

INA

Instituto Nacional del Agua y del Ambiente



**ESTUDIO DEL MURO COSTANERO DE LA RAMBLA SUR
DE LA CIUDAD DE MONTEVIDEO**

*Informe LHA 01-163-97
Ezeiza, diciembre 1997*

Informe producido para

HIDRA S.R.L.

INDICE

Página

INTRODUCCION	- 1 -
1. METODOLOGIA	- 2 -
1.1. Instalaciones experimentales	- 2 -
1.2. Medición del sobrepaso	- 2 -
2. DISEÑO DEL MODELO. PLAN DE ENSAYOS	- 3 -
2.1. Características del muro	- 3 -
2.2. Condiciones de ensayo	- 3 -
2.3. Escalas del modelo	- 4 -
2.4. Plan de ensayos	- 4 -
3. RESULTADOS	- 5 -
CONCLUSIONES	- 7 -

FIGURAS

Figura 1. Esquema del canal de olas e instrumentación

Figura 2. Perfil transversal del muro

Figura 3 Resultados para NM = +2,0 m

Figura 4 Resultados para NM = +2,5 m

Figura 5 Resultados para NM = + 3,0 m

Figura 6 Resultados para NM = + 2,0 m y protección de geotextil al pie.

Figura 7 Resultados para NM = + 2,5 m y protección de geotextil al pie.

FOTOGRAFIAS

- Fotografía N° 1. Cubeta para la acumulación del caudal de sobrepaso y seguidor de nivel para la medición y registro.
- Fotografía N° 2. Ensayo para $NM = + 2 \text{ m}$, $T = 8 \text{ s}$, $Hb = 3,30 \text{ m}$, $q = 0,9 \text{ l/s/m}$
- Fotografía N° 3. Ensayo para $NM = + 2 \text{ m}$, $T = 10 \text{ s}$ $Hb = 2,40 \text{ m}$, $q = 10 \text{ l/s/m}$
- Fotografía N° 4. Ensayo para $NM = + 2,50$, $T = 8 \text{ s}$, $Hb = 2,40 \text{ m}$, $q = 2,5 \text{ l/s/m}$
- Fotografía N° 5. Ensayo para $NM = + 2,50 \text{ M}$, $T = 10 \text{ S}$, $hB = 3,50 \text{ m}$, $q = 15,5 \text{ l/s/m}$
- Fotografía N° 6. Ensayo para $NM = + 3 \text{ m}$ $T = 8 \text{ s}$ $Hb = 2,48 \text{ m}$ $q = 5 \text{ l/s/m}$
- Fotografía N° 7. Ensayo con protección de geotextil para $NM = + 2,50 \text{ m}$, $T = 10 \text{ s}$.
- Fotografía N° 8. Ensayo con protección de geotextil para $NM = + 2,00$, $T = 10\text{s}$.

EQUIPO DE TRABAJO

Responsable de Proyecto

Jefe de Programa de Hidráulica Marítima Ing. Castellano Roberto

Técnico de modelo Sr. Haspert C.

**Instrumentación Sr. Torchio J.
Ing. Tatone G.**

Fotografía Sta. Moreno B.

RESUMEN

Se presentan los resultados de un estudio mediante modelo físico bidimensional del caudal de sobrepaso medio para el muro costanero de la Rambla Sur de la ciudad de Montevideo.

Sobrepaso - defensa de costas - modelos físicos - Montevideo

INTRODUCCION

A requerimiento de HIDRA S.R.L. se llevaron a cabo ensayos mediante un modelo hidráulico de una sección transversal del muro costanero de la Rambla Sur de la ciudad de Montevideo.

El muro existente ha sufrido daños por la acción del oleaje y se ha efectuado un nuevo proyecto de su sección transversal a los efectos de su reconstrucción.

El propósito de los ensayos fue determinar la respuesta funcional del muro diseñado a la acción del oleaje, determinando para distintas situaciones el caudal medio que sobrepasa el coronamiento, habida cuenta de que detrás del muro se ubica una avenida costanera por la que circulan automóviles y peatones.

1. METODOLOGIA

1.1. Instalaciones experimentales

El estudio se llevó a cabo en un canal experimental de 30 m de longitud, 0,60 m de ancho y 0,70 m de profundidad (Figura N° 1). El canal se halla equipado en uno de sus extremos con una pantalla para generación de oleaje. La pantalla es movida mediante un actuador hidráulico, el que recibe la señal aleatoria generada por una computadora, y que responde a una distribución espectral predeterminada.

En el extremo opuesto se colocó la sección transversal del muro, precedido por un talud de pendiente 1:20.

Las características de las olas se determinaron mediante tres sondas de tipo resistivo ubicadas en el eje del canal, unos 10 m delante del modelo, y cuyas señales analógicas fueron adquiridas por una PC con un intervalo de muestreo de 50 milisegundos, digitalizadas y guardadas en un archivo para su procesamiento.

Este último se realiza mediante un programa computacional que, mediante la aplicación de la transformada rápida de Fourier (FFT), determina en forma separada, el espectro de la señal incidente, el de la reflejada, y los parámetros espectrales característicos: altura significativa, período de pico, período medio.

1.2. Medición del sobrepaso

La determinación del caudal de sobrepaso se efectuó mediante el registro de la variación de nivel en un recipiente ubicado detrás del modelo del muro (Fotografía 1), provisto de una placa de aquietamiento a los efectos de minimizar las oscilaciones de nivel debidas al ingreso brusco de agua en el recipiente. La variación del nivel se determinó mediante un seguidor de nivel DELFT, con registro en papel. Las máximas variaciones de nivel determinadas fueron de 100 mm; la velocidad de registro fue de 10 mm/minuto.

