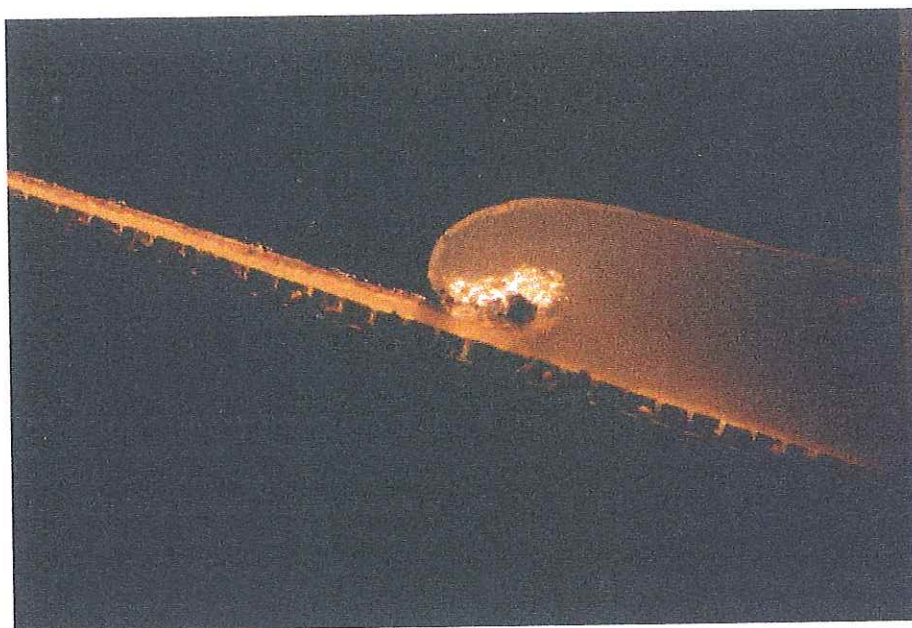




**ESTUDIO DE RESISTENCIA
AL OLEAJE DE UNIDADES
PREMOLDEADAS
BETONCOVER Y BETONPLAN**



INFORME FINAL
DICIEMBRE DE 2003

Informe LHA -221-02-03

Director del Laboratorio de Hidráulica

Ing. Julio De Lio

Jefe del Programa de Hidráulica Marítima

Ing. R. D. Castellano

EQUIPO DE TRABAJO

Ing. Andrés I. Grande

Téc. Mec. Carlos A. Haspert

M.M.O. Sebastián L. Peralta

Asesoramiento

Ing. Sergio Loschacoff

Fotografía y video

Srta. Beatriz Moreno

Instrumental

Ing. Gabriel Tatone

Ing. Javier Chielens

INDICE

SÍNTESIS	1
I INTRODUCCIÓN.....	4
II OBJETIVOS	4
II MARCO TEÓRICO.....	5
Mecanismos de falla	5
Estabilidad estructural.....	7
Estabilidad Geotécnica	11
Run-up	12
Reflexión.....	14
IV DESCRIPCIÓN DE LAS INSTALACIONES EXPERIMENTALES ...	16
V DISEÑO DEL MODELO	17
V.1 Leyes de similitud	17
V.2 Selección de la escala.....	17
V.3 Diseño del modelo	18
V.4 Efectos de Escala	18
V.5 Granulometría de la Arena.....	20
V.6 Selección del Geotextil	21
V.7 Construcción del Talud	22
V.8 Olas Aleatorias.....	23
V.9 Duración de los ensayos	23
VI METODOLOGÍA DE ENSAYOS	24
VI.1 Determinación de la Estabilidad.....	25
VI.2 Determinación del Run Up	26
VI.3 Determinación del coeficiente de Reflexión	27
VII UNIDADES BETONCOVER.....	28
VII.1 Descripción de las piezas	28
VII.2 Construcción de las Piezas del Modelo	28
VII.2 Protección sobre Geotextil sin Filtro Granular.....	29
VII.3.1 Descripción de la sección transversal	29
VII.3.2 Ensayos realizados.....	30
VII.3.3 Resultados obtenidos	30
Estabilidad	30
Run up.....	35
Reflexión.....	36
VII.4 Protección Sobre Geotextil con Filtro Granular	37
VII.4.1 Descripción de la sección transversal	37
VII.4.2 Ensayos realizados.....	38
VII.4.3 Resultados.....	38
Estabilidad	38
Run up.....	39
Reflexión.....	40

VII.5 Conclusiones	40
VII.6 Recomendaciones	41
VIII UNIDADES BETONPLAN.....	42
VIII.1 Descripción de las piezas	42
VIII.2 Construcción de las piezas del modelo	42
VIII.3 Protección sobre Geotextil sin Filtro Granular	43
VIII.3.1 Descripción de la sección transversal.....	43
VIII.3.2 Ensayos realizados	44
VIII.3.3 Resultados	44
Estabilidad	44
Run up.....	50
Reflexión.....	50
VIII.4 Conclusiones	51
VIII.5 Recomendaciones	52
ANEXO I	53
ANEXO II	55

ESTUDIO DE RESISTENCIA AL OLAJE DE UNIDADES PREMOLDEADAS BETONCOVER Y BETONPLAN

Informe Final

Diciembre 2003

SÍNTESIS

El presente **Informe Final** describe los estudios realizados mediante un modelo hidráulico de las unidades prefabricadas para protección de taludes *Betoncover* y *Betonplan*. Los estudios se efectuaron en el marco de un convenio suscripto entre la empresa CORIPA S.A. y el Instituto Nacional del Agua el día 13 de diciembre de 2002, y que dieran comienzo efectivo el 18 de febrero de 2003.

Las **tareas realizadas** consistieron en la prueba hidráulica de las unidades en un canal de olas, donde se estudió el comportamiento de la protección desde el punto de vista de su resistencia a la acción dinámica del oleaje y otras características técnicas funcionales como el run up (trepada de la ola) y el coeficiente de reflexión de la unidad.

Las **Conclusiones y Recomendaciones** más significativas son:

La protección de bloques sueltos (no vinculados) *Betoncover* apoyados sobre geotextil en terraplén de arena resultaron sujetos a dos tipos de falla bajo la acción de las olas: la expulsión de los elementos y la inestabilidad geotécnica por impacto de la ola.

Para el primer mecanismo citado se propuso una curva de diseño expresada como una relación funcional entre dos variables adimensionales, una conteniendo los términos de sollicitación (altura y período de las olas) y la otra incorporando las propiedades de la protección (peso específico y dimensión).

Respecto al segundo mecanismo, el talud de arena sufrió un daño importante al estar apoyadas las piezas únicamente sobre un geotextil.

Los bloques sueltos *Betoncover* han demostrado un buen desempeño como conjunto, resultando su trabazón en una obra de relativamente poca fragilidad.

La estabilidad de esta protección sobre un filtro granular mejoró notablemente ante idénticas condiciones hidrodinámicas, para ambos mecanismos de falla.

A los efectos del run up la protección resultó ser poco rugosa, coincidiendo el valor determinado del coeficiente de rugosidad γ_f con los órdenes indicados en la literatura para elementos de este tipo.

Se determinó una expresión que permite calcular el coeficiente de reflexión de una estructura con esta protección. Los valores hallados están también en correspondencia con los brindados por otros estudios.

Del estudio surgieron otras características técnicas importantes como la zona posible de ser más dañada, permitiendo optimizar con este dato el diseño de estas estructuras.

Por las notables mejoras observadas en el desempeño de los bloques *Betoncover* apoyados sobre filtro granular, es recomendable utilizar siempre esta protección de esa manera, al menos cuando el terraplén es de un suelo arenoso.

Los mecanismos de falla observados en los ensayos de unidades *Betonplan* fueron los que conducen a la inestabilidad geotécnica: por impacto de ola y por descenso de la ola (run-down).

Se ensayaron dos inclinaciones de talud: 1V:2H y 1V: 3H. En el caso más tendido hubo situaciones estables (cercasas al umbral de estabilidad) tanto como inestables. Es importante notar que la cantidad de ensayos realizada es pequeña y la curva de diseño propuesta tiene gran incerteza.

En el talud más empinado la protección no resultó estable en ningún caso. Los primeros descensos de las olas produjeron el deslizamiento superficial de la arena con la consiguiente expulsión de las unidades.

La cobertura tuvo un comportamiento muy frágil ante la pérdida de algunas unidades.

Se determinó un coeficiente de rugosidad utilizable en la determinación del $R_{u,2\%}$ que ajusta adecuadamente a los valores teóricos y coincide con valores dados por la experiencia en otros estudios.

La respuesta de esta unidad frente al fenómeno de la reflexión no difiere sustancialmente de la dada por la unidad *Betoncover*, para los ensayos realizados.

Bajo el esquema de obra planteado, se recomienda no utilizar esta unidad para inclinaciones más empinadas que 1V:3H y para períodos de ola mayores a 3.5 segundos.



Se recomienda realizar una mayor cantidad de ensayos para ambas unidades a fin de mejorar la precisión en la definición de las curvas de diseño propuestas.

I INTRODUCCIÓN

La empresa CORIPA S.A. dedicada al diseño y construcción de protección de márgenes ha convenido con el Laboratorio de Hidráulica del INA los presentes estudios mediante modelación física, destinados a la determinación de las características hidráulicas de dos nuevos productos: *Betoncover* y *Betonplan* diseñados para la protección de taludes contra la acción del oleaje.

En el caso del bloque *Betoncover*, se estudiaron dos configuraciones de obra: terraplén de arena con y sin filtro granular, en ambos casos apoyados sobre geotextil. Para las unidades *Betonplan* sólo se estudió un esquema de protección colocada sobre geotextil en terraplén de arena, es decir sin filtro granular.

Precede a este **Informe Final** un Informe de Avance 1 (IA1), donde se describe detalladamente la metodología aplicada, los ensayos realizados y los resultados obtenidos para las unidades *Betoncover* sobre geotextil en terraplén de arena. En el presente se incluyen además los ensayos y resultados correspondientes a la segunda configuración de obra y a los bloques *Betonplan*.

II OBJETIVOS

El propósito de estos estudios hidráulicos es analizar aspectos funcionales y de estabilidad de dos tipos diferentes de unidades prefabricadas para protección de taludes: los bloques premoldeados de hormigón *Betoncover* y *Betonplan*.

Los aspectos hidráulicos básicos a estudiar son 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, la capacidad de controlar la trepada del oleaje (run-up) y la capacidad de reflejar las olas incidentes.

III MARCO TEÓRICO

Diversos estudios sobre protecciones flexibles de elementos prefabricados vinculados y no vinculados han sido desarrollados, especialmente en Holanda, en el marco de los cuales se ha definido el comportamiento general de estas estructuras y caracterizado los diferentes tipos de falla. En ese marco se ha investigado la estabilidad hidráulica de variados tipos de unidades y obtenido expresiones generales para su dimensionamiento.

Si se pretende establecer la correspondiente curva de diseño para un tipo de protección en particular, se hace necesario determinar las características técnicas para ese producto específico. A través de ella se podrá dimensionar adecuadamente la obra de protección de márgenes donde serán utilizadas.

La metodología de diseño de protecciones implementada por la escuela holandesa (representada especialmente por investigadores como K. Pilarczyk y M.K. Breteler) es de amplia difusión en la actualidad, estando las ecuaciones de diseño avaladas por numerosos estudios y ensayos de laboratorio. Las normas del CUR (Ministerio de Transportes y Obras Públicas de Holanda) son ampliamente utilizadas en todo el mundo. A los efectos de disponer de una adecuada referencia para los resultados del presente estudio, se han seguido para su evaluación y descripción los lineamientos y criterios fijados por dicha escuela, indicados más adelante.

Mecanismos de falla

Las revestimientos de bloques son colocados para proteger el talud subyacente del ataque de las olas. Los mecanismos de falla de esos revestimientos pueden ser los siguientes:

- Expulsión de un bloque de la cubierta de protección
- Asentamiento de la cubierta de protección a causa de la introducción del material de base granular en el filtro
- Deslizamiento de la cubierta de protección sobre el talud por falta de una adecuada estructura al pie o un buen anclaje
- Inestabilidad geotécnica

Los mecanismos que interesan a este estudio son los de expulsión del bloque e inestabilidad geotécnica.

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 fuera mayor el bloque comenzará a moverse, pudiendo no volver a su posición original luego de ocurrida la sollicitación. En esos casos la pérdida del bloque es inminente.

Los criterios de diseño utilizados que permiten cuantificar estos sucesos son los siguientes¹:

- **Bajo cargas extremas**
 - a. No debe haber movimiento del bloque para la altura de ola H_s .
 - b. 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**
 - a. No debe haber movimiento del bloque para alturas de ola comprendidas entre H_s y $H_{2\%}$.

Estos criterios fueron los implementados para la determinación de las curvas de diseño de protecciones del Manual CUR, al igual que las dadas por Pilarczyk y otros, ambas utilizadas actualmente para el dimensionado de las protecciones. Para el presente estudio se adoptaron idénticos criterios de falla.

Si los bloques están vinculados y forman una estructura que actúa como una entidad, el mecanismo de falla es diferente. El grado de libertad para moverse de los bloques individuales es restringido notablemente y los bloques no podrán ser expulsados. Los mecanismos de falla que pueden desarrollarse en esta situación incluyen:

- Una columna normal al eje de la obra y de varios bloques de ancho puede ser elevada suavemente empujando la capa inferior: un perfil tipo "S" comienza a formarse en columnas de bloques y la interacción entre los mismos puede afectarse o eliminarse eventualmente.

¹ Design manual for pitched slope protection, CUR (Center for Civil Engineering Research and Codes). Balkema, 1995.

- La fuerza hacia arriba de la ola sobre la cubierta puede reducir la fricción entre la cobertura y la capa inferior, pudiendo deslizarse la protección hacia abajo como si fuera una entidad.

La inestabilidad geotécnica comprende a su vez dos tipos de rotura que consisten en deslizamientos del suelo base por efecto del escurrimiento interno de agua coincidente con el descenso de la ola (run-down) ó 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 evitar la falla por deslizamiento, particularmente en suelos no cohesivos. Cuando la base o subsuelo es de arcilla generalmente no se presenta este tipo de inconvenientes, pues la cohesión reduce el efecto. Para terraplenes de arena las superficies de deslizamiento que ocurren son superficiales.

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 relativo es importante respecto de la altura del bloque, provocando un descenso abrupto del perfil (en el caso de bloques no vinculados). En estos casos es importante juzgar si la interacción entre bloques sueltos está puesta en riesgo por la deformación. Los autores holandeses consideran que esto ocurre efectivamente y 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

En este mecanismo de falla interviene el ángulo de fricción interna de la arena, y por tanto su compacidad. Se ha comprobado que si el ángulo de fricción interna del material de base es mayor que 40° este mecanismo no causa inestabilidad. En el caso de una base poco compacta, este tipo de falla puede provocar que el coeficiente de seguridad descienda a la mitad.

Estabilidad estructural

La estabilidad de la cubierta de bloques de una obra de protección costera está amenazada por la expulsión de los mismos debido a la diferencia de presión que originan las olas. Esta diferencia de presión ocurre en el momento de máximo descenso (run down) de la ola. En ese momento el talud drena agua hacia afuera, ocasionando fuerzas de empuje sobre la zona inferior de la cubierta.

En el caso de olas rompientes sobre la estructura y una cubierta permeable sobre filtro granular¹, el cálculo teórico de la máxima diferencia de presión es considerablemente complejo. En la **Figura 1** se esquematiza una situación de máximo run down. En ella se muestra cómo el agua ingresa a la estructura a través de las unidades y luego asciende por el filtro (Zona A). El flujo de agua sale donde la presión sobre el talud es pequeña. Este flujo causa una diferencia de presión sobre la cubierta. Al mismo tiempo el agua está fluyendo hacia abajo y hacia fuera a través de la zona B. Este flujo también crea una diferencia de presión sobre la cubierta de unidades. Este modelo de circulación del agua es el responsable de la expulsión de los bloques. El impacto de ola puede dañar la cubierta que yace en el filtro granular en un corto período de tiempo. A un menor flujo de agua se tendrá una menor diferencia de presión. El flujo está limitado por el espesor del filtro granular y su permeabilidad. Si el espesor y permeabilidad del filtro son bajos se hace dificultoso para el agua fluir a través de él para escapar en forma no drenada a través de la cubierta, es decir, sin una gran diferencia de presión.

Esta diferencia de presión sobre la cubierta es medida a través de la *longitud de derrame*, parámetro cuya expresión es (Bezuijen, et al., 1990):

$$\Lambda = \sqrt{\frac{b_f D k_f}{k'}} \quad (1)$$

donde: Λ es la longitud de derrame (m), b_f es el espesor del filtro, D el espesor de la protección, k_f es la permeabilidad del filtro y k' es la permeabilidad de la cobertura.

La diferencia de presión que se desarrolla sobre la cubierta es mayor si la *longitud de derrame* lo es, y es menor si esta también es pequeña. En general este parámetro varía entre 0.5 y 3 metros.

Cuando se utiliza una cubierta sobre un geotextil sobre arena o arcilla (sin filtro granular), la *longitud de derrame* no puede ser determinada porque los valores de b y k no pueden ser calculados. En este tipo de estructura la descripción física del flujo es diferente. La *longitud de derrame* puede ser aplicada aproximadamente¹ con la condición que la permeabilidad de la cubierta sea mucho menor que la del filtro y esta última mayor que 1 mm/s.

Sin embargo², aceptando que en los casos de cubierta sobre geotextil sobre arena el movimiento del agua se restringe a un cierto espesor del terraplén se puede aplicar esta teoría. En esos casos se sugiere adoptar como espesor de filtro $b = 1$ m. de ancho del terraplén de arena, y para k su correspondiente permeabilidad.

La ecuación general resultante de este modelo teórico que interpreta el fenómeno de la estabilidad es la siguiente:

$$H_{scr} = c \Delta D \left(\frac{D}{\Lambda \xi_{op}} \right)^{0.67} \quad (2)$$

en donde: H_s : altura de ola significativa

Δ : densidad del material de la pieza relativa al agua $\left(\frac{\rho_m}{\rho_a} - 1 \right)$

D : espesor del bloque

ξ_{op} : parámetro de rotura o de Iribarren

Λ : longitud de derrame

y c es un coeficiente que depende levemente de Δ , de $\tan \alpha$, de la fricción entre bloques, etc.

El parámetro de rotura se define como sigue:

$$\xi_{op} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H_s / L_{op}}} \quad (3)$$

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).

² K. Pilarczyk, Dykes and Revetments, Design, Maintenance and Safety Assesment, Balkema-Fotterdam 1999.

Un método de diseño preliminar más simple y de fácil y rápida aplicación, utilizado cuando se analizan varias alternativas de protecciones en estructuras que incluyen filtro granular, es el que delinea la siguiente ecuación empírica³:

$$\left(\frac{Hs}{\Delta D}\right)_{cr} = \frac{F \cos \alpha}{\xi_{op}^b} \quad (4)$$

con un máximo de $\left(\frac{Hs}{\Delta D}\right)_{cr} = 8$; $\text{ctg } \alpha > 1.5$

donde b: constante, 2/3 para revestimientos de bloques.

El subíndice *cr* indica la condición de estabilidad crítica, a partir de la cual la sollicitación supera la capacidad resistente de la protección.

La ventaja de esta fórmula de diseño es su gran simplicidad. Sin embargo, su desventaja es que el valor del coeficiente F se conoce sólo para algunos tipos de estructuras.

A partir del método analítico descripto inicialmente y otros modelos numéricos y físicos, autores holandeses² obtuvieron curvas de dimensionado para distintos esquemas de obra. Para los esquemas involucrados en el presente estudio las curvas correspondientes son las que se indican en las Figuras 2, 3 y 4, en donde el parámetro adimensional resistente o de estabilidad $Hs/(\Delta D)$ se expresa en función del parámetro de rotura ξ . Correspondiendo a una protección de bloques sueltos sobre geotextil en arena, la misma protección pero sobre filtro granular y a una protección de bloques vinculados sobre geotextil en arena, respectivamente.

En las Figuras mencionadas se indican dos curvas envolventes que corresponden a varias protecciones de diferentes características de acuerdo a su respuesta frente al mecanismo de *expulsión del bloque*. En la misma se pueden distinguir tres zonas de variable condición de estabilidad: por debajo de la curva inferior se encuentra la zona segura para *todos los tipos de unidades* ensayadas. Por

³ Klein Breteler, 1996; Pilarczyk, 1998

encima de la curva superior, se encuentra la zona de inestabilidad para todos los tipos de protección. La zona intermedia, se encuentra en una situación que ha sido denominada por el autor como de "estabilidad dudosa". Esta designación indica que en esta región la estabilidad o inestabilidad de la protección dependerá del tipo de bloque utilizado.

Esto significa que la existencia de dos envolventes se debe al hecho de que los tipos de bloques de protección abarcados en esos estudios fueron variados. Para un único y determinado tipo de unidad prefabricada existe una única curva umbral de estabilidad que separa la zona estable de la inestable.

Cabe destacar que las figuras correspondientes a una protección sobre geotextil sobre arena surgen del relevamiento de ensayos en modelos físicos realizados en todo el mundo, sobre los que se trazaron las curvas que arroja el modelo teórico antes descrito aunque su aplicación no sea estrictamente correcta.

Estabilidad Geotécnica

Para el caso de inestabilidad geotécnica que conduce a un deslizamiento superficial cuando se tiene terraplenes de arena, se han diseñado diversas ecuaciones que interpretan el fenómeno y permiten verificar si el espesor de la cobertura más el del filtro son adecuados para evitar este mecanismo de falla. Una de ellas es la siguiente (Benzuijen, 1990):

$$\Delta D + (1 - n) \Delta_f b = d_s - 2.8 (1 - n) \Delta_z (1 - \tan \alpha / \tan \Phi) [(T_p k) / (n_z W_L)]^{1/2} \quad (5)$$

que es válida si la cobertura tiene una estructura de pie o anclaje superior.

En ella se indica:

D: espesor de la cobertura (debe reducirse por los espacios vacíos entre bloques u orificio del mismo)

Δ_f : densidad volumétrica relativa del material de filtro = $(\rho_f - \rho) / \rho$

Φ : ángulo de fricción interna del material de base (arena) $\approx 30^\circ$ suelta, $35 - 40^\circ$ compacta.

α : ángulo del talud.

Δ_z : densidad volumétrica relativa de la arena = $(\rho_z - \rho) / \rho$

Δ : densidad volumétrica relativa de la cobertura

n : porosidad del filtro.

N_z : porosidad de la arena.

T_p : período de la ola.

d_s : mínima carga de presión sobre el talud inmediatamente antes del impacto de la ola

k : permeabilidad de la arena de base

W_L : contenido de aire del agua ≈ 0.05 a 0.10

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

Los lineamientos para el cálculo y demás valores de interés son indicados en el manual CUR¹.

Run-up

La trepada de la ola (run-up) es una característica técnica que interesa conocer por tener incidencia en la definición de la altura de las obras costeras, pues de ello dependerá tanto el riesgo de inundación de los terrenos protegidos como la estabilidad del talud interno de la obra. Para cuantificar este parámetro se ha definido el $Ru_{2\%}$, que es la diferencia de altura medida en la vertical respecto del nivel estático del agua que es superada por el 2 % de las olas incidentes⁴.

El run up relativo está dado por $Ru_{2\%}/H_s$, con H_s altura de ola significativa (promedio del tercio superior de las olas o basada en el espectro de densidad de

⁴ J. P. de Waal and J. W. van der Meer, Wave run-up and overtopping on coastal structures, ASCE, Coastal Engineering Conference 1992, ch. 134.

energía: $4\sqrt{m_0}$, donde m_0 es el momento de orden cero del espectro de densidad de energía). Esta altura de ola significativa es la que ocurre al pie de la estructura.

En general, esta medida relativa es dada en función del parámetro de rotura o de Iribarren ξ , definido como lo indica la ecuación (3).

Para valores del parámetro $\xi < 2-2.5$, las olas tienden a romper sobre el talud inclinado (en la mayoría de los casos para taludes de 1:3 o menores). Para valores superiores de ξ las olas no rompen, ya sea por actuar sobre taludes empinados o por ser las olas de una pendiente pequeña.

La *fórmula de diseño* general que se aplica en diques es la siguiente⁴:

$$R_{u2\%} / H_S = 1.6 \gamma_b \gamma_f \gamma_\beta \xi_{op} \quad (6)$$

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, en el que la incidencia de las olas es normal al talud y no hay presencia de berma, 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 (6) lleva incluido un margen de seguridad debido a la dispersión propia de la modelación física de donde surgió. Ese margen de seguridad consiste en un desvío standard de la muestra. El valor medio de ese conjunto de valores arroja la siguiente ecuación:

$$R_{u2\%} / H_S = 1.5 \gamma_b \gamma_f \gamma_\beta \xi_{op} \quad (7)$$

con un máximo de $3 \gamma_f \gamma_\beta$. La misma fue determinada con un coeficiente de variación (σ/μ : desvío standard respecto del valor medio) de 0.085 que, agregado al coeficiente 1.5, produce en la práctica el valor 1.6 de la ec. (6).

Reflexión

Cuando un tren de olas se encuentra con un obstáculo en su propagación, sea un muro permeable o impermeable, una inclinación del fondo, un talud inclinado, etc, refleja una cierta cantidad de energía variable según el caso. Esa energía reflejada depende del período de las olas, de su altura y de ciertas propiedades físicas del obstáculo. El grado de ola reflejada está definido por medio de un parámetro denominado coeficiente de reflexión C_R , que establece la relación entre la altura de ola reflejada y la incidente.

Interesa conocer ese coeficiente para esta particular protección por su posible uso en obras, como puertos, donde la agitación interna debe ser controlada.

El coeficiente de reflexión para el caso de un talud inclinado recto dependerá 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 estará en función del parámetro de rotura o Iribarren ξ .

Algunas investigaciones de laboratorio (Seelig and Ahrens 1981, Seelig 1983, Allsop and Hettiarachchi 1988)⁵ indican que para la mayoría de los tipos de obras el coeficiente de reflexión puede calcularse con la siguiente expresión:

$$C_R = \frac{a \xi^2}{b + \xi^2} \quad (8)$$

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, si es regular o irregular. Diversos autores han utilizado para el caso de olas irregulares el parámetro de rotura calculado con el período medio (ξ_{om}) o el de pico del espectro (ξ_{op}).

Para el caso del presente estudio, en el que el talud es recto y alcanzado por olas irregulares, los valores de los coeficientes a y b de acuerdo a la referencia citada, son los siguientes:

$$a = 1.0 \quad ; \quad b = 5.7$$

⁵ Coastal Engineering Manual, U.S. Army, Corps of Engineers, Versión Preliminar 2001.

Debe observarse que en la ecuación el coeficiente C_R se aproxima al valor de a para grandes valores del parámetro ξ .

Para tener como referencia un valor mínimo del coeficiente de reflexión, con la misma ecuación se pueden determinar los valores correspondientes al enrocado con:

$$a = 0.6 \quad ; \quad b = 6.6$$

Ambas curvas resultantes (talud plano y enrocado) de la ecuación (8) serán utilizadas como referencia para el presente estudio.

IV DESCRIPCIÓN DE LAS INSTALACIONES EXPERIMENTALES

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, consistente en una placa de dimensiones ajustadas al ancho y alto de la sección transversal del canal, y montada sobre una estructura articulada que permite su movimiento oscilatorio. El conjunto es movido por un actuador oleohidráulico de alta presión, controlado por una servoválvula. Esta a su vez recibe una señal eléctrica y el conjunto se desliza proporcionalmente a la tensión recibida, generando ondas progresivas en el agua contenidas en el canal.

La señal eléctrica es generada mediante una computadora y ha sido determinada sintéticamente a partir de un espectro de densidad de energía predeterminado. La medición de altura de ola se realizó mediante un conjunto de tres sondas separadas entre sí a una distancia variable entre 15 y 25 cm de acuerdo al período de las olas utilizado. El conjunto se ubica a mitad de recorrido entre el generador de olas y el talud. Las señales eléctricas son convertidas en valores digitales de tensión y almacenadas en una computadora para su procesamiento.

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 permite determinar, en forma separada, 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 .

En la **Figura 5** puede observarse un esquema del canal en 3D.

V DISEÑO DEL MODELO

V.1 Leyes de similitud

Las fuerzas a que están sometidas las unidades de una protección por el flujo de agua generado por las olas son las de inercia, de arrastre y las viscosas. Las fuerzas de inercia resultan por el gradiente de presiones del agua al ser la protección atacada por la ola. Las fuerzas de gravedad también están involucradas y son las más importantes en este tipo de fenómenos, siendo junto a las de inercia las predominantes. Por tanto la ley de similitud que gobierna el fenómeno es la ley de Froude, que establece la relación entre las fuerzas de inercia y las gravitatorias. Los modelos utilizados para evaluar la estabilidad de este tipo de unidades responden a esta ley. De esta manera las fuerzas de inercia relativas a las gravitatorias son escaladas adecuadamente, las fuerzas de arrastre relativa a las gravitatorias son escaladas en forma casi correcta (dependiendo de su forma, peso y tamaño de la ola), mientras que las fuerzas viscosas no son escaladas correctamente, resultando en consecuencia distorsionadas.

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 se estará cumpliendo por tanto la ley de Reynolds. Esto podría acarrear algunos efectos de escala en aquellas zonas del modelo donde las fuerzas viscosas tienen mayor importancia. Esto sería por ejemplo, en el movimiento del agua dentro del material que conforma el talud del modelo en el cual el número de Reynolds dejaría de permanecer constante en la zona de flujo turbulento para ingresar en la zona de flujo laminar. Pasando entonces las pérdidas de carga a ser dependientes también del número de Reynolds. Por ello la relación de escala para los granos del suelo no es necesariamente la escala lineal de Froude, sino que requiere ser distorsionada para tener en cuenta estos efectos de escala.

V.2 Selección de la escala

La escala óptima para el modelo hidráulico se seleccionó de acuerdo con las condiciones de falla estimadas a partir de las ecuaciones de predimensionado de bloques premoldeados, teniendo en cuenta además las posibilidades que ofrecen las instalaciones experimentales disponibles (dimensiones, capacidad de generación de olas) y los elementos comerciales que permitían construir la matriz.

