

ESTUDIO DE RESISTENCIA AL OLEAJE DE UNIDADES PREMOLDEADAS BETONCOVER Y BETONPLAN

Ing. Andrés I. Grande, Ing. Sergio Loschacoff, Ing. Roberto D. Castellano (*)

Ing. Carlos Rodríguez, Ing. Daniel Berrilio ()**

(*) Instituto Nacional del Agua – (**) CORIPA S.A.

AU Ezeiza Cañuelas Tramo J. Newbery – Km 1.62 Ezeiza/Bs.As./Argentina

Tel. (54 11) 4480-4500 / Fax (54 11) 4480-0433.

Emails: agrande@ina.gov.ar; sloschacoff@ina.gov.ar; rcastell@ina.gov.ar, info@coripa.com.ar

RESUMEN

El objetivo de la investigación realizada fue evaluar el comportamiento de una protección de taludes desde el punto de vista de su resistencia a la acción dinámica del oleaje. La protección estuvo constituida por unidades premoldeadas BETONCOVER y BETONPLAN desarrolladas por CORIPA S.A. Los estudios se realizaron mediante un modelo hidráulico bidimensional en escala reducida, en el que se analizó tanto la falla por expulsión de los bloques como por inestabilidad geotécnica debido al impacto de las olas.

Los estudios se llevaron a cabo en un canal de olas aleatorias en una escala de similitud de Froude. Adicionalmente se estableció el comportamiento funcional de la protección mediante la determinación de características técnicas importantes como el run-up y el coeficiente de reflexión.

Se realizaron ensayos para distintas inclinaciones de talud y períodos de olas sobre terraplenes de material no cohesivo colocando las piezas sobre un geotextil no tejido e intercalando en algunos casos un filtro de material granular.

A partir de los ensayos se establecieron relaciones funcionales entre el parámetro adimensional resistente o de estabilidad ($H_s/\Delta D$) y el parámetro de rotura de olas ξ , se determinaron las características técnicas mencionadas y se observó el comportamiento general de la estructura en su conjunto.

Palabras Claves: revestimiento, oleaje, estabilidad, run-up, reflexión.

INTRODUCCIÓN

En las márgenes de los distintos ríos, lagos y lagunas de nuestro país se realizan obras que requieren la protección de sus taludes ante la acción del oleaje. Para ello distintas empresas han diseñado elementos premoldeados de fácil manejo y colocación que ofrecen una alternativa interesante al momento de decidir esta parte de la obra. Si bien se ha alcanzado un importante desarrollo en la investigación de este tipo de estructuras, se hace necesario estudiar los nuevos productos diseñados en forma particular a fin de optimizar la economía de fabricación frente a la resistencia hidráulica.

Por este motivo la empresa CORIPA S.A. ha encargado al Laboratorio de Hidráulica del Instituto Nacional del Agua realizar estudios mediante modelación física de nuevas unidades premoldeadas a fin de determinar su funcionamiento hidráulico.

OBJETIVOS

El uso de la modelación física para este tipo de protecciones permite alcanzar un conocimiento integral del comportamiento de las estructuras ante la acción del oleaje, determinar la resistencia hidráulica de las unidades y determinar sus características hidráulicas, permitiendo validar criterios de dimensionamiento y consiguiendo así optimizar el diseño de las obras con ellas proyectadas.

El propósito de estos estudios hidráulicos consistió en analizar aspectos funcionales y de estabilidad de tres tipos diferentes de unidades prefabricadas para protección de taludes en diferentes configuraciones de obra.

Los aspectos hidráulicos básicos a estudiar fueron: a) el comportamiento de la protección desde el punto de vista de su resistencia a la acción dinámica del oleaje, a los efectos de identificar el tipo de falla y determinar los límites de resistencia, b) la capacidad de controlar la trepada del oleaje (run-up) y c) la capacidad reflejante de las olas incidentes.

MARCO TEÓRICO

Se hace a continuación una breve descripción del marco teórico sobre el que se apoyó el estudio. Se abarca la temática de la estabilidad de las unidades, la trepada de la ola (run up) y el coeficiente de reflexión de la estructura.

Estabilidad

Mecanismos de falla

Los revestimientos de bloques son colocados para proteger los terraplenes de materiales sueltos del ataque de las olas. Los mecanismos de falla de esos revestimientos son diversos e involucran distintos componentes de las estructuras. Entre ellos se encuentran la expulsión del bloque y la inestabilidad geotécnica.

Cuando se analiza el mecanismo de falla de un elemento individual de la cubierta, se está considerando una carga particular y un parámetro resistente que se relaciona con esa falla. Si se

trata por ejemplo de la expulsión de un bloque, se considera como carga principal la diferencia de presión que ocurre entre ambas caras del bloque. Esta diferencia de presión depende especialmente del espesor y la densidad relativa al agua del bloque y ocurre en el momento del máximo descenso (run-down) de la ola.

El parámetro más importante que representa la carga es el parámetro de rotura de la ola, que se define como:

$$\xi_{op} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H_s / L_{op}}} \quad (1)$$

en la cual: α es el ángulo del talud, $L_{op} = 1.56 T_p^2$: longitud de onda en aguas profundas que resulta del período de pico del espectro (T_p).

A través de estudios teóricos y de modelación se han determinado diversas relaciones entre el parámetro de rotura de la ola ξ y el parámetro adimensional $H_s/\Delta D$, donde H_s es la altura de ola significativa (basada en el espectro de densidad de energía: $4\sqrt{m_0}$, donde m_0 es el momento de orden cero del espectro) y ΔD el espesor de cobertura efectivo, con Δ la densidad del bloque relativa al agua y D su altura.

Los bloques mejoran notablemente su funcionamiento hidráulico si la estructura incluye un filtro granular. El impacto de la ola igualmente puede dañar una protección que descansa sobre un filtro granular en un corto tiempo. Cuanto menor es el flujo que puede circular a través de la cubierta de unidades, menor es la diferencia de presión que este origina sobre los bloques. El flujo de agua es limitado si el espesor del filtro es pequeño o si su permeabilidad es baja, de igual manera si el espesor del bloque es mayor o si la permeabilidad de la unidad es reducida.

La inestabilidad geotécnica comprende a su vez dos tipos de rotura que consisten en deslizamientos del suelo base por efecto del run-down (descenso de la ola) o deformaciones locales por impacto de la ola.

La primera ocurre por falta de espesor de la cobertura o del filtro, que al sumarse a la resistencia propia del suelo del terraplén no son suficientes para alcanzar la estabilidad. Si la base o subsuelo es de arcilla generalmente no se presentan estos tipos de inconvenientes, pues la cohesión reduce el efecto. Cuando ocurre en terraplenes de arena, las superficies de deslizamiento son superficiales y los deslizamientos involucran un reducido volumen de terraplén.

En el segundo caso el impacto de la ola provoca una deformación que conduce inicialmente a la formación de un perfil tipo "S", cuando la misma es una ondulación suave, evolucionando a un perfil tipo "Z" cuando el asentamiento es importante respecto de la altura del bloque, provocando un descenso abrupto del perfil en el caso de bloques no vinculados.

Para algunas condiciones la cobertura puede ser estable ante la acción de la ola, pero no así su base, por lo que a veces se hace necesario incrementar el espesor de la cobertura o del filtro para lograr la estabilidad.