La variación de nivel Δh , multiplicada por el área del recipiente y dividida por el intervalo de tiempo Δt y por el ancho L del tramo de muro representado en el modelo, permitió calcular el caudal medio de sobrepaso q por unidad de longitud de muro.

2. DISEÑO DEL MODELO. PLAN DE ENSAYOS

2.1. Características del muro.

El muro está constituido por un paramento curvo (Figura 2a) con un desarrollo en vertical de 5,30 m. La pendiente del lecho delante del muro es 1:20.

Se efectuaron ensayos complementarios, para una sección transversal a la que se agregaron elementos de geotextil rellenos de hormigón al pie del muro (Figura 2b).

2.2. Condiciones de ensayo

Las condiciones de ensayo establecidas por HIDRA S.R.L. son las siguientes y corresponden al pie del muro:

Configuración I

Condición 1	nivel del mar	NM = + 2,0 m
	altura de ola al pie del muro	Hb = 2,60 m
	período	T = 10 s
Condición 2	nivel del mar	NM = + 3 m
	altura de ola al pie del muro	Hb = 3,75 m
	período	T = 10 s.
Condición 3	nivel del mar	NM = + 2,50 m
	altura de ola al pie de muro	Hb = 3,15 m
	período	T = 10 s

Configuración II (con protección de tubos de geotextil al pie)

Condición 1	Pie de muro con tubos de geotextil	
	nivel del mar	NM = + 2,0 m
	altura de ola al pie del muro	Hb = 2,60 m
Condición 2	Pie de muro con tubos de geotextil	
	nivel del mar	NM = + 2,5 m
	altura de ola al pie del muro	Hb = 3,15 m
	período	T = 10 s

Los valores indicados de altura de ola son los máximos para ola rompiente al pie del muro determinados según la metodología del Shore Protection Manual (SPM) (Ref.[1]) y cuya determinación se indica en el Anexo I; en las Tablas de ese Anexo se ha calculado también la altura de ola en aguas profundas correspondiente a cada caso, H'_{o} , mediante la utilización de las curvas del SPM.

2.3. Escalas del modelo

Se define como escala de un parámetro P a la relación entre su magnitud en el prototipo y en el modelo: $e_p = P_p/P_m$.

Las escalas del modelo deben responder al criterio de Froude, $e_v = e_T = e_L^{1/2}$, donde L son longitudes, T tiempo y V velocidades. Dadas las dimensiones de la sección transversal y de las condiciones hidrodinámicas a reproducir, se escogió $e_L = 25$, con lo cual resultan las escalas de tiempo y velocidad $e_T = e_v = 5$.

2.4. Plan de ensayos

Se estableció un programa de ensayos que permitiera cubrir una gama de situaciones en el entorno de las de diseño indicadas por el proyectista. Cada serie de ensayos estuvo conformada por al menos cuatro ensayos de altura de ola creciente hasta alcanzar y en algunos casos superar el valor máximo de altura de ola requerido.

En el modelo la determinación de altura de ola en cada ensayo se realizó en un tramo de fondo plano, cuya profundidad es $d_m = 0,47$ m para el NM + 2 m, $d_m = 0,51$ m para NM + 3 m y $d_m = 0,49$ para NM + 2,50 m.

3. RESULTADOS

Las Figuras 3, 4 y 5 muestran los valores de caudal medio de sobrepaso en función de la altura de ola H_b rompiente al pie del muro. La misma se determinó transformando los valores medidos a valores en aguas profundas (H_d) y éstos a H_b mediante las curvas de la Figura A-2 del Anexo I.

Para las condiciones de diseño los resultados obtenidos son los siguientes:

TABLA 1 - Caudal medio de sobrepaso

NM (m)	H _b (m)	T (s)	q (l/s/m)
2,00	2,60	10	<1
2,50	3,15	10	6
3,00	3,75	10	>30

Para los dos primeros casos los valores de caudal medio de sobrepaso se encuentran dentro de los máximos admisibles según Goda, $q_{max} = 10$ l/s/m (Ref.[2]).

En el caso del pie del muro con protección de elementos de geotextil los resultados son los siguientes

**TABLA 2 - Caudal medio de sobrepaso para muro
con protección de geotextil al pie**

NM (m)	H _b (m)	T (s)	q (l/s/m)
2,00	2,60	10	2,50
2,50	3,15	10	9,00

Los valores obtenidos resultan sensiblemente superiores, en especial para NM + 2. Ello se debe a que los elementos de geotextil dispuestos como se indica en la Figura 2, conforman un talud sólido de pendiente 1:2, que no permite la disipación de oleaje y favorece el run-up. Con mayor tirante de agua este efecto es menos notable, y los caudales de sobrepaso tienden a semejarse a los del caso anterior.

Con respecto al resto de los períodos analizados ($T = 6, 8$ y 12 s), cabe señalar que en términos generales el sobrepaso se incrementa fuertemente con períodos de ola mayores.

No obstante, los ensayos correspondientes a $T = 6$ s para el caso de la configuración I, arrojó valores mayores valores de caudal medio de sobrepaso. Ello se debió, según pudo observarse, a la composición de las olas incidentes y reflejadas (el muro es muy reflejante), situación que en el caso de las olas de 6 segundos, dada su escasa longitud, se produce a corta distancia del muro, produciendo un fuerte aumento del sobrepaso.

En el caso de la configuración II, también puedo determinarse que para $T = 6$ s resultan mayores valores de caudal medio de sobrepaso.

