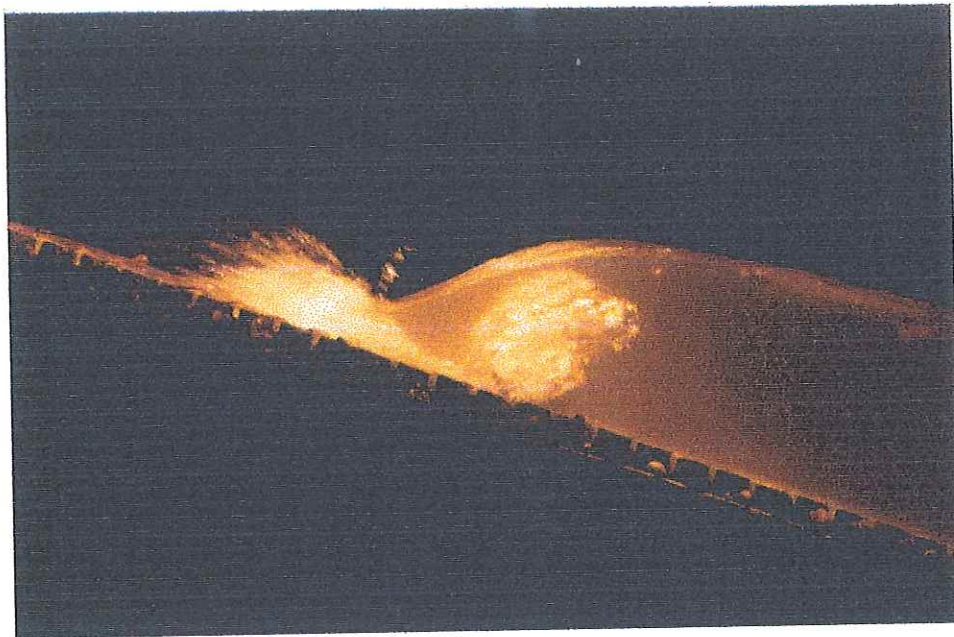




**ESTUDIO EN MODELO FISICO DE
RESISTENCIA AL OLEAJE
DE TALUDES PROTEGIDOS MEDIANTE
UNIDADES PREFABRICADAS
BETONCOVER Y BETONPLAN**



INFORME DE AVANCE N° 1
JULIO DE 2003

Informe LHA -221-01-03

ESTUDIO EN MODELO FISICO DE RESISTENCIA AL OLEAJE DE
TALUDES PROTEGIDOS MEDIANTE UNIDADES PREFABRICADAS
BETONCOVER Y BETONPLAN

Informe de Avance N° 1

RESUMEN: se presentan los resultados iniciales de un estudio de en model físico de la estabilidad ante la acción del oleaje de una protección de taludes constituida por elementos de hormigón premoldeados.

PALABRAS CLAVE: protección de taludes – olas – modelo físico

Informa LHA – 221 – 01 - 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 Haspert

Sr. Sebastián Peralta

Asesoramiento

Ing. Sergio Loschacoff

Fotografía y video

Srta. Beatriz Moreno

INDICE

1.	Introducción	4
2.	Objetivos	4
3.	Antecedentes	4
	Estabilidad	5
	Mecanismos de falla.....	7
	Run-up.....	9
	Reflexión	11
4.	Descripción de los elementos premoldeados	13
5.	Descripción de las instalaciones	14
6.	Diseño del modelo.....	15
6.1.	Leyes de similitud.....	15
6.2.	Dimensiones del modelo.....	15
6.3.	Selección de la escala	16
6.4.	Efectos de escala	17
6.5.	Construcción de las piezas del modelo	20
6.6.	Geotextil.....	21
6.7.	Nivel de agua	22
6.8.	Granulometría de la arena utilizada	22
6.9.	Construcción del talud.....	23
7.	Metodología de ensayo.....	25
7.1.	Ensayos preliminares	25
7.2.	Ensayos sistemáticos	25
	Olas aleatorias.....	25
	Metodología de los ensayos	26
	Determinación de la Estabilidad	27
	Metodología para determinación del Run up	28
	Determinación de la reflexión.....	29
8.	Resultados obtenidos.....	30
8.1.	Estabilidad hidráulica.....	30
8.2.	Run-up.....	35
8.3.	Coefficiente de reflexión.....	36

1. INTRODUCCIÓN

La empresa CORIPA S.A. dedicada a la construcción de obras relacionadas con 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 presente Informe de Avance 1 se presentan los estudios realizados en el período comprendido entre la fecha de inicio de tareas (17 de febrero de 2003), hasta el 17 de julio sobre el producto *Betoncover* para taludes de pendiente 1:2 y 1:3. Incluye los resultados obtenidos sobre estabilidad, coeficiente de reflexión y trepada de la ola (run-up), además una descripción de la metodología de ensayos.

2. 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 reflejante de las olas incidentes.

3. ANTECEDENTES

Diversos estudios sobre este tipo de protecciones flexibles de elementos prefabricados no vinculados han sido desarrollados, en especial en Holanda, con los que se ha definido el comportamiento general de estas obras ante diferentes tipos de falla. Si bien se ha investigado la estabilidad hidráulica de distintas unidades y obtenido relaciones funcionales para su dimensionamiento, es no obstante necesario determinar con adecuada precisión las características técnicas propias de

cada producto específico. A través de ellas se podrá dimensionar adecuadamente las obras 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. También 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 la escuela holandesa, que se indican más adelante.

Estabilidad

Las curvas resultantes obtenidas en las mencionadas investigaciones¹ para este tipo de estructura de costa y protección se indican en la **Figura 1**, en donde el parámetro resistente o de estabilidad $H_s/(\Delta D)$ se expresa en función del parámetro de rotura ξ .

En la **Figura 1** se indican dos curvas envolventes que corresponden a varias protecciones de diferentes características. 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 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 las protecciones abarcadas en esos estudios fueron muy variadas. Para un único y

¹ K. Pilarczyk, Dykes and Revetments, Design, Maintenance and Safety Assesment, Balkema-Rotterdam, 1999.

determinado tipo de unidad prefabricada existe una única curva umbral de estabilidad que separa la zona estable de la inestable.

A partir de esos estudios surgieron varios métodos de cálculo para distintas protecciones de costa de diversa simplicidad y precisión.

Un método de diseño preliminar de fácil aplicación, utilizado cuando se analizan varias alternativas de obras, es el que delinea la siguiente ecuación empírica²:

$$\left(\frac{H_s}{\Delta D}\right)_{cr} = \frac{F \cos \alpha}{\xi_{op}^b} \quad (1)$$

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

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

F: factor de estabilidad del revestimiento, 4.5 para bloques

α: ángulo de inclinación del talud respecto a la horizontal

ξ_{op}: parámetro de rotura o de Iribarren

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.

El parámetro de rotura se define como sigue:

² Klein Breteler, 1996; Pilarczyk, 1998

$$\xi_{op} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H_s / L_{op}}} \quad (2)$$

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). 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.

El modelo analítico, de mayor complejidad de aplicación, está basado sobre la teoría de bloques de revestimiento ubicados sobre filtros granulares. En este modelo, prácticamente los demás parámetros físicos que intervienen en la estabilidad de la protección son considerados a través del factor denominado "longitud de derrame". Resultando una ecuación de la forma anterior pero en función de este parámetro:

$$\Lambda = \frac{b_f D k_f}{k'} \quad (3)$$

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

$$H_{scr} = c \Delta D \left(\frac{D}{\Lambda \xi_{op}} \right)^{0.67} \quad (4)$$

donde c es un coeficiente que depende levemente de Δ , $\tan \alpha$, de la fricción entre bloques, etc y el resto de los símbolos tiene el mismo significado que el de la ecuación (1).

Mecanismos de falla

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

- Expulsión del talud 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 buena estructura la 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 continúa aumentando 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 siguientes³:

- 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 del Manual CUR, al igual que los resultados dados por Pilarczyk y otros,

³ Manual CUR, Balkema, 1995.

ambas utilizadas actualmente para el diseño de las protecciones. Para el presente estudio se adoptaron similares criterios de falla.

El mecanismo de falla denominado inestabilidad geotécnica comprende a su vez dos tipos de rotura que consisten en deslizamientos del suelo base por efecto del run-down (descenso de la ola) o deformaciones locales por impacto de la ola. En general la primera ocurre por falta de espesor de la cobertura o del filtro. En el segundo caso el impacto de la ola provoca una deformación que conduce a la formación de un perfil tipo "S", cuando la misma es una ondulación suave, o un perfil tipo "Z" cuando el asentamiento es importante respecto de la altura del bloque, provocando un descenso abrupto del perfil. En estos casos es importante juzgar si la interacción entre bloques 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 a 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.

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.

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.

El run up relativo está dado por $R_{u2\%}/H_s$, con H_s altura de ola significativa (promedio del tercio superior de las olas o, basada en el espectro de densidad de energía: $4\sqrt{m_0}$, donde m_0 es el momento de orden cero del espectro). 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 (2).

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, 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:

$$R_{u2\%} / H_s = 1.6 \gamma_b \gamma_f \gamma_\beta \xi_{op} \quad (5)$$

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 (5) lleva incluido un margen de seguridad debido a la dispersión propia de los modelos físicos, de donde surgió esta ecuación. Ese margen de seguridad consiste en un desvío stantard de la muestra. El valor medio de ese conjunto de valores arroja la siguiente ecuación:

$$R_{u2\%} / H_s = 1.5 \gamma_b \gamma_f \gamma_\beta \xi_{op} \quad (6)$$

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. (5).

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:

$$C_R = \frac{a \xi^2}{b + \xi^2} \quad (7)$$

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}).

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

Para el caso del presente estudio, en el que se tiene un talud recto y alcanzado por olas irregulares, los valores de los coeficientes a y b son los siguientes:

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

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 (7) serán utilizadas como referencia para el presente estudio.

4. DESCRIPCIÓN DE LOS ELEMENTOS PREMOLDEADOS

Los elementos prefabricados *Betconcover* 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 (**Figura 2**).

Cada pieza está constituida de tres prismas hexagonales unidos en dos de sus caras. Esta disposición otorga una cierta trabazón al conjunto aumentando la estabilidad de las piezas.

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 3**). 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 superficie de vacíos y superficie total) 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.

Las **Fotos 1 y 2**, muestran el modelo construido en el canal de olas del Laboratorio de Hidráulica, pudiendo apreciarse la buena estética que tendrá una obra terminada.

5. DESCRIPCIÓN DE LAS INSTALACIONES

Los ensayos se llevaron a cabo en un canal de olas de 28 m de largo, por 0.60 m de ancho y una profundidad de 0.70 m. En uno de sus extremos se halla ubicado el generador de olas, 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 desplaza 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 4** puede observarse un esquema del canal en 3D.

6. DISEÑO DEL MODELO

6.1. 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 gravitatorias, las de inercia, arrastre y sustentación. 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, mientras que las fuerzas viscosas son no escaladas correctamente, resultando 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 es por ejemplo, en el movimiento del agua dentro del material que conforma el talud del modelo en el cual el número de Reynolds deja 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 la escala lineal (escala de Froude), es una distorsionada que tiene en cuenta estos efectos de escala y permite determinar el diámetro característico que se está representando en prototipo.

