lineamientos del estudio de Hidrogeomorfología, se pueden establecer tres estados de verificación del proceso erosivo y geotécnico, los cuales deben ser atendidos y verificados. Para cada estado se brindan los taludes y factores de seguridad (FS) determinados. Las etapas son:

- Estado 1: Proceso de erosión, desestabilización geotécnica parcial del talud actual y deformación del mismo, hasta alcanzar una situación tal que el mismo alcance una configuración estable, con una protección de pie que sea 2 veces la erosión generalizada estimada (EG).
- Estado 2: Ocurrencia de erosión generalizada (EG= 3,5 m), desestabilización geotécnica parcial del talud actual y deformación del mismo, hasta alcanzar una situación en que el mismo alcance una configuración estable.
- Estado 3: Ocurrencia de avance de hoya (profundización de 5 m de la arena al pie del talud), sumado a la erosión generalizada (EG=3,5 m), desestabilización geotécnica del talud y deformación del mismo, hasta alcanzar una situación en que el mismo alcance una configuración estable.

Nota: Los efectos del posible pasaje de la “hoya” por frente de la obra, según la línea de talweg relevada por batimetría, producirían un descenso del nivel de arena estimado al pie del talud de aproximadamente 5 m.

Comentarios pertinentes:

- Los estados mencionados se ordenan en grado de probabilidad decreciente. O sea, el estado 1 es el más probable y el estado 3 es el de ocurrencia menos probable.
- El coeficiente de seguridad de la margen actual frente a un círculo profundo de deslizamiento es 1,35.
- Los coeficientes de seguridad varían al mismo tiempo entre 1,57 y 1,35, coeficientes razonables y aceptados por la experiencia internacional de acuerdo al grado de probabilidad de ocurrencia de un evento. Conviene recordar que los coeficientes de seguridad recomendados son siempre directamente proporcionales a la incertidumbre de ocurrencia del suceso y a la gravedad de las consecuencias del mismo suceso, y que en nuestro caso la gravedad de las consecuencias de un presunto fallo son irrelevantes, por cuanto no habría daño a personas ni a bienes materiales: tan sólo se vería afectada la boquilla de los caños que captan el agua del río, y esto tampoco significa que dejara de entrar agua por ellos ha-

Solución Definitiva:

Erosión hasta -28 IGM más 3,5 m generalizada
 No invasión de la hidrovía, ocupación 15 m balneario, ocupación 20 m Valot
 Coeficiente de seguridad global frente a toma > 1,5
 Seguimiento de batimetría, para actuar en caso necesario

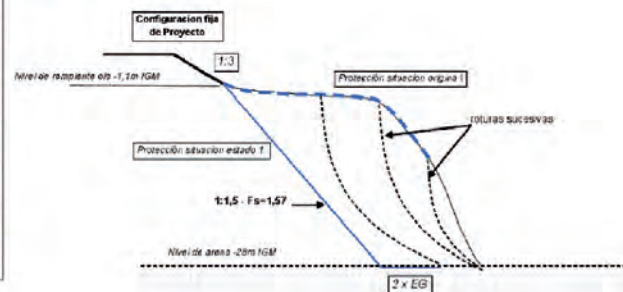
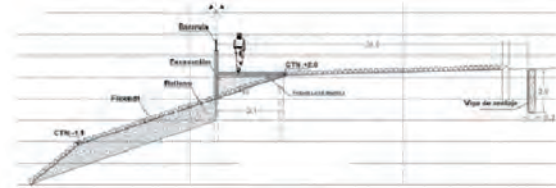
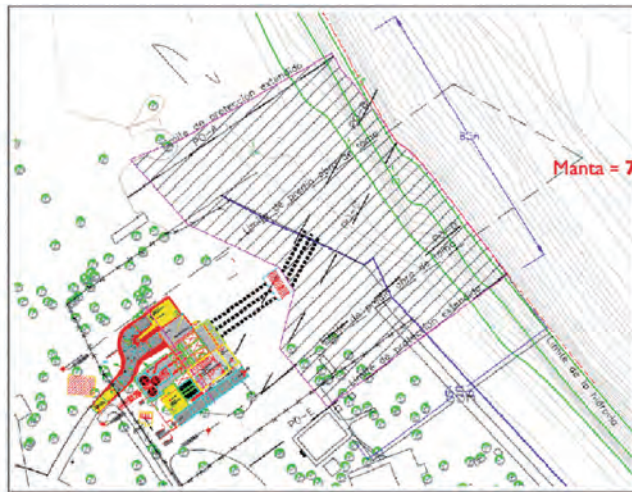


Fig. 25. Planta general y detalles de la protección flexible.

cia la cántara de bombeo de la obra de toma. En el peor de los casos, quedaría el recurso de bombear agua directamente desde el río hasta el pozo de bombeo mediante bombas arroceras, mientras se verificaran las obras de reparación, porque la obra de toma se sitúa 40 m tierra adentro.