En el caso de olas de mayor período, aunque esta circunstancia también ocurre, se produce a mayor distancia del muro, dada la mayor longitud de onda.

CONCLUSIONES

1. El perfil de muro estudiado permite mantener el caudal medio de sobrepaso en valores inferiores a 10 l/s/m, cuando el nivel del mar se halla debajo de cota + 2,50. Este valor es considerado por algunos autores como el máximo tolerable para áreas pobladas .
2. Los mayores niveles del mar ejercen una doble influencia doble en el sobrepaso: permiten la llegada al pie del muro de olas más altas al disponerse de mayor profundidad, y reducen en la misma proporción la distancia entre la superficie del mar y la cota de coronamiento del muro. Ambas circunstancias favorecen el incremento del sobrepaso. Para NM = + 3 m los caudales determinados superan ampliamente a los considerados admisibles.
3. El período de las olas es una variable importante en el caudal de sobrepaso. En términos generales a igual altura de ola el sobrepaso es mayor cuando mayor es el período. La diferencia se incrementa con la altura de ola. Las olas de período corto ($T = 6$ s) mostraron un efecto particular, debido a las características altamente reflejantes del muro: al componerse las olas incidentes con las reflejadas por el muro a corta distancia de éste (debido a la reducida longitud de onda), los caudales de sobrepaso son mayores que para períodos mas largos.
4. El agregado de una protección de geotextil como el estudiado induce mayores sobrepasos para niveles bajos del mar (NM = + 2 m) al favorecer el run-up y no disipar energía. Para niveles mayores, este efecto tiende a disminuir.
5. La geometría del muro favorece el rechazo de olas rompientes que llegan a su pie con gran energía. Las olas de menor amplitud, que no rompen, se reflejan en el muro y pueden interactuar en las proximidades de éste con olas que se aproximan, favoreciendo el sobrepaso que se produce por derrame de las olas que alcanzan a superar la cota de coronamiento. Este efecto es particularmente notable para olas de período corto.
6. Para mantener los caudales medios de sobrepaso debajo de valores admisibles aún para nivel del mar NM = + 3 m, deberá elevarse la cota de coronamiento del muro. Una protección de enrocado al pie, puede resultar más disipativa que los elementos de geotextil y colaborar en la reducción del sobrepaso.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Shore Protection Manual. Department of the Army. Waterways Experimental Station. Corps of Engineers. Coastal Engineering Research Center. 1984.
2. Random seas and design of maritime structures. Y. Goda. University of Tokyo Press, 1985.

ANEXO I

Las alturas de ola a ensayar han sido establecidas al pie del muro. La medición de olas se efectúa en el canal de olas en una zona de fondo plano y de profundidad d . La transformación de uno a otro valor se efectuó como se indica a continuación. Los resultados se muestran en las Tablas A.1, A.2 y A.3.

A los efectos de determinar la máxima altura de ola rompiente posible al pie del muro, donde existe una profundidad d_b , se utilizó la curva del Shore Protection Manual (Figura A-1), entrando en el eje de abcisas con d_b/gT^2 y obteniendo H_b/d_b y a partir de éste, H_b .

Se determinó a continuación la distancia entre la cara frontal del muro y la posición de la rompiente, $x_p = (4-9,25m)H_b$, donde m es la pendiente ($m = 1/20 = 0,05$):

Con H_b y x_p se obtuvo d_b (profundidad en la que ocurre la rompiente, con éste y el período T se obtiene K_s (coeficiente de bajo) y finalmente $H'_o = H_b/K_s$. Con H_o y K_s correspondiente al lugar de medición se obtiene $H_p = H_o \cdot K_s$.

TABLA A.1. NM = + 2 m

T	d_o/gT^2	H_b/d_o	H_b	x_p	d_b	K_s	H_o	Canal de olas, $d = 11,75m$		
								K_s	H_p	H_m
8	0,00318	1,25	2,50	8,80	2,44	1,174	2,13	0,922	1,86	7,8
10	0,00204	1,30	2,60	8,20	2,46	1,282	2,00	0,962	1,82	7,7
12	0,00142	1,34	2,65	9,35	2,47	1,404	1,89	1,015	1,82	7,7