6.2. Dimensiones del modelo

De acuerdo a lo acordado en el convenio se deberán ensayar los dos tipos de protección para dos inclinaciones de talud diferentes, 1:2 y 1:3 (V:H). Esta variable ejerce una influencia muy importante sobre la estabilidad.

También se indicó en el mismo que el número de períodos a ensayar debe ser de tres. De acuerdo a las posibles zonas donde va a ser utilizada esta protección, los

períodos más aconsejables para utilizar en el modelo son los que en prototipo varían de 3 a 4 segundos.

Debido a que se ensayará la estabilidad de la protección en un determinado talud, sin tener en cuenta la estabilidad al pie por ser particular a cada obra, no será necesario utilizar niveles de agua variables excepto lo exija el canal de olas por cuestiones propias del generador.

6.3. Selección de la escala

De acuerdo con las ecuaciones de predimensionado de bloques premoldeados, con las posibilidades que ofrece nuestro generador y canal de olas y con los elementos comerciales que permitirían construir la matriz, se seleccionó la escala óptima que regió el modelo hidráulico.

Para el presente caso, en el que la protección se dispondrá sobre dos inclinaciones de talud diferentes, para distintas olas y períodos la ecuación queda:

Para $\text{ctg } \alpha = 2$:

$$H_s = 12.93 \frac{(\Delta D)^{1.5}}{T_p} \quad (8)$$

resultando

T_p (seg)	H_s (m)
3	0.70
4	0.50
5	0.40

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

$$H_s = 21.19 \frac{(\Delta D)^{1.5}}{T_p} \quad (9)$$

resultando

T _p (seg)	H _s (m)
3	1.15
4	0.90
5	0.70

Considerando que la altura de ola máxima que permite realizar el generador para estos períodos en el canal es del orden de los 20 cm y que de acuerdo con los resultados previos mostrados 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.

Algunas piezas del modelo se pueden observar en la **Foto 3**.

6.4. Efectos de escala

Como se mencionara en el apartado 6.1, 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:

$$d_M = d_p / E_L * K \quad (10)$$

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:

$$K = E_L^{3/4} \quad (11)$$

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:

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.

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

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

entonces (considerando el valor máximo posible) $R_d = 3 \text{ m}$.

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 va a componer el terraplén en prototipo, y suponiendo una arena de un diámetro d_{10} de unos 200 μm (como límite superior de una arena no uniforme), de acuerdo con los valores generales de permeabilidad de una arena medianamente fina⁷:

$$k = 0.005 \text{ cm/seg}$$

con lo que, según la ley de Darcy (válida para $Re < 4$), la velocidad en el medio poroso es de:

$$v = k * i = 0.0023 \text{ cm/s}$$

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):

$$Re = \frac{v d_{10}}{\nu} = 0.05 \ll 4$$

Por lo tanto, es de esperarse que el régimen sea laminar también en prototipo y se considera por ello aplicable la ecuación (10).

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

6.5. 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 necesarias para cubrir un talud de 1:3 hasta el metro de altura.

Se realizó la determinación del peso y volumen de las piezas. 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, 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

Este es el valor de densidad relativa que será utilizado en las curvas de estabilidad vs. parámetro de rotura o de Iribarren.

6.6. 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 geotextil: el mencionado anteriormente y una tela tejida de trama fina y muy pequeño espesor. Para el primer caso se incluyeron en el talud franjas de arena coloreada con tinta para registrar algún posible movimiento de arena (Foto 4). Luego de realizado el ensayo el talud quedó como se muestra en la Foto 5, 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 6. Claramente se observan canalículos 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.

Al observar los resultados se concluyó que el comportamiento de la tela es más adecuado en esta escala de modelo, por lo que desempeñó la función de geotextil en los ensayos sistemáticos.

Debido a que la permeabilidad del geotextil de apoyo juega un papel importante en la estabilidad del conjunto, se ha previsto realizar un ensayo para caracterizar la permeabilidad de esta tela de manera de poder interpretar cuáles son las características que representa en prototipo. Los ensayos de permeabilidad vertical se realizarán siguiendo las normas IRAM para geotextiles.

6.7. Nivel de agua

Se realizaron ensayos para varios niveles de agua estático para observar qué diferencias se alcanzaban en las alturas de generación de ola para los diferentes períodos a ensayar. De acuerdo con ello se decidió que el nivel estático de los ensayos sistemáticos fuera de 0.45 m para todos los períodos.

6.8. Granulometría de la arena utilizada

Como se conoce que el comportamiento del flujo de agua dentro del filtro de una protección o terraplén tiene influencia en la estabilidad de las piezas, se utilizaron en los ensayos dos tipos de arena: una fina y una gruesa.

Las granulometrías de ambas arenas pueden observarse en las Figuras 6 y 7, designadas como curvas 1. Como se observa 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 6.4, la relación que vincula esas magnitudes se deduce de las ecuaciones (9) y (10):

$$d_P = d_M * E_L^{1/4} \quad (12)$$

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 6 y 7** se pueden observar las curvas granulométricas correspondientes a las arenas de prototipo, designadas como curvas 2.

6.9. 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. No se observaron diferencias en el comportamiento de las piezas respecto a la estabilidad y la trepada de ola entre ambas configuraciones.

7. METODOLOGÍA DE ENSAYO

El fin último de estos ensayos es caracterizar los parámetros resistentes y técnicos más importantes de la protección de manera de permitir conocer su futuro comportamiento en prototipo y establecer criterios de diseño.

7.1. Ensayos preliminares

Inicialmente se realizaron varias pruebas básicas con el fin de observar la sensibilidad a algunas de las variables que intervienen en el fenómeno de la estabilidad. A partir de ello se fijaron las condiciones de ensayo sistemáticos como la duración de los mismos, el nivel estático más adecuado, el uso de geotextil comercial o una tela fina, la igualdad de resultados al construir el talud íntegramente de arena o sólo un manto sobre una rampa, etc.

7.2. Ensayos sistemáticos

A continuación se describirá como se han tratado en el modelo las diversas variables que intervienen en el fenómeno de la estabilidad de las piezas y la metodología implementada.

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 8** 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.

Duración de los ensayos

Según los estudios realizados, 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 desplazamiento seguramente si se continúa el ensayo se producirá un mayor daño.

En las investigaciones realizadas por los holandeses, se utilizaron 1000 olas como duración de cada ensayo. La razón de ello radicó en la duración del pico de marea en la zona donde se preveía ubicar las protecciones ensayadas. En otros ensayos de laboratorio para otro tipo de protección (Tri-lock) se han utilizado 100 olas por escalón de carga sin aclarar el criterio de la elección.

Para el presente caso, se observó cómo era el desarrollo del daño en la protección, obteniéndose como conclusión de las pruebas iniciales que al cabo de 3 horas (modelo) el daño desarrollado llega a una situación de equilibrio para condiciones hidrodinámicas constantes. Además, esta duración de temporal, aproximadamente 8 hs en prototipo, es más acorde con la duración de una tormenta extrema de los posibles lugares donde se ubicarán estos bloques, donde no se presenta algún efecto de variabilidad del nivel de agua.

Metodología de los ensayos

De acuerdo con lo indicado en el apartado 3. **Antecedentes**, 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 Pilarczyk¹. El objetivo de este estudio es encontrar una curva umbral de estabilidad, que constituya el límite que define la zona estable de la inestable para esta protección particular denominada *Betoncover*.

Luego de haber realizado los ensayos preliminares se diseñó una metodología para la realización de los ensayos sistemáticos que persiguió ese objetivo. 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.

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 coincidente con un eje normal al eje lineal de la obra a que pertenece el talud, 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). Así cada pieza quedó identificada en cada ensayo por un par ordenado (fila, columna). Luego de finalizado el ensayo se determinó el daño ocurrido relevando todas las piezas que sufrieron algún desplazamiento relativo por medio de un calibre. En caso de que hubiera ocurrido un mecanismo de falla con la formación de un perfil tipo "S", se hubieran relevado 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 del adimensional de estabilidad ($H_s/\Delta D$) vs. 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 la **Figura 1**.

Cabe mencionar que durante este estudio se consideraron solamente los dos siguientes mecanismos de falla: *expulsión del bloque* e *inestabilidad geotécnica* con la formación de un perfil tipo "S" o "Z".

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 3. **Antecedentes - Mecanismos de falla**, y teniendo en cuenta la precisión alcanzada en la terminación del talud de arena realizado en el presente estudio, se establecieron los siguientes criterios de falla en el modelo:

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

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

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 y $e_{\text{máx}}$ es una cota 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 la que se referencia. El valor de $e_{\text{máx}}$ se estimó en 0.5 mm de asentamiento relativo positivo (descenso) o negativo (ascenso).

Metodología para determinación del Run up

De acuerdo a lo presentado en el apartado 3. **Antecedentes**, con este estudio se pretende determinar el coeficiente de rugosidad que interviene en la ecuación de cálculo del run-up para esta protección.

Para ello se realizó la medición del run-up por medio de filmación desde un punto elevado, perpendicularmente al talud. El equipo utilizado para la medición por filmación 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 de chapa 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 $R_{12\%}$, el 2 % es de las 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 de posición 2 % en el total de olas que inciden en el talud, ordenadas en porcentaje de ocurrencia acumulado. Como la determinación de la altura de ola significativa y el período de espectro se realizan por medio de una adquisición de datos durante unos 8 minutos, no mejora la precisión que las mediciones de run-up se realicen durante más tiempo porque esas variables también intervienen en la ecuación. Por lo tanto se decidió realizar cada filmación o apreciación visual durante 10 minutos. A lo largo de ese tiempo se observaron los mayores valores de run-up que ocurrieron.

Luego, según cual fue el período medio que se estuvo ensayando, 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 correspondía 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 (6).

Para presentar los resultados se utilizó la ecuación (6) y no la ecuación (5), 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 mencionado margen de seguridad. Con el coeficiente de variación de la ecuación (6) se pueden trazar dos líneas de manera de considerar los puntos contenidos dentro de la banda limitada por \pm un desvío standard respecto del valor medio.

Determinación de la 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. Entre ellas la altura de ola reflejada, que junto a la incidente fue utilizada para determinar el coeficiente de reflexión C_R dado en el apartado 3.

Teniendo en cuenta los demás parámetros actuantes se dibujaron los resultados en un gráfico de 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 (7), 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.

8. RESULTADOS OBTENIDOS

8.1. Estabilidad hidráulica

Como conclusiones generales se pudieron observar dos mecanismos de falla en 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 falla, de acuerdo a los criterios adoptados mencionados en el apartado 3. 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 1**). La condición inestable estuvo dada por haber sufrido un desplazamiento ascendente mayor o igual al 10 % de la altura del bloque.