Si los bloques están vinculados y forman una estructura que actúa como una entidad, el mecanismo de falla es diferente debido a que el grado de libertad para moverse de los bloques individuales resulta restringido notablemente. La estructura responde deformándose como si fuera una sola unidad, resultando esta deformación en una disminución de la interacción entre las unidades con el consiguiente riesgo de la expulsión

Criterios de diseño

Para que un bloque pueda ser expulsado fuera de la protección, la fuerza de succión debe ser superior al peso del bloque más la fricción entre piezas. Los bloques sueltos permanecen estables por debajo de un valor de ola significativa, pero ocurrirán pequeños movimientos si la altura de ola supera ese umbral. Si la altura de ola continúa aumentando el bloque comenzará a moverse, pudiendo no volver a su posición original luego de ocurrida la sollicitación.

Los criterios de diseño utilizados en este estudio que permiten cuantificar estos sucesos son los siguientes (Manual CUR, 1995):

Bajo cargas extremas

- No debe haber movimiento del bloque para la altura de ola H_s .
- Se permiten movimientos de hasta el 10 % de la altura del bloque para alturas de ola entre H_s y $H_{2\%}$.

Bajo cargas frecuentes

- No debe haber movimiento del bloque para alturas de ola comprendidas entre H_s y $H_{2\%}$.

Para el caso de inestabilidad geotécnica por impacto de la ola, es importante juzgar si la interacción entre bloques sueltos está puesta en riesgo por la deformación. El criterio de falla utilizado para cuantificarlo es el siguiente:

- Si la amplitud de la deformación (asentamiento) es mayor al 50 % del espesor del bloque, se considera falla de la protección

Run-up

La trepada de la ola (run-up) es una característica técnica que interesa conocer por tener incidencia en la determinación de la altura de las obras costeras. Se define el $R_{u2\%}$, como la diferencia de altura medida en la vertical respecto del nivel estático del agua que es superada por el 2 % de las olas incidentes (de Waal y van der Meer, 1992). El run-up relativo está dado por $R_{u2\%}/H_s$, con H_s definida al pie de la estructura. En general, esta medida relativa se expresa en función del parámetro de rotura o de Iribarren ξ (ec. 1)

La relación funcional para diseño general que se aplica en diques es la siguiente (de Waal y van der Meer, 1992):

$$R_{u2\%} / H_s = 1.6 \gamma_b \gamma_f \gamma_\beta \xi_{op} \quad (2)$$

con un máximo de $3.2 \gamma_f \gamma_\beta$, y donde: γ_b : factor de reducción por berma, γ_f : factor de reducción por rugosidad del talud y γ_β : factor de reducción por ataque oblicuo. Esta ecuación es válida para el rango que comprende $0.5 < \gamma_b \xi_{op} < 4$ o 5 . Para el caso del presente estudio, sólo interviene el coeficiente de reducción por rugosidad y es uno de los objetivos del mismo determinar su valor.

Es importante destacar que la ecuación (2) lleva incluido un margen de seguridad debido a la dispersión propia de los resultados en los modelos físicos, de donde surgió. Ese margen de seguridad consiste en un desvío standard de la muestra. El valor medio de ese conjunto de valores arroja un coeficiente de 1.5.

Reflexión

Cuando un tren de olas se encuentra con un obstáculo en su propagación una parte de la energía puede disiparse en rotura de ola o fricción y otra parte resultar reflejada. La proporción de energía de ola reflejada está definida por medio del coeficiente de reflexión C_R , que establece la relación entre la altura de ola reflejada y la incidente. El coeficiente de reflexión depende del período de las olas, de su altura y de ciertas propiedades físicas del obstáculo.

Para el caso de un talud inclinado recto C_R depende de la inclinación del talud, su rugosidad y porosidad. También dependerá de la pendiente de la ola H_s/L (L = longitud de la onda). Por tanto, para una dada rugosidad y porosidad, el coeficiente de reflexión podrá expresarse en función del parámetro de rotura o Iribarren ξ .

Algunas investigaciones de laboratorio (Seelig and Ahrens 1981, Seelig 1983, Allsop and Hettiarachchi 1988, indicados en Coastal Engineering Manual, 2001) indican que en una gran variedad de estructuras el coeficiente de reflexión puede determinarse mediante:

$$C_R = \frac{a \xi^2}{b + \xi^2} \quad (3)$$

donde los valores de los coeficientes a y b dependen principalmente de la geometría de la estructura y en menor medida del tipo de ola, según se trate de olas regulares o irregulares. Para el caso de un talud plano y otro constituido por enrocado bajo olas irregulares, $a = 1$ y 0.6 , mientras que $b = 5.7$ y 6.6 , respectivamente. En el presente estudio se han utilizado como referencia los valores resultantes por esta última ecuación para esas estructuras.

DESCRIPCIÓN DE LAS UNIDADES ENSAYADAS Y DEL ESQUEMA DE OBRA REPRESENTADO

Los elementos prefabricados que se estudiaron son indicados en la Tabla 1 y están constituidos de hormigón simple. En las Figuras 1, 2 y 3 se pueden observar esquemas de los mismos y algunas de sus dimensiones en metros.

El modelo ensayado de bloques sueltos o no vinculados *Betoncover* presenta una configuración en planta de dodecágono regular con agujeros pasantes, constituidos por la suma de tres prismas regulares hexagonales unidos en dos de sus caras. Esta disposición otorga una cierta trabazón al conjunto aumentando la estabilidad de las piezas. El diámetro del círculo exterior en el que se inscriben los tres hexágonos es de aproximadamente 40 cm.

Asimismo el tipo de *Betonplan* cuyas unidades prefabricadas ensayadas consisten en bloques de hormigón simple vinculados a través de unas pequeñas pestañas en el perímetro de los mismos. Las piezas presentan en planta una configuración de dodecágono regular suma de tres polígonos regulares de seis lados vinculados entre sí por dos de sus lados, sin orificios y con partes salientes y entrantes. Son piezas planares o bidimensionales, siendo la altura la dimensión menos importante. Poseen, además, orificios en las caras laterales para un eventual cableado.

Teniendo en cuenta la relativa facilidad de conseguir suelos arenosos en muchos lugares de nuestro territorio y su sensiblemente mayor erodibilidad respecto de los suelos cohesivos, se consideró un talud a proteger que estuviera formado por este tipo de suelos. El esquema de obra tipo incluyó entonces filtros intermedios para evitar la pérdida del material del talud a través de un

geotextil no tejido. Lo mismo se hace necesario para salvar la discontinuidad entre las unidades de gran porosidad y el material granular del filtro en los casos que se incluyó.