Para el presente caso, en el que la protección se dispuso sobre dos inclinaciones de talud diferentes y para distintas alturas de ola y períodos, se pudo inferir que una ola de $H_s \approx 1.15$ m como máximo en prototipo sería resistida por el bloque de mayor espesor, de acuerdo con la ecuación (4).

Considerando que la altura de ola máxima que permite realizar el generador en el canal es del orden de los 20 cm y que una ola en prototipo de 1.40 m sería suficiente para provocar la inestabilidad, se consideró conveniente definir la escala geométrica como $e_L \cong 7$. Como la matriz fue construida por medio de barras hexagonales de bronce se debieron respetar las medidas comerciales, surgiendo como elección definitiva de la **escala de longitudes** el valor $e_L = 6.8$.

De acuerdo a la ley de Froude, la **escala de tiempos** surge a partir de la anterior, siendo su expresión:

$$E_T = \sqrt{E_L} = 2.6$$

Escala de pesos: $E_p = E_L^3 = (6.8)^3 = 314.4$. De acuerdo a esto el peso de cada unidad modelo debe ser de 111 gramos.

V.3 Diseño del modelo

El programa de ensayos consistió en la prueba hidráulica de dos tipos de protección para dos inclinaciones de talud diferentes, 1:2 y 1:3 (V:H). Como es sabido esta variable ejerce una influencia muy importante sobre la estabilidad.

De acuerdo a las posibles zonas donde va a ser utilizada esta protección, se estimó que sobre la misma podrían incidir olas de los períodos relativamente cortos, propios de cuerpos de agua en los que el fetch es limitado, como en lagos o ríos. Se escogió sobre esa base un rango de variación del período de las olas en el entorno de los 3 a 4 segundos.

Para las dos inclinaciones se construyó un talud que alcanzó el metro de altura.

Debido a que se ensayó la estabilidad de la protección en un talud arbitrario, 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 para lograr una adecuada altura de ola generada y por otra parte limitar la trepada máxima de la ola.

V.4 Efectos de Escala

Como se mencionara en apartado V.1- **Leyes de Similitud**, los fenómenos que ocurren en el medio permeable no resultan correctamente escalados al gobernar el modelo la ley de Froude. El flujo del agua a través del filtro o el terraplén, según el caso, tiene un efecto importante en el fenómeno de la estabilidad de las piezas, pues de él dependen las diferencias de presión que ocurren sobre ambas caras de los elementos premoldeados. Por tanto se hace presente un efecto de escala que debe

ser tenido en cuenta al evaluar el tamaño de grano en prototipo representado en el modelo.

Adoptando inicialmente este efecto de escala, el diámetro en el modelo se puede expresar de la siguiente manera⁶:

$$d_M = d_P / E_L * K \quad (9)$$

En el caso del presente estudio el *coeficiente de agrandamiento* K tiene la siguiente expresión (ver Anexo I):

$$K = E_L^{3/4} \quad (10)$$

Respecto al adecuado escalado de la presión generada por el impacto de ola, Führböter (1986)⁷ condujo ensayos en prototipo y a una escala media (1:10) de cargas de impactos de ola rompientes sobre un talud impermeable de una inclinación 1V:4H. Utilizó alturas de ola que variaron de 0.10 m a 2.10 m en el modelo a gran escala. Él notó que las olas rompientes en el gran modelo introducían una mayor cantidad de aire. El autor concluyó que al extrapolar a prototipo las condiciones de ensayo existe un efecto de escala, de tal manera que la presión verdadera en prototipo es menor a aquella que resulta de la extrapolación del modelo. Esto significa que los resultados obtenidos en el modelo caen del lado de la seguridad.

Pueden ocurrir efectos de escala en el run up de una ola sobre un talud impermeable debido a la imposibilidad de escalar la rugosidad en modelos pequeños. Este efecto puede ser minimizado realizando taludes bien lisos.

Una indicación acerca de las escalas de longitud donde el efecto de escala en el run up es despreciable fue realizado por Jensen (1989) (Ref. 9), quien reportó una buena comparación entre relaciones de sobrepaso de prototipo y modelo utilizando escalas de 1:8 y 1:10.

Kostense y Boer (1984) estudiaron el efecto de la escala de modelo sobre la estabilidad de revestimiento de bloques de hormigón sobre un talud impermeable.

⁶ B. Le Méhauté, "Perméabilité des digues en enrochements aux ondes de gravité périodiques, La Houille Blanche", N° 6, 1957; N° 2 y 3, 1958.

⁷ Steven A. Hughes, "Physical models and laboratory techniques in coastal engineering", World Scientific, 1993.

Los ensayos fueron conducidos para cuatro escalas de longitud diferentes, entre 3.6 y 10, en los que se utilizó olas regulares e irregulares. Los autores concluyeron que la estabilidad del bloque no estuvo afectada dentro del rango de escalas estudiado, pero notaron que la fricción de contacto entre bloques podría incrementar la estabilidad en el modelo.

V.5 Granulometría de la Arena

En los ensayos se utilizaron dos tipos de arena: una fina y una gruesa, a fin de observar el comportamiento de esta variable bajo el esquema de obra planteado.

Las granulometrías de ambas arenas pueden observarse en las Figuras 7 y 8, designadas como curvas 1. Como se ve ambas granulometrías son bastante uniformes.

Las arenas del modelo se pueden caracterizar de la siguiente manera:

Arena fina: d_{10} : 0.16 mm
 d_{50} : 0.25 mm
 d_{90} : 0.30 mm

Arena gruesa: d_{10} : 0.55 mm
 d_{50} : 0.70 mm
 d_{90} : 0.90 mm

Partiendo de la ecuación general del movimiento del agua dentro de los macizos porosos, al plantear la similitud de Froude, se concluye que manteniendo la relación de vacíos del suelo en modelo y prototipo, las fuerzas de inercia estarán bien escaladas, estando en similitud el resto de las magnitudes físicas que intervienen en dicho movimiento⁶. Para que esta condición de igualdad de índices de vacío se cumpla, es suficiente trasladar en forma paralela las curvas granulométricas una magnitud igual a la que relaciona los diámetros de los granos del prototipo y modelo.

Como se ha visto en el apartado anterior, la relación que vincula esas magnitudes se deduce de las ecuaciones (9) y (10):

$$d_p = d_M * E_L^{1/4} \quad (11)$$

Por lo que las granulometrías de las arenas representadas en prototipo se pueden resumir de la siguiente manera:

Arena fina: d_{10} : 0.26 mm

d_{50} : 0.40 mm

d_{90} : 0.48 mm

Arena gruesa: d_{10} : 0.89 mm

d_{50} : 1.13 mm

d_{90} : 1.45 mm

En las Figuras 7 y 8 se pueden observar las curvas granulométricas correspondientes a las arenas de prototipo, designadas como curvas 2.

V.6 Selección del Geotextil

Al comenzar con los ensayos se empleó un geotextil comercial con las siguientes propiedades: permeabilidad normal de 0.40 cm/s, abertura de filtración de 150 μm , gramaje de 150 g/m², entre otras. En estos ensayos se pudo observar que el geotextil no permitía un adecuado asentamiento relativo entre las piezas del modelo y hacía dificultoso el movimiento característico de la arena debajo del mismo al ser solicitada la protección. Por ello se decidió realizar un ensayo utilizando dos tipos de elementos: el geotextil mencionado anteriormente y una tela tejida de trama fina y muy pequeño espesor. Para el primer caso, luego de realizado el ensayo, el talud quedó como se muestra en la Foto 1, donde se puede apreciar sólo una suave marca de lo ocurrido debajo de las piezas. Con similares condiciones de ensayo se utilizó en un segundo caso la fina tela, resultando lo mostrado en la Foto 2. Claramente se observan canaliculos por los que hubo movimiento de arena y además se permitió el asentamiento relativo de piezas, tanto de ascensos como de descensos; ocupando la arena el lugar de las piezas en el caso de los primeros.

Las razones por la que estos dos fenómenos no ocurrieron en el caso del geotextil se adjudicó al excesivo espesor relativo a la altura de las piezas y a su superficie rugosa.

Por tanto se concluyó que el comportamiento de la tela era más adecuado en esta escala de modelo, por lo que desempeñó la función de geotextil en los ensayos sistemáticos.

La permeabilidad vertical de la tela se determinó 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 de la cantidad de agua que pasa por una sección bajo una determinada carga hidráulica en condiciones de flujo laminar, en la dirección normal del geotextil.

El ensayo se realizó bajo una carga hidráulica constante de 50 mm, utilizando un área de probeta de 5027 mm² durante 10 segundos.

Los valores hallados indican una permisividad de 0.8 l/seg, con un coeficiente de variación (valor medio/desvío standard) en la determinación del 2 %. (Anexo 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 de 0.016 cm/s.

Para establecer el valor en prototipo de la permeabilidad de geotextil que se está representando con esta tela, es necesario evaluar la permeabilidad de la protección, que depende del material que compone el filtro. Como en este caso no se utilizó filtro granular en el esquema de obra planteado, no hay información técnica disponible para un material tan fino, ni siquiera considerando las características de la arena que se utilizaría en prototipo.

Entonces, si bien no resulta posible utilizar el valor de la permeabilidad estimado en este momento por la cuestión técnica indicada, será de mucha utilidad en estudios posteriores.

V.7 Construcción del Talud

A los efectos de permitir observar directamente el talud y la trepada de la ola y facilitar la medición, observación y registro fotográfico, se construyó el talud frente a una de las ventanas de observación que compone el canal de olas. El talud fue construido utilizando rampas de acrílico con estructura metálica cubiertas con una capa de arena de unos 25 cm. Con ello se evitó construir un talud íntegramente en arena con el consiguiente esfuerzo sobre la ventana de vidrio.

Previo a esta toma de decisión, se realizaron dos ensayos comparativos: uno, construyendo el talud íntegramente de arena sobre el extremo del canal donde los laterales son de mampostería y otro, con una capa de arena de 25 cm de espesor apoyado sobre la rampa de acrílico en la zona de la ventana principal del canal.

Para evitar cualquier deslizamiento de la capa de arena sobre la placa de acrílico, inducido por la disminución de rugosidad introducida, a la misma se le adosaron pequeñas barras transversales de madera. Entre ambas configuraciones no se observaron diferencias en el comportamiento de la estructura de protección con respecto a su estabilidad y la trepada de ola.

V.8 Olas Aleatorias

Las olas generadas en el canal para la prueba hidráulica del modelo son aleatorias y responden a una distribución espectral $S(f)$ (espectro de densidad de energía, en función de la frecuencia f) predeterminada. En este caso se utilizó el espectro de Bretschneider- Mitsuyasu. En las **Figura 9** se puede ver la forma de uno de estos espectros para un período y altura de ola.

A partir de los espectros así definidos, y mediante la antitransformada de Fourier, se generó la serie temporal de valores de tensión eléctrica que gobierna la posición del generador de olas.

V.9 Duración de los ensayos

Según los estudios ya mencionados, la duración de los ensayos para este tipo de protección influye ciertamente en los resultados. Se ha observado que si para la duración fijada no ocurre el movimiento del bloque, es poco probable que sufra algún desplazamiento al continuar el ensayo. Si sufrió algún pequeño desplazamiento, seguramente se producirá un mayor daño si se continúa el ensayo.

Para el presente estudio, se observó en ensayos preliminares cómo era el desarrollo del daño en la protección, obteniéndose como conclusión 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 asumió esta duración de temporal (equivalente a aproximadamente 8 hs en prototipo) como la duración de diseño de una tormenta extrema de los posibles lugares donde se ubicarán estos bloques.

VI METODOLOGÍA DE ENSAYOS

De acuerdo con lo indicado en el apartado III Marco Teórico-*Estabilidad*, es de esperar que los resultados del modelo se ubiquen en la región delimitada por las curvas de estabilidad e inestabilidad de todos los tipos de protecciones dadas por Pilarczyk². El objetivo de este estudio es encontrar una curva umbral de estabilidad, que constituya el límite que separa la zona estable de la inestable para ambas protecciones.

La realización de un conjunto de ensayos preliminares permitió ajustar la metodología de detalle para la realización de ensayos sistemáticos. La misma consistió en solicitar a la protección por medio de escalones crecientes de carga (distintas alturas de ola) durante un cierto tiempo (1 hora de ensayo) para cada período de ola definido. Cuando al cabo de esa duración se alcanzó una situación de inicio de daño, se mantuvieron las condiciones hidrodinámicas constantes hasta completar la duración estipulada para los ensayos (tres horas) 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 continuó con un escalón de carga inmediato superior. En particular, la diferencia entre cada escalón de carga fue de unos 3 cm de altura de ola modelo. 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 a que conducía.

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, comenzando a contabilizar las filas desde la de cota inferior. El eje de ordenadas se eligió coincidente con el eje lineal de obra comenzando a contabilizar las columnas desde la izquierda (visto de frente el talud), es decir desde la ventana de visualización del canal de olas. Así cada pieza quedó identificada en cada ensayo por un par ordenado (fila, columna). Se colocaron en el ancho del canal 15 columnas de las unidades *Betoncover* y 10 columnas en el caso de unidades *Betonplan*. 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 tipo "S", se relevaron perfiles paralelos al eje de ordenadas definido.

Luego de caracterizado 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 antes descriptos, se ubicó el punto resultante en un 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 similar a la curva que separa la zona estable de la de estabilidad dudosa de las Figuras 2, 3 y 4 mencionadas para las dos protecciones.

A partir de esa curva umbral de estabilidad, considerando un margen de seguridad a partir de las incertezas involucradas, se propuso una *curva de diseño* de cada protección para la configuración de obra ensayada.

Cabe recordar que durante este estudio se consideraron solamente los dos siguientes mecanismos de falla: *expulsión del bloque* e *inestabilidad geotécnica*.

VI.1 Determinación de la Estabilidad

En cada ensayo se observó qué tipo de mecanismo de falla fue predominante y luego se aplicó el criterio de falla correspondiente, estableciendo así el resultado del ensayo en estable o inestable.

Siguiendo el criterio indicado en el apartado III Marco Teórico - *Mecanismos de falla*, y teniendo en cuenta la precisión alcanzada en la terminación del talud de arena construido, se establecieron los siguientes criterios de falla en el modelo:

Para el caso de los bloques sueltos *Betoncover*:

- En el caso del mecanismo de *expulsión del bloque*:

$$\text{Desplazamiento de falla (ascenso relativo)} = 0.1 * D_M + e_{\text{máx}} = 4 \text{ mm}$$

- En el caso del mecanismo de *inestabilidad geotécnica* (formación de un perfil "Z"):

$$\text{Desplazamiento de falla (descenso)} = 0.5 * D_M + e_{\text{máx}} = 17 \text{ mm}$$

donde D_M es el espesor del bloque del modelo (≈ 33 mm) y $e_{\text{máx}}$ es una medida del desplazamiento inicial relativo entre piezas (es una medida de la precisión alcanzada en la terminación del talud de arena). Cabe aclarar que para que un desplazamiento sea de tal medida, ese valor debe ser constante en todo el perímetro de la pieza o el promedio con las que se referencia. El valor de $e_{\text{máx}}$ se estimó en 0.5 mm de asentamiento relativo positivo (descenso) o negativo (ascenso).

Para el caso de bloques vinculados *Betonplan*:

- En el caso del mecanismo de *expulsión del bloque* (formación de un perfil tipo "S"):

Desplazamiento respecto del perfil original (ascenso o descenso, ver Figura 10):

$$0.5 * D_M = 8 \text{ mm}$$

VI.2 Determinación del Run Up

De acuerdo a lo presentado en el apartado III Marco Teórico – *Run up*, con este estudio se pretende determinar 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. El equipo utilizado fue una cámara Sony CH 1400CE sistema PAL, una video grabadora y un monitor. Además se colocó sobre el talud, en una posición lejana a la zona de rompiente de las olas, una regla hidrométrica metálica que permitió una buena visualización de las medidas. La tarea de gabinete se realizó con una video reproductora multinorma y un monitor.

Según la definición del parámetro $R_{u2\%}$, el 2 % se refiere al número de olas incidentes y no del número total de run-up que ocurren. Por lo tanto, de cada medición lo que interesa es el valor de run-up correspondiente a la ola de posición 2 % del total de olas que inciden en el talud, ordenadas en porcentaje de ocurrencia acumulado. El tiempo elegido para cada filmación fue consecuente con la duración de la adquisición de datos utilizada para determinar la altura de ola significativa y el período de espectro. Así fue que a lo largo de 10 minutos se observaron los mayores valores de run-up que ocurrieron.

A partir del período medio ensayado en cada ocasión, se estimó la cantidad media de olas que incidieron sobre el talud durante la medición de run-up y se determinó la posición de los valores del run-up ordenados de mayor a menor que correspondió a la posición 2 % de las olas incidentes. 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 (7).

Para presentar los resultados se utilizó la ecuación (7) y no la ecuación (6), debido a que la primera corresponde a los valores medios de los *resultados experimentales* que le dieron origen y la última es la utilizada para el *diseño* de las

obras con el indicado margen de seguridad. Con el coeficiente de variación de la ecuación (7) se pueden trazar dos líneas de referencia, de manera de considerar que la mayoría de los puntos observados se hallen dentro de la zona limitada por \pm un desvío standard respecto del valor medio, descartando aquellos demasiado dispersos.

VI.3 Determinación del coeficiente de Reflexión

A través del análisis de los valores adquiridos por las tres sondas usadas, mediante la transformada de Fourier, y conociendo la distancia que las separa entre sí (variable con el período de la ola) se pudo determinar las características del espectro de ola incidente y reflejado⁸. Obtenidas las alturas de ola incidente y reflejada se determinó el coeficiente de reflexión C_R dado en el apartado III.

Los resultados se dibujaron en un gráfico Coeficiente de reflexión C_R vs. Parámetro de rotura ξ . A su vez, en el mismo gráfico se incluyeron los valores dados por otros autores, como los de la ecuación (8), utilizados como referencia.

⁸ Y. Goda – Y. Suzuli, Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments, ASCE, Coastal Engineering Conference, ch. 48, 1976.

VII UNIDADES BETONCOVER

VII.1 Descripción de las piezas

Los elementos prefabricados *Betoncover* están constituidos de hormigón simple, tienen una altura de 23 cm y un peso aproximado de 35 kg, según sea el peso específico del hormigón.

Cada pieza está constituida de tres prismas hexagonales unidos en dos de sus caras, otorgando una cierta trabazón al conjunto.

El diámetro de un círculo exterior en el que se inscriben los tres hexágonos es de 40 cm, siendo la distancia entre 2 caras paralelas de cada uno de los hexágonos de unos 17 cm aproximadamente (**Figura 11**). Cada uno de estos polígonos regulares posee un orificio centrado de forma hexagonal, que le otorga porosidad a la cubierta constituida por estos elementos.

La porosidad de cada pieza (es decir la relación entre volumen de vacíos y volumen total, traducido en este caso a una relación de superficies) es de 15 %.

El área total de la sección es de 780 cm², el área neta de 662.5 cm² y el volumen neto de cada pieza es de 0.0152 m³. Para cubrir 1 m² son necesarias 12.8 piezas.

VII.2 Construcción de las Piezas del Modelo

Las piezas del modelo fueron construídas por medio de moldes de caucho sintético en los que se coló mortero (cemento y arena fina), material componente de las mismas. Los moldes fueron realizados a partir de una matriz que tiene la forma externa de las piezas, dada por medio de tres prismas hexagonales realizados a partir de una barra de bronce de dimensiones existentes en el mercado.

Con proporciones adecuadas de cemento, arena y acelerante de fragüe se construyeron las 1031 piezas (**Foto 3**) necesarias para cubrir un talud de 1:3 hasta el metro de altura.

Se determinó el peso y volumen de las piezas. Para la obtención del peso representativo de las mismas se pesó su totalidad en estado seco por medio de una balanza electrónica de precisión, cuya sensibilidad es de 0.1 g. El volumen de las piezas del modelo utilizado para el cálculo de la densidad relativa fue el teórico, determinado a través de la escala de longitudes.

Los parámetros que caracterizan la muestra de los valores de la medición del peso de la totalidad de las piezas son:

$$\mu = 102.2 \text{ g}$$

$$\sigma = 3.8 \text{ g}$$

$$C = 0.04$$

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.

El valor de la densidad relativa definida como la relación entre el peso específico medio de las piezas (cociente entre el peso medio y el volumen teórico de una pieza) 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

ρ_a : densidad del agua

Las Fotos 4 y 5, muestran el modelo construido en el canal de olas del Laboratorio de Hidráulica, pudiendo apreciarse la buena estética que tendrá una obra terminada.

VII.3 Protección sobre Geotextil sin Filtro Granular

VII.3.1 Descripción de la sección transversal

Se construyó un talud de arena (capa de arena sobre la rampa de acrílico) compactado por capas, colocándola con un grado de saturación cercano al 100 %. Sobre el mismo se colocó la tela fina que simula el geotextil en forma no anclada, de manera que permitiera algún tipo de deslizamiento que pudiera ocurrir por falta de fricción. Las piezas fueron apoyadas en el inicio del talud contra un listón de madera, que simuló la viga de fundación utilizada habitualmente en este tipo de estructuras.

En la Figura 12 se puede observar la sección transversal utilizada en el modelo.

VII.3.2 Ensayos realizados

Los ensayos se realizaron sobre taludes de 1:2 y 1:3 con alturas y períodos de ola variable. Los ensayos se hicieron en su mayoría siguiendo la metodología descripta y algunos con la ola máxima producida por el generador, a fin de observar las consecuencias de superar un valor umbral.

Los períodos correspondientes a prototipo utilizados en los ensayos estuvieron ubicados fundamentalmente entre los 3 y 4 segundos, incluyendo algunos casos con 2.5 y 4.5 segundos para lograr una mejor descripción de la curva umbral de estabilidad. Las alturas de ola fueron variables alcanzando como máximo el 1.20 m.

En el siguiente apartado se incluyen las condiciones hidrodinámicas de algunos de los ensayos.

VII.3.3 Resultados obtenidos

Estabilidad

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. Para el primer caso se alcanzaron estados de falla y para el segundo se observó un desarrollo del estado previo a la misma, sin alcanzarla, de acuerdo a los criterios adoptados mencionados en el apartado VI.

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.

Para el tipo de falla de *expulsión de bloque* los puntos que resultaron inestables se ubicaron correctamente en la zona de *estabilidad dudosa* definida por las curvas adoptadas como referencia (Figura 2).

De acuerdo con los criterios indicados en el manual CUR para el diseño de protecciones (expuestos en Marco teórico – Estabilidad), el espesor de la misma se determina en función de la altura de la ola de diseño H_s , de manera que la misma no provoque el movimiento del bloque. En un próximo paso del dimensionado se verifica que una ola extrema ($H_{2\%}$) no produzca un desplazamiento del bloque mayor al 10 % de su altura.

Como el objetivo del estudio es establecer una *curva de diseño* para la protección siguiendo aquellos lineamientos, el espesor de bloque que surja de dicha curva debe asegurar el no movimiento para la correspondiente ola significativa H_s y un desplazamiento máximo del 10 % del espesor para una ola $H_{2\%}$.

Asumiendo una distribución de Rayleigh para las olas aleatorias, ambas magnitudes están relacionadas de la siguiente manera:

$$H_{2\%} = H_s * 1.4 \quad \text{con un máximo de} \quad H_{2\%} = 0.6 * d$$

siendo d la profundidad.

Se consideró el resultado de un ensayo como inestable, si al finalizar, el desplazamiento del bloque fue del 10 % de su altura. La ola correspondiente a ese daño –de acuerdo a lo expuesto anteriormente– se consideró como la $H_{2\%}$. Al incluir la dupla $H_s/\Delta D$ vs ξ en el gráfico de la curva de diseño se asumió la distribución de Rayleigh para las olas, con la que se determinó la H_s que no provoca movimiento.

Se recuerda que la densidad relativa de las piezas del modelo fue de 1.1. Como en obra es posible conseguir densidades más elevadas se deben transformar los adimensionales de estabilidad ($H_s/\Delta D$) a esos valores de prototipo. Se consideró una densidad de hormigón de prototipo de 2250 kg/m^3 .

Se presentan por tanto los resultados obtenidos y la curva umbral de estabilidad experimental (línea punteada) en la **Figura 13**, correspondiendo a cargas que no provocan el movimiento de los bloques (denominadas frecuentes) y a una densidad relativa de 1.25. Se incluyeron los resultados de ensayos con ambos tipos de arena.

En las siguientes **Tablas 1 y 2** se sintetizan los resultados de los ensayos en los que se observó inestabilidad de los bloques (expresados en valores de prototipo). Vale aclarar que no todos se encuentran cercanos al umbral de estabilidad.

Como expresión de la *curva umbral de estabilidad experimental* se puede utilizar una de similar forma a la dada por Pilarczyk para el predimensionado de protecciones sobre filtro granular (ecuación 4):

$$\left(\frac{H_s}{\Delta D} \right)_{cr} = \frac{F \cos \alpha}{\xi_{op}^b} \quad (12)$$

resultando para la protección *Betoncover* $F = 5$ y $b = 0.57$.

Ensayo	Tipo de arena	Altura de ola Hs (m)	Período medio Tm (seg)	Período de pico Tp (seg)
7	Fina	0.90	3.0	2.9
9	Gruesa	0.80	3.3	3.3
10	Gruesa	1.0	3.3	3.3
12	Gruesa	1.0	2.9	2.9
13	Gruesa	1.10	3.9	3.8
14	Fina	0.80	3.7	3.8
17	Fina	0.70	3.1	4.2
29	Fina	1.0	3.4	4.2

Tabla 1 – Condiciones de ola para inestabilidad de bloques (cargas frecuentes)

Ensayo	Tipo de arena	Altura de ola Hs (m)	Período medio Tm (seg)	Período de pico Tp (seg)
7	Fina	1.30	3.0	2.9
9	Gruesa	1.10	3.3	3.3
10	Gruesa	1.40	3.3	3.3
12	Gruesa	1.40	2.9	2.9
13	Gruesa	1.50	3.9	3.8
14	Fina	1.10	3.7	3.8
17	Fina	1.0	3.1	4.2
29	Fina	1.40	3.4	4.2

Tabla 2 – Condiciones de ola para inestabilidad de bloques (cargas extremas)

A partir de este límite de estabilidad se propuso una *curva de diseño* de la protección, para la cual se adoptó un margen de seguridad que incluye las incertezas propias del estudio (dispersión), 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 (inclinación del talud, la determinación de la densidad relativa y el espesor de los bloques, etc).

Como no es sencillo establecer un valor máximo para algunas de esas incertezas, la elección del margen de seguridad debió ser conservativa.

Como expresión de dicha *curva de diseño* se propone adoptar un margen de seguridad del 20 % respecto de la curva umbral de estabilidad experimental:

$$\left(\frac{Hs}{\Delta D} \right)_{cr} = \frac{4 \cos \alpha}{\xi_{op}^{0.57}} \quad (13)$$

Este margen de seguridad podrá ser disminuido en un futuro realizando una mayor cantidad de ensayos a fin de disminuir la dispersión propia del modelo. Un margen de seguridad del 10 % hubiera conducido a un coeficiente de 4.5 en lugar de 4, con el mismo exponente en la potencia.

Dicha curva puede observarse en la **Figura 13** en línea continua.

En la **Foto 6** se muestra el desarrollo de un ensayo particular.

Los ensayos que alcanzaron la inestabilidad de las piezas se registraron en material fotográfico. Se muestran las **Fotos 7, 8, 9 y 10** para un caso particular, el ensayo 7. En ellas se puede observar el ascenso y descenso relativo de las piezas, presentándose con pequeños carteles los casos más significativos. En la **Foto 7** se ve el importante ascenso relativo que sufrió una de las piezas, mientras que en la **Foto 8** los descensos ocurridos. En la **Foto 9** se puede observar cómo se ha comportado el flujo de agua, al dejar los restos de arena que pasó a través de la tela claramente por debajo de una definida fila. En la siguiente **Foto 10** se muestra el estado final del talud de arena. Pudo también observarse en todos los ensayos que la arena ocupa el lugar libre que dejan las piezas cuando son ascendidas. Esto implica que la pieza no puede volver a ocupar su posición original, quedando en una condición de mayor inestabilidad ante una ola mayor que pueda causar su expulsión definitiva.

Por último, respecto de los resultados obtenidos para este tipo de falla, se pudo observar que no hubo diferencias en cuanto a la estabilidad al modificar las características de la arena.

Se observó además el desarrollo de daño causado por impacto de ola, produciéndose la formación de un perfil tipo "Z", pero sin alcanzar los desplazamientos definidos en el criterio de falla. En algunos casos se observaron asentamientos generalizados del orden del 35 % de la altura del bloque al cabo de la

duración decidida para los ensayos. Seguramente en este mecanismo de falla la duración de la sollicitación tiene una incidencia mayor en los resultados que para el otro mecanismo observado. En la Foto 11 se muestra el resultado correspondiente a un ensayo en arena gruesa, en el que la altura de ola significativa en prototipo fue de 0.75 m y el período medio y de pico del espectro, de 3.1 y 2.9 seg., respectivamente, donde se observa la formación de un perfil tipo "Z".

Lo que se observó en todos los ensayos (de igual manera en arena fina que gruesa) es la influencia del período de la ola en la ubicación de la zona de daño y formación de un perfil tipo "Z". Para el caso de períodos cortos (3 seg), al estar más definida la ubicación de la rompiente, la zona de daño resultó reducida casi siempre a pocas filas. En cambio, para los períodos largos (4 seg), las olas rompientes que producen el impacto variaron considerablemente su ubicación sobre el talud, conduciendo a una zona más amplia de daño. Para el período intermedio ocurrió una situación intermedia.

Respecto de este mecanismo de falla se puede decir que en arena gruesa hubo un daño muy parecido al ocurrido para arena fina para similares condiciones hidrodinámicas.

Como se mencionara en el **Apartado III**, en prototipo este tipo de falla es evitable si se consigue un ángulo de fricción interna de la arena colocada mayor a 40° . Por lo que se puede decir que el desarrollo de daño está asociado a un determinado estado de la arena, o sea, a una cierta compacidad y ángulo de fricción interna. Para obtener una somera idea del estado de la arena alcanzado en el talud del modelo se realizaron determinaciones expeditivas del peso específico in situ (γ). Se tomaron dos muestras de arena: una por debajo del nivel estático (-NE) y otra por encima (+NE).