Según los criterios adoptados, ese ascenso es permitido sólo ante la presencia de cargas extremas como la altura de ola $H_{2\%}$. Para cargas más frecuentes como H_s no es permitido el movimiento del bloque. Por tanto, las alturas de ola en modelo para las cuales se alcanzó el estado de inestabilidad definido corresponden al valor $H_{2\%}$. Al realizar las citadas curvas de referencia, se graficaron los resultados obtenidos de estudios en modelo físico en función de H_s .

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 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* de la protección *Betoncover* trazada en la **Figura 9**, correspondiendo a cargas frecuentes y a una densidad relativa de 1.25. Se incluyeron los resultados de ensayos con ambos tipos de arena.

Como expresión de esa *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 1):

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

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

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)

Ensayo	Tipo de arena	Altura de ola H_s (m)	Período medio T_m (seg)	Período de pico T_p (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)

En la **Figura 10**, se presentan los resultados obtenidos para el caso de cargas poco frecuentes equivalentes a una altura de ola $H_{2\%}$. Se incluyeron los resultados de ensayos con ambos tipos de arena.

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 muestra como quedó formado un perfil tipo "Z" por el impacto de la ola y en la **Foto 8** se ve el importante ascenso relativo que sufrió una de las piezas.

Ensayo	Tipo de arena	Altura de ola H_s (m)	Período medio T_m (seg)	Período de pico T_p (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)

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 (para este caso la 14 estando el nivel estático en la 20), este esquema de movimiento de agua se repitió en todos los ensayos, dependiendo la posición a partir de la cual hubo arena del período y la altura de ola, por influir en la ubicación de la rompiente. En la siguiente **Foto 10** se muestra cómo quedó el talud de arena.

Pudo también observarse en todos los ensayos que la arena ocupa el lugar libre que dejan las piezas cuando son ascendidas, lo que 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 definición de la curva umbral de 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 las **Fotos 11 y 12** correspondientes a un ensayo de 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, 3.1 y 2.9 seg., respectivamente, se observa la formación de un perfil tipo "Z".

En las **Fotos 13 y 14** se muestra el desarrollo de un ensayo particular.

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 3**, en prototipo este tipo de falla es evitable si se consigue un ángulo de fricción interna de la arena colocada mayor a 40° (Referencia 3). 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:

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

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

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 solicitado 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 la máxima sollicitación.

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:

$$\bar{d}_i = 0.6 H_s$$

$$\sigma_{d_i} = 0.3 H_s$$

donde d_i es la cota inferior respecto del nivel estático.

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.

8.2. Run-up

Como se mencionara en el apartado 7.2 (Determinación del 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 (6) y se volcaron sobre la **Figura 11**.

En esta última se incluyeron también los valores teóricos medios expresados por la ecuación (6) 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:

$$R_{u2\%} / H_s = 1.6 \gamma_b \gamma_f \gamma_\beta \xi_{op} \quad \text{con un máximo de } 3.2 \gamma_f \gamma_\beta$$

con γ_f igual a 0.94.

8.3. Coeficiente de reflexión

Los valores obtenidos del coeficiente de reflexión C_R se indican en la **Figura 12**. 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. Ambas curvas fueron extraídas de la Referencia 5.

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

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

$$C_R = - 0.0157 * \xi^3 + 0.0929 * \xi^2 + 0.1113 * \xi - 0.0198$$

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.

FIGURAS

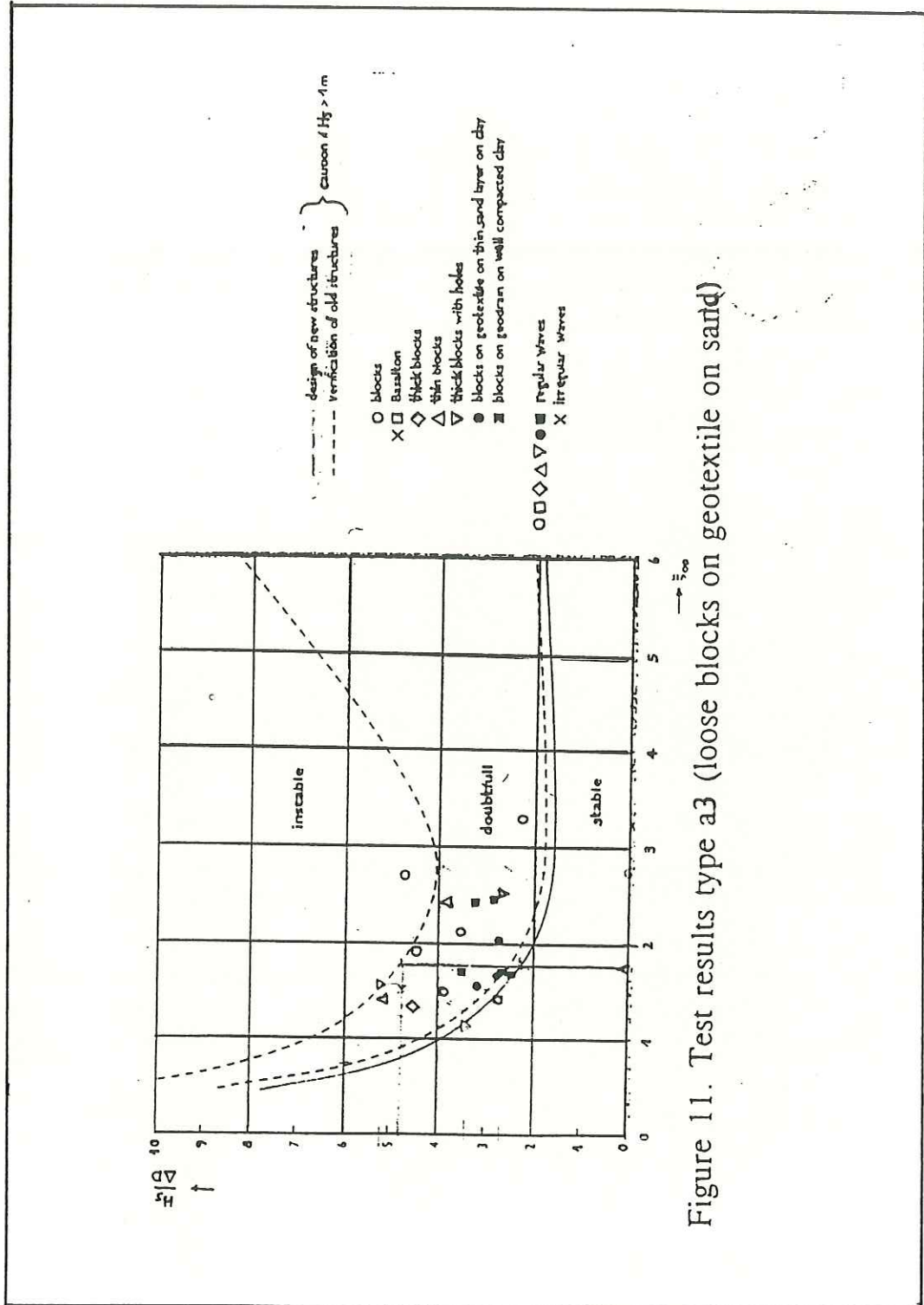


Figure 11. Test results type a3 (loose blocks on geotextile on sand)