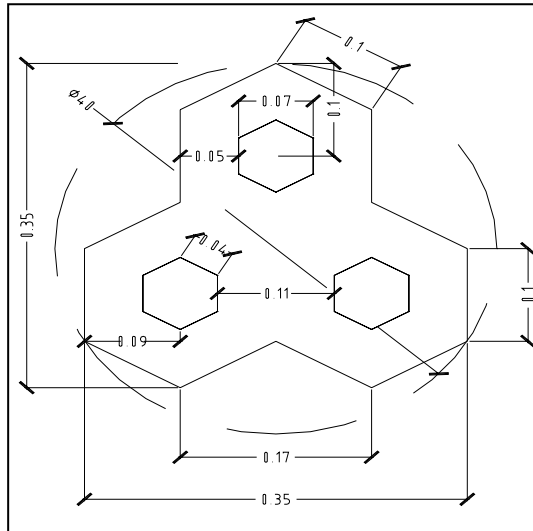


Figura 1: Elemento premoldeado ensayado Betoncover I

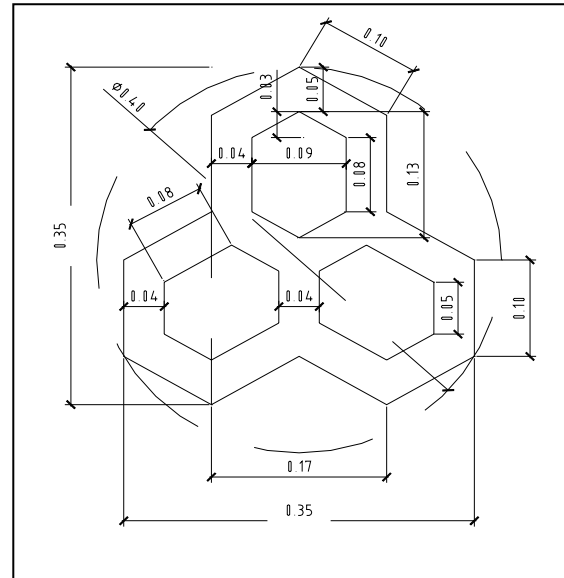


Figura 2: Elemento premoldeado ensayado Betoncover II

Para el filtro se consideró un espesor de 15 cm por ser éste un valor utilizado habitualmente.

Por diversas cuestiones, se previó utilizar como material de filtro una piedra similar a la usada habitualmente para realizar los hormigones de resistencia tradicional o de una granulometría parecida.

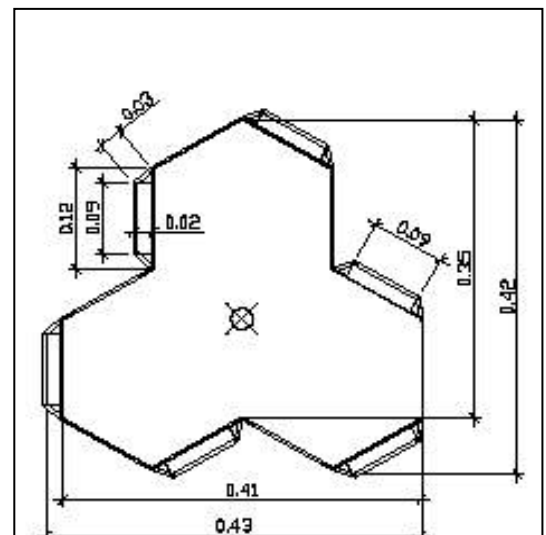


Figura 3: Elemento premoldeado Betonplan ensayado

En el presente estudio se consideraron como esquemas de obra los siguientes:

- Boques sueltos con orificios (*Betoncover I*) apoyados sobre geotextil no tejido sobre arena con inclinaciones de talud de 1:2 y 1:3.

- Bloques sueltos con orificios (*Betoncover II*) apoyados sobre filtro granular con inclinaciones de 1:2 a 1:4.
- Bloques vinculados sin orificios (*Betonplan*) apoyados sobre no tejido sobre arena con inclinaciones de talud de 1:2 y 1:3.

Tabla 1: Elementos prefabricados estudiados

Designación del elemento	Tipo de bloque	Altura del bloque en m	Peso del bloque en kg	Área abierta en porcentaje	Área total en cm ²	Nº de unidades por m ²
<i>Betoncover I</i>	Suelto con orificios	0.23	35	15	780	12.8
<i>Betoncover II</i>	Suelto con orificios	0.23	25	37	780	12.8
<i>Betonplan</i>	Vinculado sin orificios	0.10	24	3	1126	8.9

DESCRIPCIÓN DEL MODELO

Diseño del modelo

Las fuerzas más importantes que actúan son las gravitatorias y las de inercia, por lo que el criterio de similitud de Froude es el que rige el modelo. La escala seleccionada debe ser la mayor posible a fin de que los efectos de escala sean mínimos. Esto cobra mayor relevancia en este tipo de estructuras, donde parte de la resistencia de los bloques sueltos está dada por la fricción entre piezas contiguas.

En efecto la dificultad de representar la rugosidad entre piezas cuando se utilizan escalas pequeñas, se traduce en un elevado riesgo de sobrevaluación de la fricción entre bloques y por ende de su resistencia hidráulica.

La escala de longitudes E_L expresa la relación entre las longitudes en el prototipo y el modelo: $E_L = L_p/L_m$. Considerando la igualdad del número de Froude $F=U^2/gh$ en modelo y prototipo ($E_F = 1$), la escala de tiempos E_T resulta

$$E_T = \sqrt{E_L}$$

Como no es posible escalar las fuerzas de acuerdo a dos leyes de similitud en forma simultánea, al regir el modelo la ley de Froude no estará en similitud el número de Reynolds. Esto podría acarrear algunos efectos de escala en aquellas zonas del modelo donde las fuerzas viscosas tienen mayor importancia. Como por ejemplo en el movimiento del agua dentro del material que conforma el talud del modelo en el cual el número de Reynolds es pequeño. Por ello se utilizó una relación de escala para los granos del suelo diferente a la escala lineal por similitud de Froude.

Adoptando inicialmente este efecto de escala, el diámetro en el modelo se puede expresar de la siguiente manera (B. Le Mehauté, 1958):

$$d_M = d_p / E_L * K$$

En el caso del presente estudio el *coeficiente de agrandamiento* K para la arena es:

$$K = E_L^{3/4}$$

Para el caso del material granular del filtro se pueden utilizar gráficos diseñados para determinar K en función de la escala de longitudes por similitud de Froude y parámetros que incluyen las características físicas de los suelos (para más detalle referirse a la bibliografía anteriormente citada).

Las escalas que gobernaron el modelo hidráulico se seleccionaron teniendo en cuenta especialmente las ecuaciones de predimensionado de bloques, las dimensiones y la capacidad de generación de olas del canal experimental. Cabe destacar que se utilizaron diferentes escalas durante los estudios según se indica en la **Tabla 2** que sigue.

Tabla 2: Escalas del modelo

Unidad	Escala		
	Longitud	Tiempo	Peso
<i>Betoncover I y Betonplan</i>	6.8	2.6	314
<i>Betoncover II</i>	9.1	3	754

Las piezas utilizadas en el modelo fueron construidas en mortero de cemento y arena. Para reducir la resistencia hidráulica de fricción entre piezas contiguas se puso especial cuidado en reducir la rugosidad superficial de las caras de las unidades.

Descripción de los componentes del modelo

Unidades

Se construyeron las 1031 piezas tipo *Betoncover I* necesarias para cubrir un talud de 1:3 hasta el metro de altura en la correspondiente escala ($E_{L1}=6.8$). La altura de los bloques resultó de 3.4 cm. Se pesaron la totalidad en estado seco por medio de una balanza electrónica de precisión. El volumen de las piezas del modelo utilizado para el cálculo de la densidad relativa fue el teórico (volumen neto), determinado a través de la escala de longitudes. Los parámetros que caracterizaron el peso de las piezas fueron: $\mu = 102.2$ g, $\sigma = 3.8$ g y $C = 0.04$, donde μ es el valor medio, σ es el desvío standard y C el coeficiente de variación (σ / μ). Debe notarse el bajo valor de C (4 %) lo que indica la buena calidad de fabricación de las piezas.