Los valores obtenidos fueron los siguientes:

$$\gamma_{-NE} = 1.94 \text{ g / cm}^3$$

$$\gamma_{+NE} = 1.88 \text{ g / cm}^3$$

Estas magnitudes en similitud hidráulica tienen iguales valores en prototipo, aunque se debe recordar que son determinaciones expeditivas.

Otra característica técnica observada es la zona donde se produce daño en la protección al ser sollicitada por el oleaje. Este desarrollo de daño abarca tanto asentamientos como ascensos relativos entre piezas. Es de interés porque (dependiendo de la variabilidad del nivel estático de agua), el talud puede

eventualmente diseñarse de modo de tener en cuenta el área donde se concentrará el daño.

En la totalidad de los ensayos se observó cuáles fueron las filas superiores e inferiores que sufrieron un asentamiento mayor al 10 % de la altura del bloque. Con las distintas franjas abarcadas se determinaron las cotas de los extremos del área afectada respecto del nivel estático, expresado en valores de H_s .

Se observó que sólo ocurrió daño por encima del nivel estático en 2 casos de un total de 11 para el talud de 1:2 y en ningún caso de los 4 realizados en 1:3. El valor medio de esa cota en los ensayos donde ocurrió daño es el siguiente:

$$\bar{d}_s = 0.1 H_s$$

donde d_s es la cota superior respecto del nivel estático.

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

$$\begin{aligned}\bar{d}_i &= 0.6 H_s \\ \sigma_{d_i} &= 0.3 H_s\end{aligned}$$

donde d_i es la cota inferior respecto del nivel estático.

Para el caso de los ensayos realizados en 1:3, los valores fueron:

$$\begin{aligned}\bar{d}_i &= 0.4 H_s \\ \sigma_{d_i} &= 0.1 H_s\end{aligned}$$

Un criterio que podría ser utilizado en el diseño de manera de disponer de un margen de seguridad, sería considerar para cada caso un valor que consista de la suma del valor medio de la cota más un desvío standard.

Run up

Como se mencionara en el apartado VI – Metodología para la determinación del run-up, con los valores observados se formaron ternas de $R_{0.2\%}$, 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 (7) y se volcaron sobre la Figura 14.

En esta última se incluyeron también los valores teóricos medios expresados por la ecuación (7) y sus desviaciones standard como referencia.

Los valores obtenidos para el coeficiente de rugosidad se pueden resumir como sigue:

$$\begin{aligned}\bar{\gamma}_f &= 0.94 \\ \sigma_{\gamma_f} &= 0.09 \\ C &= 10\%\end{aligned}$$

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 $\bar{\gamma}_f$ es acorde con los valores recomendados por la literatura para este tipo de protecciones e indica que un talud revestido con Betoncover resulta poco rugoso.

Por lo tanto, la ecuación de cálculo del run-up para la protección Betoncover es:

$$R_{u2\%} / H_s = 1.6 \gamma_b \gamma_f \gamma_\beta \xi_{op} \quad (14)$$

con un máximo de $3.2 \gamma_f \gamma_\beta$ y γ_f igual a 0.94.

Reflexión

Los valores obtenidos del coeficiente de reflexión C_R se indican en la Figura 15. En la misma se han incluido dos curvas de referencia: una correspondiente a un talud plano impermeable y la otra a un talud de enrocado (determinadas mediante la ecuación 8).

Los valores resultantes del modelo deberían estar por encima de la curva dada para la reflexión del enrocado y cercanos a la curva de un talud impermeable.

Como se observa la tendencia de los puntos obtenidos es correcta y realizando un ajuste se puede determinar una curva que los interprete. La misma ha sido incluida en esa figura y tiene como ecuación:

$$C_R = -0.0157 * \xi^3 + 0.0929 * \xi^2 + 0.1113 * \xi - 0.0198 \quad (15)$$

El coeficiente de correlación cuadrático de ese ajuste de curva es 0.83. Esta expresión podrá ser utilizada en el diseño de obras donde deben ser conocidas las propiedades reflectivas de este revestimiento.

VII.4 Protección Sobre Geotextil con Filtro Granular

VII.4.1 Descripción de la sección transversal

En este caso se colocó la protección sobre un filtro granular por encima del terraplén de arena, en la **Figura 16** se muestra un esquema de ello. El filtro granular utilizado fue de una granulometría tal que hizo necesario colocar geotextil (fina tela en el modelo) entre la protección y el mismo, de manera de no permitir la fuga de la fracción menor del material por los orificios de las piezas. Entre el terraplén de arena y el filtro granular se colocó geotextil (fina tela en el modelo), al igual que en la configuración de obra anterior.

El talud del terraplén de arena utilizado en los ensayos fue de 1V: 3H.

El filtro granular usado en el modelo estuvo constituido por una gravilla, cuya curva granulométrica se observa en la **Figura 17**. Los siguientes parámetros la resumen:

$$D_{15} = 10 \text{ mm}$$

$$D_{50} = 18.5 \text{ mm}$$

$$D_{90} = 49 \text{ mm}$$

Respecto de los efectos de escala observados en el apartado V.4, haciendo algunos cálculos preliminares, se puede decir que en este caso se estaría prácticamente en régimen turbulento en el modelo. Por lo que al ser turbulento en el prototipo (material granular aún más grueso), la escala a utilizar para determinar los diámetros equivalentes sería directamente la escala lineal usada para las demás dimensiones, es decir $E_L = 6.8$.

Admitiendo los cálculos expeditivos, el filtro granular representado en el modelo tendría los siguientes valores en prototipo:

$$D_{15} = 1.5 \text{ mm}$$

$$D_{50} = 2.7 \text{ mm}$$

$$D_{90} = 7.2 \text{ mm}$$

La arena fina utilizada en el terraplén es la misma que la usada en los ensayos descriptos anteriormente para esta protección.

El espesor del filtro en el modelo fue de 1.5 cm, lo que equivale en prototipo a unos 10 cm de espesor.

En las Fotos 12 y 13 se puede observar el momento de armado y el esquema de obra terminado con cobertura de Betoncover, geotextil, filtro granular, geotextil y terraplén de arena.

VII.4.2 Ensayos realizados

Se realizaron dos ensayos de la protección sobre este esquema de obra, para períodos de ola de 3.5 y 4 segundos. Los períodos y alturas de olas utilizados precisamente en el modelo equivalen en prototipo a los indicados en la siguiente Tabla 3.

La metodología utilizada en los ensayos es similar a la descrita para el esquema de obra anterior, tanto para la determinación de la estabilidad como para el run up y la reflexión. Los criterios de daño utilizados para la determinación de la estabilidad son también iguales a los descriptos.

En la Foto 14 puede observarse el impacto de una ola durante el transcurso de un ensayo.

Ensayo	Tprot medio	Tprot pico	Hs prot
1	3.5	4.5	1.00
2	3.2	3.7	0.95

Tabla 3: Cargas frecuentes en prototipo equivalentes a las utilizadas en el ensayo

VII.4.3 Resultados

Estabilidad

Respecto a los dos mecanismos de falla mencionados en el VII.3.3, se pudo observar que el mecanismo de expulsión de bloque no se hizo presente en alguno de los ensayos.

El mecanismo de falla por inestabilidad geotécnica, con la formación de un perfil tipo “S” o “Z”, se notó disminuido en el ensayo de $T = 4$ s para iguales condiciones de ensayos de protección sin filtro (los asentamientos fueron mucho menores).

En el caso del ensayo correspondiente a $T = 3.5$ s, se notaron algunos asentamientos importantes. Al quitar la fina tela y descubrir el filtro, se pudo observar su deformación (que no se transmitió al terraplén de arena) y la migración de la parte fina del mismo, quedando sólo la parte gruesa en algunos sectores. (Foto 15)

En ambos casos se observó (Foto 16) cómo se logran importantes mejoras en la situación final del terraplén de arena, quedando el mismo prácticamente intacto (comparar con Foto 10).

En las Tablas 3 y 4 se resumen las condiciones hidrodinámicas de los ensayos equivalentes a prototipo, cargas frecuentes (que no generan movimiento) y poco frecuentes (que provocan desplazamiento).

Ensayo	T_{prot} medio	T_{prot} pico	H_s prot
1	3.5	4.5	1.40
2	3.2	3.7	1.35

Tabla 4: Cargas poco frecuentes en prototipo equivalentes a las utilizadas en el ensayo

En el gráfico $H_s/\Delta D$ vs ξ , incluido como Figura 18 se puede apreciar las ubicaciones resultantes de estos ensayos respecto de los realizados sin filtro para cargas frecuentes y las posiciones respecto de las nuevas curvas teóricas de estabilidad según Pilarczyk² para protecciones sobre filtro granular.

Run up

Se realizaron filmaciones y se determinaron los valores del run up siguiendo las mismas metodologías que se aplicaron para la configuración de obra anterior. De la misma manera se determinó el coeficiente de rugosidad γ_f de esta protección en el nuevo esquema de obra.

En la **Figura 19** se puede observar el gráfico de $R_{u2\%}/H_s$ vs ξ resultante de estos ensayos, donde además se incluyen los puntos obtenidos en los ensayos sin filtro.

Los valores obtenidos de γ_f se ajustan adecuadamente con el valor 0.94, anteriormente determinado. Sin embargo, el coeficiente que mejor ajusta los valores obtenidos en estos dos ensayos con filtro a los teóricos (mínimo de las diferencias cuadradas) es 0.93. Deberían realizarse una mayor cantidad de ensayos para asegurar el cambio de coeficiente ante el cambio de esquema de obra.

Reflexión

En la **Figura 20** se muestran los valores obtenidos del coeficiente de reflexión en distintas adquisiciones de datos realizadas en estos ensayos. Nuevamente se han seguido para ello las metodologías ya descritas.

Se puede observar que el cambio de configuración de obra no ha generado cambios en esta variable, ubicándose los valores obtenidos dentro de la muestra de puntos correspondientes a los resultados anteriores.

VII.5 Conclusiones

La protección de bloques sueltos *Betoncover* apoyados sobre geotextil en terraplén de arena resultaron sujetos a dos tipos de falla bajo la acción de las olas: la expulsión de los elementos y la inestabilidad geotécnica por impacto de la ola.

Para el primer mecanismo citado se propuso una *curva de diseño* para esta protección, de acuerdo con los criterios adoptados y que tiene en cuenta las incertezas y errores propios del estudio. Los ensayos realizados definen adecuadamente una curva umbral de estabilidad, la que fue utilizada para trazar la de diseño.

La estabilidad de esta protección mejoró notablemente ante idénticas condiciones hidrodinámicas, cuando estuvo colocado sobre un filtro granular, no habiéndose alcanzado a provocar la inestabilidad de los bloques con la máxima sollicitación capaz de realizarse con el generador de olas.

Los bloques sueltos han demostrado un buen desempeño como conjunto, resultando su trabazón en una obra de relativamente poca fragilidad.

Respecto al segundo mecanismo de falla, el talud de arena sufrió un daño importante al estar apoyadas las piezas únicamente sobre un geotextil, en cuyo caso se desarrollaron perfiles de falla tipo "Z", pudiendo verse afectada eventualmente la interacción entre bloques si se hubieran continuado los ensayos.

Bajo esta configuración de obra, no se apreciaron cambios en la estabilidad estructural y geotécnica ante modificaciones de la granulometría de la arena componente del terraplén.

Al incorporar un filtro granular en la estructura, el estado final del terraplén de arena en todos los ensayos fue excelente, sin apreciarse deformaciones de ningún tipo. Sólo tuvo alguna incidencia el impacto de la ola en el filtro, que provocó deformaciones mínimas.

Utilizando un filtro de granulometría más uniforme el comportamiento de la protección mejorará probablemente para el mecanismo de falla de inestabilidad geotécnica observado.

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

Con respecto al run up, la protección resultó ser poco rugosa, coincidiendo el valor determinado del coeficiente de rugosidad γ_f con los órdenes indicados en la literatura para elementos de este tipo.

Se determinó una expresión que permite calcular el coeficiente de reflexión de una estructura con esta protección. Los valores hallados están también en correspondencia con los brindados por otros estudios.

VII.6 Recomendaciones

Para definir una *curva de diseño* de los bloques *Betoncover* con mayor precisión, a fin de adoptar un margen de seguridad menor, se recomienda realizar una mayor cantidad de ensayos que resulten cercanos a la curva umbral de estabilidad.

Por las notables mejoras observadas en el desempeño de los bloques protegiendo el talud es recomendable utilizar siempre esta protección con un filtro granular debajo, al menos cuando el terraplén es de un suelo arenoso.

VIII UNIDADES BETONPLAN

VIII.1 Descripción de las piezas

Las unidades prefabricadas *Betonplan* consisten en bloques de hormigón simple vinculados a través de pequeñas pestañas en la parte inferior de los mismos, que no permiten la extracción o aspiración del bloque del talud (mientras no esté deformado en gran medida) pero sí la deformación de la base de apoyo, haciendo que la protección se comporte de una manera particular ante la acción del oleaje.

Las piezas se pueden describir como tres hexágonos unidos en 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 para un eventual cableado.

En la **Figura 21** se pueden observar sus dimensiones. La altura del bloque es de 10 cm. Poseen un área cubierta de 1126 cm², dejan un área abierta del 3% al conformar el revestimiento y son necesarias 8.88 piezas para cubrir 1 m².

Considerando un peso específico del hormigón simple de 2250 kg/m³, el peso de una unidad resulta de aproximadamente 24 kg y el de la manta que componen de 210 kg/m².

VIII.2 Construcción de las piezas del modelo

Las piezas del modelo fueron construídas por medio de moldes de caucho sintético (**Foto 17**) en los que se coló mortero (cemento y arena fina), material componente de las mismas. Los moldes fueron realizados a partir de una matriz que tiene la forma externa de las piezas, dada por medio de una pieza tallada en madera balsa.

Con proporciones adecuadas de cemento, arena y acelerante de fragüe se construyeron las piezas necesarias para cubrir un talud de 1:3 hasta el metro de altura. En la **Foto 18** se muestran algunas piezas del modelo terminadas sobre la unidad en prototipo.

Se realizó la determinación del peso y volumen de las piezas utilizadas en los ensayos. Para la obtención del peso representativo de las piezas se pesó la totalidad de las mismas en estado seco por medio de una balanza electrónica de precisión, de una sensibilidad de 0.1 g. El volumen de las piezas del modelo utilizado para el cálculo de la densidad relativa fue el teórico.

$$\text{Volumen pieza modelo} = 35.3 \text{ cm}^3$$

Los parámetros que caracterizan la muestra de los valores de la medición del peso de la totalidad de las piezas son:

$$\mu = 73.7 \text{ g}$$

$$\sigma = 2.5 \text{ g}$$

$$C = 0.034$$

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 (3.4 %) lo que indica la buena calidad de fabricación de las piezas.

El valor de la densidad relativa definida como la relación entre el peso específico medio de las piezas (cociente entre el peso medio y el volumen teórico de una pieza) y la densidad del agua fue de:

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

donde cada uno de los términos de la ecuación fueron ya indicados en VII.2.

VIII.3 Protección sobre Geotextil sin Filtro Granular

VIII.3.1 Descripción de la sección transversal

Para este caso se utilizó la misma arena fina que en los estudios anteriores, la que fue compactada y saturada también de la misma manera. La inclinación del talud ensayado fue de 1:2 y 1:3.

Se utilizaron 710 piezas enteras para cubrir la superficie modelada del talud. Para resolver la discontinuidad de la manta ocasionada por las paredes del canal, se colocaron en los extremos de cada fila piezas partidas aprisionadas por un burlete de goma.

Debajo de las piezas se simuló el geotextil colocando la misma tela fina (utilizada en los estudios anteriores), de manera que no se produjera la fuga del suelo arenoso donde yacieron las piezas. Se colocó en forma no anclada para permitir algún tipo de deslizamiento que pudiera ocurrir.

En la zona inferior de la estructura se colocó un listón de madera a modo de viga de fundación, a partir del cual se colocó la protección.

En la **Figura 22** se muestra la sección transversal ensayada. En la **Foto 19** se observa el talud conformado en el modelo, pudiendo apreciar la buena estética de una obra terminada.

VIII.3.2 Ensayos realizados

Los ensayos realizados fueron de alturas y períodos de ola variable para el caso del talud inclinado 1V:3H, sumando un total de cuatro. En el caso del talud 1:2 se reiteró un único ensayo tres veces obteniendo siempre el mismo resultado.

Los valores utilizados durante el ensayo (en valores de prototipo) son los que se indican en la **Tabla 5**, del apartado siguiente.

VIII.3.3 Resultados

Estabilidad

Como se dijera en el apartado III, las protecciones compuestas de bloques vinculados se desempeñan de una manera diferente a las constituidas por bloques sueltos ante la acción del oleaje. Para el presente caso 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, a lo que resultan más vulnerables debido a su reducido espesor respecto a las otras unidades *Betonoxxer*.

Los criterios de falla utilizados fueron descriptos en el apartado VI.1.

La respuesta de la protección fue diferente de acuerdo a la inclinación del talud ensayada: 1V:2H o 1V:3H.

Para el caso del talud más tendido se realizaron cuatro ensayos que abarcaron períodos de ola variable entre 3 y 4 segundos. Las condiciones hidrodinámicas utilizadas en el modelo en valores de prototipo se presentan en la **Tabla 5**. Para la realización del gráfico de diseño donde se propondrá una curva se utilizaron los valores indicados en la **Tabla 6**, siguiendo la misma metodología que para las unidades *Betonoxxer* (apartado VII.3.3 *Estabilidad*).

Ensayo	Tmedio (seg)	Tpico (seg)	Hs (m)
42	3	3.1	1.10
43	3.5	4.3	1.30
44	3.2	3.7	1.25
45	3.5	4.3	1.30

Tabla 5: Cargas poco frecuentes utilizadas correspondientes a prototipo

Ensayo	Tmedio (seg)	Tpico (seg)	Hs (m)
42	3	3.1	0.80
43	3.5	4.3	0.90
44	3.2	3.7	0.90
45	3.5	4.3	0.90

Tabla 6: Cargas frecuentes utilizadas correspondientes a prototipo

Los mecanismos de falla observados para este caso 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 esta inclinación de talud y la duración estipulada, es probable que ello ocurriera si se hubiera continuado con algunos ensayos.

Aunque la duración de la sollicitación tiene una incidencia más importante en esta protección que la anterior, de acuerdo a los criterios de falla definidos para establecer el resultado de estabilidad en estos ensayos (deformación de 8 mm), se alcanzó el estado de falla para una sola condición hidrodinámica.

Los perfiles del talud que resultaron de los ensayos 42, 43, 44 y 45 se relevaron con un nivel óptico y se presentan en las **Figuras 23, 24, 25 y 26**, respectivamente. Los valores máximos de las flechas obtenidas fueron :

Ensayo 42:	F (+) = 2 mm
	F (-) = 6.5 mm
Ensayo 43:	F (+) = 14 mm
	F (-) = 9 mm
Ensayo 44:	F (+) = 4 mm
	F (-) = 6 mm
Ensayo 45:	F (+) = 3 mm
	F (-) = 9 mm

donde el signo positivo indica una deformación hacia abajo del perfil y el negativo hacia arriba. Se puede decir que los ensayos 42 y 44 si bien en rigor no alcanzaron la falla, están al límite de la inestabilidad de acuerdo al criterio adoptado.

Los valores de las condiciones hidrodinámicas utilizadas fueron volcados en el ya utilizado gráfico de estabilidad de $H_s/\Delta D$ vs. ξ . En el mismo se han incluido las curvas de referencia dadas por Pilarczyk² para estos casos. En la **Figura 27** se presentan los resultados, donde se incluyó además una curva umbral de estabilidad tentativa, trazada con muy limitado número de datos al no haber podido incluir los resultados para el caso de talud 1:2. Es importante destacar que en estas condiciones no se deberían trazar curvas que delimiten una zona segura de una insegura, aunque a los efectos de dejar un antecedente para estudios posteriores, se trazó una curva tentativa utilizando una forma similar a la dada por la ecuación (12).

Si se pretendiera definir una *curva de diseño* para esta unidad se haría necesario adoptar un margen de seguridad igual o más riguroso que en el caso anterior (apartado A.1.5 Estabilidad). Utilizando el mismo criterio de adoptar una curva que esté un 20 % por debajo de una curva umbral de estabilidad definida, se alcanzaría una *curva* de expresión similar a la de la ecuación (13):

$$\left(\frac{H_s}{\Delta D}\right)_{cr} = \frac{6 \cos \alpha}{\xi_{op}^{0.4}} \quad (16)$$

válida cuando $\text{ctg } \alpha > 4$ y $\xi < 3$. Para utilizar una ecuación de este tipo en el dimensionado de protecciones con estas unidades se recomienda fuertemente realizar antes una mayor cantidad de ensayos para acotar las incertezas que posee.

En la **Foto 20** se muestra el desarrollo de un ensayo, en este caso el 43, observándose cómo se produce el impacto de una ola sobre una zona definida. El estado final del talud resultante de este ensayo se muestra en la **Foto 21**. Obsérvese cómo se ha deformado toda la protección, con un comportamiento de entidad, formándose un perfil tipo "S" en varias columnas de bloques. Se nota un hundimiento pronunciado a la altura del nivel estático del agua, mostrando la pérdida de interacción entre los bloques con la deformación. Hacia abajo de ese valle se ve el ascenso de toda una zona. En las **Fotos 22 y 23** siguientes se puede observar con detalle las zonas dañadas. En la primera, el descenso y rotación de las piezas de una fila induce la pérdida del vínculo con las superiores, quedando clavadas las piezas de la fila siguiente inferior en aquellas, vinculadas ya no por las lengüetas sino por sus cantos. En la segunda, se ve cómo en las crestas de la deformación la cobertura se abre, perdiendo parte de su vinculación.

Al descubrir el talud arenoso, luego de quitar la tela fina, se observan en la **Foto 24** las marcas de los contornos de las piezas además de la deformación ocurrida. Claramente se nota el deslizamiento de arena ocurrido, desde la zona del valle a la cresta de la deformación. La línea realizada sobre la arena que atraviesa el valle indica la posición que tuvo el nivel estático del agua. A su vez se pueden apreciar otras deformaciones menores cercanas a esa zona. Como conclusión se puede decir que el talud quedó en mal estado.

Cambiando la iluminación se sacó la **Foto 25** que muestra el estado del talud por debajo del nivel estático, siendo similar la zona por encima. Es interesante notar los canalículos formados en la dirección de la inclinación del talud que son propios de este tipo de falla: la inestabilidad geotécnica.

A continuación se incluyen tres fotos más correspondientes al ensayo 45: las **Fotos 26, 27 y 28**. En la primera se observa el estado general de la cobertura luego de la acción del oleaje. Se ha producido una importante deformación a consecuencia de un deslizamiento superficial de arena. En la segunda foto se ve claramente la formación de un perfil "S" no tan pronunciado como en el ensayo anterior. En la tercera, se puede observar el descalce de la una fila (se nota el doblez de la tela fina) perdiendo la interacción con la siguiente debido a la formación de la cresta del perfil de arena.

Si se deseara realizar el dimensionado de una protección como la presente para una obra particular, debería determinarse un espesor tentativo a partir de un gráfico de estabilidad hidráulica ($H_s/\Delta D$ vs ξ) y luego se debería verificar la estabilidad geotécnica por medio de la ecuación (5).

Inversamente, asumiendo que el espesor del bloque es el disponible actualmente, se puede determinar cuáles son las condiciones hidrodinámicas solicitantes que permiten la estabilidad geotécnica. Considerando un suelo arenoso se utilizaron los siguientes valores más comunes del resto de las variables de la ecuación (5):

$$N_z = 0.40$$

$$\Delta_z = 1.65$$

$$\text{ctg } \alpha = 3$$

$$\Phi = 35^\circ$$

$$k = 0.001 \text{ m/s}$$

$$W_L = 0.10$$

Los valores de d_s se pueden determinar desde la Figura 128 del Manual CUR¹ para cada caso particular, obteniéndose los valores de altura de ola máxima indicados en la **Tabla 7**.

Los valores hallados teóricamente indican que una protección de este tipo en prototipo es estable geotécnicamente para períodos inferiores a 3.5 seg. A partir de este valor comenzaría a incidir este mecanismo de falla, interactuando con el de impacto de ola y reduciendo la interacción entre bloques.

T_p (seg)	H_s (m)
3.5	2.05
3.7	1.30
4	0.80
4.3	0.55
4.5	0.45

Tabla 7: Ola máxima que permite la protección para ser estable geotécnicamente

Esto es lo que ha ocurrido efectivamente en el modelo para los casos estudiados, indicando que los efectos de escala que pudieran haber intervenido en este fenómeno son despreciables.

Para el caso de la inclinación más empinada del talud se manifestó plenamente el mecanismo de falla de inestabilidad geotécnica por efecto del run down de la ola. El esquema de obra planteado está en una situación de franca inestabilidad.

Al comenzar a generarse las olas y actuar sobre el talud, aunque sean de una altura pequeña, inmediatamente ocurre 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 y el talud ya desprotegido se deforma hasta alcanzar un perfil de equilibrio.

Este hecho fue observado en tres ensayos consecutivos, documentándolos en material fotográfico a los dos últimos y videográfico al tercero.

En la **Foto 29** se ve una imagen del estado final del talud del ensayo 46, mostrándose la zona del daño principal. Se observa que se produjo un deslizamiento iniciado en la zona derecha encima del nivel estático, depositándose por debajo del nivel estático en la zona de expulsión, generando la cresta de la deformación. En la **Foto 30** se aprecia cómo una de las piezas quedó suspendida en el aire, como ocurre generalmente en prototipo cuando esta falla se hace presente. Se puede ver en la **Foto 31** más claramente de qué manera se produjo el deslizamiento superficial del terraplén. Se destaca en esta foto que la zona de daño está prácticamente centrada en el canal, no originándose desde el borde. En la siguiente **Foto 32** se hace hincapié en el estado final del terraplén. Al quitar la fina tela se observa con más claridad la trayectoria del deslizamiento de arena. Los canales originados en el movimiento de la arena están mejor definidos que en ocasiones anteriores, y se pueden apreciar con más detalle en la **Foto 33**. Como ya se dijo estos canaliculos son propios de este mecanismo de falla, según experiencias observadas en prototipo.

Por último se muestran algunas fotos del ensayo 47, en el que se alcanzó la rotura total del terraplén y fue registrado en video (incluido en el material anexo a este informe, CD y cinta de video). Al producirse el primer desprendimiento (**Foto 34**) la protección se vuelve muy frágil, siendo inevitable la rotura completa de la cobertura. Las **Fotos 35 y 36** muestran la secuencia de lo ocurrido. La expulsión de las unidades de la zona inferior conlleva al desprendimiento del resto de la cobertura. En esta **Foto 37** sólo se pretende mostrar el perfil de equilibrio alcanzado por el talud de arena.

Realizando de igual manera el cálculo teórico por medio de la ecuación (5), se obtiene que para esta inclinación la protección es inestable geotécnicamente para 3, 3.5 y 4 segundos, adoptando los mismos valores para el resto de las variables.

Representando adecuadamente el modelo lo que hubiera ocurrido en prototipo, siendo por tanto de poca importancia los efectos de escala que pudieran haber existido en este fenómeno.

Run up

Como se mencionara en el apartado VI – Metodología para la determinación de run-up, con los valores observados se formaron ternas 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 (7) y se volcaron sobre la **Figura 28**.

En esta última se incluyeron también los valores teóricos medios expresados por la ecuación (7) y sus desviaciones standard como referencia.

Se determinaron cuatro valores experimentales correspondientes a los ensayos realizados con una inclinación de talud de 1:3.

Los valores obtenidos para el coeficiente de rugosidad se pueden resumir como sigue:

$$\begin{aligned}\overline{\gamma_f} &= 1.08 \\ \sigma_{\gamma_f} &= 0.05 \\ C &= 5\%\end{aligned}$$

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 e indica que un talud revestido con *Betonplan* resulta muy liso a la trepada de la ola.

Por lo tanto, la ecuación de cálculo del run-up para la protección *Betonplan* es:

$$R_{u2\%} / H_s = 1.6 \gamma_b \gamma_f \gamma_\beta \xi_{op} \quad (17)$$

con un máximo de 3.2 $\gamma_f \gamma_\beta$ y γ_f igual a 1.08.

Reflexión

La cantidad de puntos determinada es pequeña debido a que sólo se pudo realizar la adquisición de datos en los ensayos con talud 1:3. De todas formas se incluyen estos puntos en la misma figura realizada anteriormente para *Betocover*, a fin de observar que para los valores de abscisa ensayados no cambia demasiado la tendencia dada para las unidades *Betonplan*. Por lo que aparentemente la falta de los

orificios no modifica sustancialmente el comportamiento de la protección frente a este fenómeno.

Los valores obtenidos del coeficiente de reflexión C_R se indican en la **Figura 29**. En la misma se han incluido dos curvas de referencia: una correspondiente a un talud plano impermeable y la otra a un talud de enrocado (determinadas mediante la ecuación 8).

La ecuación de la curva de ajuste mostrada es la dada en el apartado VII.3.3- *Reflexión de Betoncover* como ecuación (15).

VIII.4 Conclusiones

Los mecanismos de falla manifestados en los ensayos de unidades Betonplan fueron los que conducen a la inestabilidad geotécnica: por impacto de ola y por descenso de la ola. Ambos contribuyen a la pérdida de interacción entre los bloques cuando deforman el talud, conduciendo a la pérdida de bloques en algunos casos.

Se ensayaron dos inclinaciones de talud: 1V:2H y 1V: 3H. En el caso más tendido hubo situaciones estables (cercasas al umbral de estabilidad) e inestables. Es importante notar que la cantidad de ensayos realizada es pequeña y la curva de diseño propuesta tiene gran incerteza.

En la inclinación más empinada la protección no alcanzó a lograr la estabilidad. Los primeros descensos de las olas produjeron el deslizamiento superficial de la arena con la consiguiente expulsión de las unidades.

La cobertura tuvo un comportamiento muy frágil ante la pérdida de algunas unidades.

Se determinó un coeficiente de rugosidad utilizable en la determinación del $R_{u2\%}$ que ajusta adecuadamente a los valores teóricos y coincide con valores dados por la experiencia en otros estudios.

La respuesta de esta unidad frente al fenómeno de la reflexión no difiere sustancialmente de la dada por la unidad *Betoncover*, para los ensayos realizados.