TABLA A.2. NM = + 2,50 m

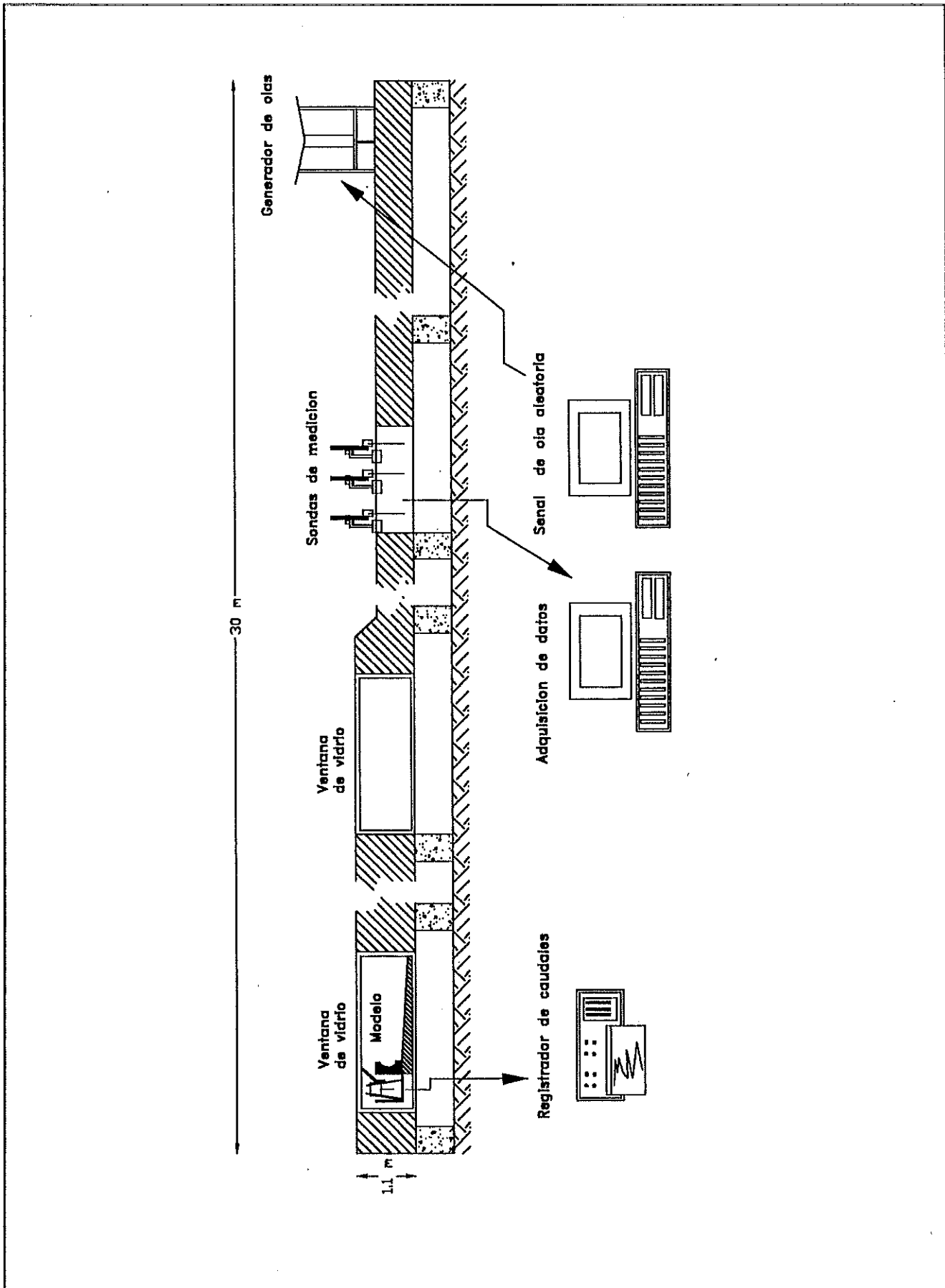
T	d_o/gT^2	H_b/d_o	H_b	x_p	d_b	K_s	H_o	Canal de olas, $d = 12,25m$		
								K_s	H_p	H_m
8	0,00398	1,21	3,02	10,70	3,04	1,122	2,69	0,919	2,47	9,9
10	0,00265	1,26	3,15	11,14	3,06	1,231	2,56	0,957	2,45	9,8
12	0,00177	1,30	3,25	11,50	3,08	1,334	2,44	1,008	2,46	9,8

TABLA A.3. NM = + 3 m

T	d ₀ /gT ²	H _b /d ₀	H _b	x _p	d _b	K _s	H ₀	Canal de olas, d = 12,75m		
								K _a	H _p	H _m
8	0,00480	1,15	3,45	12,20	3,81	1,086	3,18	0,918	2,90	11,8
10	0,00300	1,25	3,75	13,28	3,88	1,188	3,18	0,962	3,00	12,0
12	0,00210	1,30	3,80	13,80	3,89	1,281	3,04	1,002	3,05	12,2

Los resultados de los ensayos se han expresado en función de la altura de ola en aguas profundas (H_0), dividiendo el valor medido por el coeficiente de bajo correspondiente a la profundidad y período de cada caso. Para determinar H_b a partir de H_0 se utilizó la figura A.2, entrando con H_0/gT^2 , obteniendo H_b/H_0 y de aquí H_b .