La densidad relativa, definida como la relación entre la densidad media de las piezas y la densidad del agua fue de:

$$\Delta_M = \frac{\rho_m - \rho_a}{\rho_a} = 1.1$$

Donde: Δ_M : densidad relativa de las piezas del modelo, ρ_m : densidad del material componente y ρ_a : densidad del agua.

Para el caso de las unidades *Betoncover II*, similares a las anteriores pero de mayor porosidad, se utilizaron los mismos materiales. Se construyeron 2000 piezas para cubrir los taludes de distintas inclinaciones utilizados. En este caso, los parámetros que caracterizaron la muestra de los valores de la medición del peso de las piezas fueron: $\mu = 31$ g, $\sigma = 0.9$ g y $C = 0.03$. En este caso la altura de los bloques en modelo alcanzó los 2.5 cm y la densidad relativa fue similar.

En cuanto a las unidades *Betonplan*, fueron necesarias 580 piezas para cubrir todo el talud de menor inclinación y su altura fue de 1.5 cm. Los parámetros que caracterizaron la muestra de los valores de la medición del peso de la totalidad de las piezas fueron: $\mu = 73.7$ g, $\sigma = 2.5$ g, y $C = 0.034$.

Materiales granulares

La arena fina utilizada para conformar el talud en todos los ensayos tuvo las siguientes características granulométricas: $d_{10} = 0.16$ mm, $d_{50} = 0.24$ mm y $d_{90} = 0.34$ mm. Un indicador de la uniformidad de los suelos es el coeficiente de uniformidad C_u definido como la relación entre el d_{60} y el d_{10} de la curva granulométrica, siendo este caso $C_u = 1.70$.

La inestabilidad geotécnica por impacto de ola depende de las características geotécnicas del talud, como su compactación, ángulo de fricción interna, etc. Por esto fue de suma importancia determinar las características geotécnicas de la arena utilizada. Con ese fin se realizaron estudios geotécnicos en el Laboratorio de Suelos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata. En total se tomaron cuatro muestras del talud luego de realizado un ensayo. Dos muestras fueron extraídas de la zona que estuvo por encima del nivel estático del agua y dos por debajo. Como resumen de los resultados promedios de las cuatro probetas ensayadas en el Laboratorio de Suelos se puede decir lo siguiente:

Densidad in-situ de la arena	$\gamma_d = 1.66$ g/cm ³ .
Densidad mínima de la arena	$\gamma_m = 1.503$ g/cm ³ .
Densidad Máxima de la arena	$\gamma_M = 1.79$ g/cm ³ .
Peso específico de los granos	$\gamma_s = 2.63$ g/cm ³ .
Ensayo de permeabilidad	$k = 8.64 * 10^{-3}$ cm/seg
Densidad relativa de la arena	$D_R = 59$ %
Ángulo de fricción interna	$\Phi = 41$ °

Para el filtro se utilizó una gravilla cuya curva granulométrica se resume en estos valores: $d_{10} = 1.3$ mm, $d_{50} = 2.2$ mm y $d_{90} = 2.8$ mm. La piedra tuvo una curva bastante uniforme y de forma subangular y rugosa. En e este caso resultó $C_u = 1.85$.

Filtro geotextil

Para simular el geotextil no tejido de filtro se utilizó una tela tejida de trama fina y pequeño espesor. La permeabilidad vertical fue determinada a partir de ensayos que se realizaron en el Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) siguiendo la norma ASTM D 4491 –99a de permisividad de geotextiles. La permisividad está dada por la relación del volumen de agua que pasa por una sección bajo una determinada carga hidráulica en condiciones de flujo laminar, en la dirección normal del geotextil y por unidad de tiempo. Los valores hallados indican una permisividad de 0.8 l/seg, con un coeficiente de variación en la determinación del 2 %. En régimen laminar la permisividad normal se expresa como la relación entre la permeabilidad k y el espesor e del geotextil, por lo que, teniendo en cuenta que el espesor de la tela es de aproximadamente 0.2 mm, resulta una permeabilidad del modelo de 0.016 cm/s.

Esquema de obra ensayado

El talud de suelo arenoso usado en todos los ensayos estuvo formado por un manto de arena de unos 25 cm de altura, apoyado sobre un talud de acrílico soportado por una estructura metálica (se verificó previamente la no influencia de este reducido espesor de arena en los resultados).

Para las unidades *Betoncover I* y *Betonplan* el esquema de obra ensayado consistió en ese talud de arena, la fina tela tejida que simuló el geotextil no tejido y la cubierta de piezas. Para la *Betoncover II*, se construyó el filtro de material granular que resultó de un espesor de 1.6 cm. Por encima y debajo del filtro se colocaron las finas telas tejidas que simularon los geotextiles no tejidos. Finalmente arriba se colocó la cubierta formada por las unidades premoldeadas.

Se utilizaron inclinaciones de talud variables entre 1:2 y 1:4. En todas las inclinaciones se construyó un talud de arena que alcanzó el metro de altura.

Para la construcción del modelo, en el ancho del canal se colocaron 15 columnas de las unidades *Betoncover I*, 10 columnas en el caso de unidades *Betonplan* y 20 columnas en el caso de las *Betoncover II*.

Debido a que se ensayó la estabilidad de la protección en un talud cualquiera, sin tener en cuenta la estabilidad al pie por ser particular a cada obra, no fue necesario utilizar niveles de agua variables. Se decidió utilizar un nivel estático para los ensayos sistemáticos de 0.45 m para todos los períodos por cuestiones de generación de olas y trepada máxima de la ola (el canal tiene 0.70 m de altura).

DESCRIPCIÓN DE LAS INSTALACIONES

Los ensayos se llevaron a cabo en un canal de olas de 28 m de largo, por 0.60 m de ancho y una profundidad de 0.70 m. En uno de sus extremos se halla ubicado el generador de olas del tipo de placa plana, capaz de generar olas aleatorias. En el otro extremo se haya ubicado el modelo de la estructura a estudiar, ubicándose entre medio el equipo de adquisición de datos. El mismo consiste en un conjunto de tres sondas separadas entre sí por una distancia dependiente del período de las olas. Cada determinación implicó la adquisición de 8192 datos, con un intervalo de muestreo de 50 milisegundos, lo que demandó aproximadamente 7 minutos de medición. Esto permitió determinar (mediante la técnica FFT) separadamente, el espectro de densidad de energía de ola incidente y el reflejado y los parámetros espectrales característicos: altura de ola significativa H_s , período medio T_m , período de pico T_p y período de la onda reflejada T_r .

METODOLOGÍA DE ENSAYOS

El objetivo de este estudio fue identificar el límite que separa la zona estable de la inestable para las unidades consideradas y determinar de esta manera una relación funcional para el umbral de estabilidad. La metodología consistió en solicitar a la protección por medio de escalones de carga crecientes (distintas alturas de ola) durante un cierto tiempo (1 hora de ensayo) para cada período de ola definido. Si en ese lapso se hubiera detectado una situación de inicio de daño, las condiciones hidrodinámicas se mantuvieron constantes hasta completar la duración estipulada para los ensayos y se observó el comportamiento general de la estructura, el desarrollo del daño y su valor final. Si aún no se hubiera producido daño, se aumentó la altura de ola. En particular, la diferencia entre cada escalón de carga fue variable de acuerdo a la escala y alcanzó como máximo los 30 cm en prototipo. Adicionalmente, se realizaron algunos ensayos en los que se solicitó a la protección directamente con la ola máxima capaz de generarse en el canal a fin de observar las consecuencias.