Figura 1

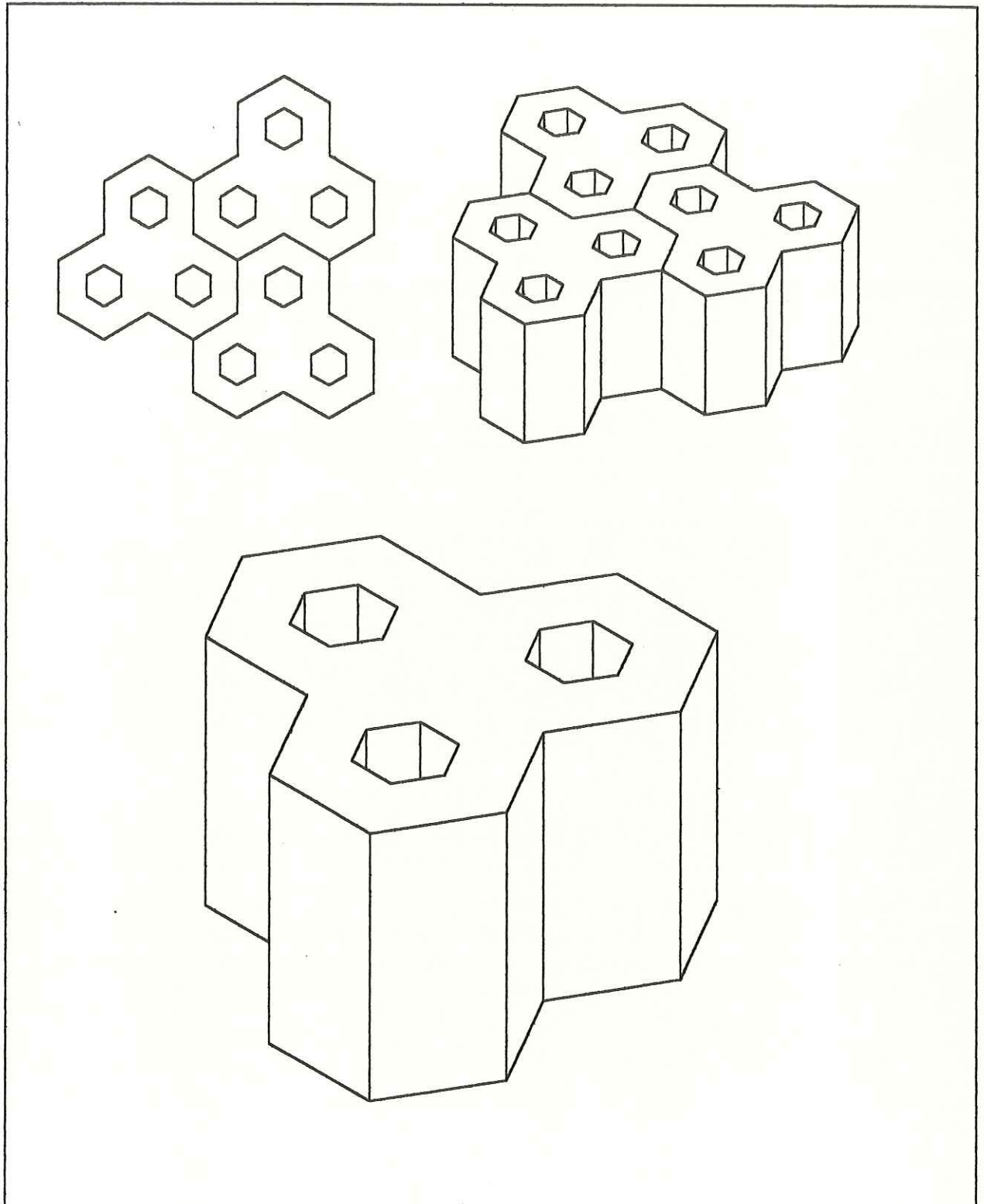


Figura 2

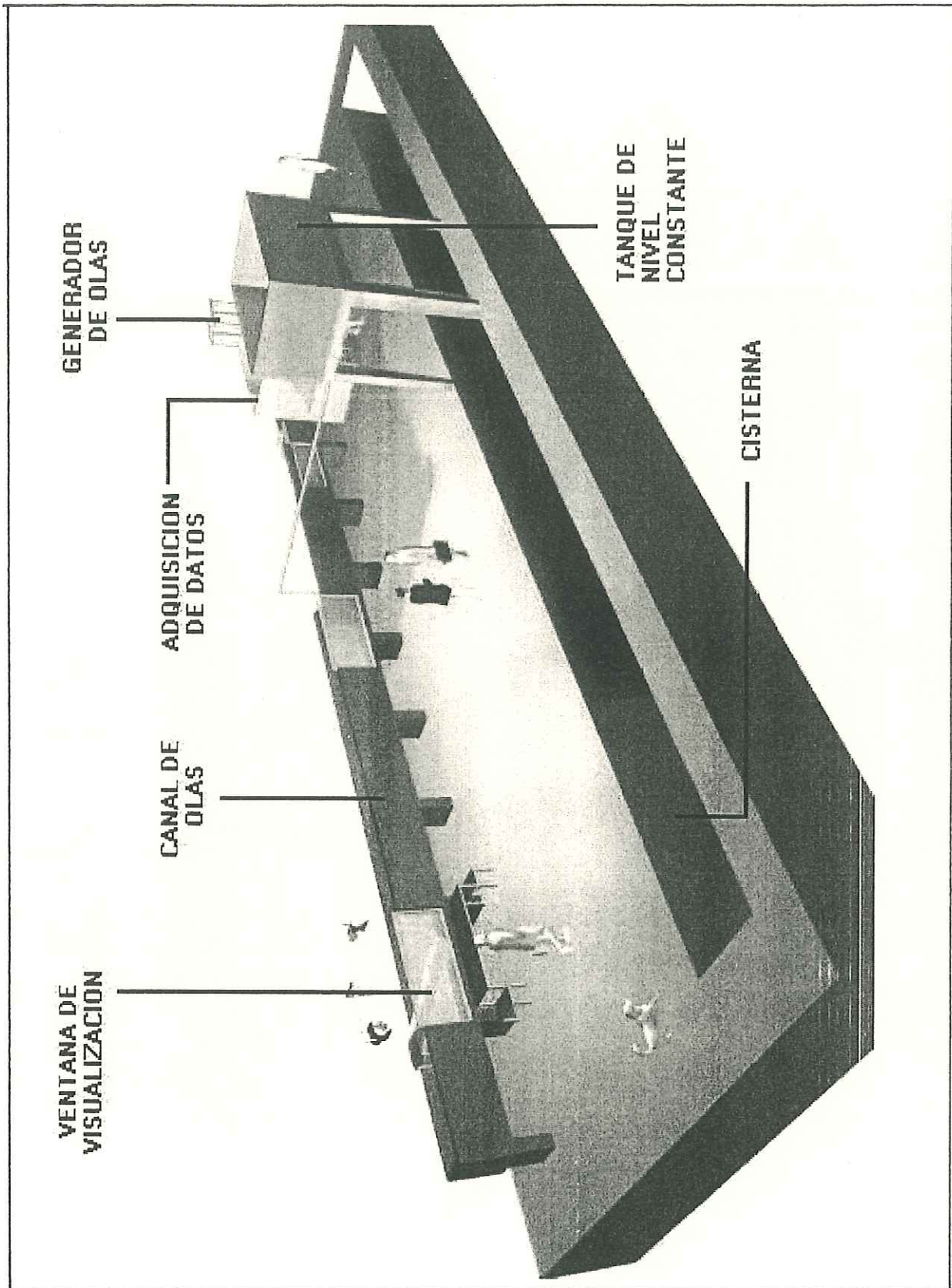


Figura 4

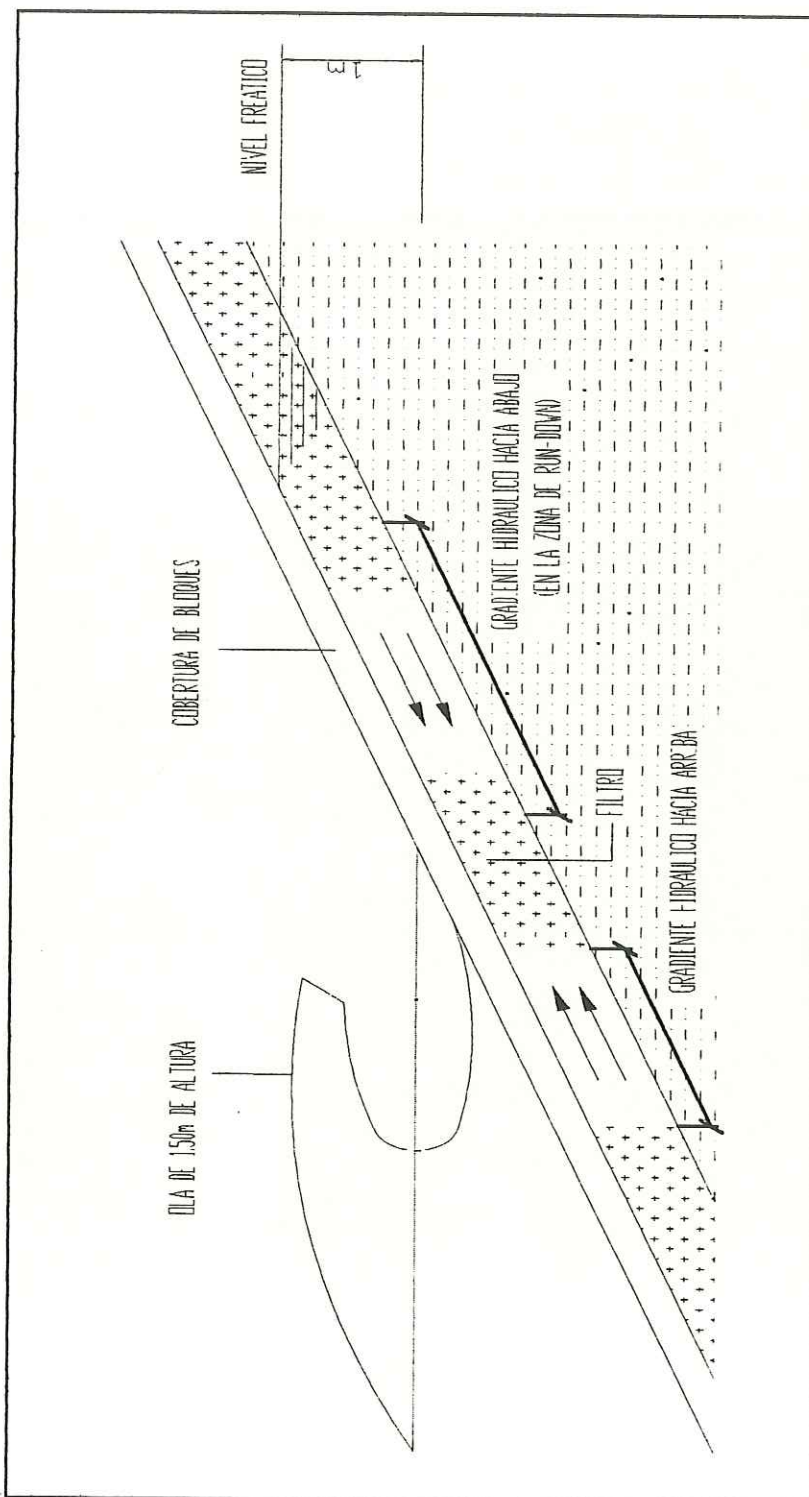


Figura 5

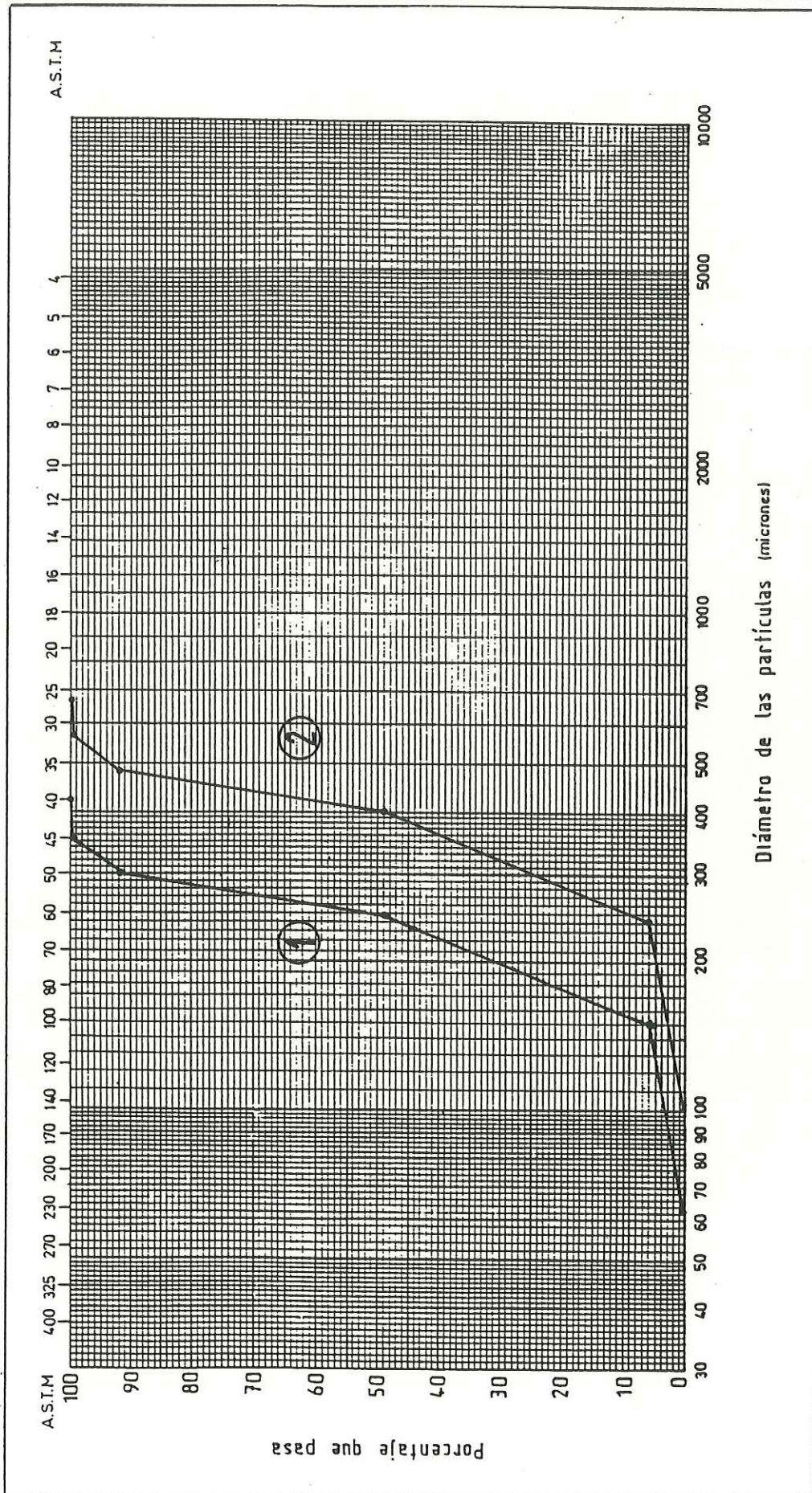


Figura 6