FIGURAS



30 m

1.1 m

Generador de olas

Sondas de medición

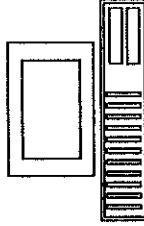
Ventana de vidrio

Ventana de vidrio Modelo

Registrador de caudales

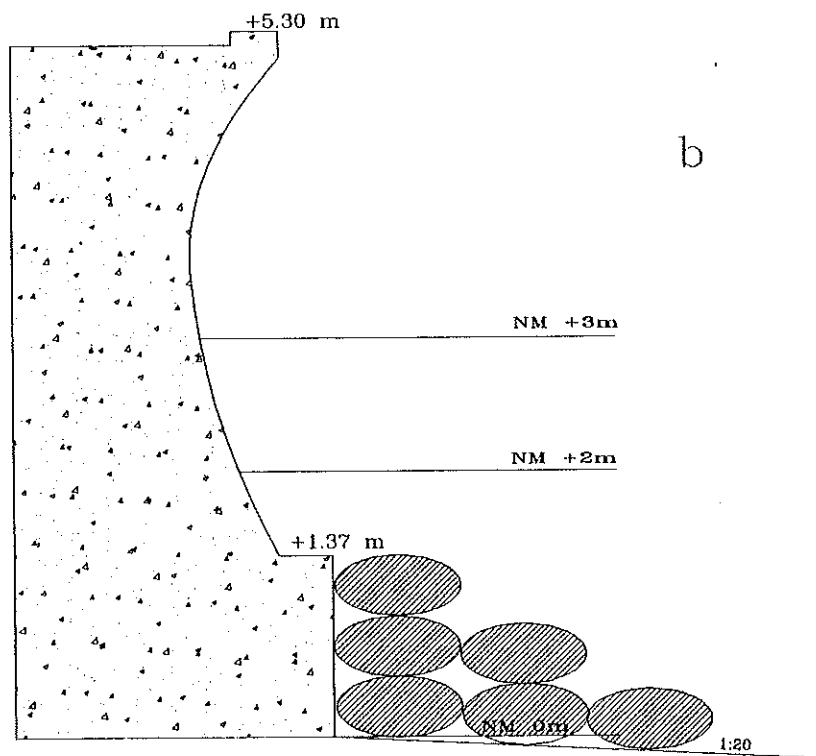
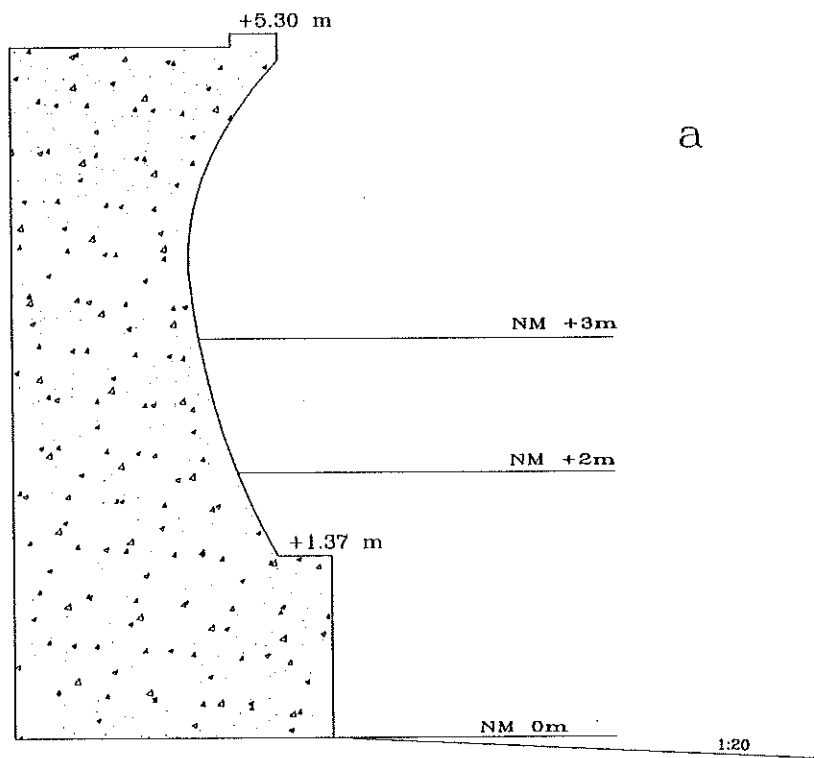
Adquisición de datos

Señal de ola aleatoria



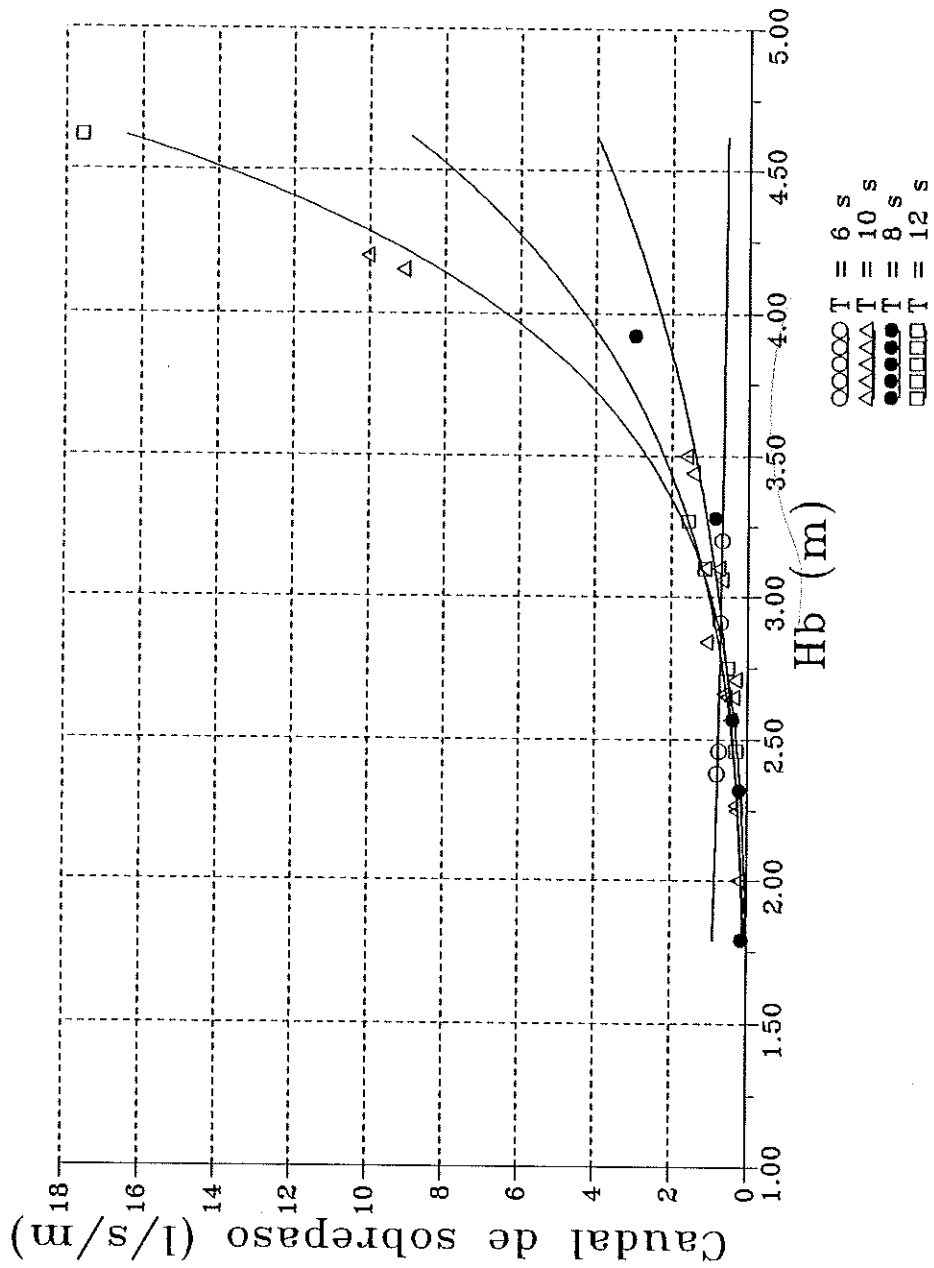
CANAL DE OLAS.