VIII.5 Recomendaciones

Bajo el esquema de obra planteado, se recomienda no utilizar esta unidad para inclinaciones más empinadas que 1V:3H y para períodos de ola mayores a 3.5 segundos.

Esto se debe a la falta de peso de la cubierta, por lo que si se realizara alguna experiencia con esta protección sobre filtro granular probablemente su comportamiento mejoraría notablemente.

Se debería incrementar la cantidad de ensayos para poder definir una *curva de diseño* con mayor precisión.

ANEXO I

Adoptando inicialmente que un efecto de escala se hace presente, el diámetro en el modelo se puede expresar de la siguiente manera⁶:

$$d_M = d_p / E_L * K \quad (11)$$

Partiendo de la ley de escurrimiento en medios permeables y de la igualdad de gradientes de presión impuesta por la condición de similitud de Froude, se alcanza una expresión del coeficiente de agrandamiento:

$$K = E_L^{3/4} \quad (12)$$

que es válida si los regímenes en la naturaleza y en el modelo son laminares.

Partiendo de un esquema de obra como el de la **Figura 6**, con valores medios normales de las distintas propiedades físicas del suelo se estimará el número de Reynolds para definir qué tipo de régimen se tiene en prototipo.

Las variaciones de presión que ocurren en el filtro o terraplén (para el presente caso) no son permanentes, a causa de las características de la sollicitación. El flujo de agua que ocurre dentro del mismo se produce en forma paralela al talud³. Así es que se tiene un gradiente hidráulico que invierte su sentido con la agitación de las olas. El gradiente hidráulico que se genera cuando ocurre el run-down es de mayor importancia que el que se produce con el run-up, no sólo en magnitud sino también en la extensión de suelo que abarca (en el run-up el gradiente hidráulico actúa en una zona más localizada). Considerando entonces una situación de run-down se tiene lo esquematizado en esa figura para el caso de un talud de 1:2.

Adoptando una altura de ola de 1.50 m el valor de run-down, de acuerdo con las expresiones utilizadas corrientemente, es:

$$R_d = (0.8 * \xi_{op} + 0.5) * H_s \quad \text{para } \xi_{op} < 2.5$$

$$R_d = 2.5 * H_s \quad \text{para } \xi_{op} \geq 2.5$$

entonces (considerando el valor máximo posible) $R_d = 3$ m.

Admitiendo una diferencia entre el nivel freático y el nivel estático del agua de 1 m, la diferencia de carga en ese instante en que ocurre el run-down es:

$$\Delta H = 4 \text{ m.}$$

Calculando el gradiente hidráulico se tiene:

$$i = \frac{\Delta H}{\Delta L} = \frac{4 \text{ m}}{8.9 \text{ m}} = 0.45$$

Teniendo en cuenta el material que formaría el terraplén en prototipo, que consistiría en una arena de refulado, y adoptando un diámetro d_{10} de unos $200 \mu\text{m}$ (como límite superior de una arena no uniforme) se puede estimar la permeabilidad mediante expresiones empíricas⁷:

Kozeny:
$$k = \frac{1}{200} \frac{m^3}{(1-m)^2} de^2 = 0.02 \text{ cm/s}$$

Terzaghi:
$$k = 600 \left(\frac{m - 0.13}{\sqrt[3]{1-m}} \right)^2 de^2 = 0.0155 \text{ cm/s}$$

Donde de es el diámetro eficaz equivalente a D_{10} en la curva granulométrica y m la porosidad total, considerada un 40 %.

Adoptando un valor medio de $k = 0.018 \text{ cm/seg}$, y según la ley de Darcy, la velocidad en el medio poroso es de:

$$v = k * i = 0.008 \text{ cm/s}$$

Finalmente el número de Reynolds en ese medio permeable es de (adoptando un valor de la viscosidad dinámica de un centipoise y de 1 g/cm^3 la densidad del agua):

$$Re = \frac{v d_{10}}{\nu} \approx 0.02 \ll 4 \text{ (límite del régimen laminar en medios permeables)}$$

Por lo tanto, es de esperarse que el régimen sea laminar también en prototipo y se considera por ello aplicable la ecuación (11).

⁷ E. Custodio -M. Llamas, Hidrología Subterránea, Ediciones Omega, 1976.



*Estudio de Resistencia al oleaje de Unidades Premoldeadas
Betóncoer y Betonplan*

INFORME FINAL

ANEXO II



O.T. N° 25641

Ensayo de Permeabilidad de Geotextiles por Permittivity

	Muestra Tela fina
Permittivity (s^{-1})	0.79
Desv.Standard	0.02
CV (%)	1.92

Permittivity: Cantidad de agua por unidad de sección por unidad de carga hidraulica en condiciones de flujo laminar, en la dirección normal del geotextil.

CIT ANEXO 1.1.1

FIGURAS

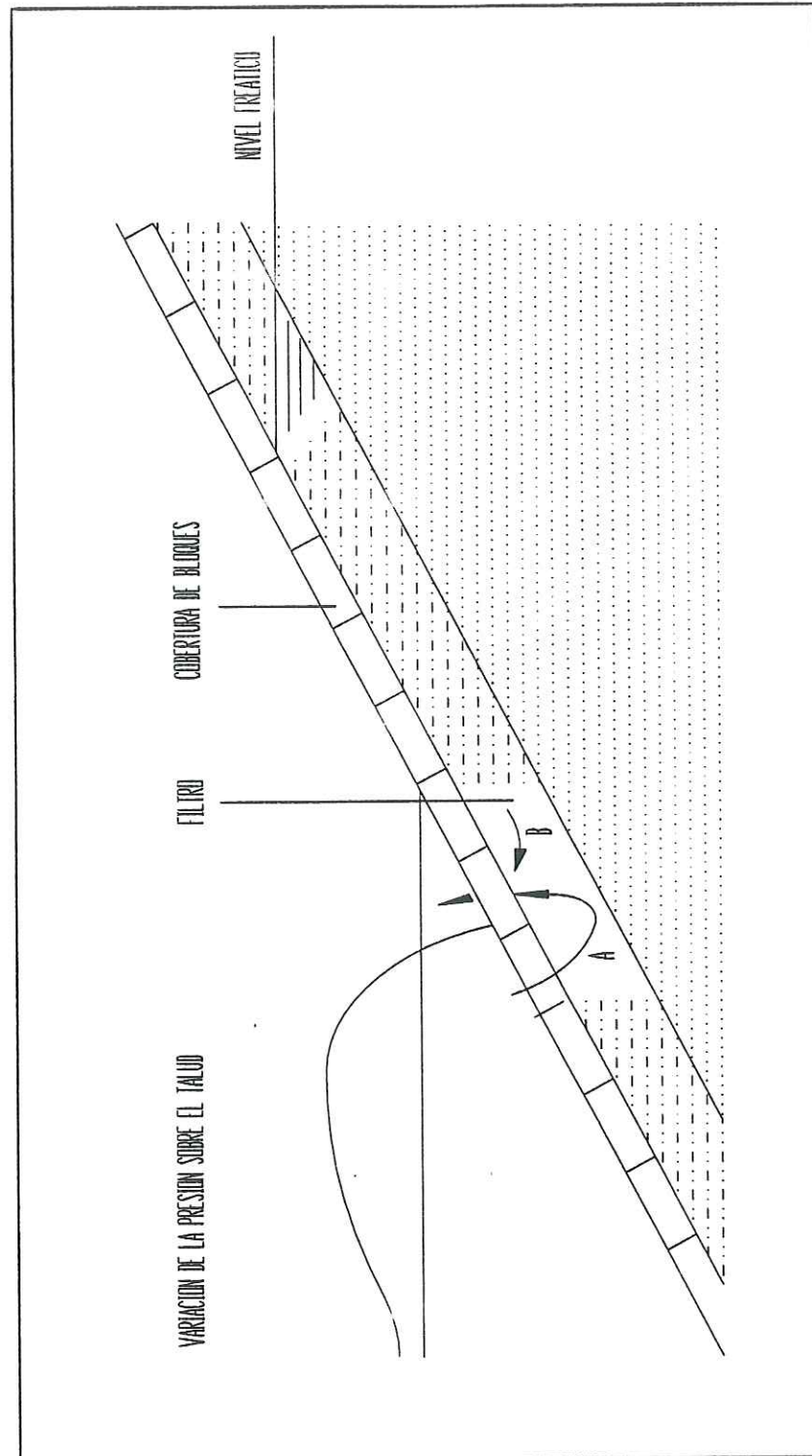


Figura 1: Situación de máximo run down en el mecanismo de expulsión del bloque

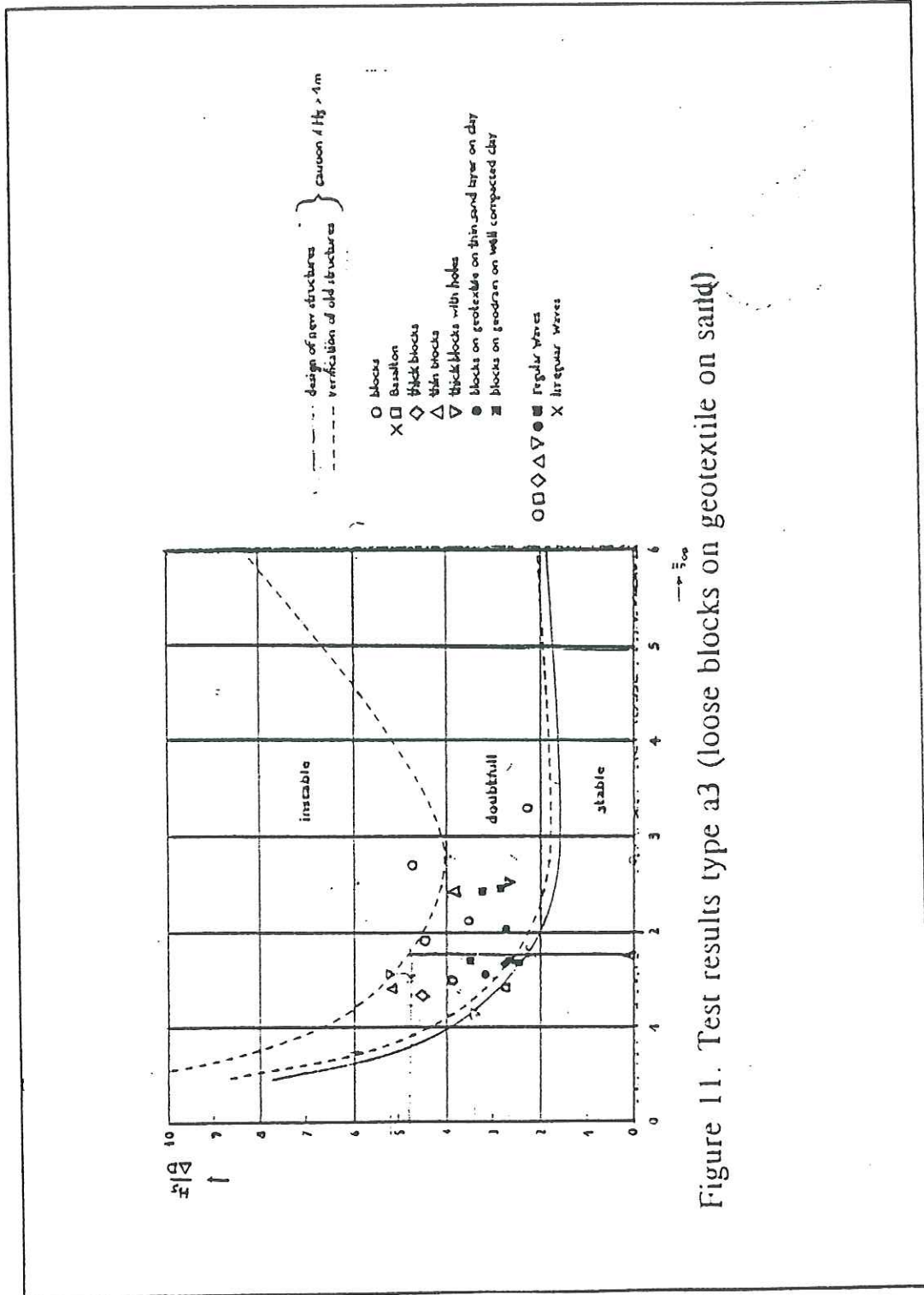


Figure 11. Test results type a3 (loose blocks on geotextile on sand)

Figura 2: Curva de estabilidad para bloques sueltos sobre geotextil en arena

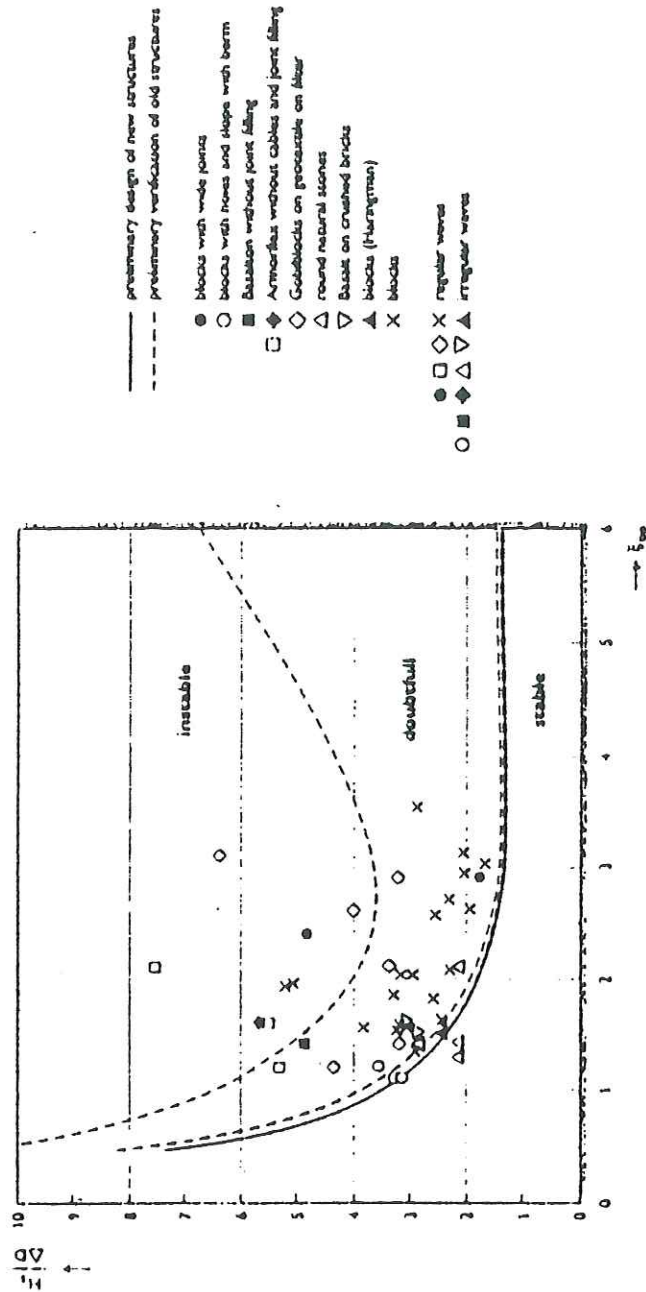


Figure 10. Test results type a2 (loose blocks on granular filter, normal stability)

Figura 3: Curva de estabilidad para bloques sueltos sobre filtro granular

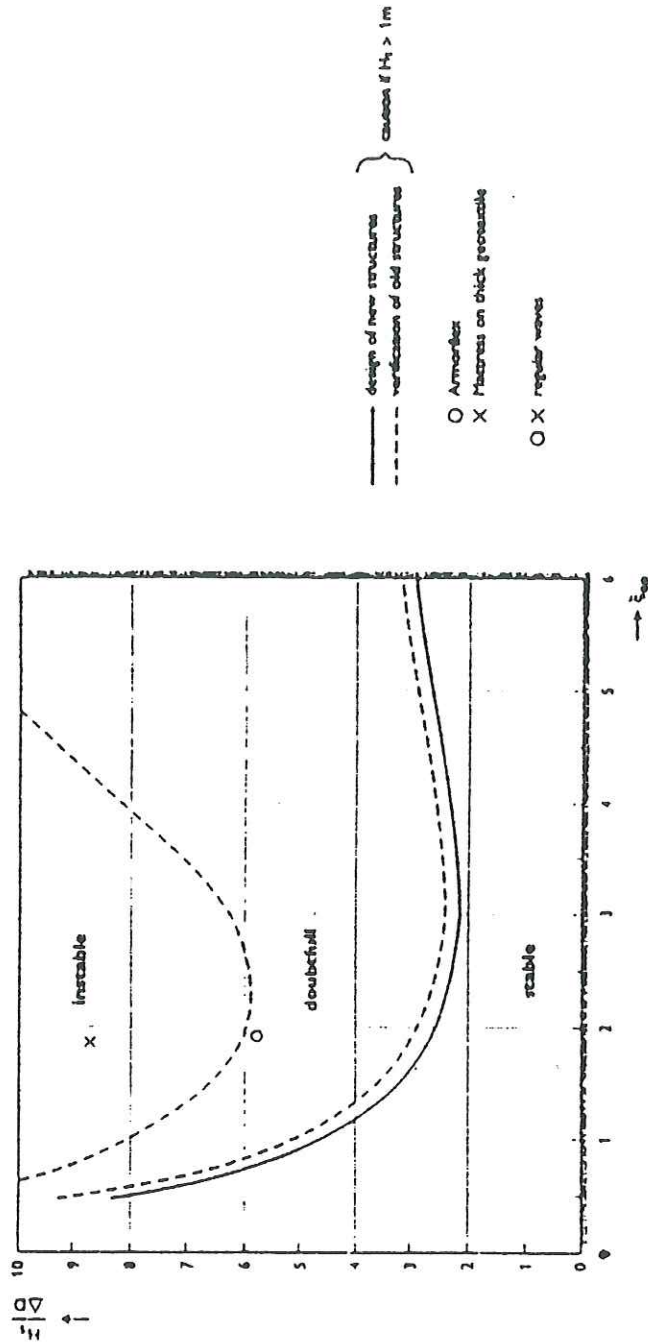


Figure 15. Test results type b3 (linked blocks on geotextile on sand)

- Low stability: $(k'/k) \cdot (D/b) < 0.05 - 0.1$
- Normal stability: $0.5 - 1 > (k'/k) \cdot (D/b) > 0.05 - 0.1$
- High stability: $(k'/k) \cdot (D/b) > 0.5 - 1$

Figura 4: Curva de estabilidad para bloques vinculados sobre geotextil en arena

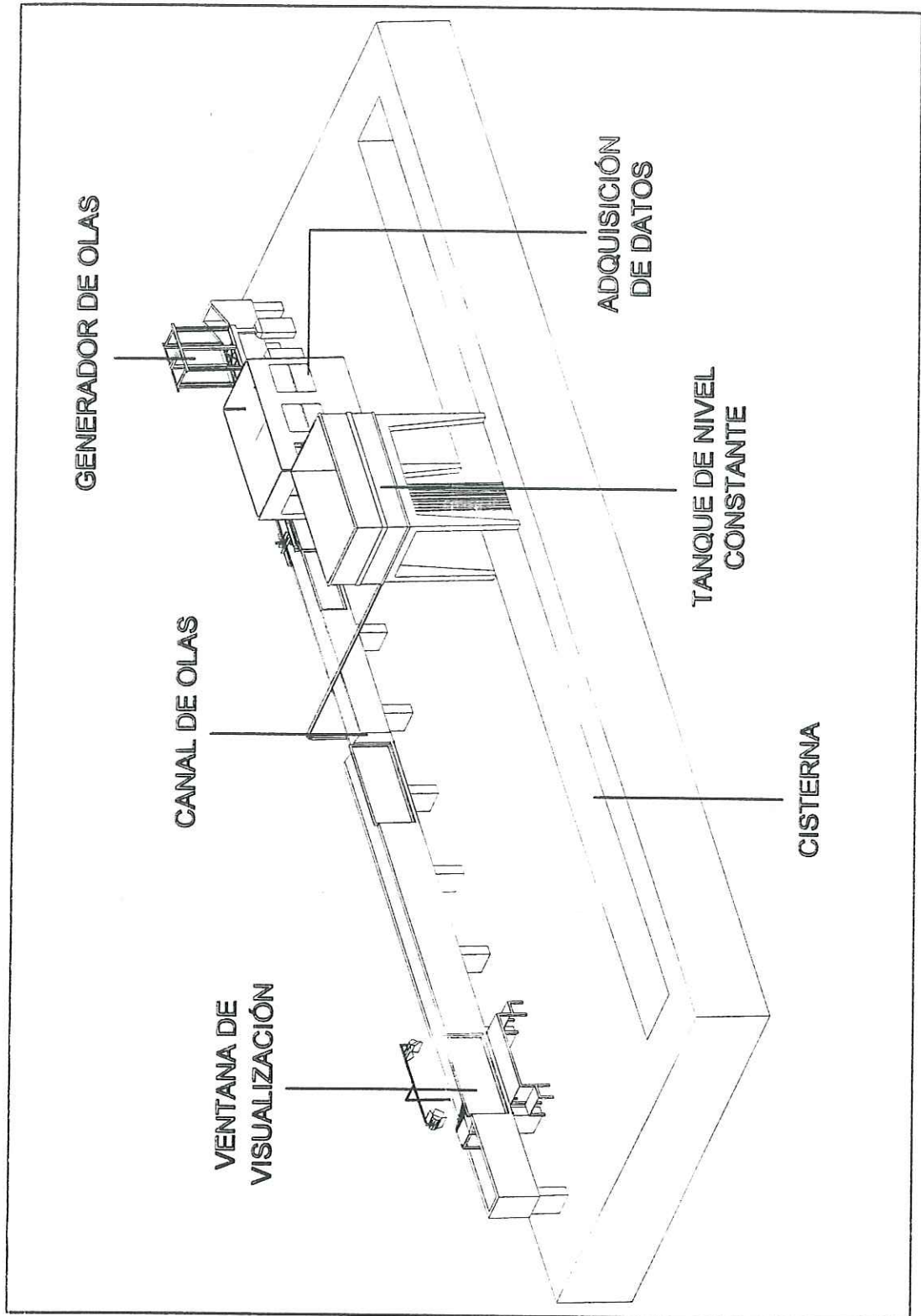


Figura 5: Esquema del canal de olas del Laboratorio

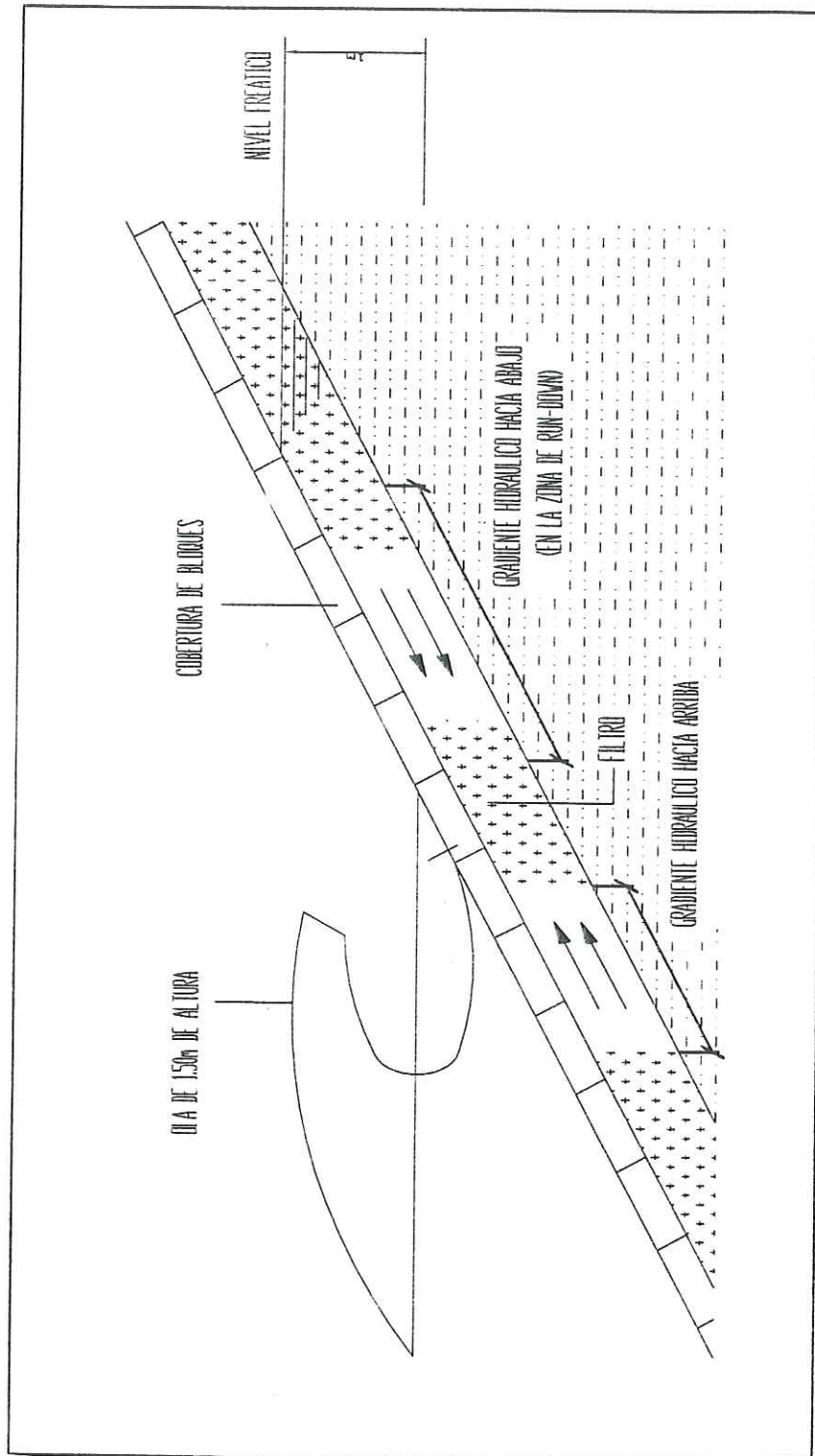


Figura 6: Esquema de obra planteado para la estimación de los efectos de escala

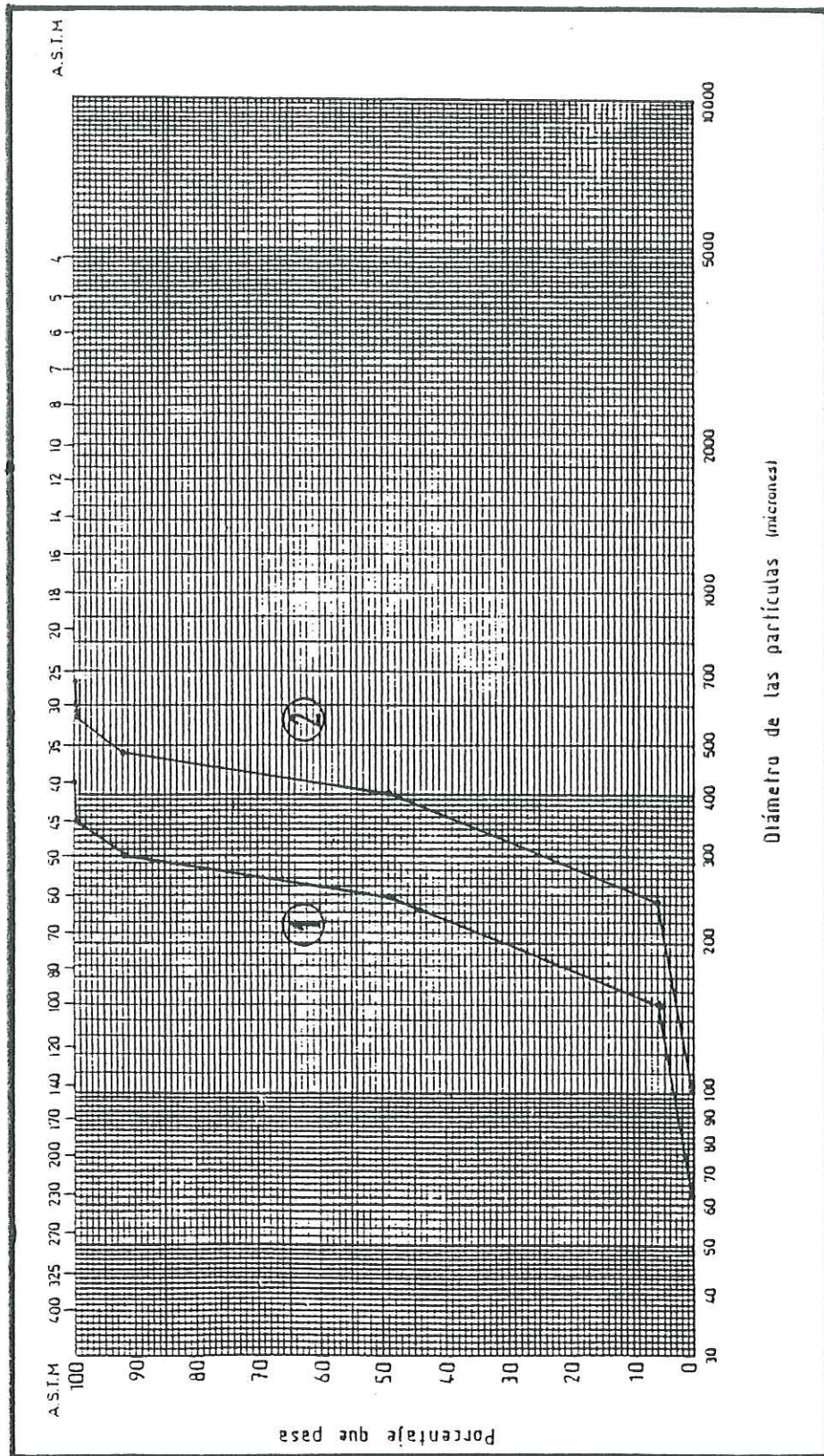


Figura 7: Curva granulométrica de la arena fina utilizada en el modelo y representada en prototipo