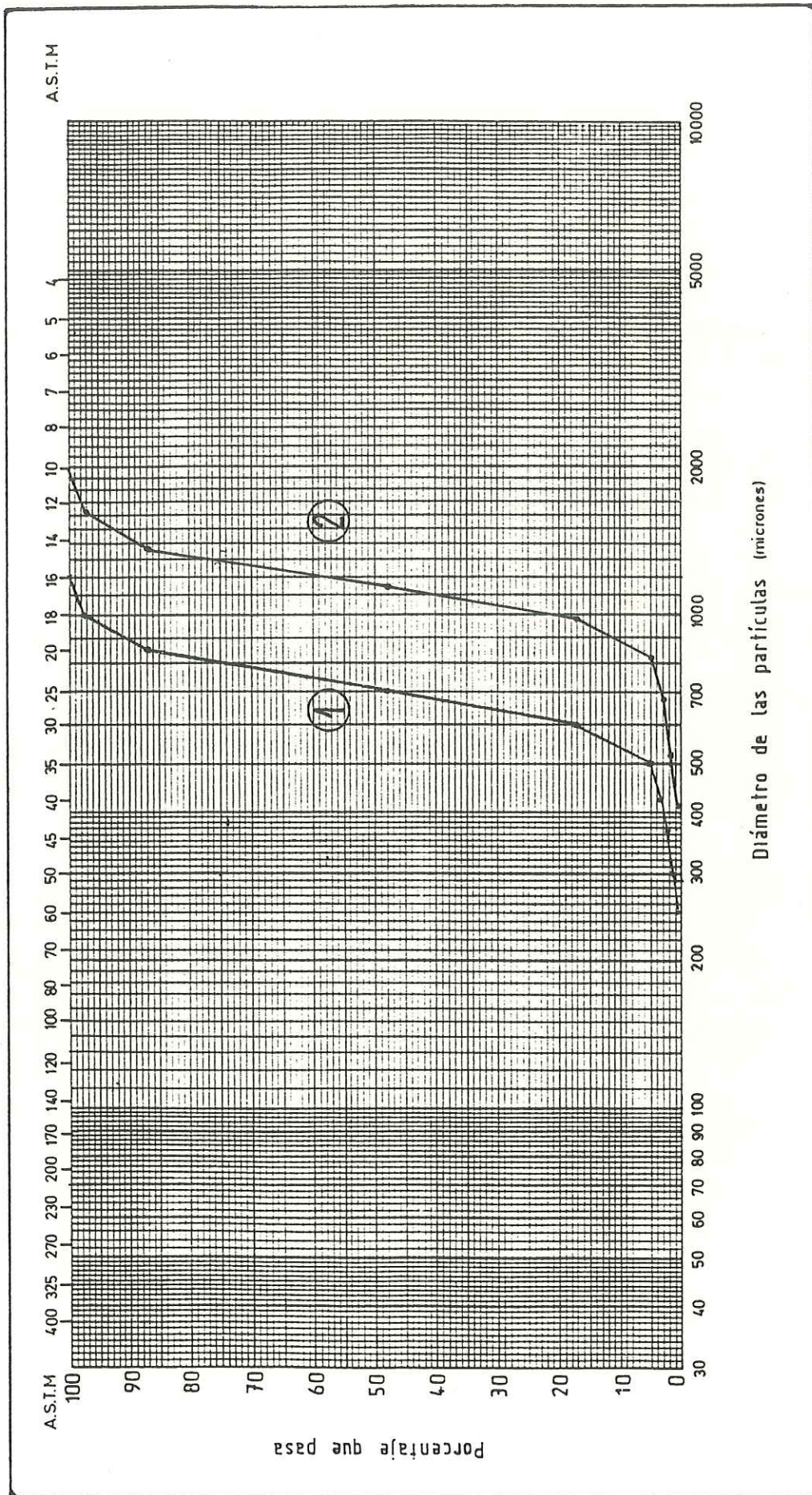


Figura 7

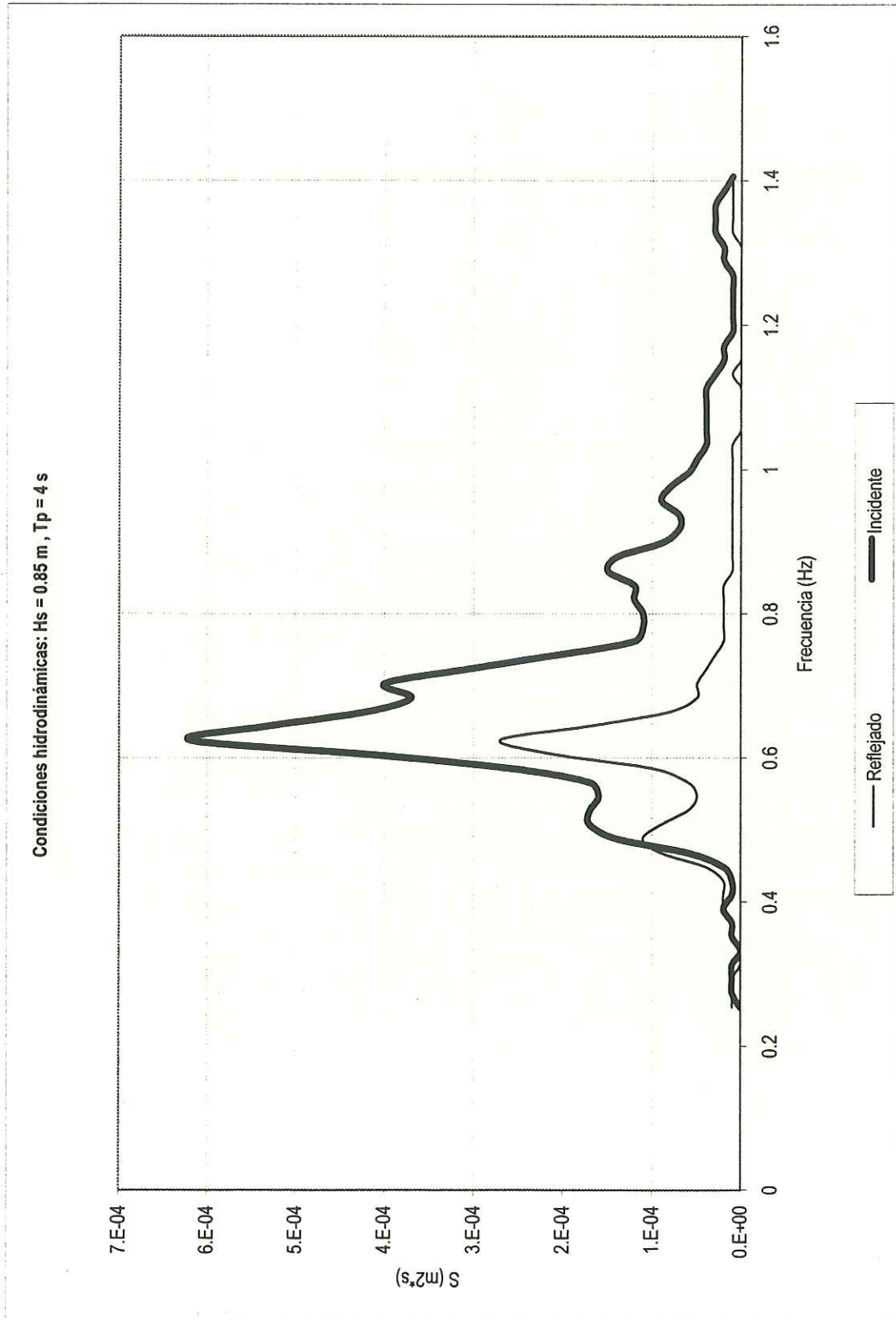


Figura 8: Ejemplo de un espectro de densidad de energía

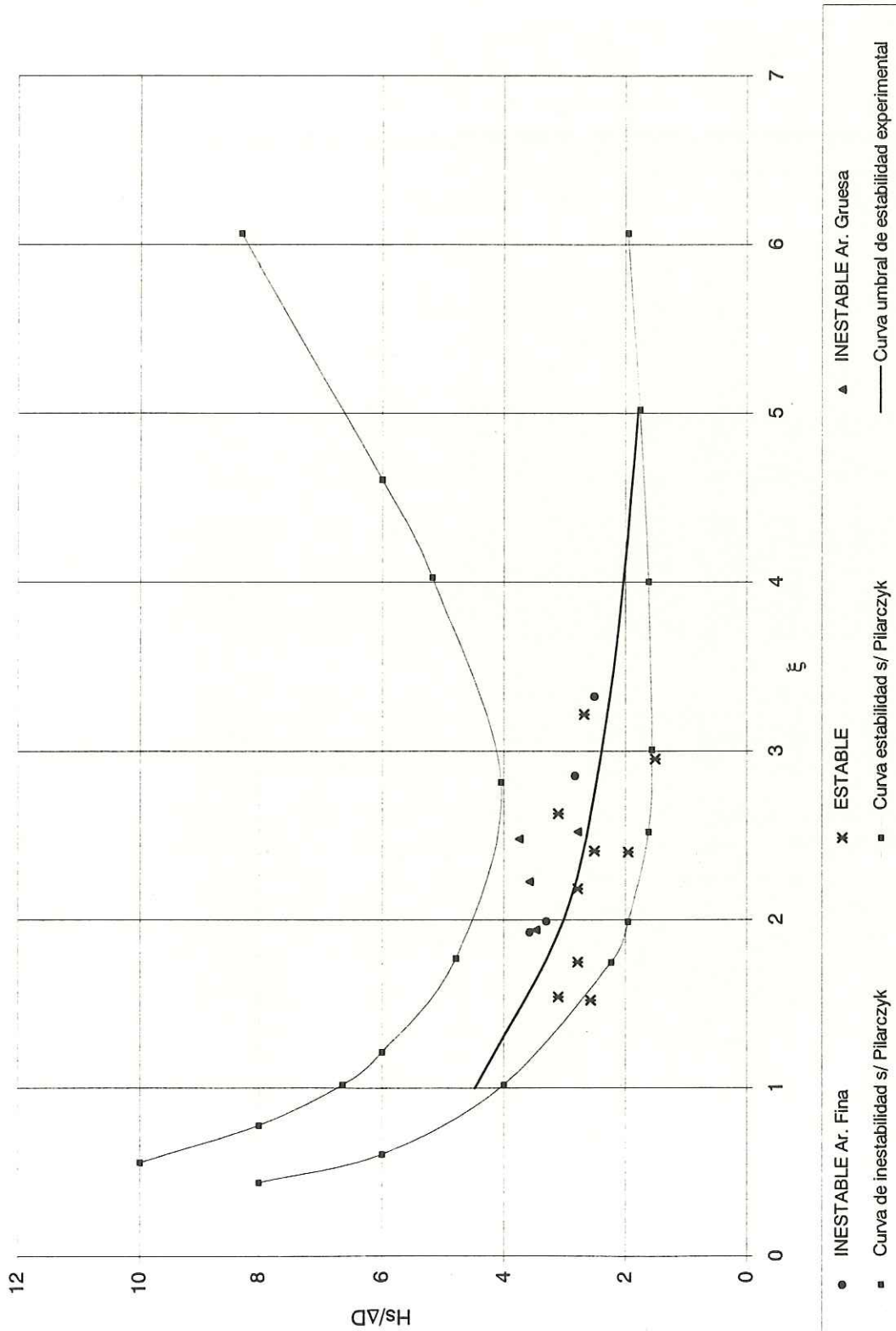


Figura 9: Estabilidad bajo cargas frecuentes