FIGURA 1



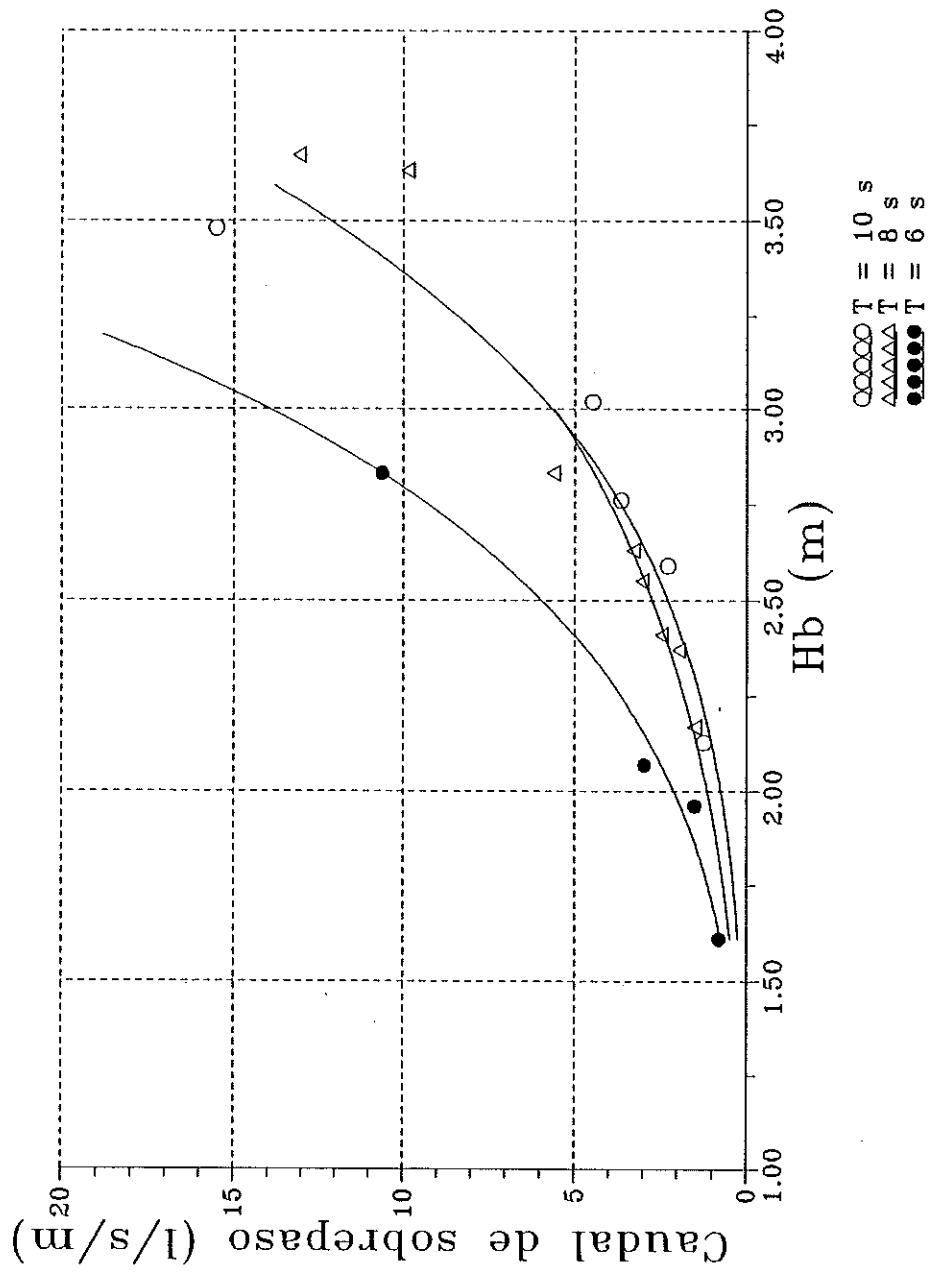
SECCION TRANSVERSAL DEL MURO ENSAYADO.