Finalmente, sobre la base de las recomendaciones y conclusiones propuestas en los informes geotécnico e hidrogeomorfológico, sumado a las apreciaciones anteriores, se concluye que:

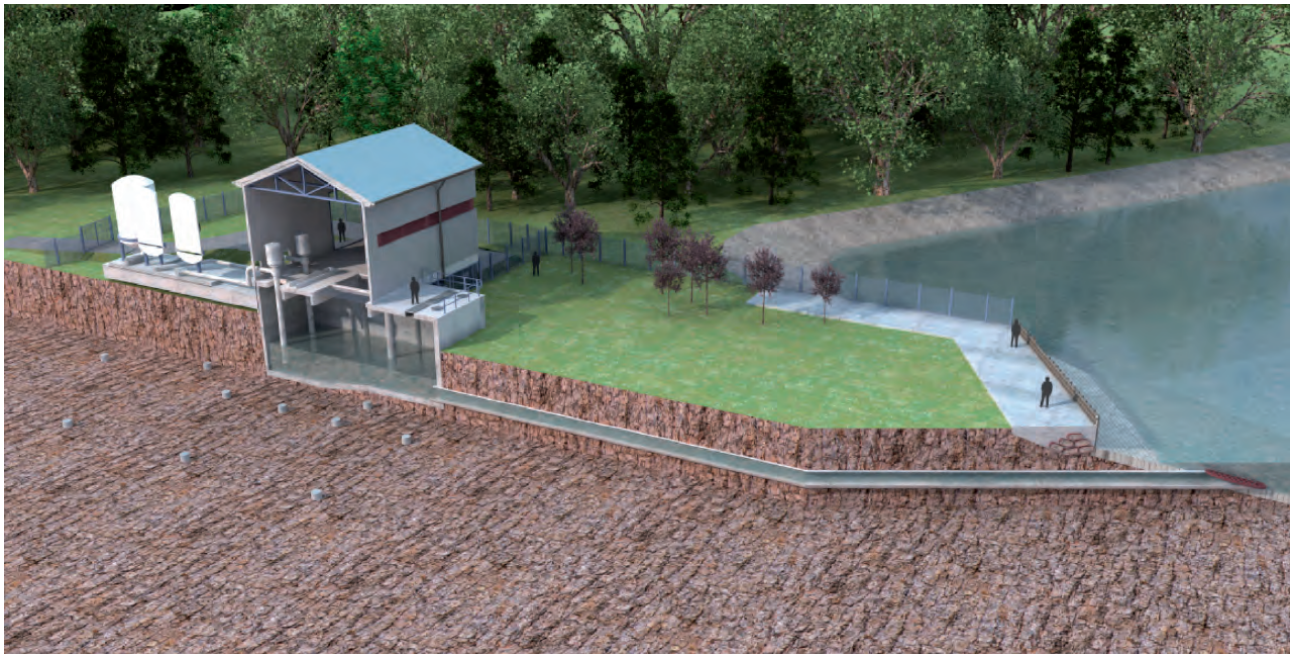
1. La longitud de la manta desde la margen actual hacia el lecho, perpendicularmente a la margen, debe ser de 62,5 m para que todos los estados planteados estén cubiertos.
2. La extensión de la protección aguas arriba, debe como mínimo ocupar la bahía del terreno vecino,

tal como se indica en el informe de hidrogeomorfología.

3. Para la longitud de la extensión aguas abajo se calcula una extensión tal que si la zona fuera erosionada según los criterios establecidos de erosión y estabilidad, los efectos no alcancen las cercanías de la obra de toma. Sobre esta base se estima que la longitud de la protección aguas abajo debe ser tal que producidos los fenómenos erosivos descritos para el Estado 3, el círculo de rotura crítico se encuentre mas allá de 10 m de la estación de bombeo.

Tomando la sección crítica y representativa más comprometida aguas abajo, se deduce que la protección aguas abajo debe extenderse 15 m desde el quiebro de la protección con el terreno vecino, como puede apreciarse en la planta general de la figura 25. Es importante destacar que según las conclusiones

Fig. 26.
Infografía de la
obra de toma
con protección
flexible.



del estudio hidromorfológico, la erosión de la costa es un fenómeno regresivo, por lo que *se verá venir*. Si con ocasión de alguna avenida extraordinaria se observara una erosión importante aguas abajo de la toma, siempre se podría ampliar la protección, *cosiendo* nuevas mantas a la protección de proyecto.

En la figura 26 se reproduce una infografía con la sección tipo por el eje de la toma con la solución flexible que se está construyendo en el momento de redactar el presente artículo. (La solución al proyecto modifica ligeramente esta infografía, correspondiente a una versión preliminar). ◆

Referencias:

-CIRIA 2007, The Rock manual
-Pilarczyk, K 2000, Geosynthetics and Geosystems in hydraulic and Coastal Engineering, A.A Balkema.
-Pilarczyk, K 1998, Dikes and Revetements, A.A Balkema.
-Pilarczyk, K 1998, Flexmat Manual design, CAT.
TAW, 1996, Clay for dikes

-Przedwoski B. & Blazejewski R. 1995, River training techniques, A.A Balkema
-CUR 1995, Design manual for pitches slope protection, A.A Balkema
-PIANC 1992, Guidelines for the design and construction of flexible revetements incorporating geotextiles in Marine environments.
-PIANC 1987, Guidelines for the design and construction of flexible revetements incorporating geotextiles in inland waterways.