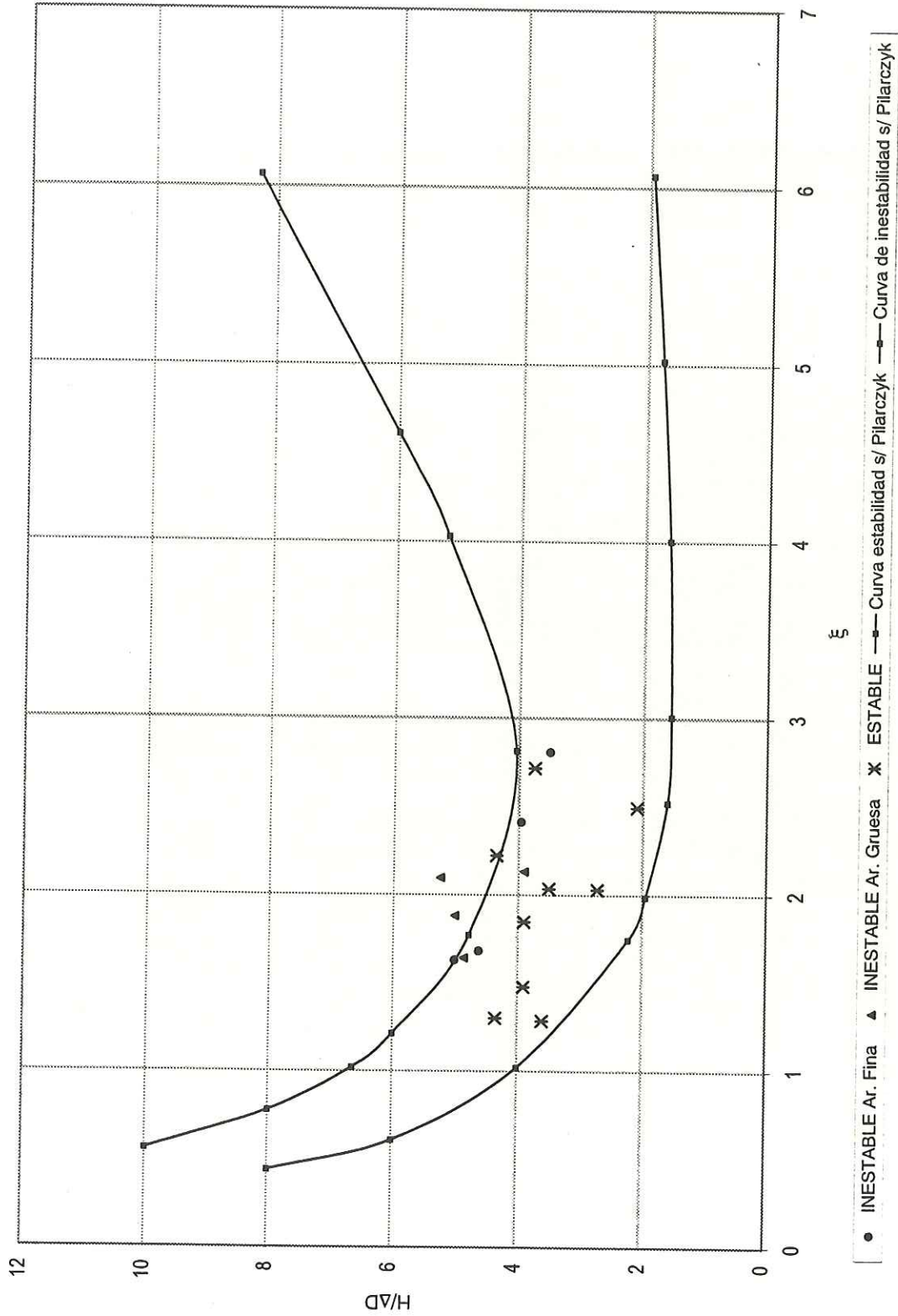


Figura 10: Estabilidad bajo cargas poco frecuentes

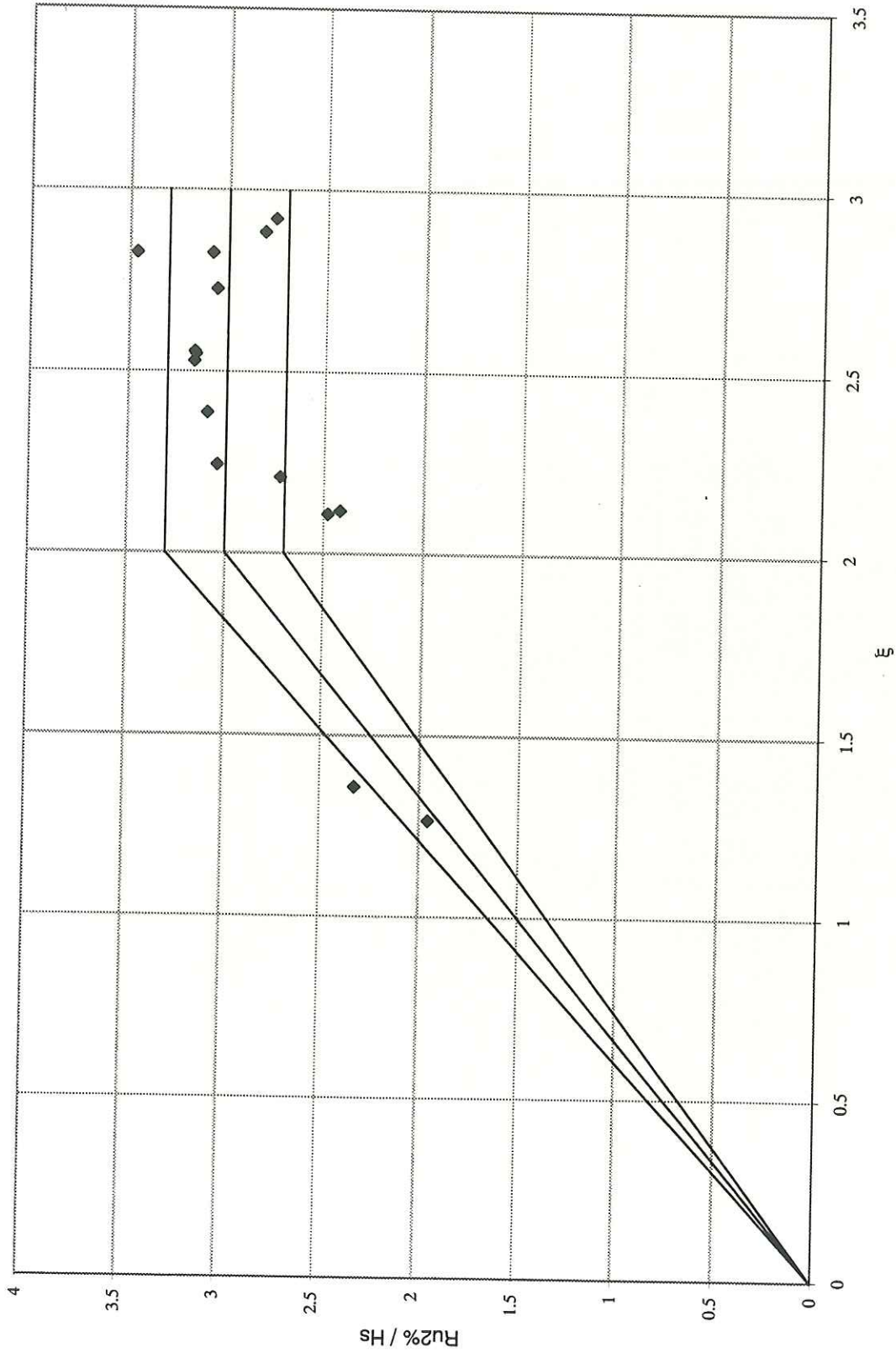


Figura 11: Run-up

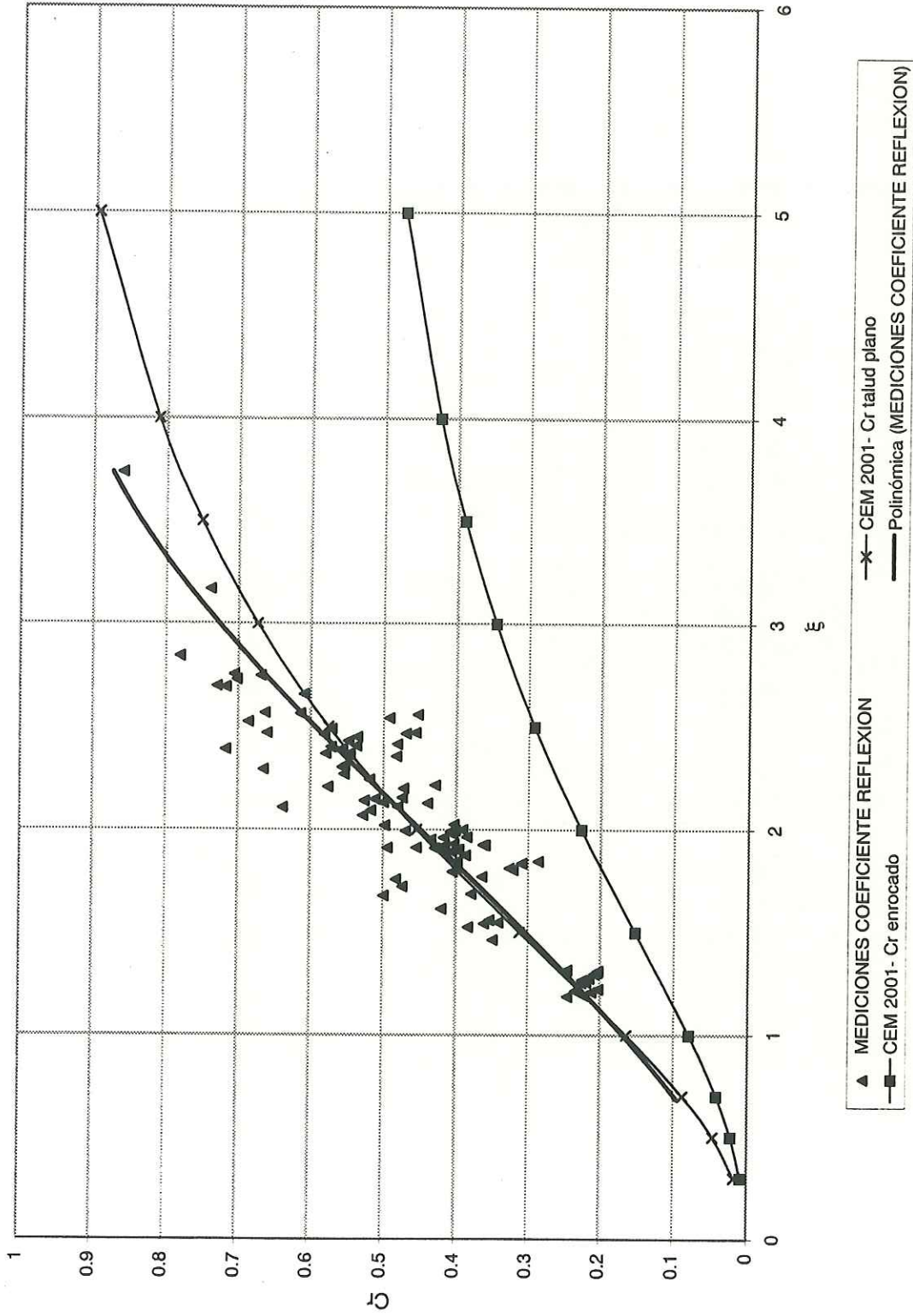


Figura 12: Coeficiente de reflexión Betoncover