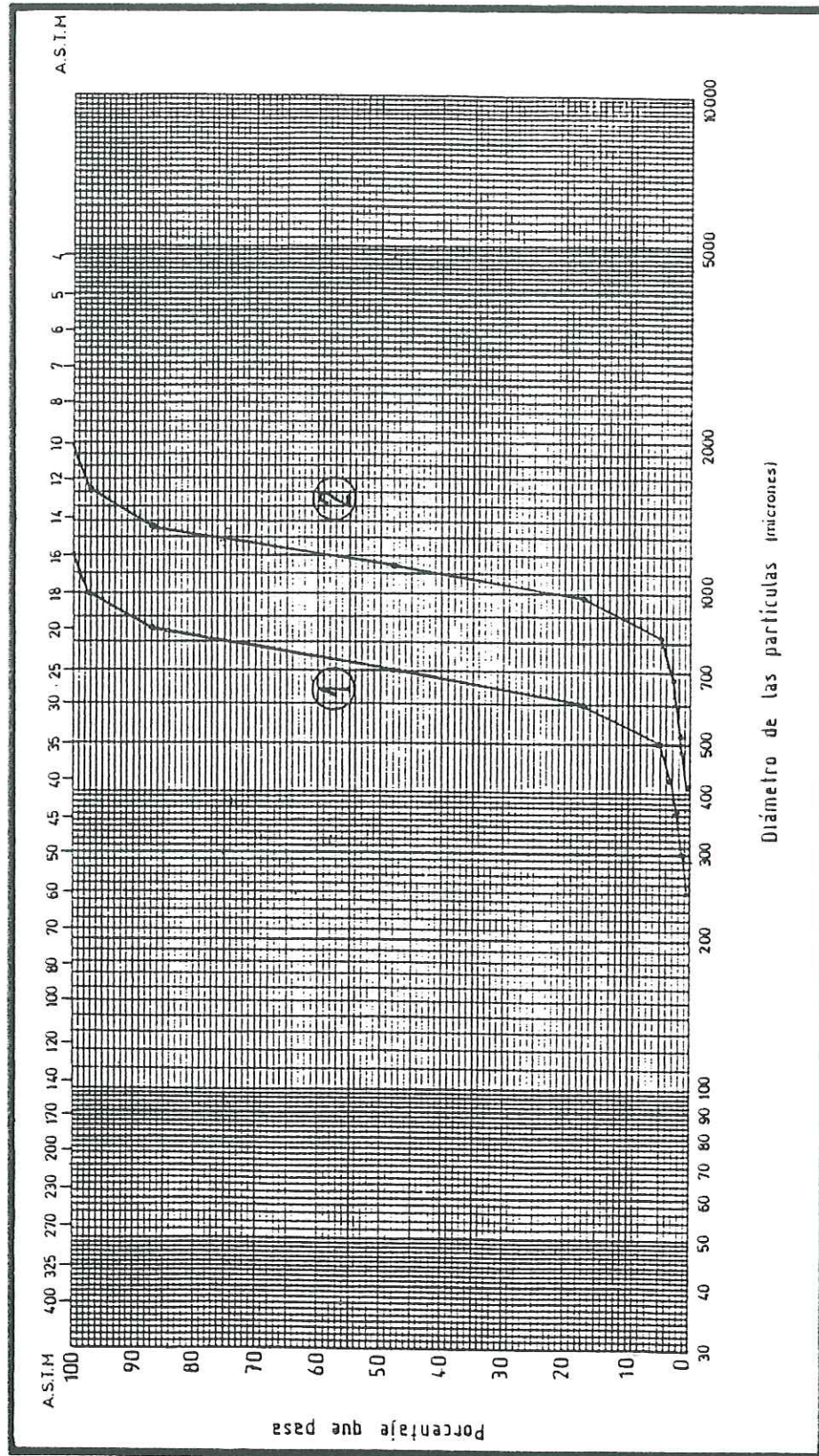


Figura 8: Curva granulométrica de la arena gruesa utilizada en el modelo y representada en prototipo

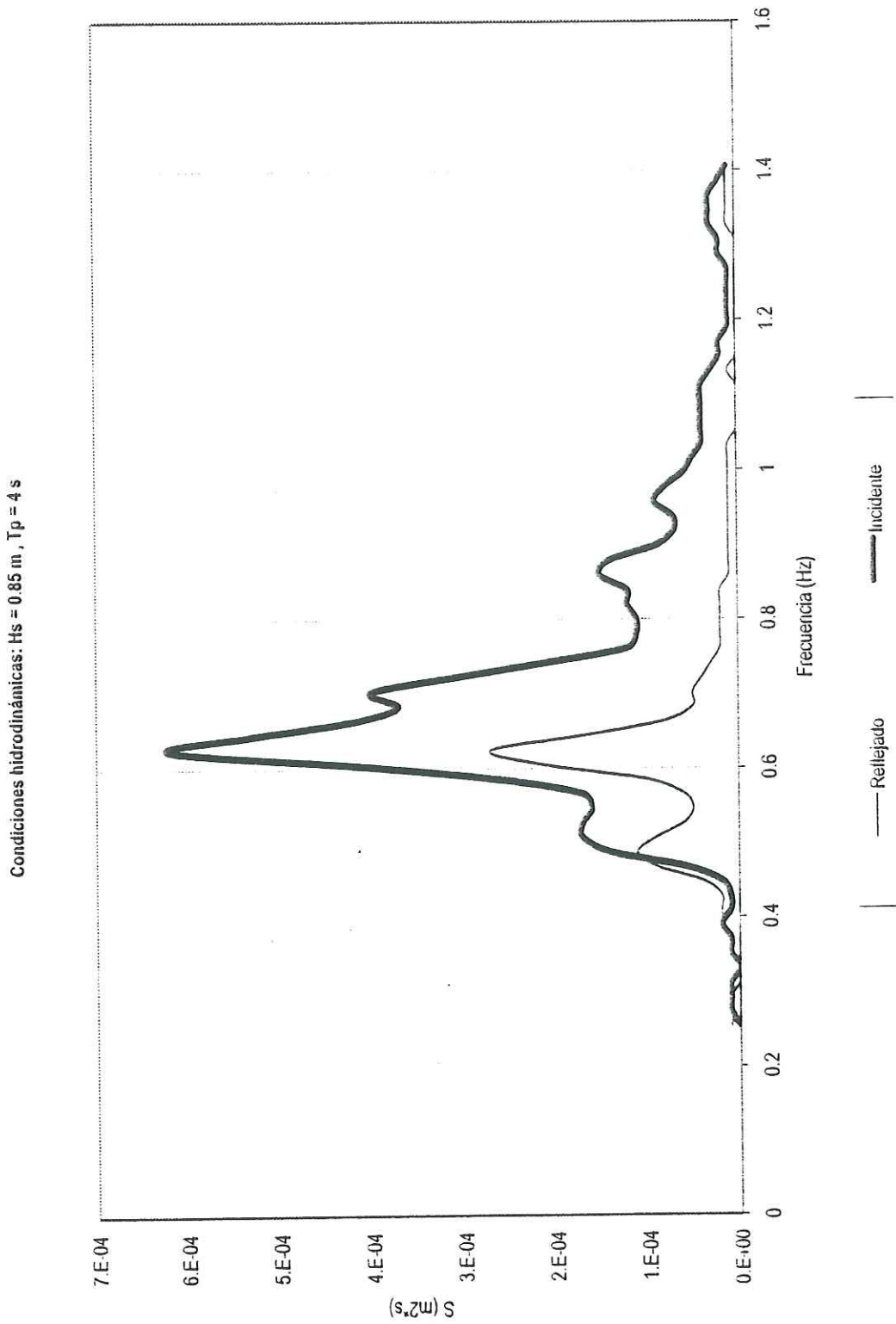


Figura 9: Ejemplo de un espectro de densidad de energía

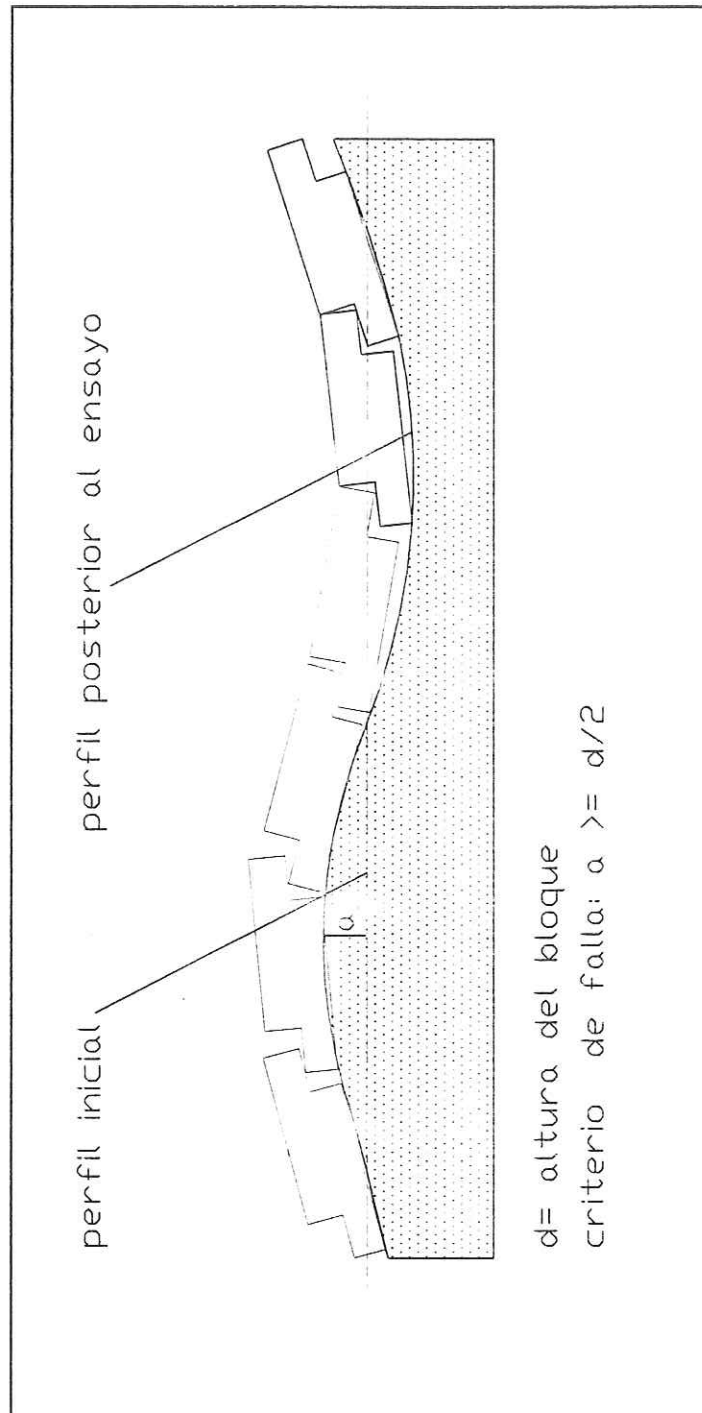


Figura 10: Criterio de falla para bloques vinculados

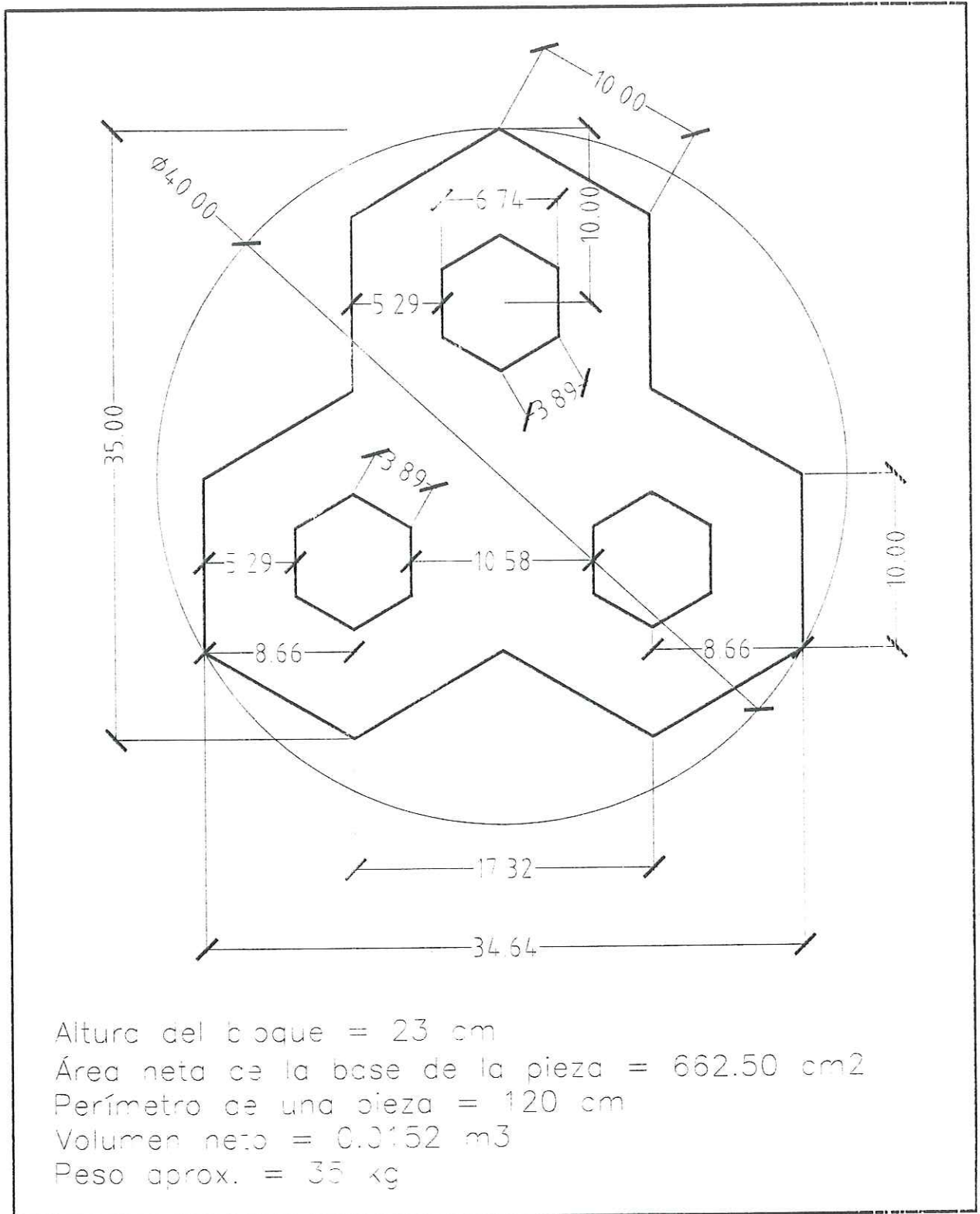


Figura 11: Dimensiones de la unidad Betoncover

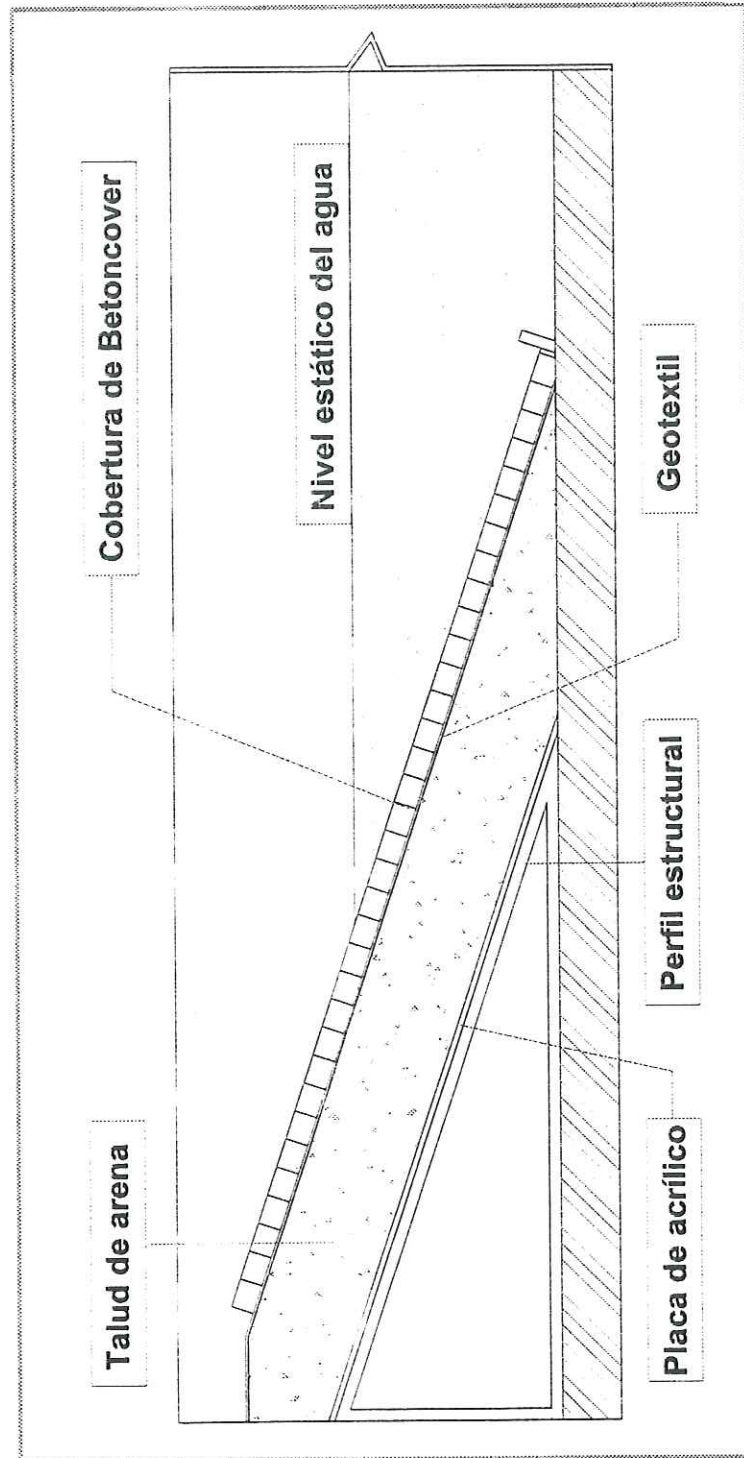


Figura 12: Sección transversal ensayada de bloques sueltos sobre geotextil en arena

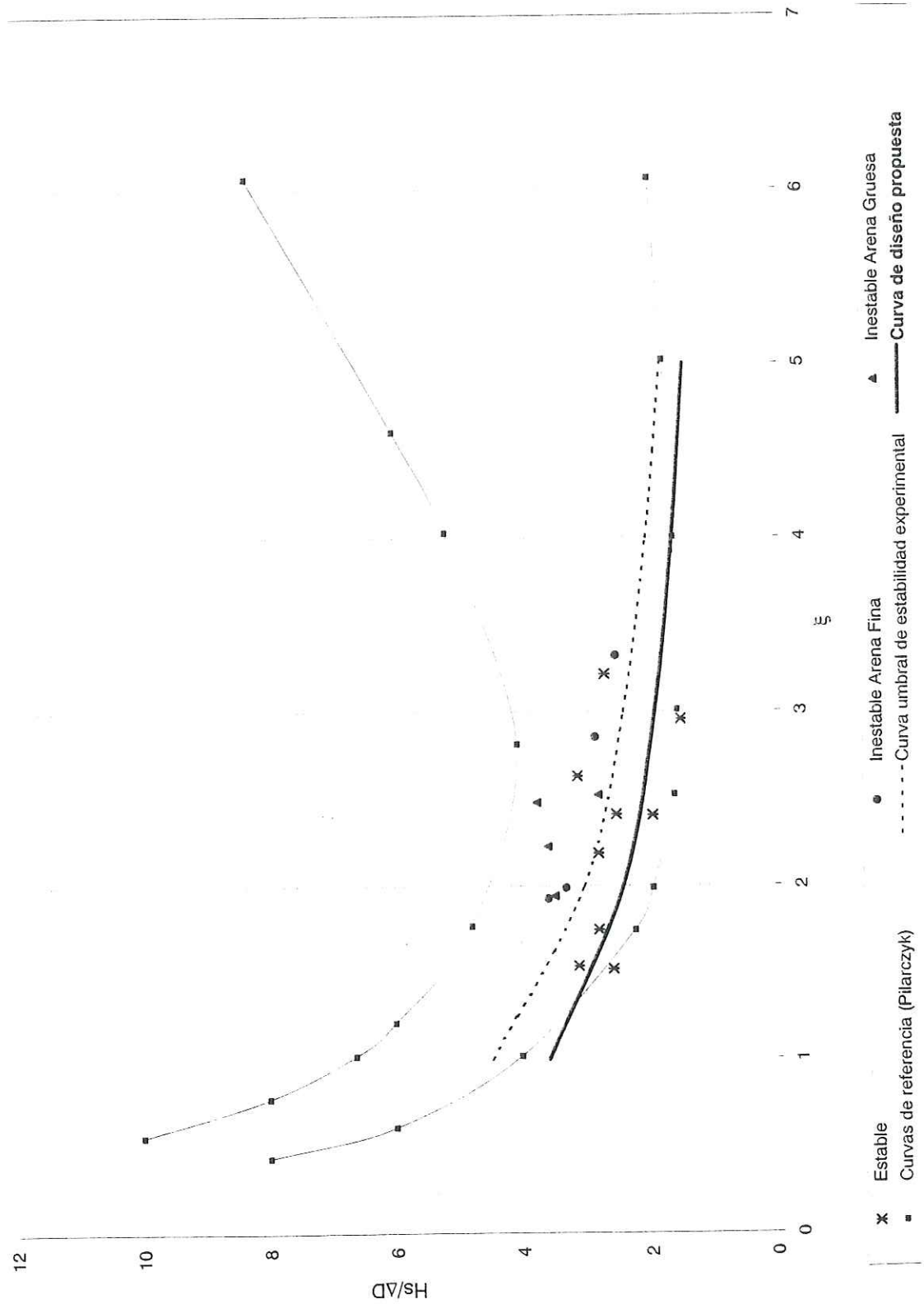


Figura 13: Curva de estabilidad de bloques Betoncover sobre geotextil en arena

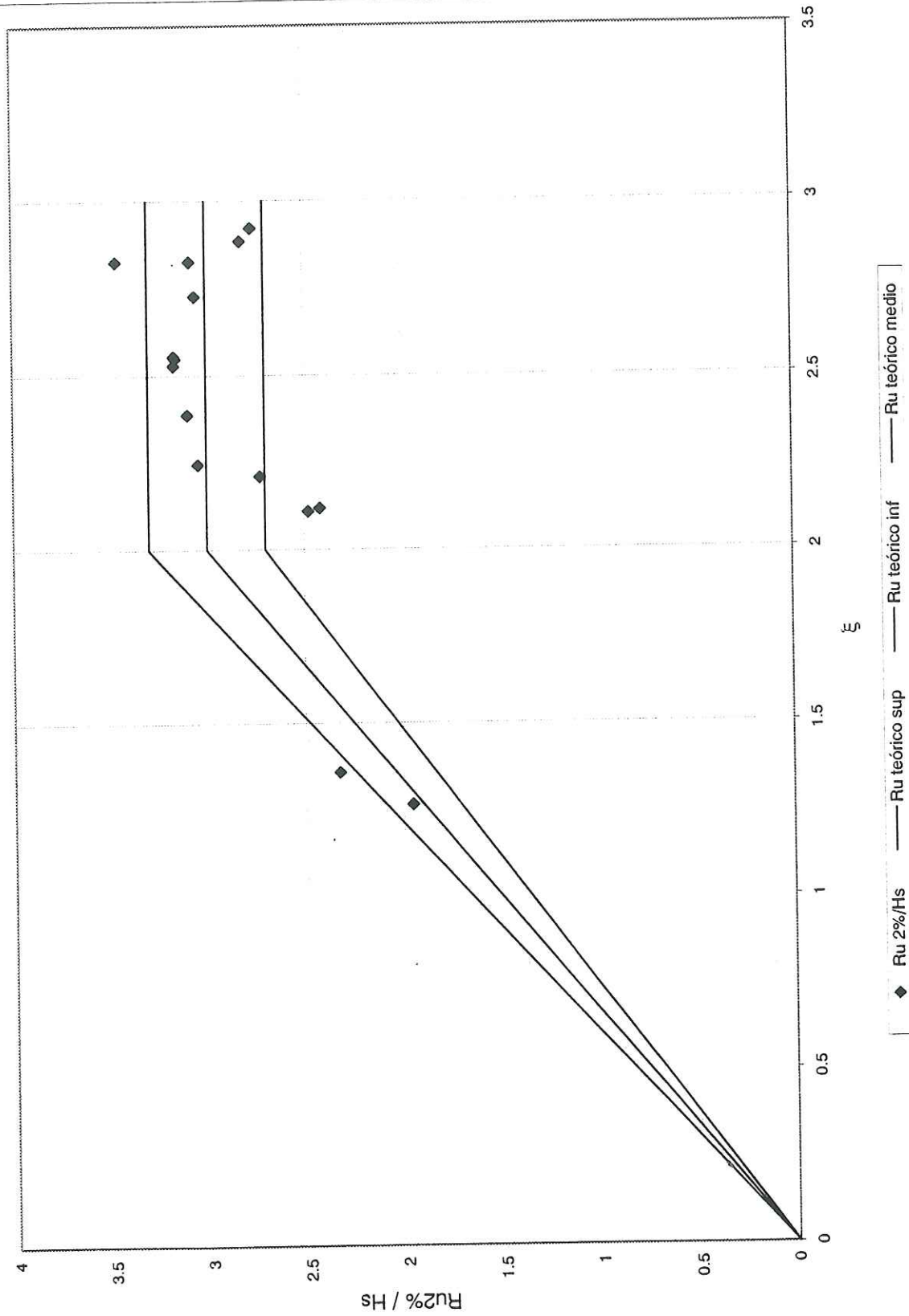


Figura 14: *Ru_{2%} up* de bloques Betoncover sobre geotextil en arena

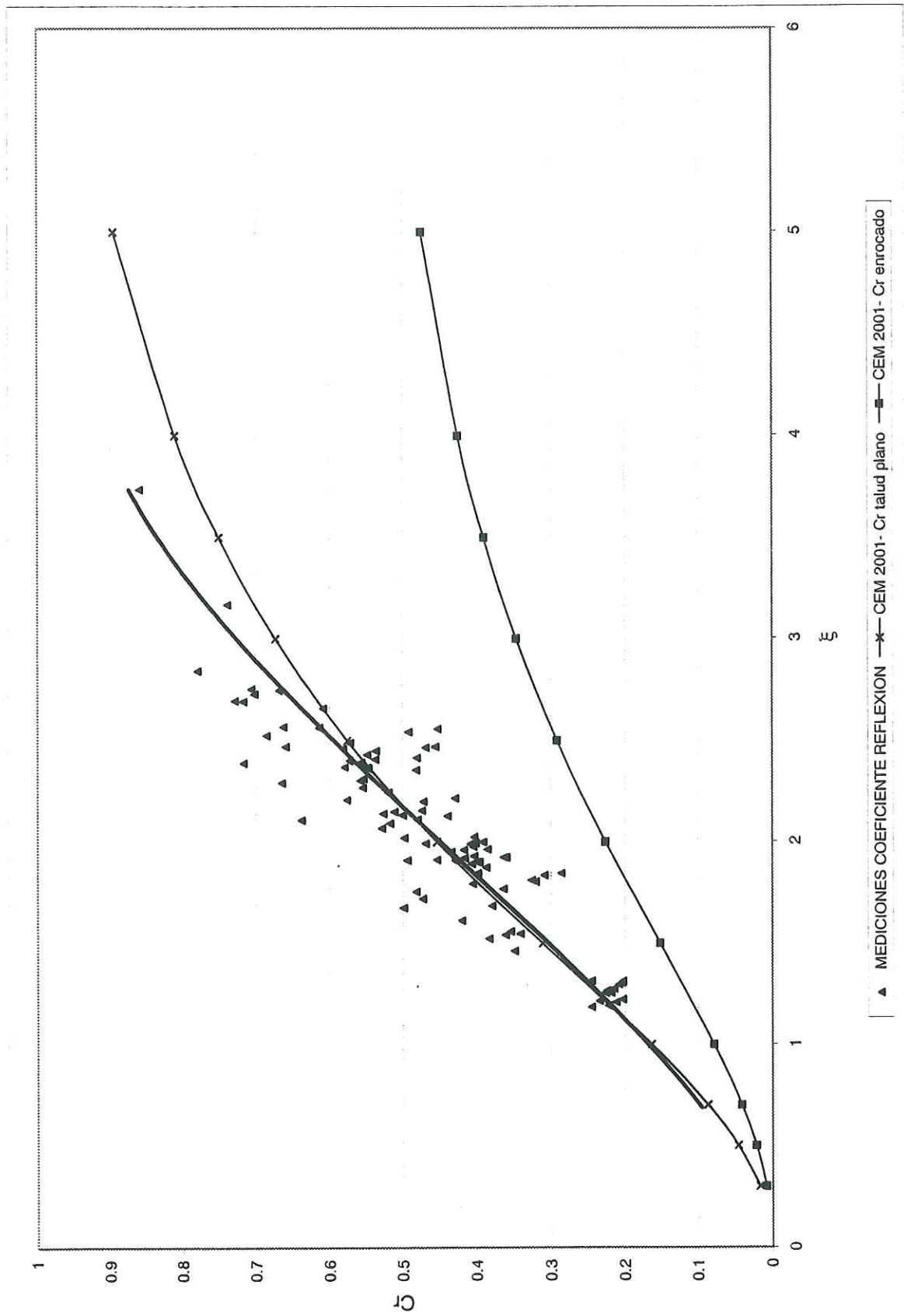


Figura 15: Coeficiente de reflexión de bloques Betoncover sobre geotextil en arena