Caracterizando cada ensayo por un valor de altura de ola, un período de pico del espectro y un valor de estabilidad (inestable o estable) de acuerdo con los criterios de falla adoptados, se expresó el resultado en forma de gráfico, en el que la ordenada es el adimensional de estabilidad ($H_s/\Delta D$) y la abscisa el parámetro de rotura (ξ). A continuación, se definió una curva umbral de estabilidad experimental. A partir de esa curva umbral de estabilidad, considerando un margen de seguridad debido a las incertezas involucradas en la modelación, se propuso una *curva de diseño* de cada protección para los distintos esquemas de obra ensayados.

Cabe aclarar que los valores determinados en el modelo y utilizados para estimar una curva de diseño corresponden a una altura de ola significativa H_s que no provoca el movimiento de la unidad. Considerando una distribución de Rayleigh para las olas, al interpretar los resultados se consideró que la ola que provocó la expulsión (o en su defecto el ascenso del 10 % de la altura de la pieza) fue una carga extrema (ver Marco Teórico-Criterios de diseño). Por consiguiente, la ola significativa H_s correspondiente que no provoca el movimiento se determinó como esa $H_{\text{daño}}/1.4$. Con esta ola y el resto de las variables se determinó el adimensional $H_s/\Delta D$ con el que se formó la dupla junto al parámetro de rotura ξ y fueron luego ubicados en el gráfico.

Para caracterizar el daño y relevarlo adecuadamente se utilizó un sistema de coordenadas para identificar a las piezas del talud. El eje de abscisas se eligió en dirección normal al eje de la obra, mientras que el eje de ordenadas se eligió coincidente con el eje lineal de obra. Así cada pieza quedó identificada en cada ensayo por un par ordenado (fila, columna). Luego de finalizado cada ensayo se determinó el daño ocurrido relevando todas las piezas que sufrieron algún desplazamiento relativo por medio de un calibre. Cuando algún ensayo condujo a la formación de un perfil ondulado tipo "S", se relevaron perfiles paralelos al eje de ordenadas definido.

Para juzgar el resultado del ensayo en estable o inestable se aplicó el criterio de falla correspondiente a cada mecanismo de falla. Teniendo en cuenta la precisión alcanzada en la terminación del talud de arena construido (en promedio 0.5 mm de desplazamiento relativo entre piezas) y los criterios de diseño adoptados, se establecieron criterios de falla propios para cada escala y tipo de bloque. Como desplazamiento relativo se consideró un valor constante en todo el perímetro de la pieza o el promedio con las unidades que se referenció.

En ensayos preliminares se observó la evolución del desarrollo del daño en la protección, concluyéndose que al cabo de 3 horas (modelo) el daño desarrollado (fundamentalmente por impacto de ola) llega a una situación de equilibrio para condiciones hidrodinámicas constantes. Se consideró entonces esa duración como referencia para los ensayos. Por otra parte y dependiendo de

la escala, esa duración representa en prototipo unas 7.5 y 9 hs, la que se consideró adecuada para describir una tormenta extrema en los posibles lugares donde se ubicarán estos bloques.

En cuanto a las características de las olas generadas en el canal, estas fueron aleatorias y respondieron a una distribución espectral $S(f)$ (espectro de densidad de energía, en función de la frecuencia f) predeterminada. El espectro de energía de las olas utilizado fue tipo Jonswap ($\gamma = 3.3$). Las alturas de olas fueron variables en los ensayos y alcanzaron como máximo el 1.65 m en prototipo (en la menor escala). Respecto a los períodos de ola usados también fueron variables en un amplio rango, desde los 2.5 seg a los 6 seg en prototipo.

Adicionalmente, en el estudio se determinó el coeficiente de rugosidad que interviene en la ecuación de cálculo del run-up para cada tipo de unidad premoldeada. Para ello se realizó la medición del run-up por medio de video - filmación desde un punto elevado perpendicular al talud.

A partir del período medio de las olas correspondientes a cada ensayo, se estimó la cantidad promedio de olas que incidieron sobre el talud durante la medición de run-up, se calculó el 2 % de ellas y se adjudicó a $R_{u2\%}$ el valor de run-up medido que ocupó esa posición en la muestra total de valores observados y ordenados de mayor a menor. Así se formaron ternas de valores de $R_{u2\%}$, H_s y ξ con las que se determinaron los valores del coeficiente de rugosidad γ_f para cada ensayo por medio de la ecuación (4).

Para la determinación del coeficiente de reflexión C_R de las distintas unidades, se determinaron las alturas de ola incidente y reflejada a través del análisis de los valores adquiridos por las tres sondas mediante la transformada de Fourier (Goda, 1976). Los resultados fueron relacionados con el parámetro de rotura ξ y la tendencia general se interpretó con un ajuste de curva.

RESULTADOS

Bloques sueltos

En el caso las unidades *Betoncover I* se pudo observar la manifestación de dos mecanismos de falla sobre esta protección para la configuración de obra dada: expulsión del bloque e inestabilidad geotécnica por impacto de la ola. También se pudo notar una buena interacción entre los bloques y la existencia de una reserva de resistencia del conjunto aún después de la extracción (manual) de algunas piezas.

Se constató en todos los ensayos que la arena ocupó el lugar libre que dejaron las piezas cuando fueron ascendidas. Esto implica que la pieza no puede volver a ocupar su posición original, quedando en una condición más vulnerable ante una ola mayor que pueda causar su expulsión definitiva, resultando además el talud marcadamente deformado.

Se observó además el desarrollo de daño causado por impacto de ola, produciéndose la formación de un perfil abrupto tipo "Z", pero sin alcanzar los desplazamientos definidos en el criterio de falla. Fue notable la influencia del período de la ola en la ubicación de la zona de daño y extensión de ese abrupto perfil. Para el caso de períodos cortos (3 seg en prototipo), al estar más definida la ubicación de la rompiente, la zona de daño resultó reducida casi siempre a pocas filas. En cambio, las olas rompientes que produjeron impacto variaron considerablemente su ubicación sobre el talud para los períodos más largos, conduciendo a una zona más amplia de daño. Se

observó que sólo ocurrió daño por encima del nivel estático en algunos casos para el talud de 1:2 y en ningún caso de los realizados en 1:3. El valor medio de esa cota en los ensayos donde ocurrió daño (desplazamientos mayores al 10 % de la altura del bloque) fue el siguiente:

$$\bar{d}_s = 0.1 H_s, \text{ donde } d_s \text{ es la cota superior respecto del nivel estático.}$$

No sucedió lo mismo para el daño ocurrido por debajo del nivel estático. En los ensayos realizados en el talud de 1:2 se obtuvieron los siguientes valores:

$\bar{d}_i = 0.6 H_s ; \sigma_{d_i} = 0.3 H_s$, donde d_i es la cota inferior respecto del nivel estático y σ el desvío standard de los valores observados. Para el caso de los ensayos realizados en 1:3, los valores fueron: $\bar{d}_i = 0.4 H_s ; \sigma_{d_i} = 0.1 H_s$.

Estos resultados permiten fijar criterios en el caso de obras con diferentes tamaños de protecciones.