FOTOS



Foto 1

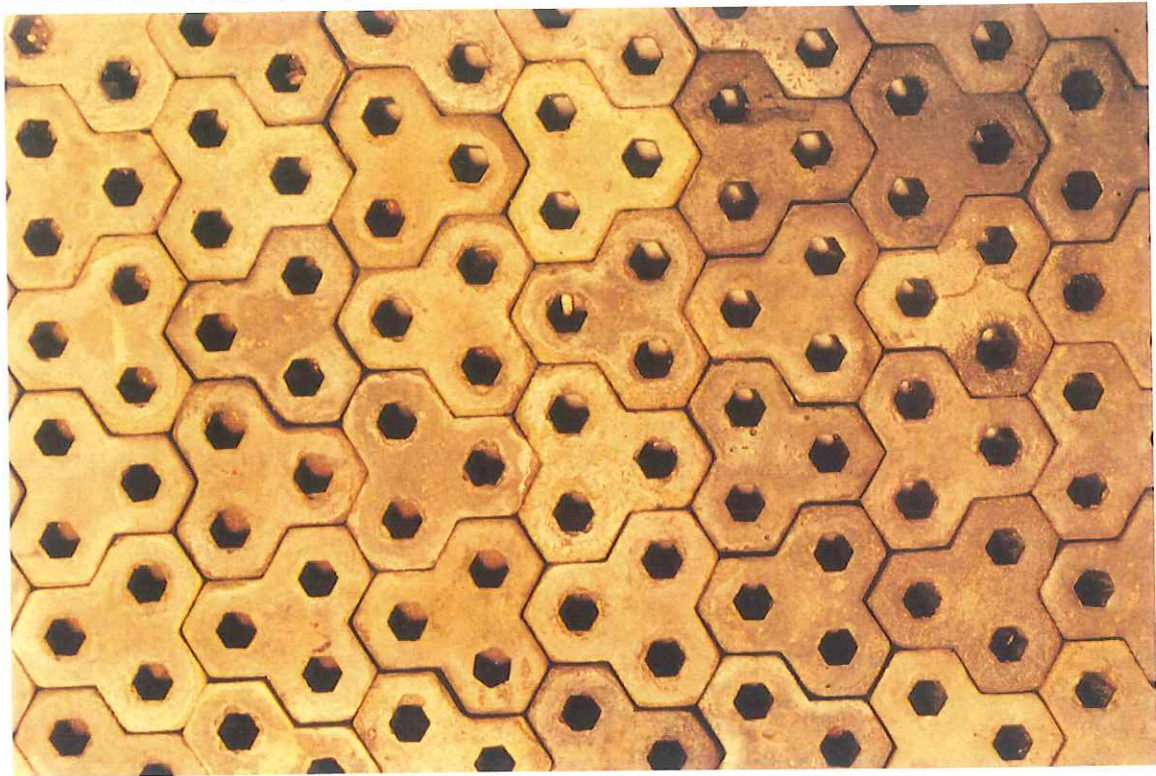


Foto 2

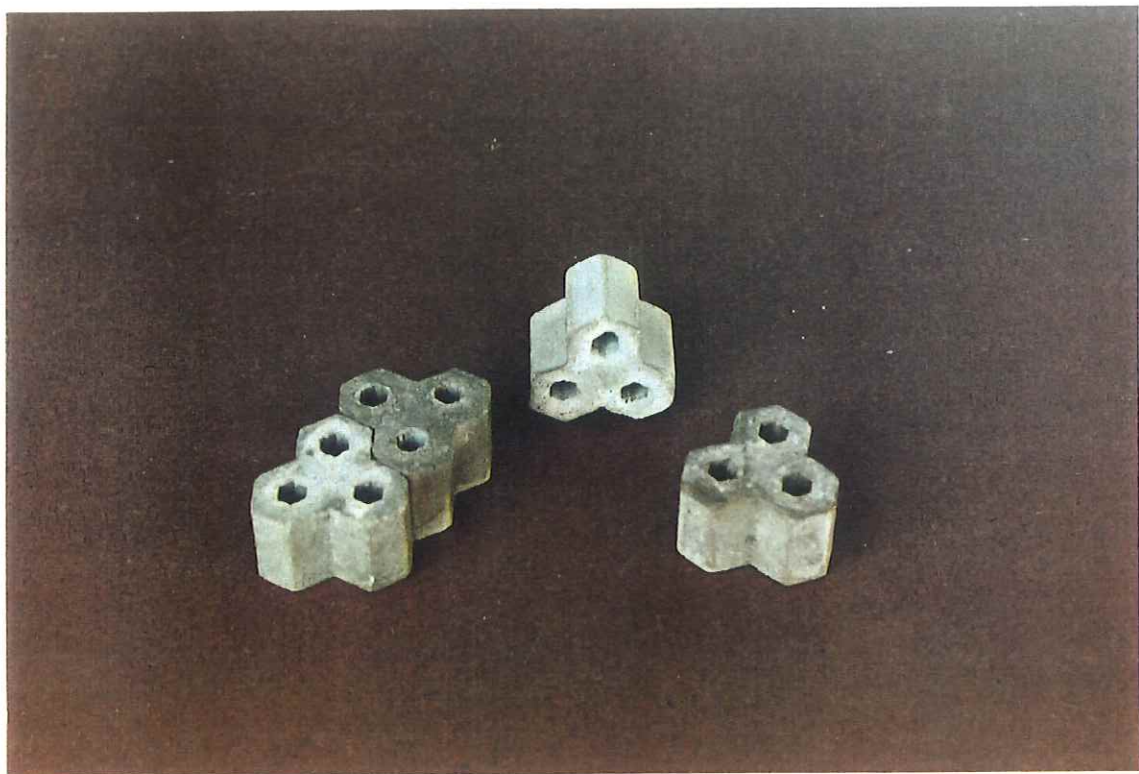


Foto 3



Foto 4



Foto 5

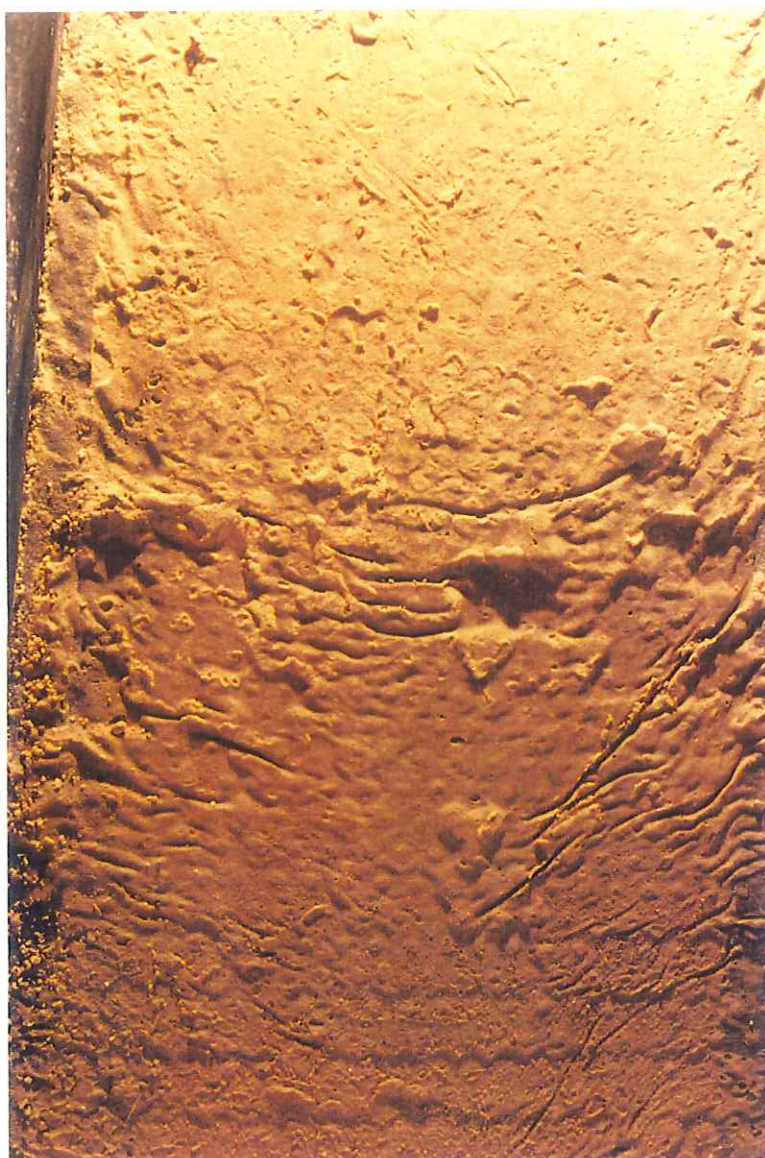


Foto 6