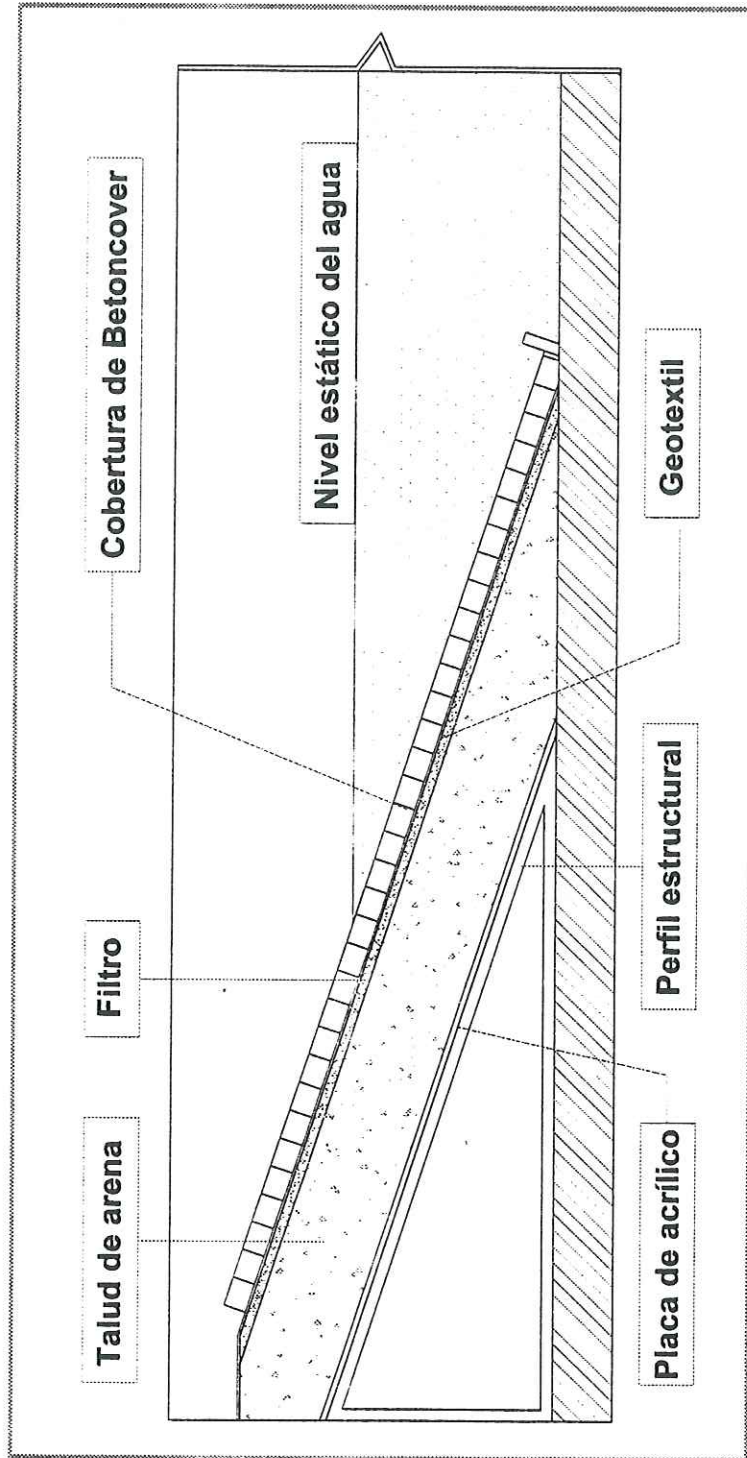


Figura 16: *Sección transversal ensayada de bloques sueltos sobre filtro granulada.*

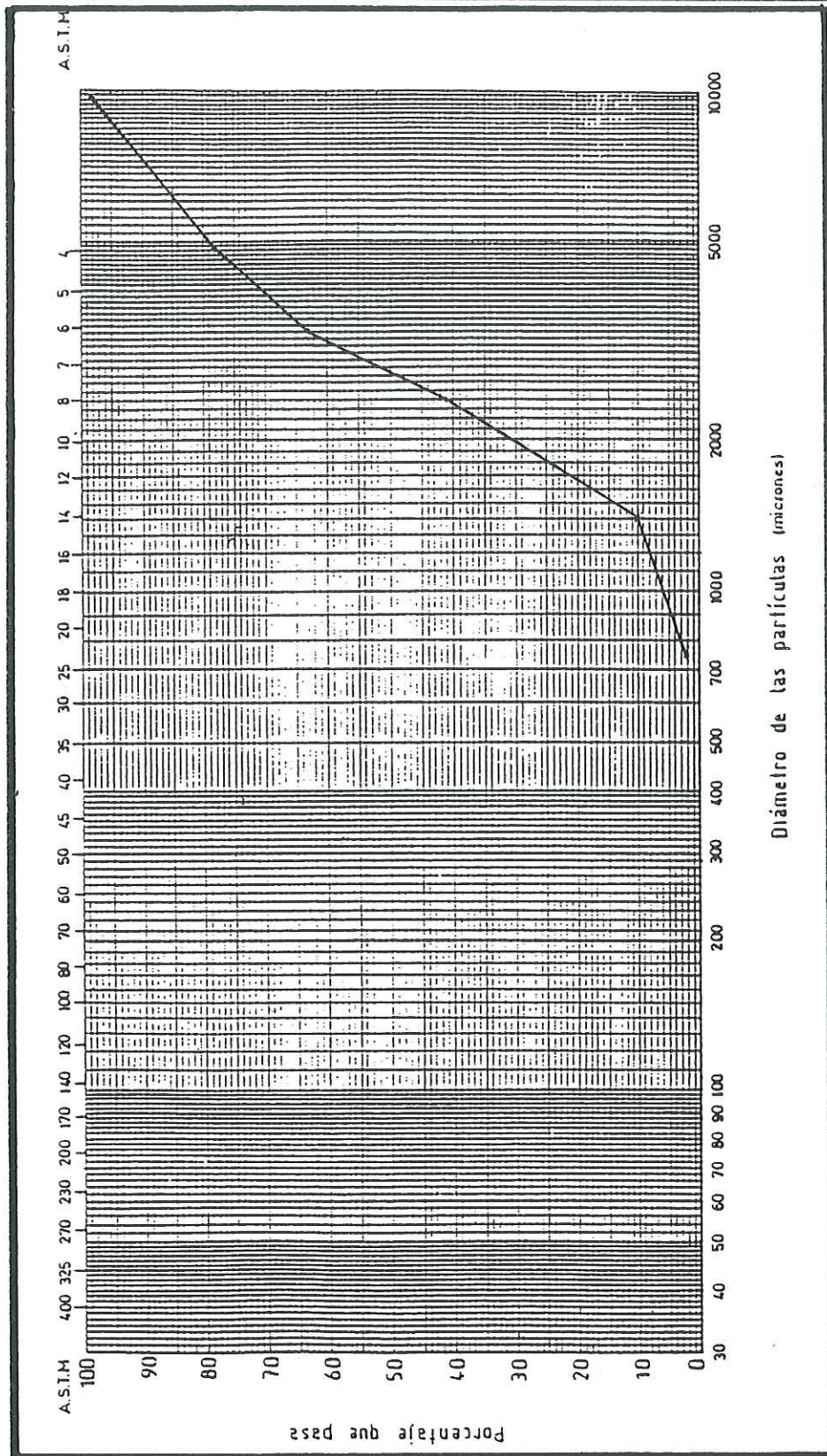


Figura 17: Curva granulométrica del filtro granular utilizado en el modelo

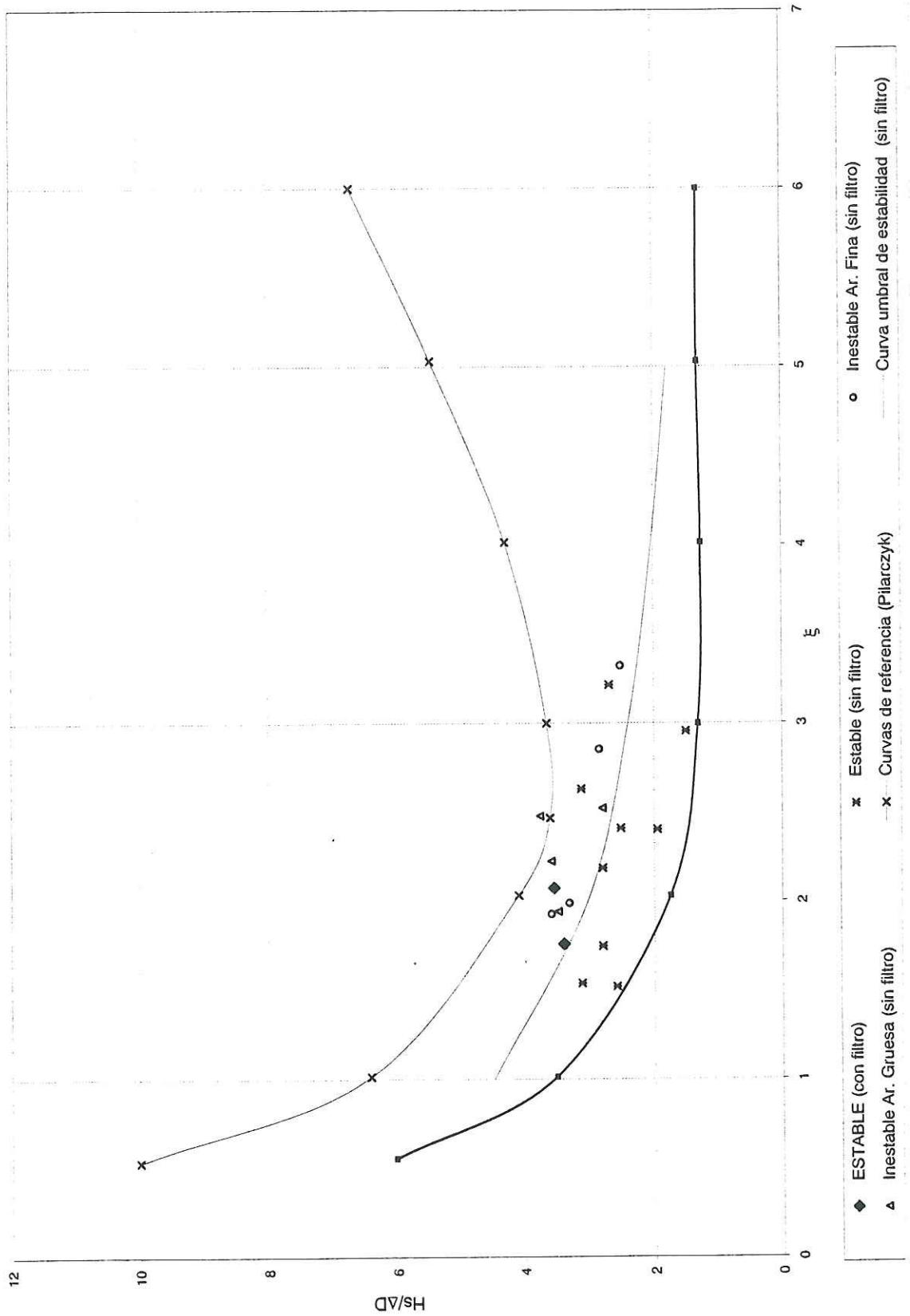


Figura 18: Curva de estabilidad de bloques Betoncoover sobre filtro granular

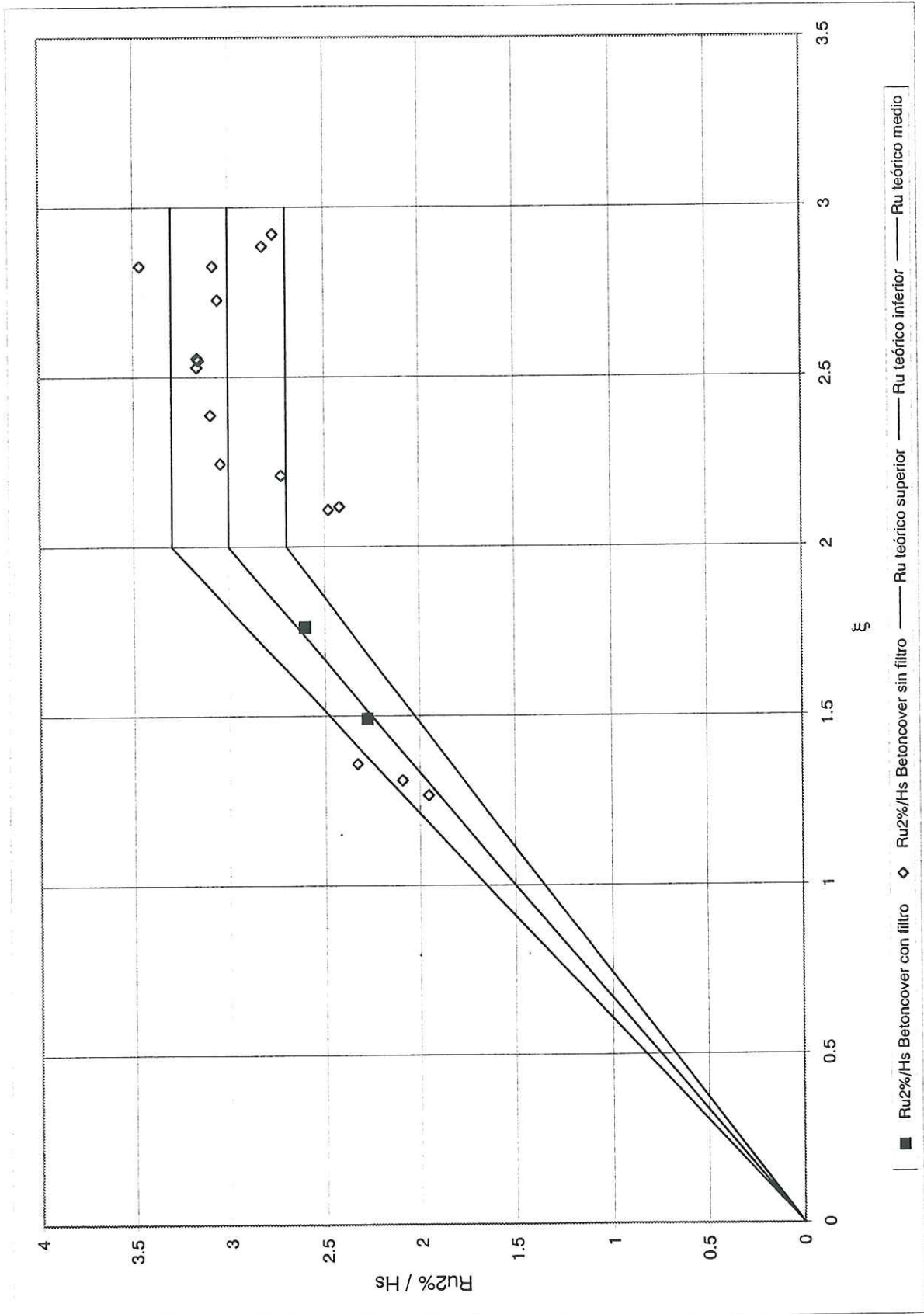


Figura 19: Run up de bloques Betoncover sobre filtro granular

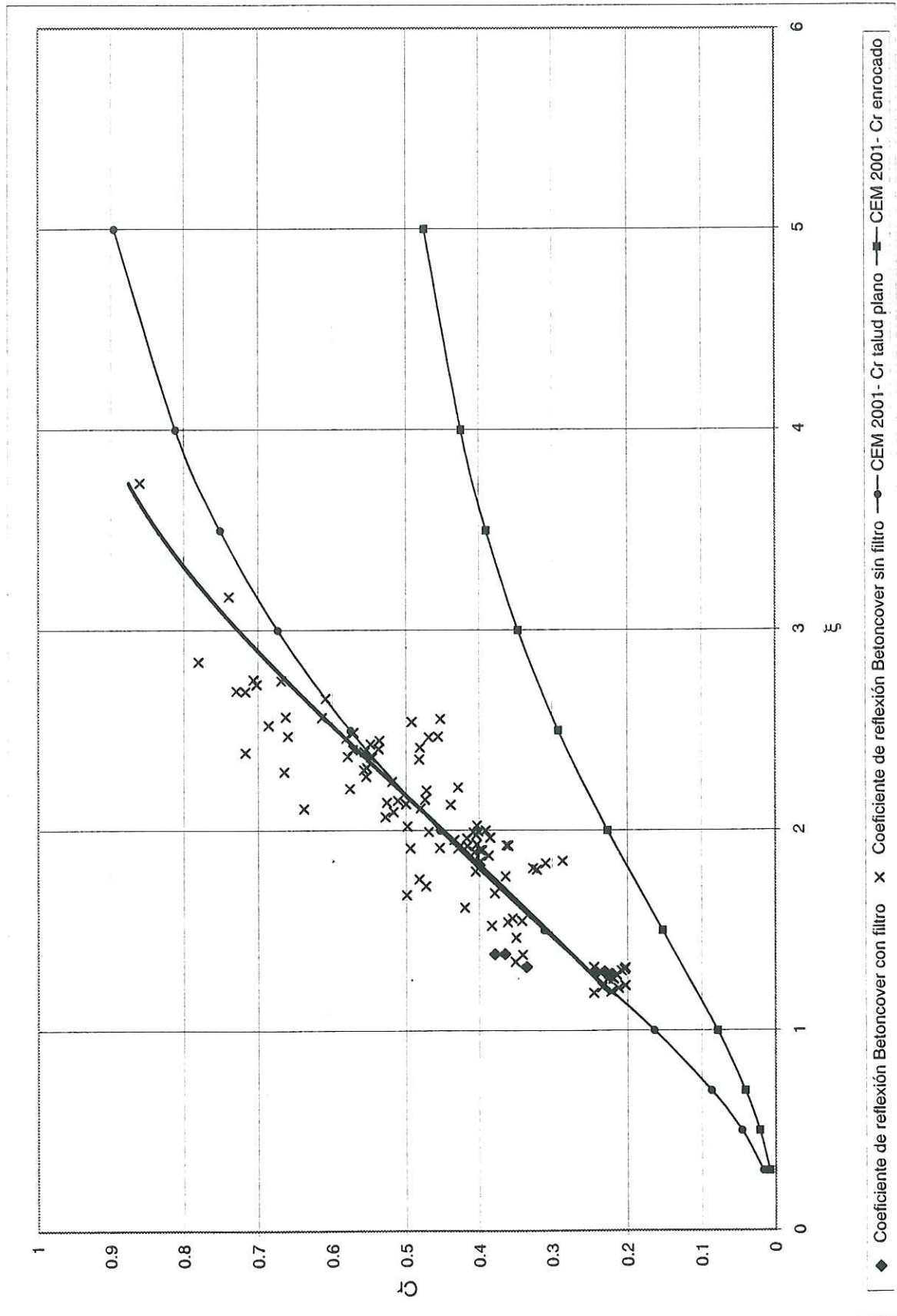
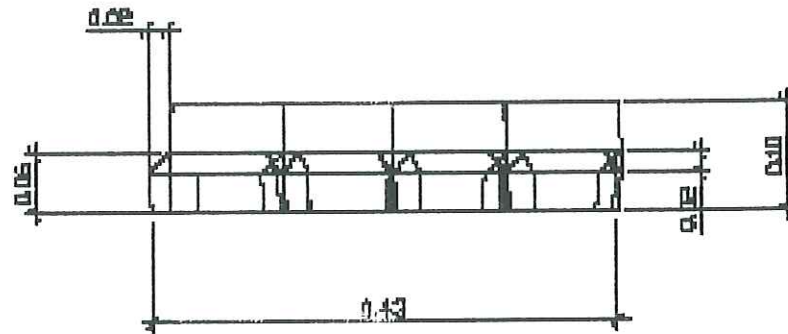
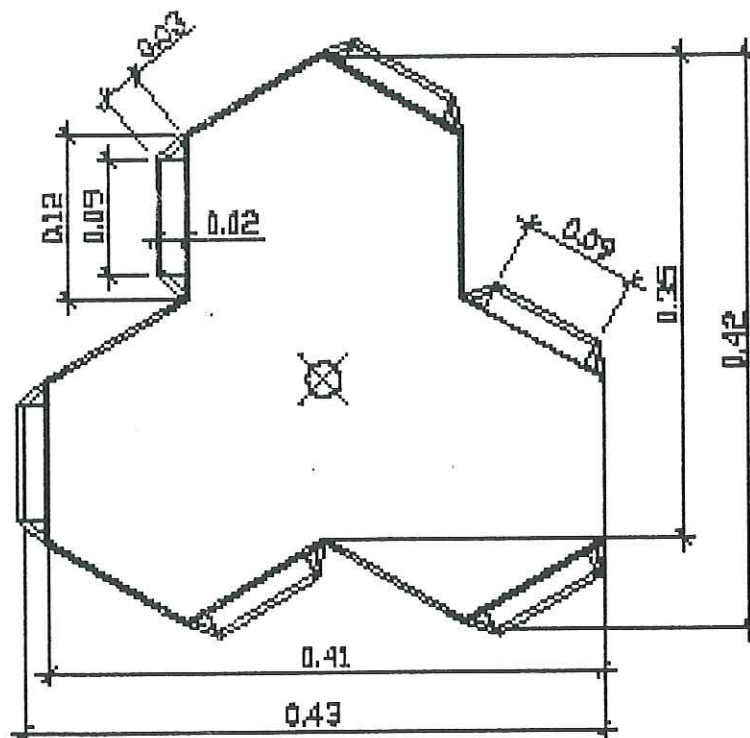


Figura 20: Coeficiente de reflexión de bloques Betoncover sobre filtro granular

MEDIDAS EN METROS



VISTA LATERAL



PLANTA

Figura 21: Dimensiones de la unidad Betonplan

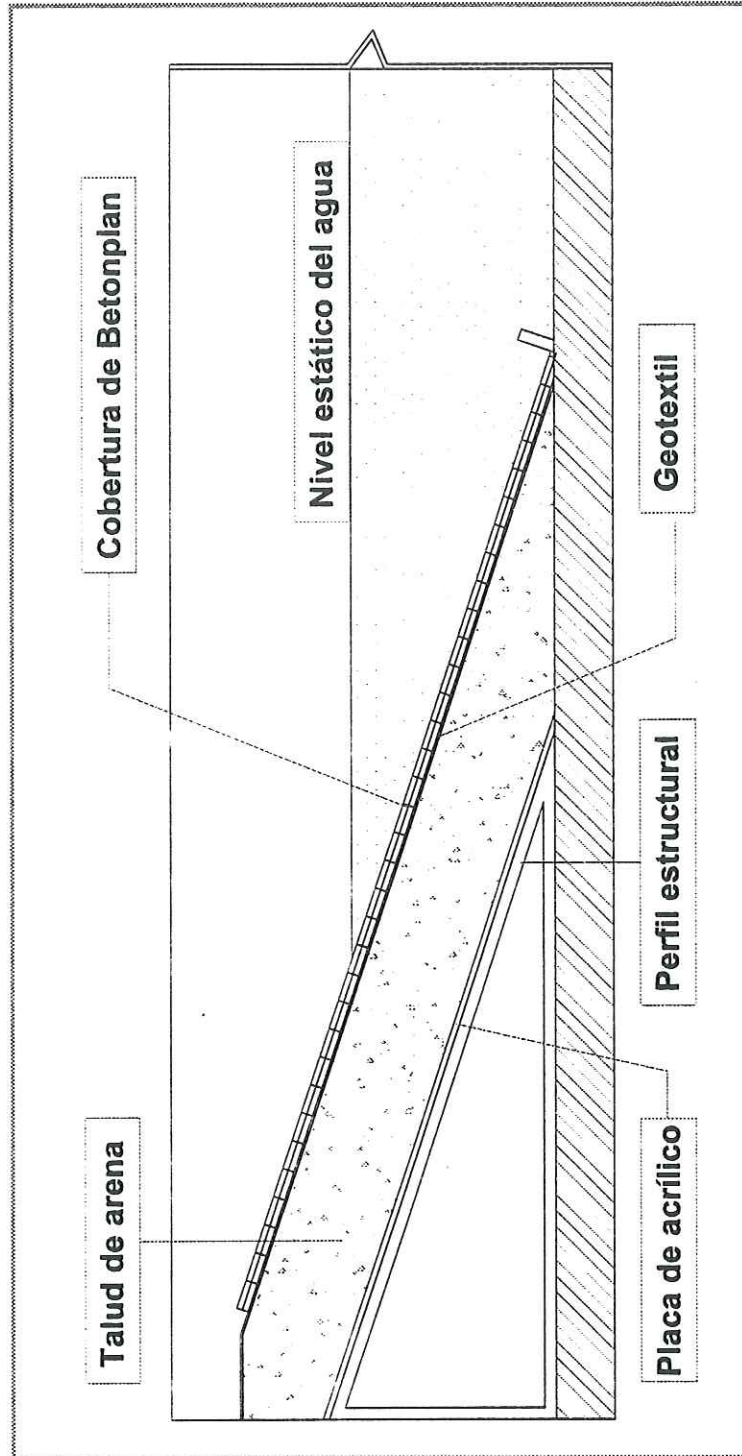


Figura 22: Sección transversal ensayada de bloques vinculados sobre geotextil en arena

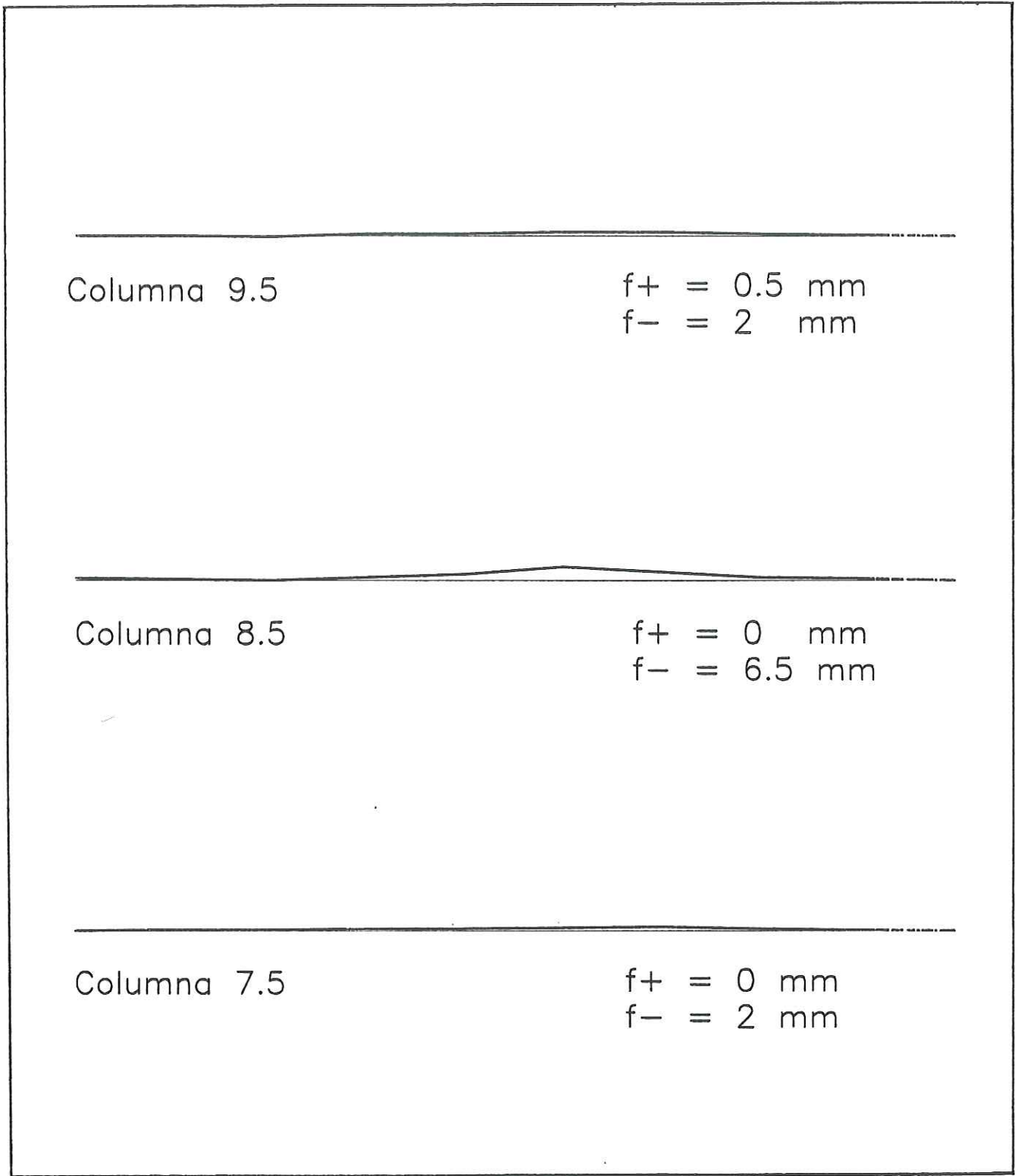


Figura 23: Perfiles del talud resultantes del ensayo 42 de las unidades Betonplan

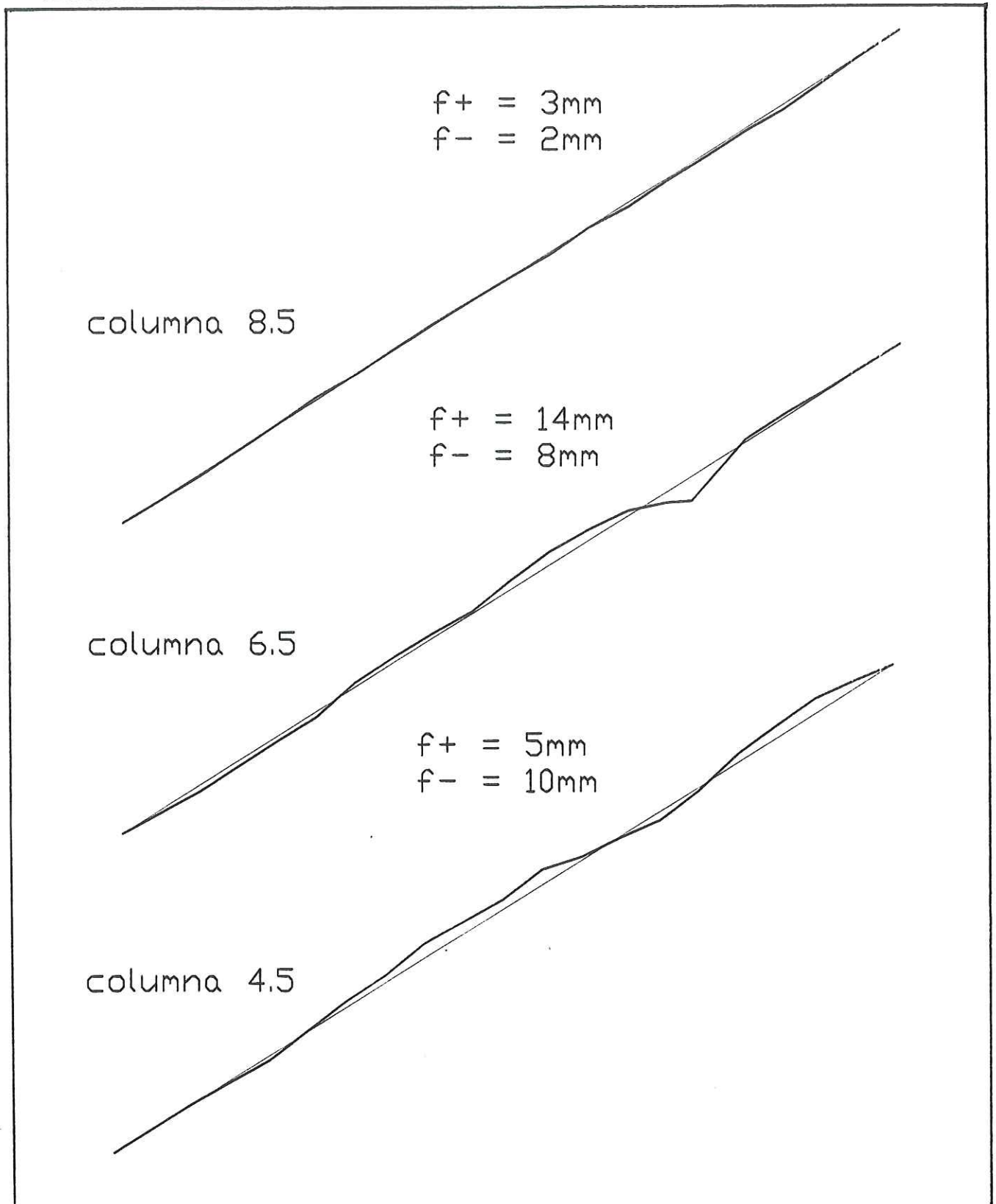


Figura 24: Perfiles del talud resultantes del ensayo 43 de las unidades Betonplan