Para el tipo de falla de *expulsión de bloque* los puntos que resultaron inestables se ubicaron correctamente de acuerdo a las curvas adoptadas como referencia.

Se presentan por tanto los resultados obtenidos y la curva umbral de estabilidad experimental en la **Figura 4**, correspondiendo a cargas que no provocan el movimiento de los bloques (denominadas frecuentes).

En la **Tabla 3** se sintetizan los resultados de los ensayos en los que se observó inestabilidad de los bloques (expresados en valores y para la densidad de los bloques en prototipo). Vale aclarar que no todos se encuentran cercanos al umbral de estabilidad.

Tabla 3: Condiciones de ola (cargas extremas) para inestabilidad de bloques correspondientes a prototipo ($\Delta=1.25$)

Altura de ola H_s (m)	Período de pico T_p (seg)	Altura de ola H_s (m)	Período de pico T_p (seg)
1.30	2.9	1.50	3.8
1.10	3.3	1.10	3.8
1.40	3.3	1.00	4.2
1.40	2.9	1.40	4.2

Como expresión de la *curva umbral de estabilidad experimental* se puede ajustar una curva de tipo potencial que pase por debajo de los resultados inestables, correspondientes a todas las condiciones hidrodinámicas e inclinaciones de talud ensayadas.

La expresión utilizada fue:

$$\frac{H_s}{\Delta D} = 4.11 * \xi^{-0.57}$$

A partir de este límite de estabilidad y en concordancia con la práctica usual para los revestimientos de taludes sometidos a oleaje, se propone una *curva de diseño* la cual presenta un

margen de seguridad que incluye las incertezas propias del estudio, los posibles alejamientos del comportamiento real por la escala escogida, los errores propios de la adquisición y determinación de los datos y errores en las demás variables que intervienen en el fenómeno. Como no es sencillo establecer un valor máximo para algunas de esas incertezas, la elección del margen de seguridad debe ser conservativa.

Para dicha *curva de diseño* se propone adoptar un margen de seguridad del 20 % respecto de la curva umbral de estabilidad experimental. Este valor se considera razonable de acuerdo a la práctica habitual aplicada a los diferentes tipos de revestimientos y protecciones costeras de uso en la actualidad. De allí que la expresión queda:

$$\frac{H_s}{\Delta D} = 3.3 * \xi^{-0.57}$$

La misma puede observarse en la **Figura 4** en línea continua.

Evidentemente una mejor y más detallada evaluación de cada caso en particular podrá redundar en un margen de seguridad menos conservativo.

Se realizaron también para estas unidades dos ensayos adicionales sobre un esquema de obra con filtro granular, con lo que se pudo observar un mejor desempeño como estructura, tanto en la expulsión del bloque como en el estado final del terraplén de arena, quedando el mismo prácticamente intacto. Si bien la cantidad de ensayos no fue importante alcanzó para observar estas mejoras obtenidas y la importancia de colocar un filtro granular en la configuración de obra.

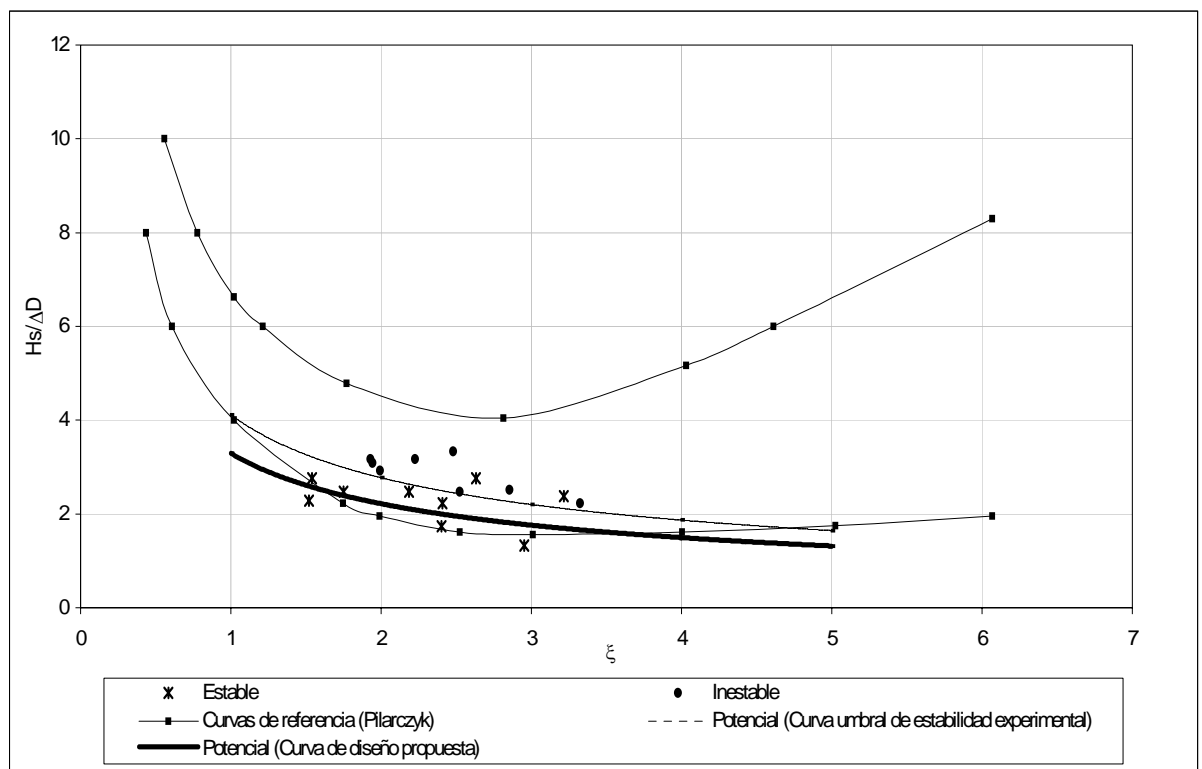


Figura 4: Estabilidad para bloques sueltos tipo Betoncover I sobre geotextil no tejido sobre arena

Al estudiar las unidades Betoncover II el talud de arena quedó intacto en todos los casos ensayados (inclusive para la inclinación 1:2).

Con esta configuración de obra se optimizó la resistencia hidráulica de las unidades frente a la expulsión, alcanzando la curva umbral de estabilidad experimental valores cercanos a la curva máxima de referencia.

Hubo eventos de inestabilidad geotécnica del filtro que condujeron a la expulsión en algunos casos de los bloques, en especial para los taludes empinados. Posteriormente se ensayó esta unidad con un filtro de material granular más grueso resultando menores asentamientos. De todas formas sería conveniente no utilizar este tipo de unidades sobre filtros granulares en taludes más empinados que 1:2.5.

Se verificó que el criterio adoptado del 50 % de asentamiento de la base donde se apoya la cobertura conduce efectivamente a la pérdida de interacción de las unidades y posterior expulsión.

En forma similar al caso anterior, se presentan los resultados obtenidos y la curva umbral de estabilidad experimental en la **Figura 5**, correspondiendo a cargas que no provocan el movimiento de los bloques (denominadas frecuentes).

En las siguiente **Tabla 4** se sintetizan algunos resultados de los ensayos donde se observó inestabilidad de los bloques (expresados en valores y en densidad relativa de prototipo) para las distintas inclinaciones y períodos de ola usados. Todos los valores indicados no pertenecen exclusivamente al umbral de estabilidad.