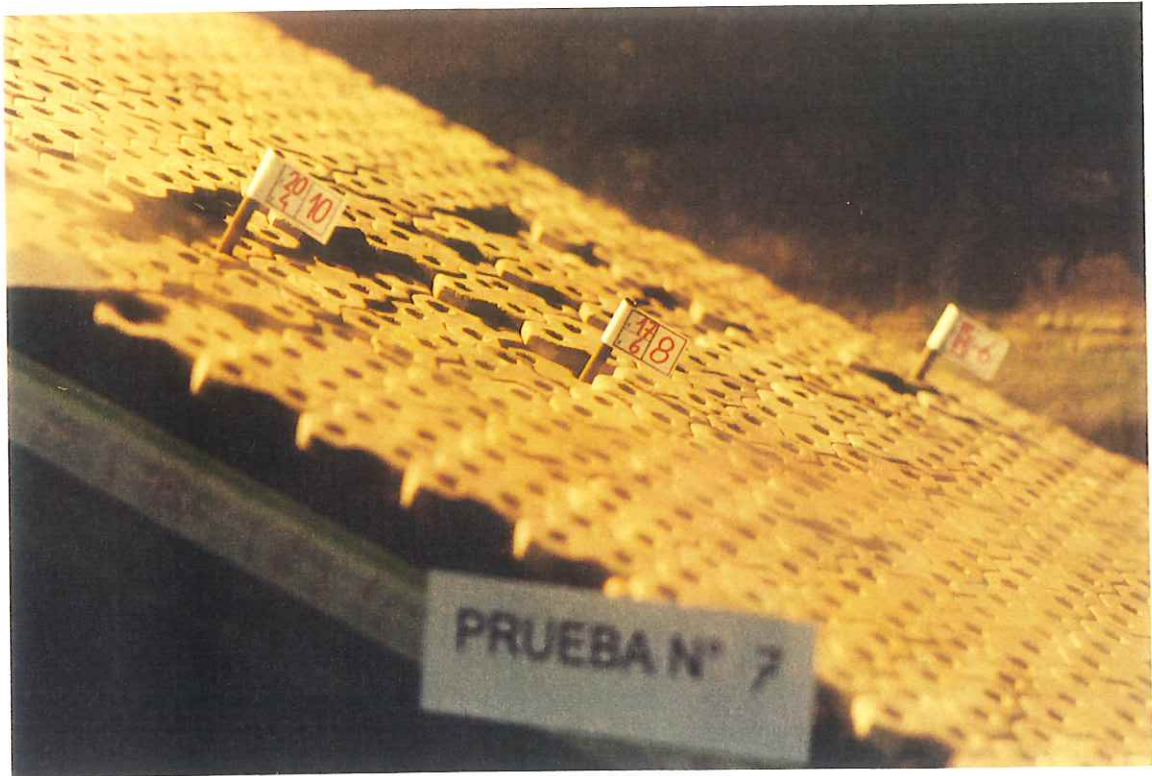


Foto 7

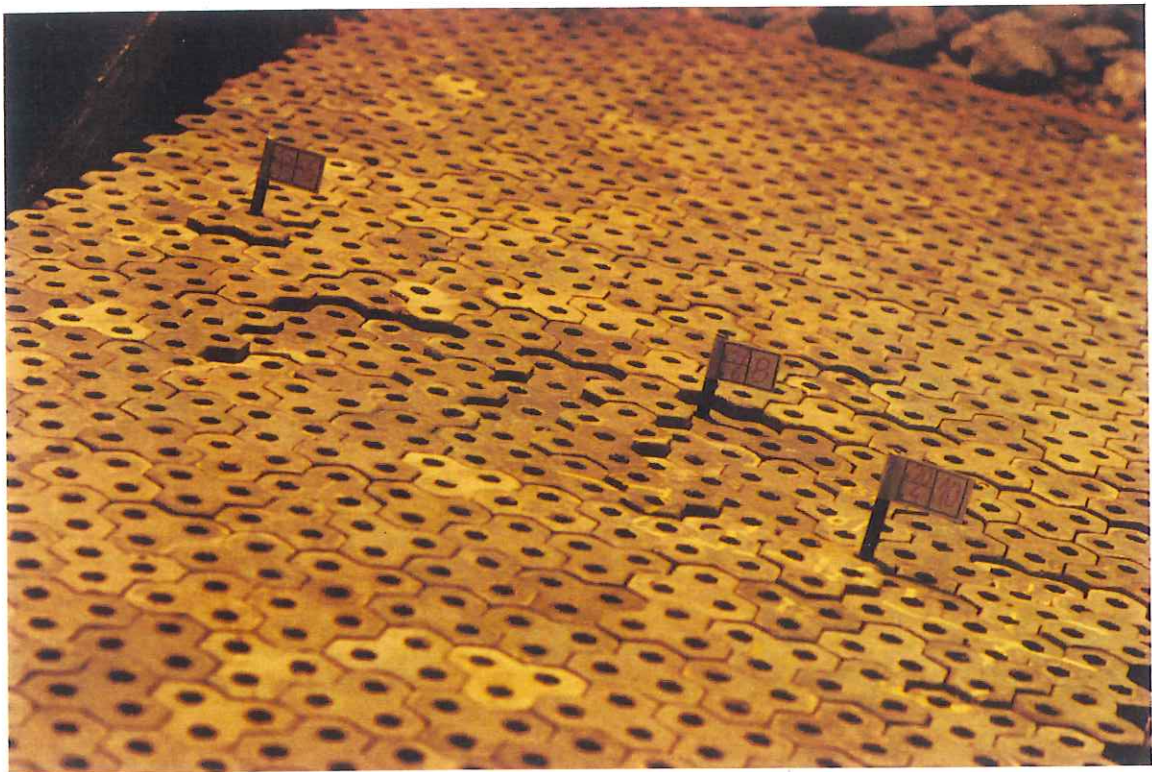


Foto 8



Foto 9



Foto 10

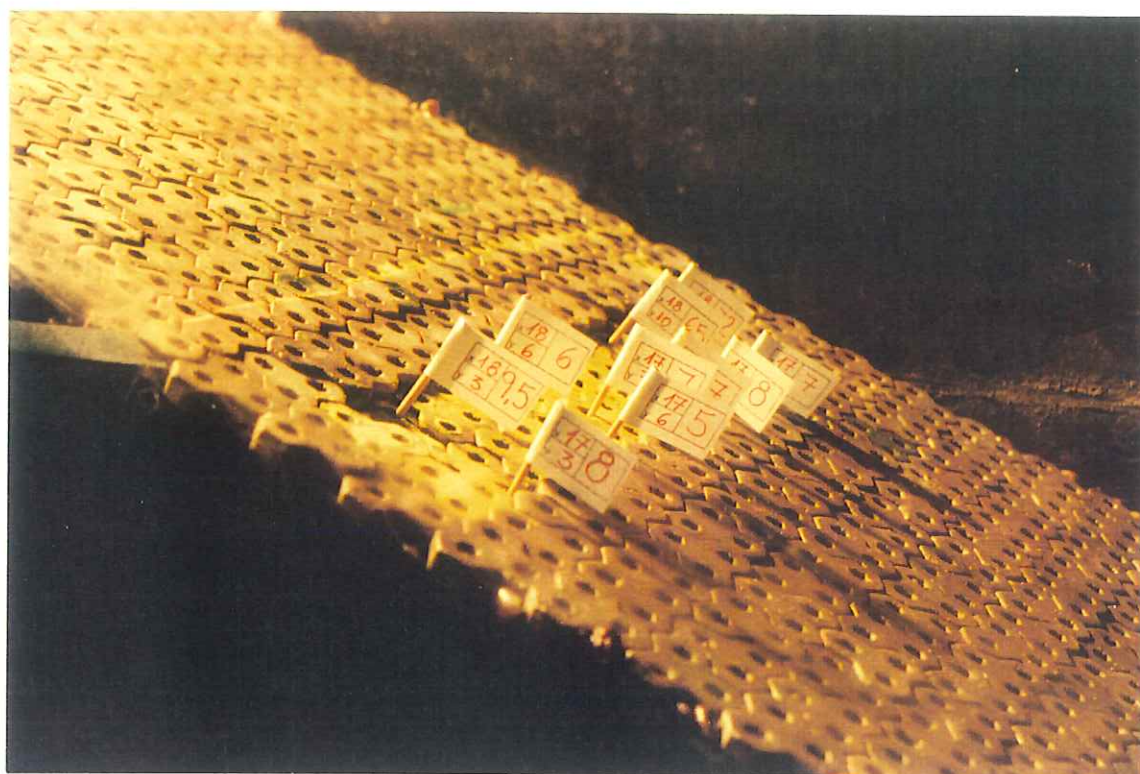


Foto 11



Foto 12



Foto 13

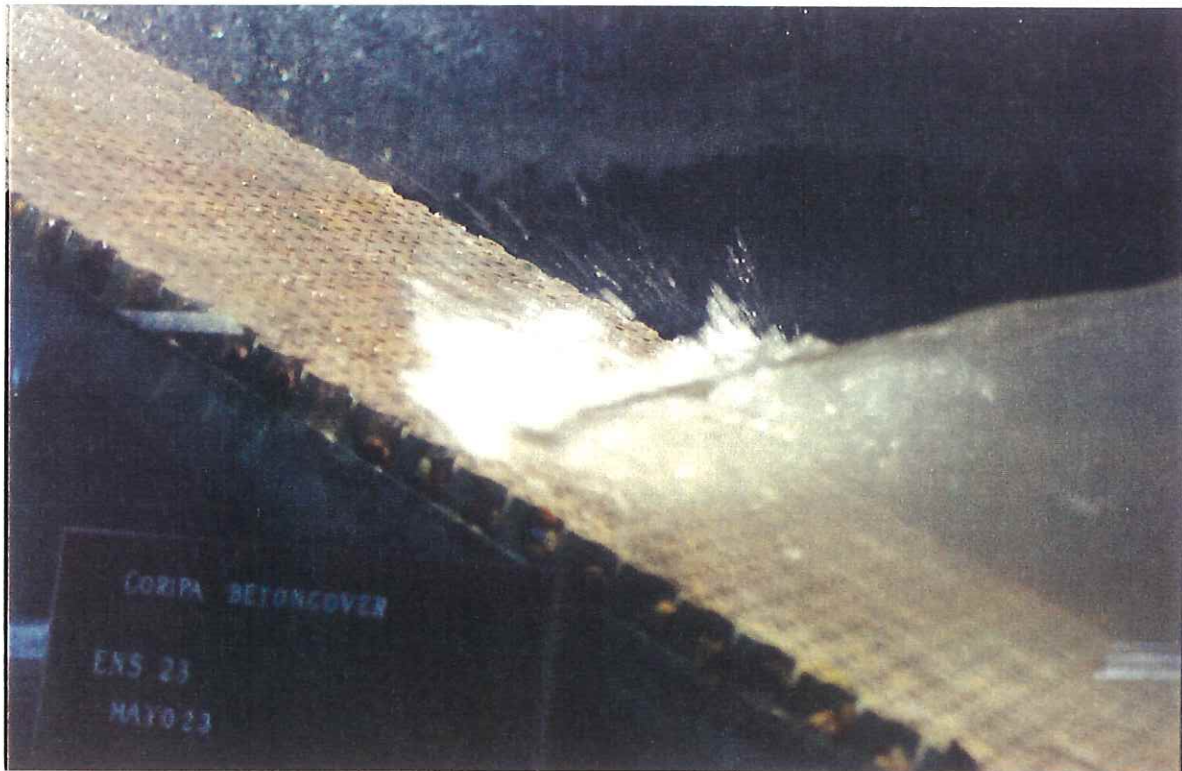


Foto 14