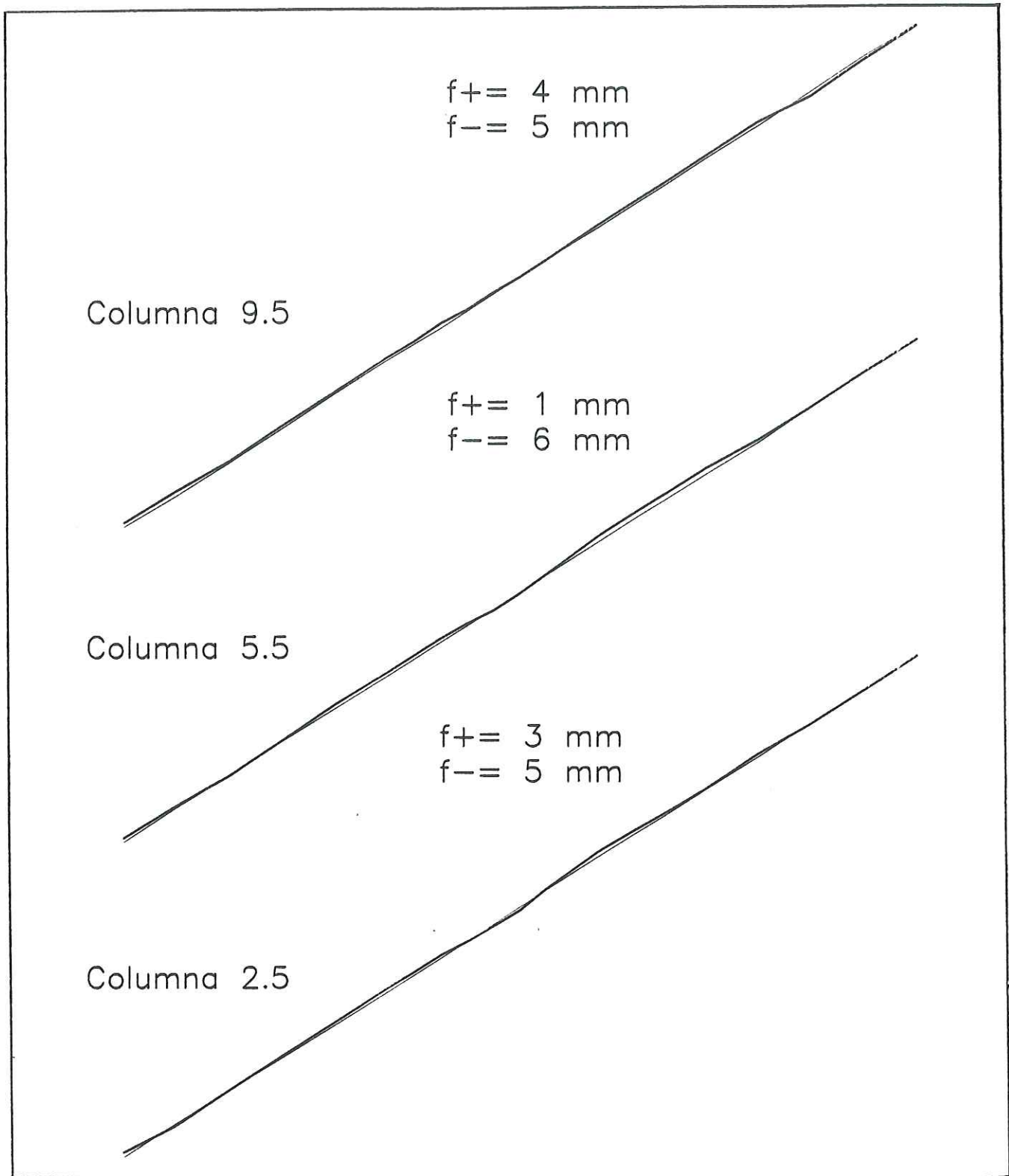


Figura 25: Perfiles del talud resultantes del ensayo 44 de las unidades Betonplan

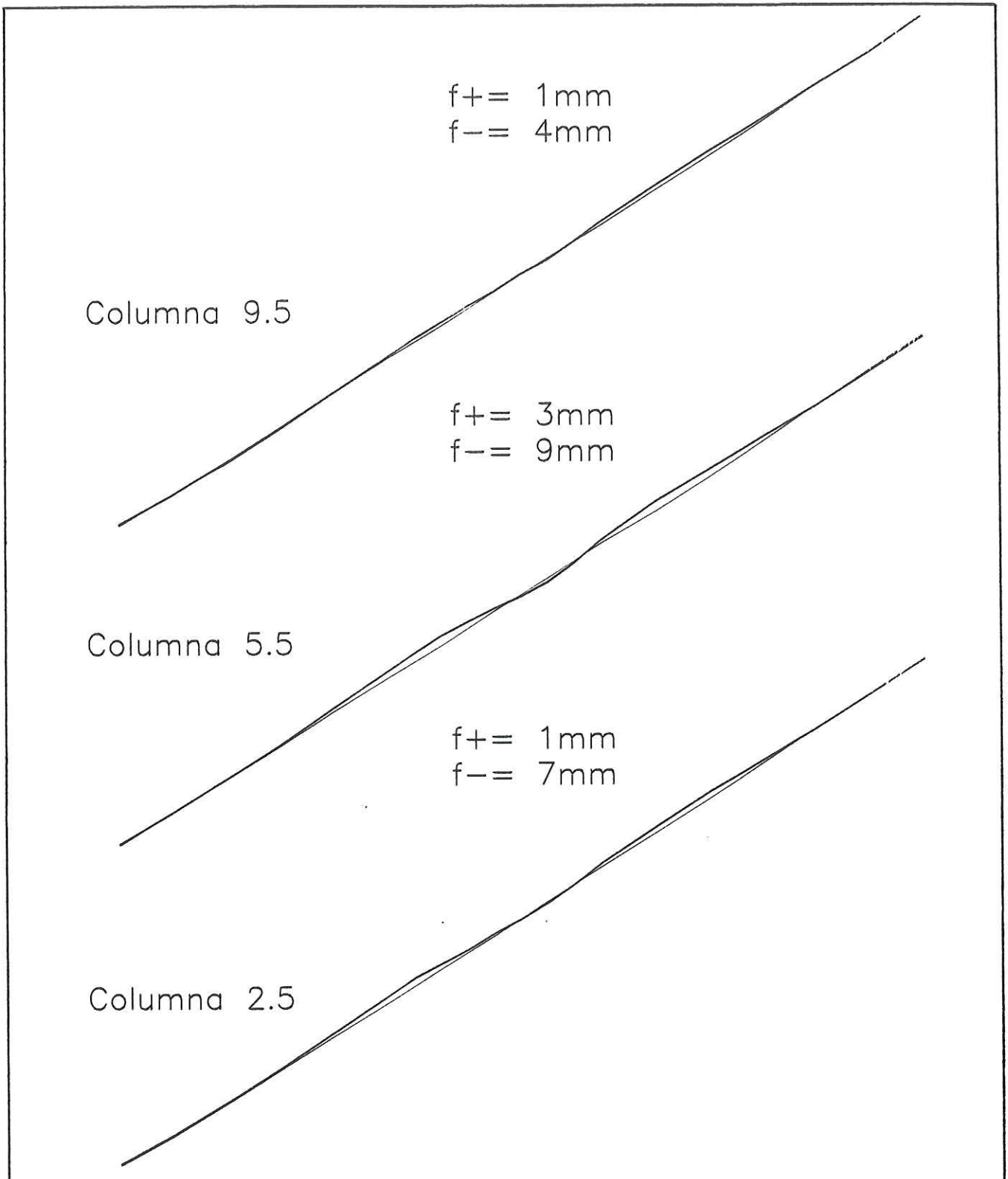


Figura 26: Perfiles del talud resultantes del ensayo 45 de las unidades Betonplan

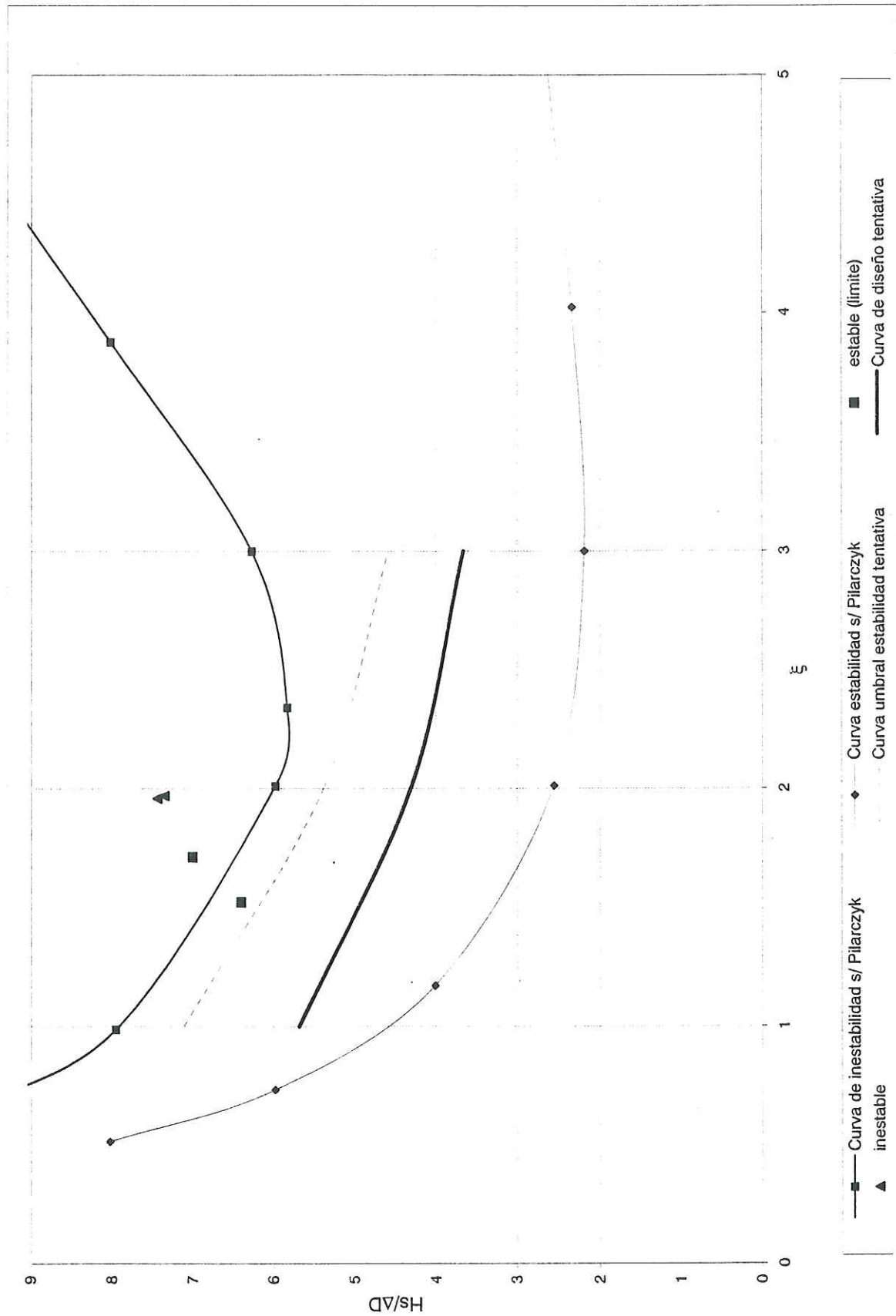


Figura 27: Curva de estabilidad de bloques Betonplan sobre geotextil en arena

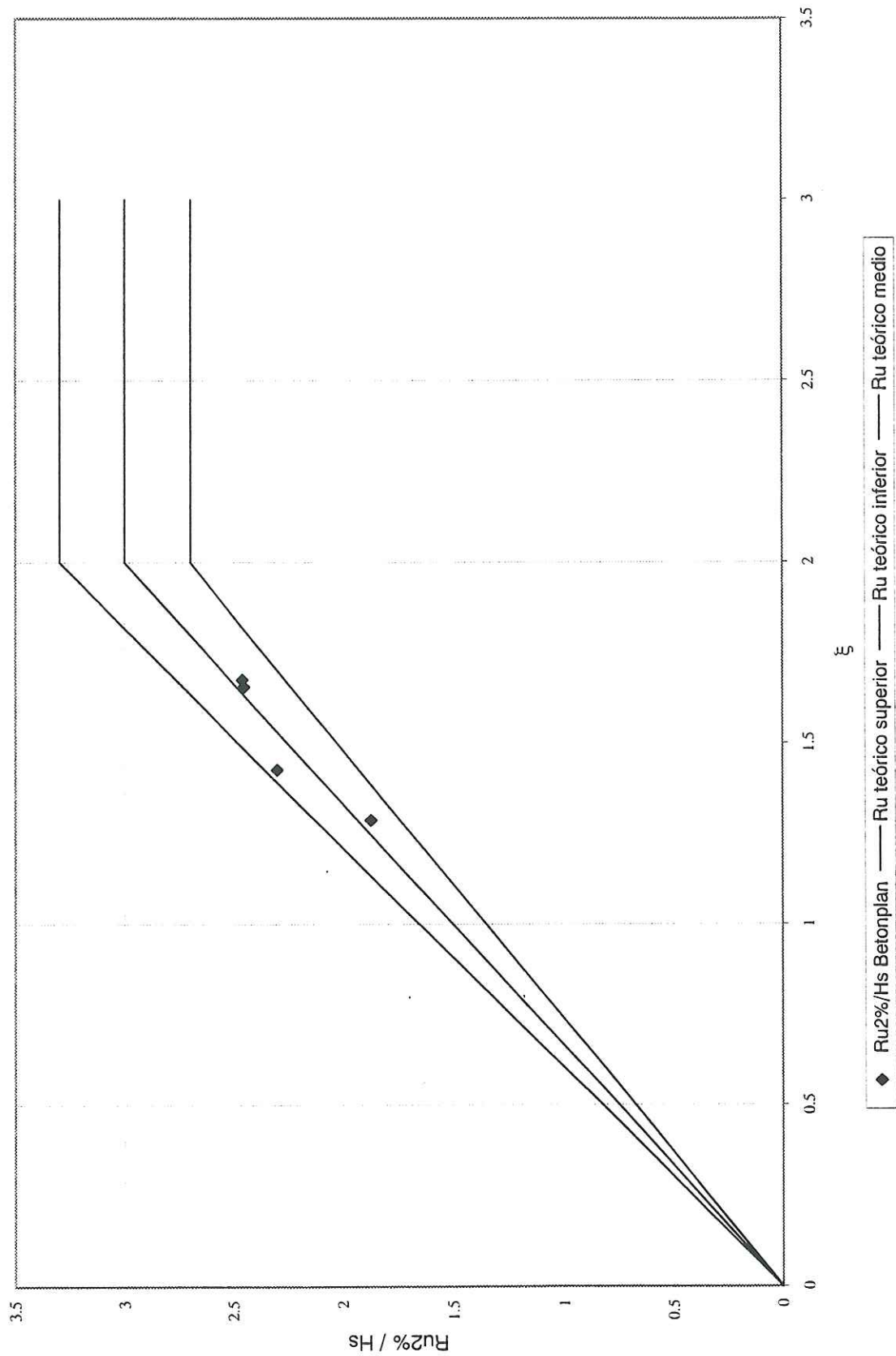


Figura 28: Run up de bloques Betonplan sobre geotextil en arena

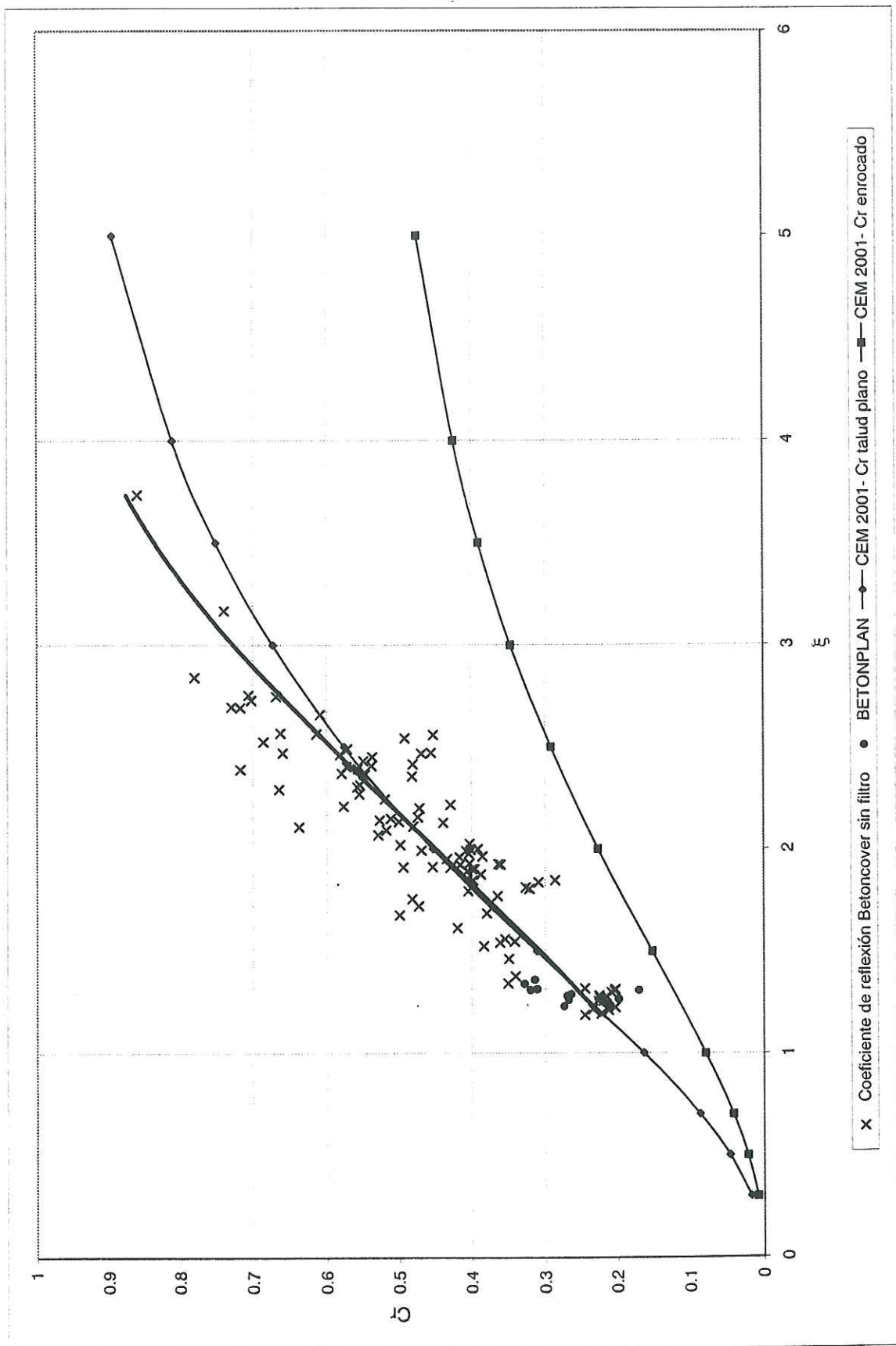


Figura 29: Coeficiente de reflexión de bloques Betonplan sobre geotextil en arena

FOTOS



Foto 1: *Estado final del terraplén de arena utilizando geotextil comercial.*

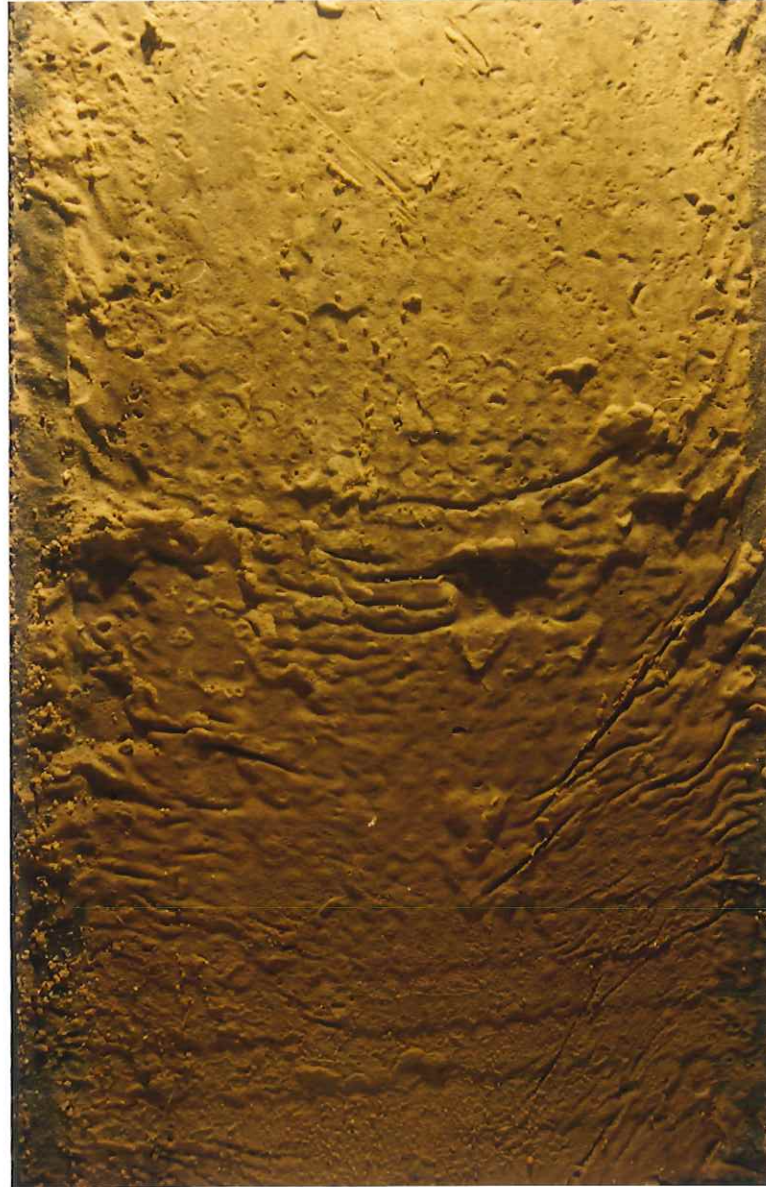


Foto 2: Estado final del terraplén de arena utilizando una fina tela tejida.

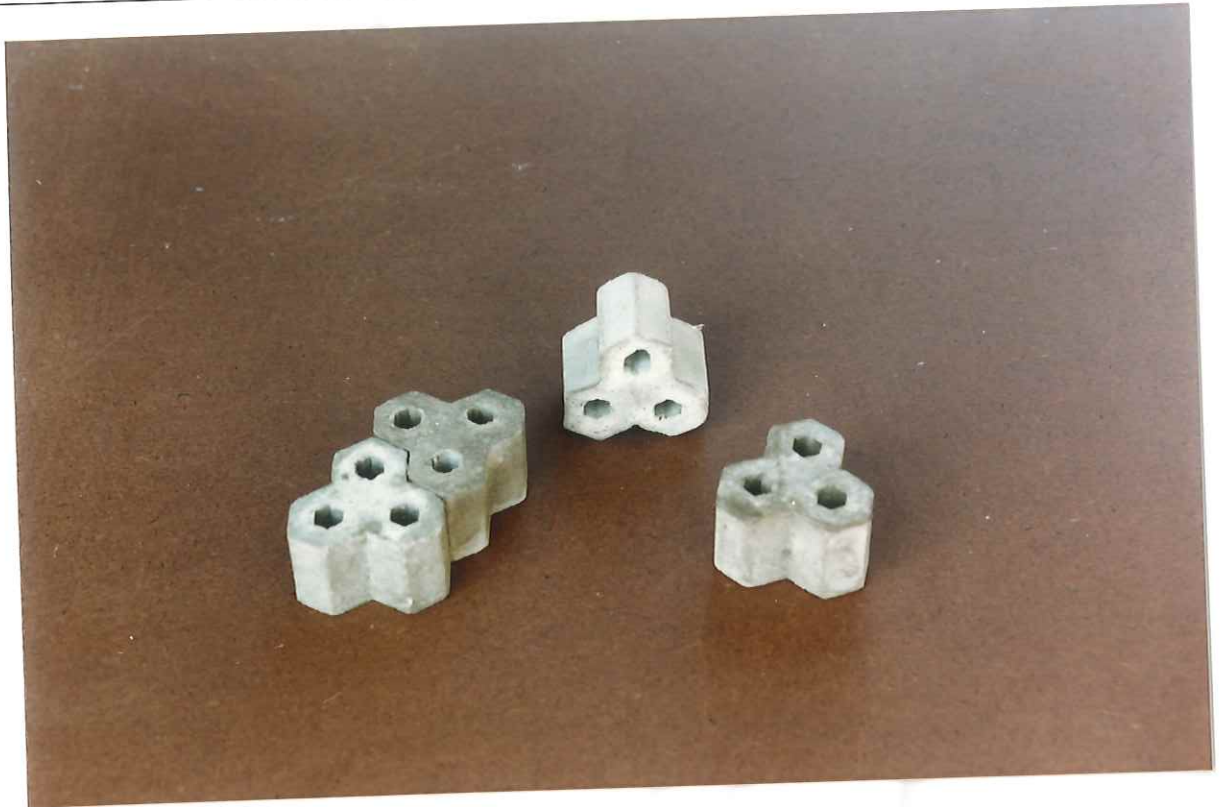


Foto 3: *Piezas modelo de la unidad Betoncover.*

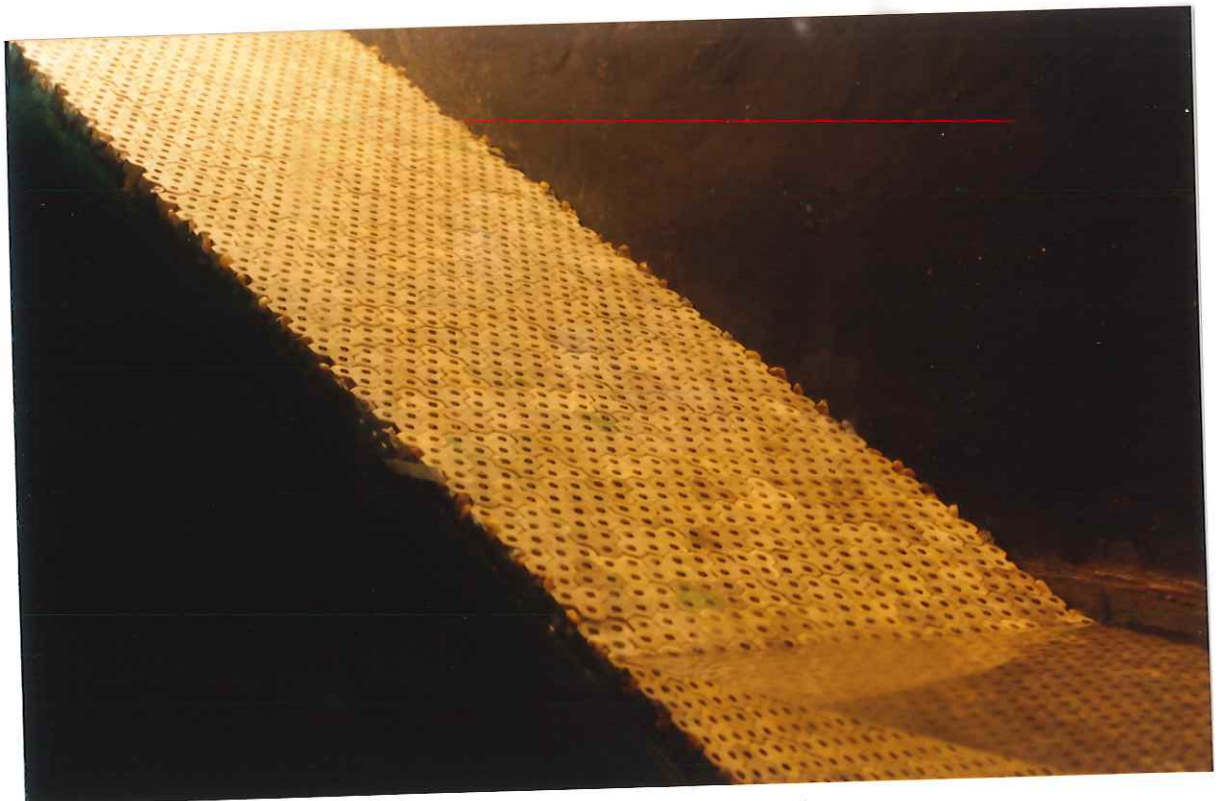


Foto 4: *Vista general de talud terminado de unidades Betoncover.*

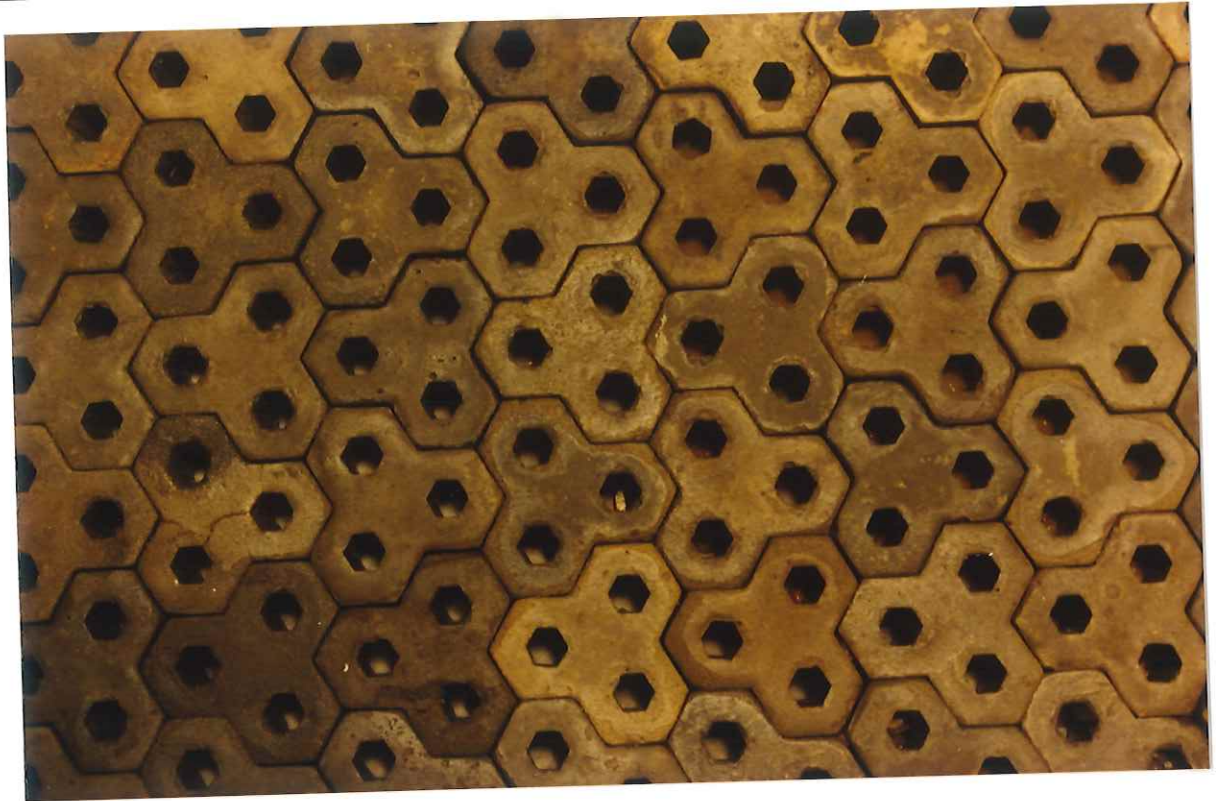


Foto 5: Unidades Betoncover colocadas (pendiente del talud de izquierda a derecha).