Se buscó una *curva umbral de estabilidad experimental* que limitó una zona estable de la inestable para todos los ensayos realizados.

Tabla 4: Condiciones de ola (cargas extremas) para inestabilidad de bloques correspondientes a prototipo

Altura de ola Hs (m)	Período de pico Tp (seg)	Altura de ola Hs (m)	Período de pico Tp (seg)
1.35	3.1	1.50	4.2
1.90	4.8	1.80	5.1

La expresión utilizada fue:

$$\frac{H_s}{\Delta D} = 6 * \xi^{-0.67}$$

Con los mismos criterios antes descriptos respecto de la práctica habitual para diferentes tipos de revestimientos y protecciones costeras de uso en la actualidad, se propuso una expresión para la *curva de diseño* (por tener un mayor respaldo teórico el comportamiento de las unidades bajo este esquema obra, se utilizó un margen de seguridad del 10 % respecto de la curva umbral de estabilidad experimental):

$$\frac{H_s}{\Delta D} = 5.5 * \xi^{-0.67}$$

Dicha curva puede observarse en la **Figura 5** en línea continua.

Al igual que en el caso del *Betoncover I*, una mejor y más detallada evaluación de cada obra en particular podrá redundar en un margen de seguridad menor.

Los valores arrojados por estas ecuaciones pueden estar limitados en algunos casos por la presencia de inestabilidad geotécnica por impacto. Este es el caso de taludes empinados, por ello se recomienda utilizar en estructuras de este tipo taludes más tendidos que 1:2 para evitar esta clase de falla y en el caso de inclinación 1:3 (V:H) y mayores no exponer la estructura a olas superiores a 1.50 m.

Con respecto al run up, los valores observados durante los ensayos de las unidades *Betoncover I* se utilizaron para determinar el coeficiente de rugosidad γ_f , alcanzando los siguientes valores:

$$\overline{\gamma_f} = 0.94 \ ; \ \sigma_{\gamma_f} = 0.09 \ ; \ C = 10 \%$$

indicándose en primer lugar el valor medio μ de la muestra obtenida, su desviación standard σ y el coeficiente de variación de la muestra $C = \sigma/\mu$.

Este $\overline{\gamma_f}$ es acorde con los valores recomendados por la literatura para este tipo de protecciones.

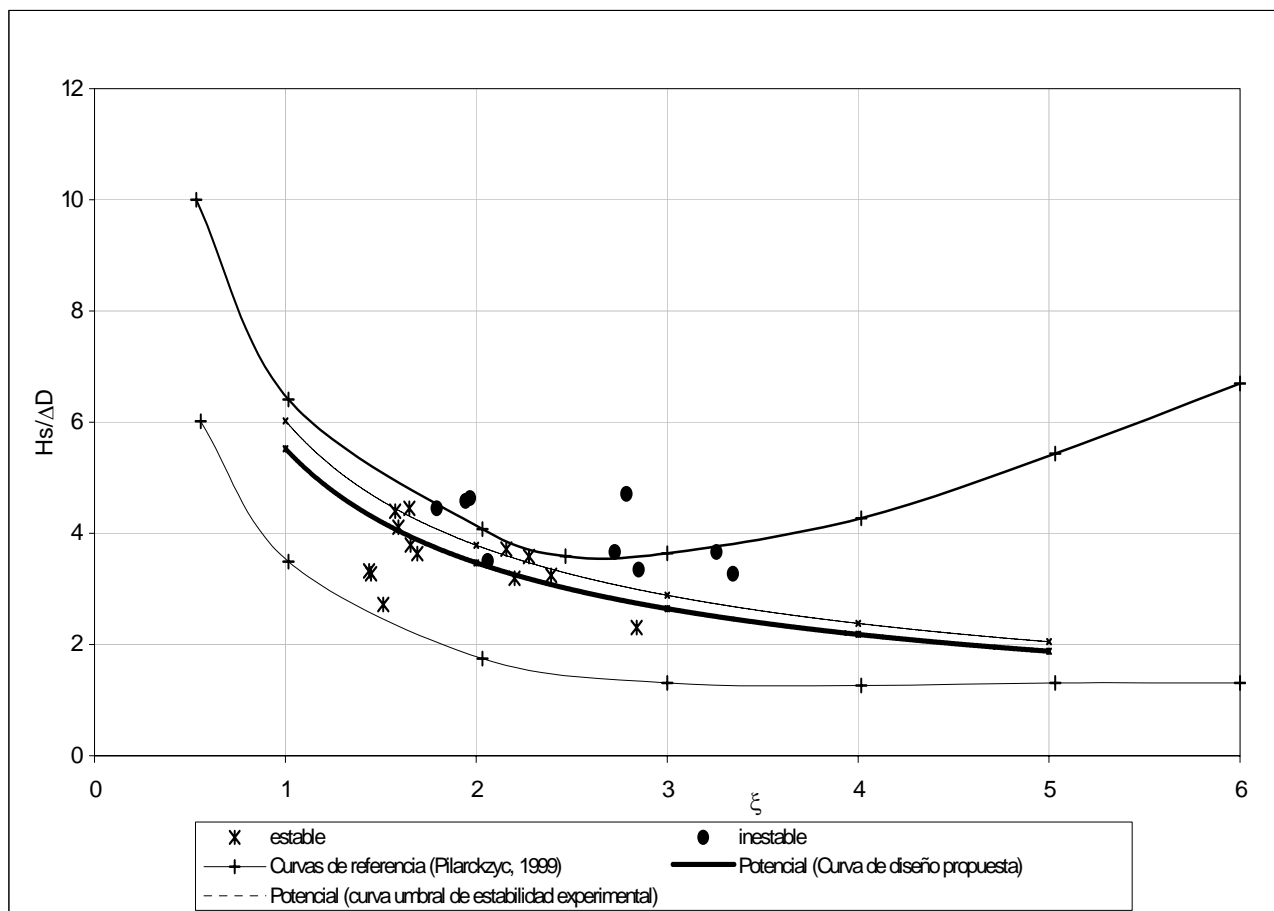


Figura 5: Estabilidad para bloques sueltos tipo *Betoncover II* sobre filtro granular

En forma análoga se analizaron los valores obtenidos para el run-up de las unidades *Betoncover II*. Los valores obtenidos para el coeficiente de rugosidad se pueden resumir como sigue:

$$\overline{\gamma_f} = 0.85 ; \sigma_{\gamma_f} = 0.1 ; C = 12 \%$$

habiendo disminuido el coeficiente de rugosidad respecto de las anteriores unidades debido al aumento de porosidad.

Los valores obtenidos del coeficiente de reflexión C_R para las unidades *Betoncover I* son acordes a los valores de referencia. Se ajustó una curva a la muestra de puntos obtenidos y tuvo por ecuación:

$$C_R = -0.0157 * \xi^3 + 0.0929 * \xi^2 + 0.1113 * \xi - 0.0198, \text{ válida para } \xi \text{ entre 1 y 4.}$$

El coeficiente de correlación cuadrático de ajuste de curva fue 0.83.

Similarmente para las unidades *Betoncover II* se pudo determinar la siguiente expresión:

$$C_R = 0.3411 * \xi - 0.2095, \text{ válida para valores de } \xi \text{ entre 1 y 3.}$$

En este caso el coeficiente de correlación cuadrático fue 0.95.