FIGURA 2



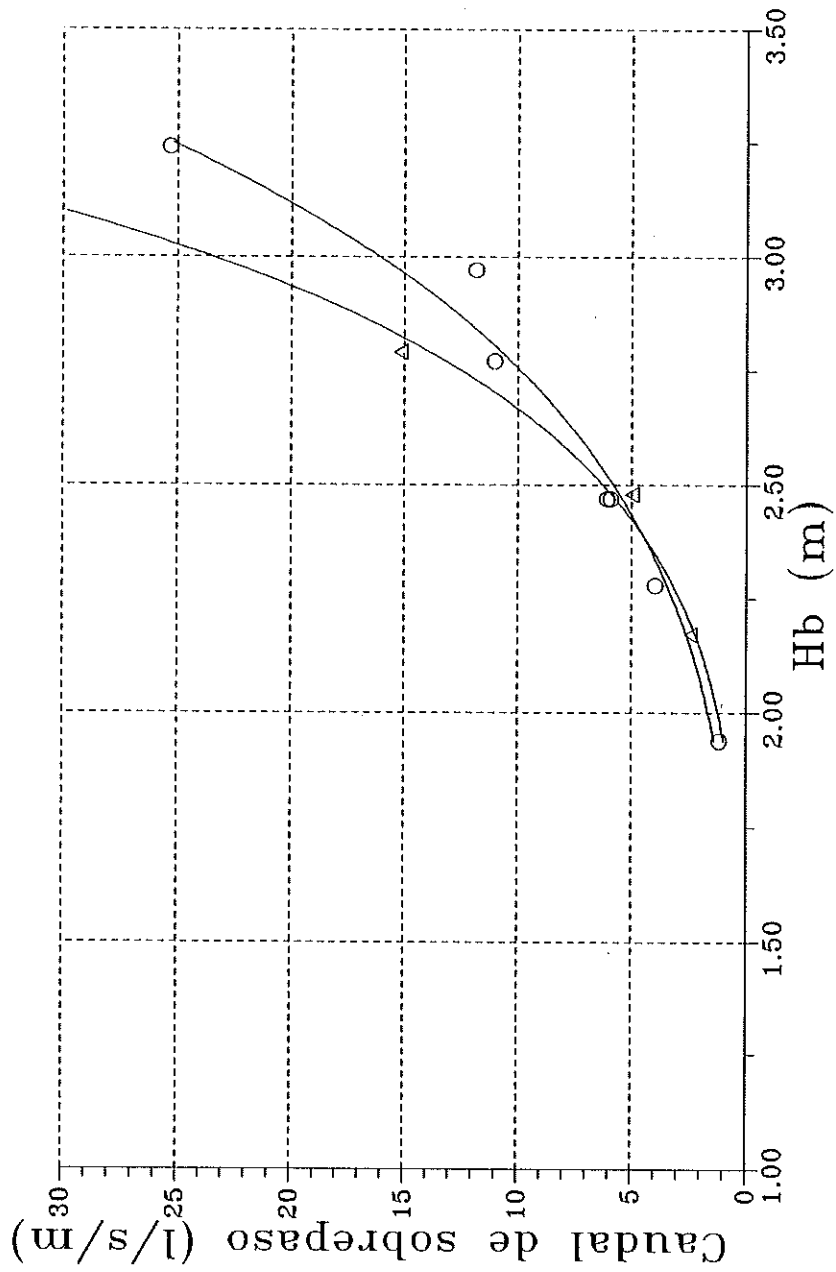
CAUDAL MEDIO DE SOBREPASO PARA NM +2m.

FIGURA 3



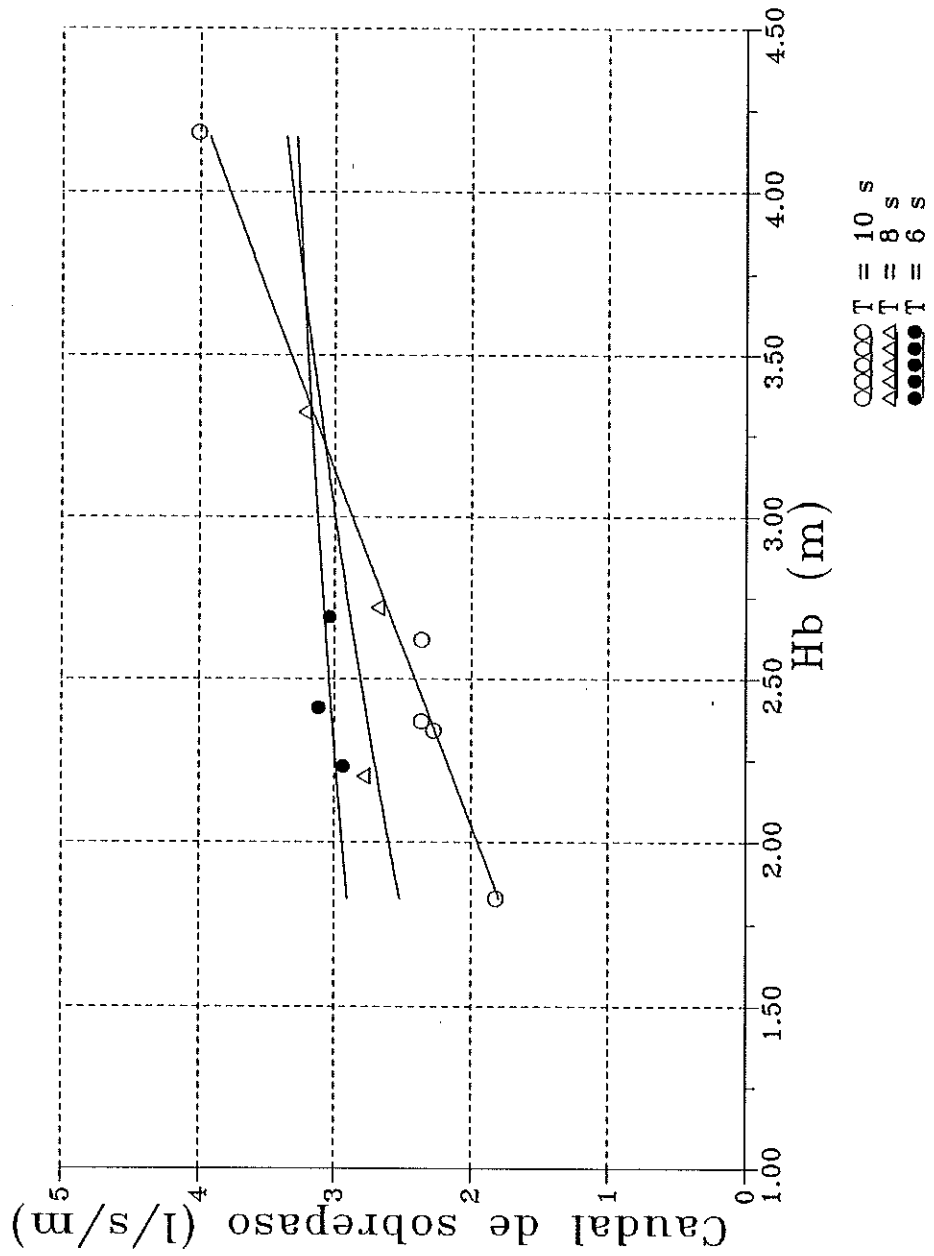
CAUDAL MEDIO DE SOBREPASO PARA NM +2.5 m.