Foto 6: Ensayo 23 - unidades Betoncover - 1H:2V, $H_s = 1.15$ m, $T = 4$ s.

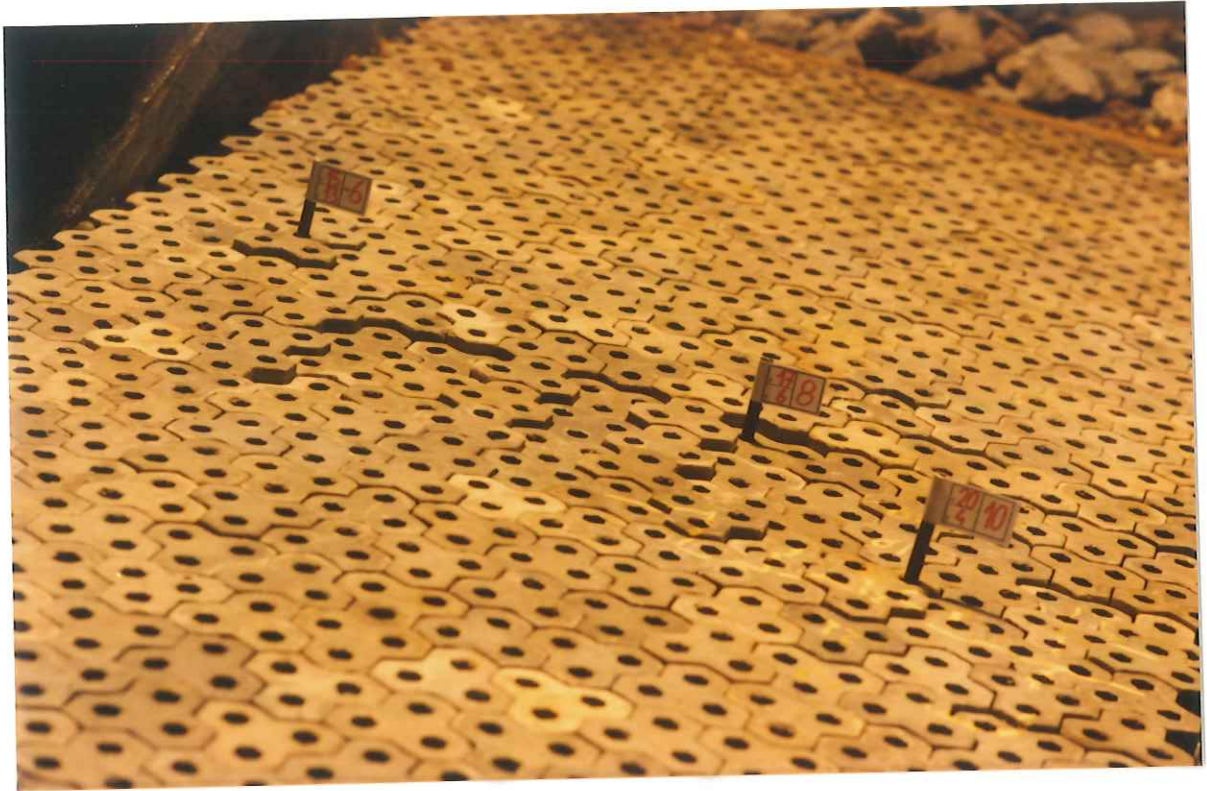


Foto 7: Estado final del talud del ensayo 7 - 1V:2H, $H_s = 1.30$ m, $T = 3$ s.



Foto 8: Expulsión de bloque e inestabilidad geotécnica en el ensayo 7.



Foto 9: *Vista del geotextil modelado finalizado el ensayo 7.*

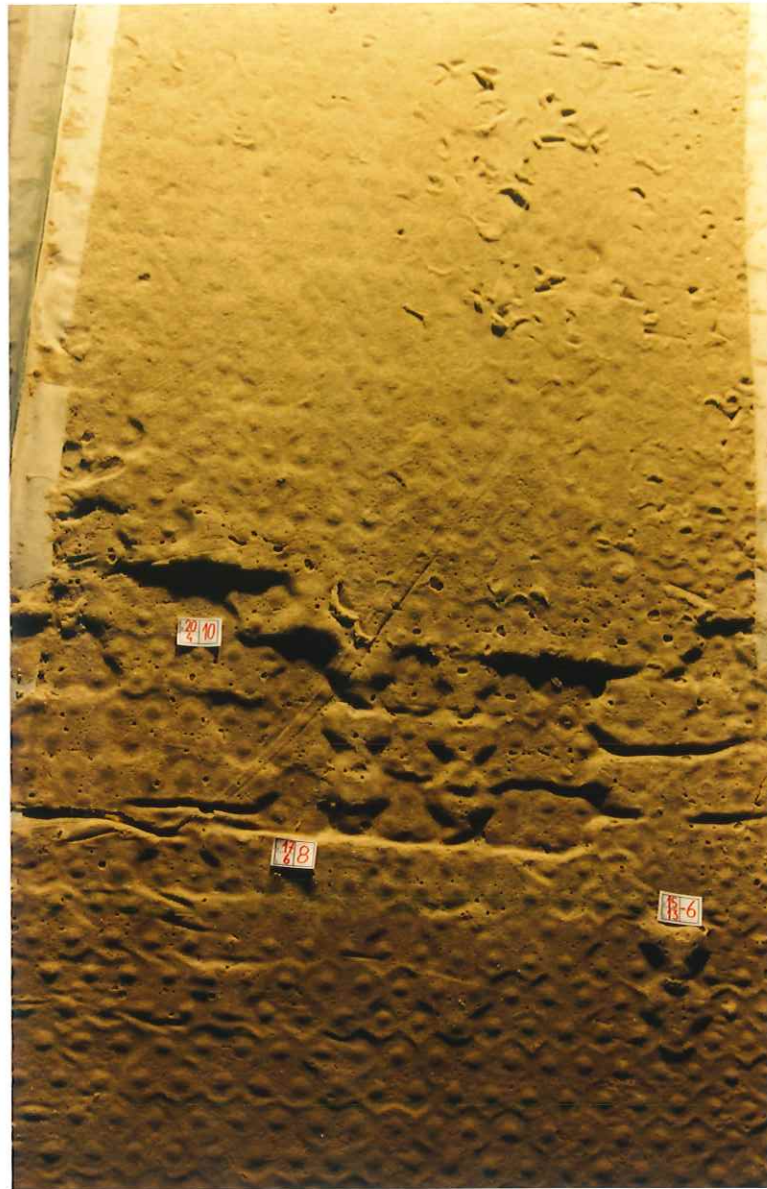


Foto 10: *Estado final del terraplén de arena del ensayo 7.*

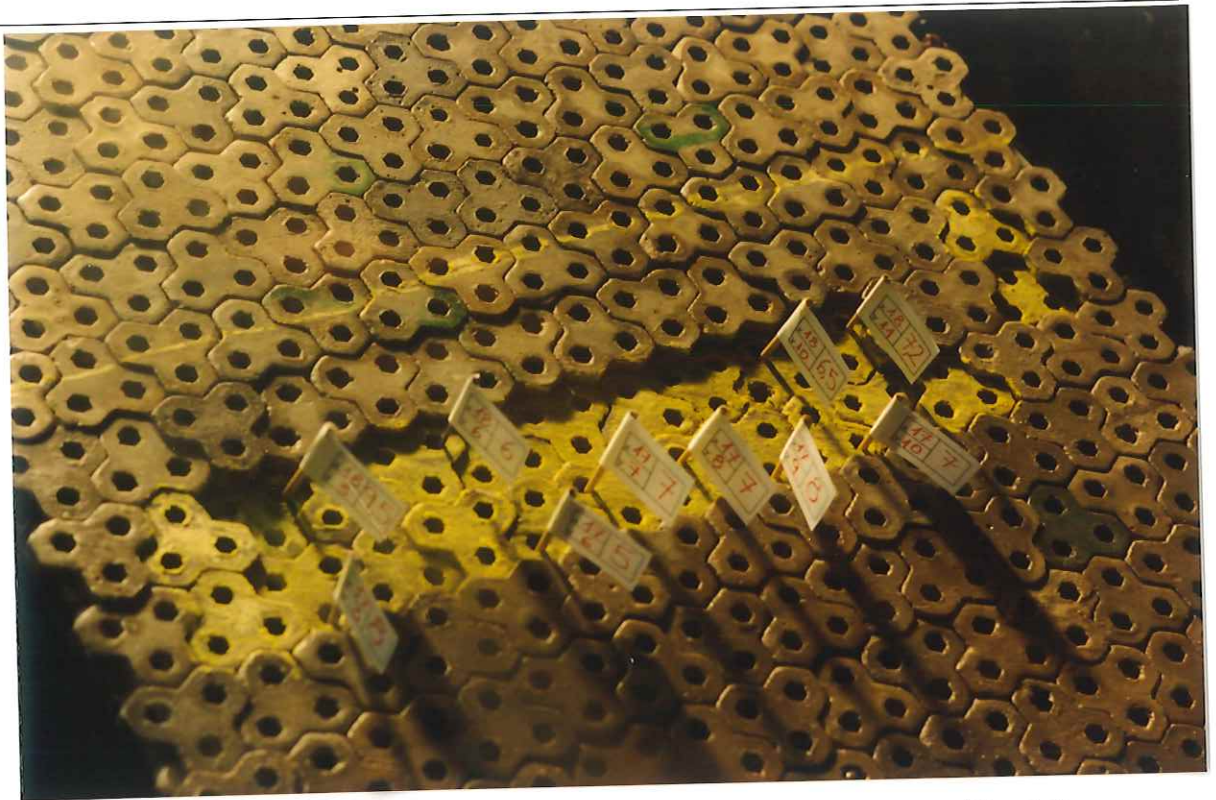


Foto 11: Formación de un perfil tipo "Z", $1V:2H$, $H_s = 0.75$ m, $T = 2.9$ s.



Foto 12: Armado de talud de unidades Betoncover sobre filtro.



Foto 13: Protección de unidades Betoncover sobre filtro.

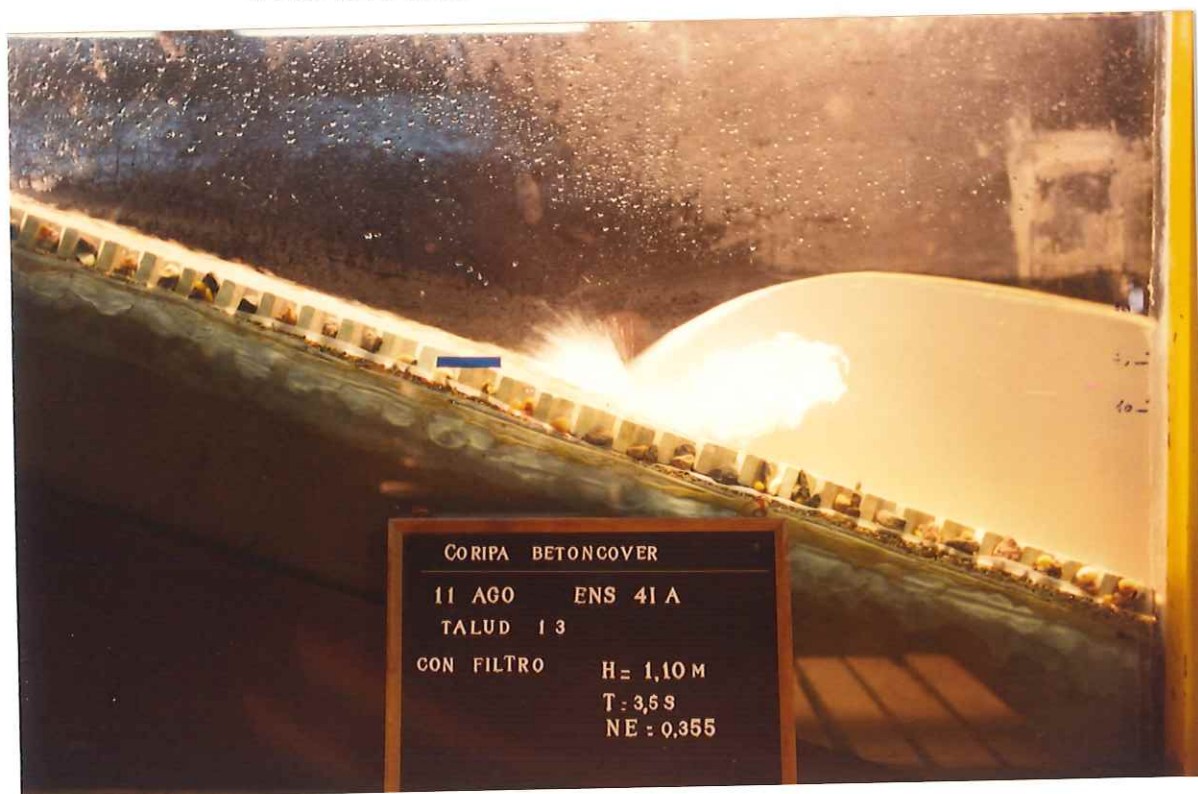


Foto 14: Ensayo 41A—Betóncover sobre filtro, 1V:3H, $H_s = 1.10\text{ m}$, $T = 3.5\text{ s.}$



Foto 15: Estado final del filtro finalizado el ensayo 41A.



Foto 16: Estado final del terraplén de arena finalizado el ensayo 41A.

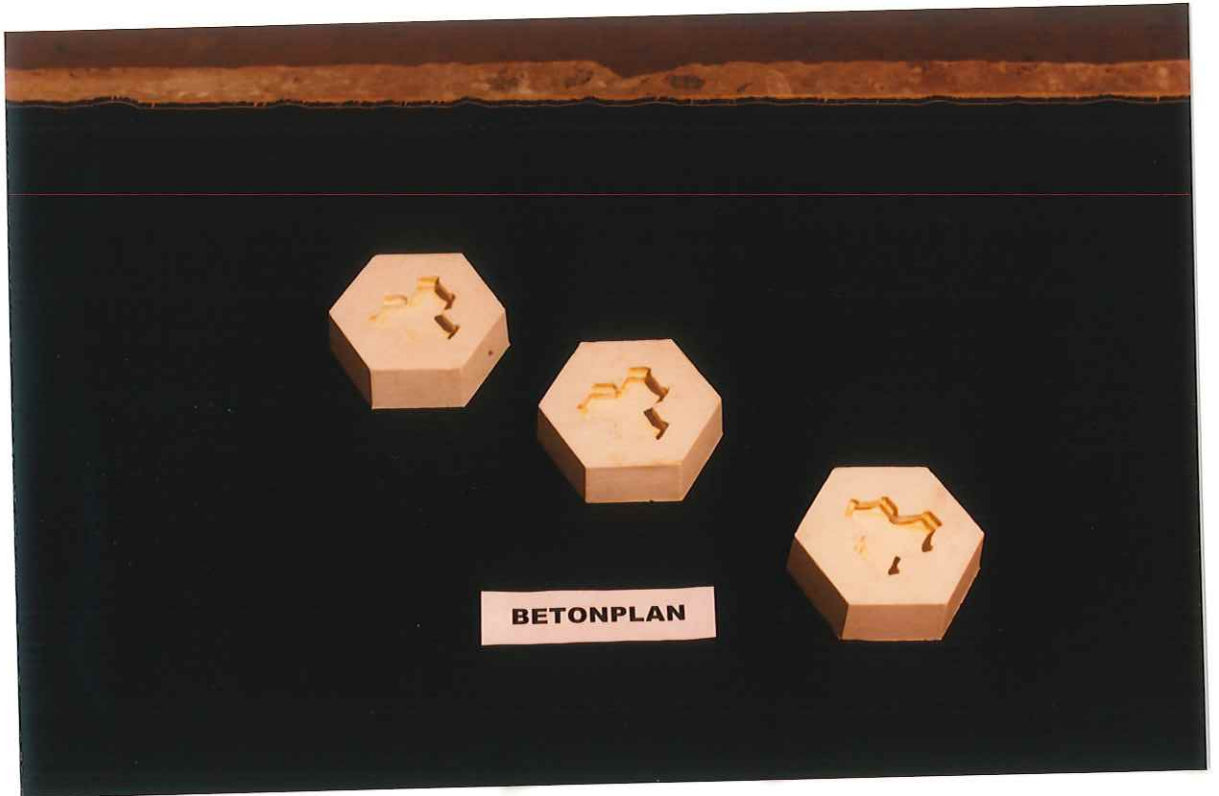


Foto 17: Moldes de las piezas modelo Betonplan.



Foto 18: Unidades modelo sobre unidad prototipo Betonplan..



Foto 19: *Talud terminado 1V:3H de unidades Betonplan.*



Foto 20: Ensayo 43 – unidades Betonplan – 1V:3H, Hs= 1.30, T= 4s.



Foto 21: Estado final del talud finalizado el ensayo 43.



Foto 22: *Valle de la deformación-ensayo 43 (pendiente del talud en dirección vertical).*



Foto 23: *Cresta de la deformación-ensayo 43 (pendiente del talud de izquierda a derecha).*

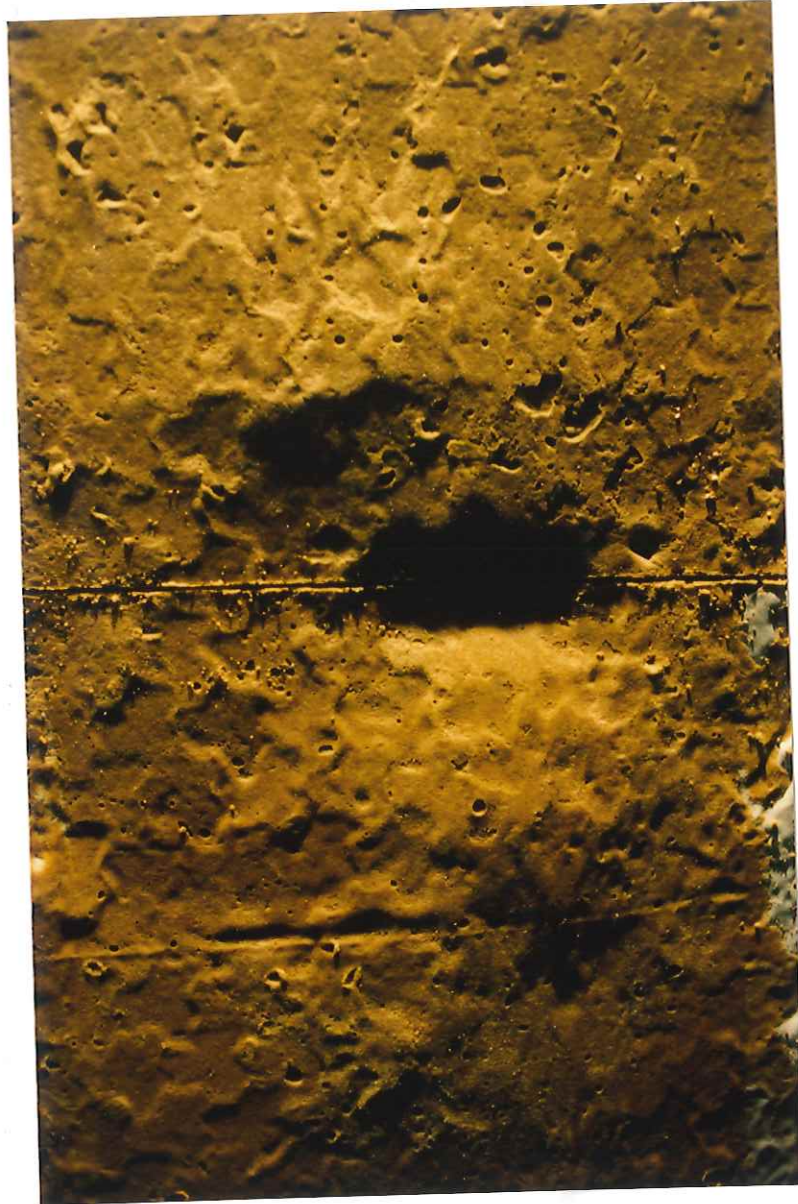


Foto 24: *Estado final del terraplén de arena finalizado el ensayo 43.*



Foto 25: *Estado final del terraplén debajo del nivel estático del agua – ensayo 43..*



Foto 26: *Estado final del talud en el ensayo 45 – 1V:3H, Hs = 1.30 m, T = 4s.*



Foto 27: Formación de un perfil tipo "S" en el ensayo 45.

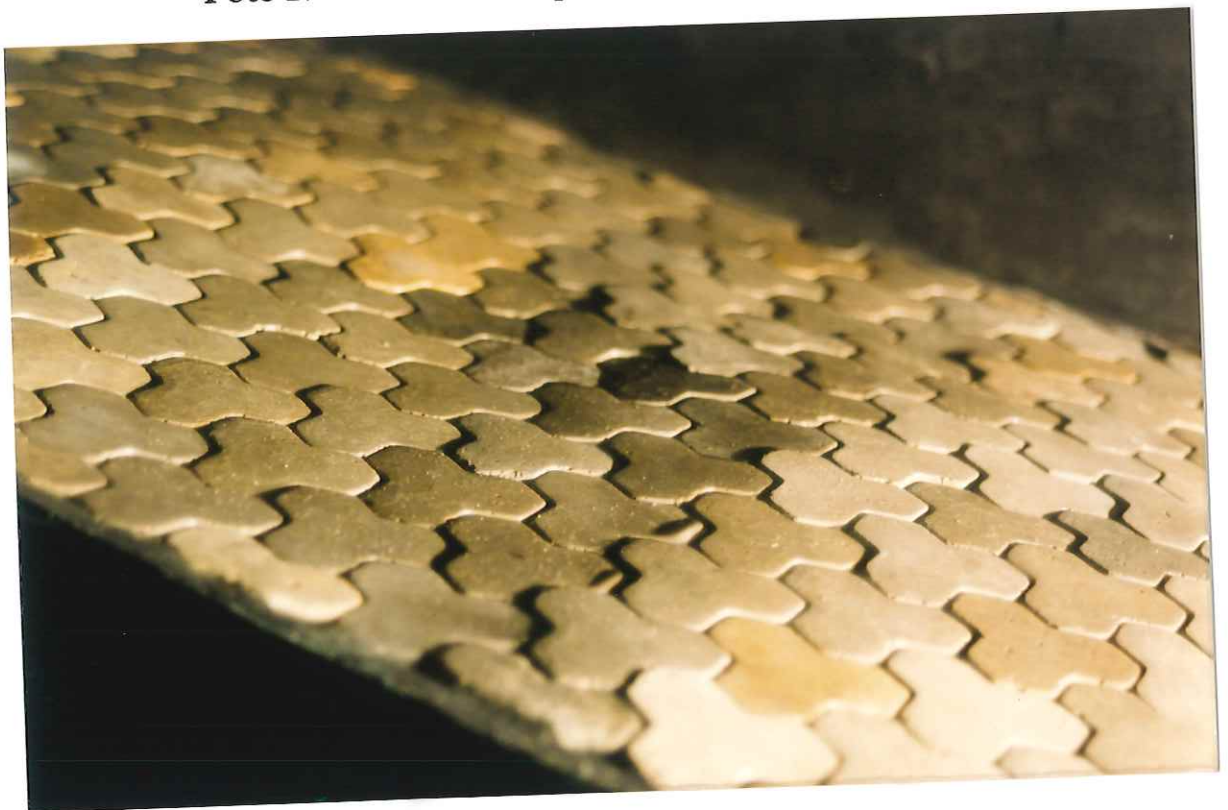


Foto 28: Descalce de la protección – ensayo 45.



Foto 29: *Estado final de la protección en el ensayo 46 – 1V:2H, T = 4 s*



Foto 30: *Rotura de la cubierta – ensayo 46.*

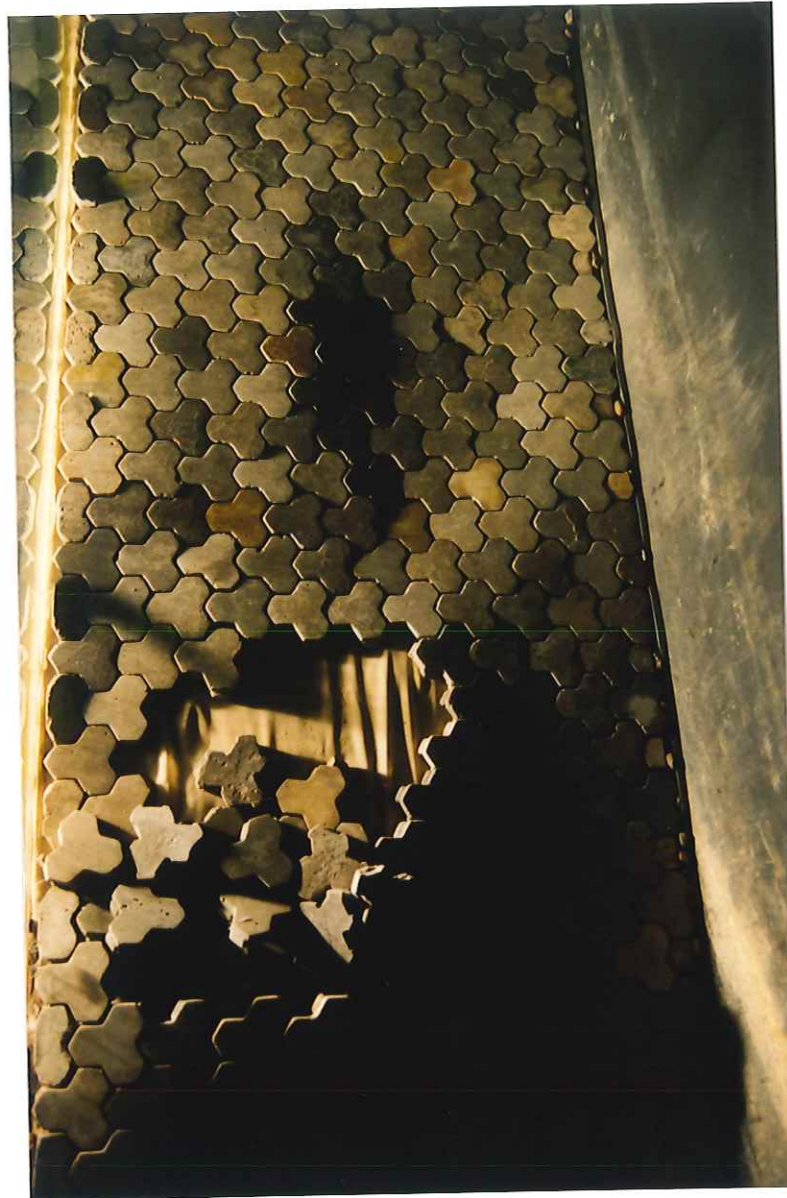


Foto 31: *Vista general del deslizamiento ocurrido en el ensayo 46.*



Foto 32: Estado final del terraplén de arena finalizado el ensayo 46.



Foto 33: *Canalículos formados en el ensayo 46.*