Bloques vinculados

La respuesta de la protección fue diferente de acuerdo a la inclinación del talud ensayada: 1:2 o 1:3. Para el caso del talud más tendido, los mecanismos de falla observados fueron los de impacto y de deslizamiento por efecto del descenso de la ola, actuando conjuntamente y contribuyendo a la pérdida de interacción entre las unidades a través de la deformación del talud. Si bien no hubo pérdida de bloques para la duración estipulada, es probable que ello ocurriera si se hubiera continuado con algunos ensayos.

Las condiciones hidrodinámicas que condujeron a la inestabilidad en el modelo se presentan en la **Tabla 5** en valores de prototipo.

Tabla 5: Condiciones de ola (cargas extremas) para inestabilidad de bloques vinculados correspondientes a prototipo

Altura de ola Hs (m)	Período de pico Tp (seg)	Altura de ola Hs (m)	Período de pico Tp (seg)
3.1	1.10	3.7	1.25
4.3	1.30	4.3	1.30

En los ensayos que hubo daño toda la protección se deformó con un comportamiento de entidad, formándose un perfil tipo “S” en varias columnas de bloques. Al descubrir el talud arenoso se observaron deslizamientos superficiales de arena.

Se notó que con la deformación adoptada como criterio de falla la pérdida de interacción entre los bloques ocurre efectivamente, conduciendo en algunos casos a la expulsión de los mismos.

Para el caso de la inclinación más empinada del talud se manifestó plenamente el mecanismo de falla de inestabilidad geotécnica por efecto del descenso (run down) de la ola. El esquema de obra planteado está en una situación de franca inestabilidad. Al comenzar las olas a actuar sobre el talud, ocurre inmediatamente un deslizamiento superficial de arena que provoca la expulsión de las unidades. A partir de ello el desprendimiento del resto de la cobertura es inevitable.

Por lo tanto, cuando se esté en presencia de terraplenes arenosos, se recomienda utilizar este tipo de protecciones con inclinaciones de talud más tendidas que 1:3 y para períodos menores a 3.5 seg y olas que no superen el metro de altura.

Asimismo se deduce que resultaría preferible utilizar este tipo de unidades delgadas intertrabadas y de baja permeabilidad en terraplenes formados por suelos cohesivos.

También de igual manera a los casos anteriores, se analizaron los valores de run-up obtenidos para las unidades *Betonplan*, correspondientes a los ensayos realizados con una inclinación de talud de 1:3. Los valores obtenidos para el coeficiente de rugosidad y su muestra fueron:

$$\overline{\gamma_f} = 1.08 \quad ; \quad \sigma_{\gamma_f} = 0.05 \quad ; \quad C = 5 \%$$

Este valor indica que un talud revestido con estas unidades resulta muy liso a la trepada de la ola.

Aunque la cantidad de determinaciones del coeficiente de reflexión para esta unidad fue pequeña, se destaca que la tendencia no fue muy diferente a la dada para los bloques *Betoncover I*.

CONCLUSIONES

Las experiencias en modelos físicos permiten avalar el desempeño hidráulico y estructural de revestimientos constituidos por bloques de hormigón sometidos a oleaje, particularmente cuando las características de la obra en estudio se adecuan al esquema original bajo el cual se realizaron los ensayos.

En modelos físicos de protecciones de bloques sueltos en pequeña escala no es conveniente alejarse de la densidad relativa de prototipo y se debe cuidar especialmente la terminación superficial de las caras de las unidades, debido a la importancia que cobran las fuerzas entre piezas adyacentes.

La protección de bloques sueltos tipo *Betoncover I* apoyados sobre geotextil no tejido en terraplén de arena estuvo sujeta a dos mecanismos de falla: la expulsión de los elementos y la inestabilidad geotécnica por impacto de la ola.

Los bloques sueltos demostraron un buen desempeño como conjunto, fundamentalmente gracias a la interacción que le brinda su forma y trabazón, lo cual redundó en una obra de relativamente poca fragilidad.

Asimismo se comprobó la existencia de una reserva de resistencia del conjunto aún después de la remoción de algunas de las piezas.

La inestabilidad geotécnica se manifestó por el nivel de daño que sufrió el talud de arena, desarrollándose perfiles de falla abruptos tipo “Z”.

Del estudio surgieron también características técnicas importantes como la zona posible de ser más dañada, permitiendo optimizar con este dato el diseño de las obras.

En todos los ensayos de las unidades tipo *Betoncover II* el estado final del terraplén arenoso resultó excelente, sin apreciarse deformaciones de ningún tipo. Sólo se observaron algunas deformaciones en el filtro debido al impacto de la ola. Con la configuración de obra ensayada, la resistencia hidráulica de estas unidades frente a la expulsión alcanzó valores elevados.

Para ambos tipos de bloques sueltos se propusieron *curvas de diseño* que resultan consistentes con los criterios adoptados y tienen en cuenta las incertezas y errores propios del estudio, y cuya aplicabilidad resulta coherente con la práctica habitual utilizada para los diferentes revestimientos y protecciones de uso actual.

Con respecto al run-up, las protecciones resultaron ser poco rugosas y el coeficiente de rugosidad alcanzó los valores típicos esperables para taludes revestidos con estos elementos.

Se propuso una expresión para ambas unidades que permite calcular el coeficiente de reflexión de un talud revestido por las mismas.

En los ensayos de las unidades tipo *Betonplan*, el impacto y descenso de la ola condujeron a que se produjese la inestabilidad geotécnica del talud, lo que derivó en una importante deformación de la superficie de apoyo de los bloques. Esto redujo la interacción entre piezas contiguas y condujo a la pérdida de algunas de ellas.

En taludes muy empinados de suelos granulares la estructura ensayada resulta ser francamente inestable. El uso de este tipo de unidades delgadas, intertrabadas y de baja permeabilidad sobre suelos cohesivos, disminuiría en gran medida el riesgo de falla por inestabilidad geotécnica. Cuando, por el contrario, se utilizan apoyadas directamente sobre terraplenes arenosos, deberían emplearse taludes tendidos con inclinaciones máximas de 1:3, y alturas de ola inferiores al metro, a fin de limitar la posibilidad de ocurrencia de fenómenos de este tipo.

El coeficiente de rugosidad alcanzó los valores dados por la experiencia de otros estudios de protecciones similares, considerando revestimientos de superficie muy lisa.

REFERENCIAS

B. Le Méhauté (1958) *“Perméabilité des digues en enrochements aux ondes de gravité périodiques”*, *La Houille Blanche*, N° 2 y 3 y 6 (1957).

CUR (Center for Civil Engineering Research and Codes) (1995) *Design manual for pitched slope protection*, Balkema, Países Bajos.

J. P. de Waal and J. W. van der Meer (1992) *“Wave run-up and overtopping on coastal structures”*, *ASCE, Coastal Engineering Conference*.

K. Pilarczyk (1999) *“Dykes and Revetments, Design, Maintenance and Safety Assesment”*, Balkema, Rotterdam.

Steven A. Hughes (1993) *“Physical models and laboratory techniques in coastal engineering”*, World Scientific.

U.S. Army, Corps of Engineers (2001) "*Coastal Engineering Manual*".

Y. Goda – Y. Suzuli (1976) "*Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments*", ASCE, Coastal Engineering Conference.