FIGURA 4



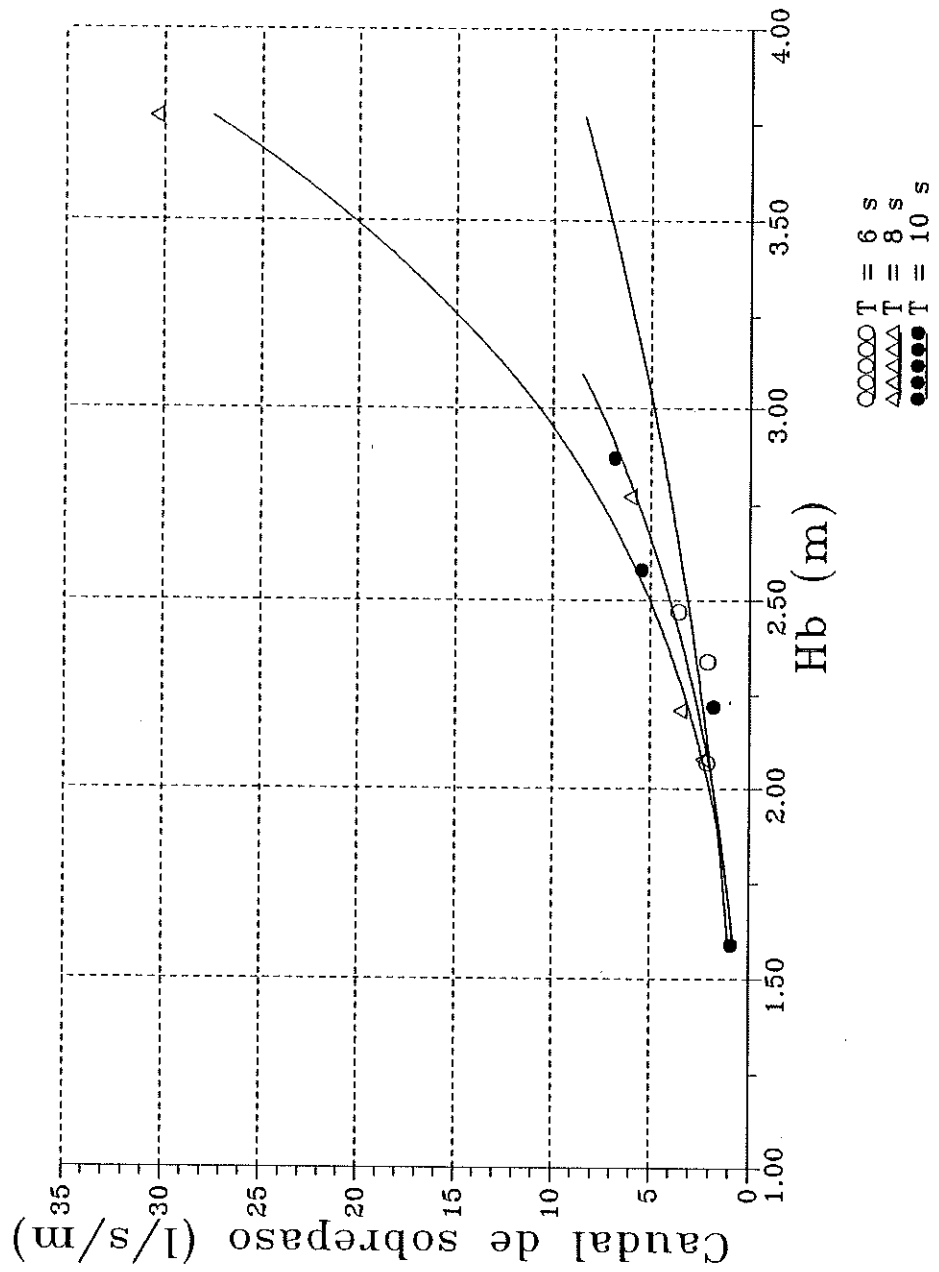
CAUDAL MEDIO DE SOBREPASO PARA NM +3 m.

FIGURA 5



CAUDAL MEDIO DE SOBREPASO PARA NM +2 m.
CON PROTECCION DE GEOTEXTIL AL PIE.

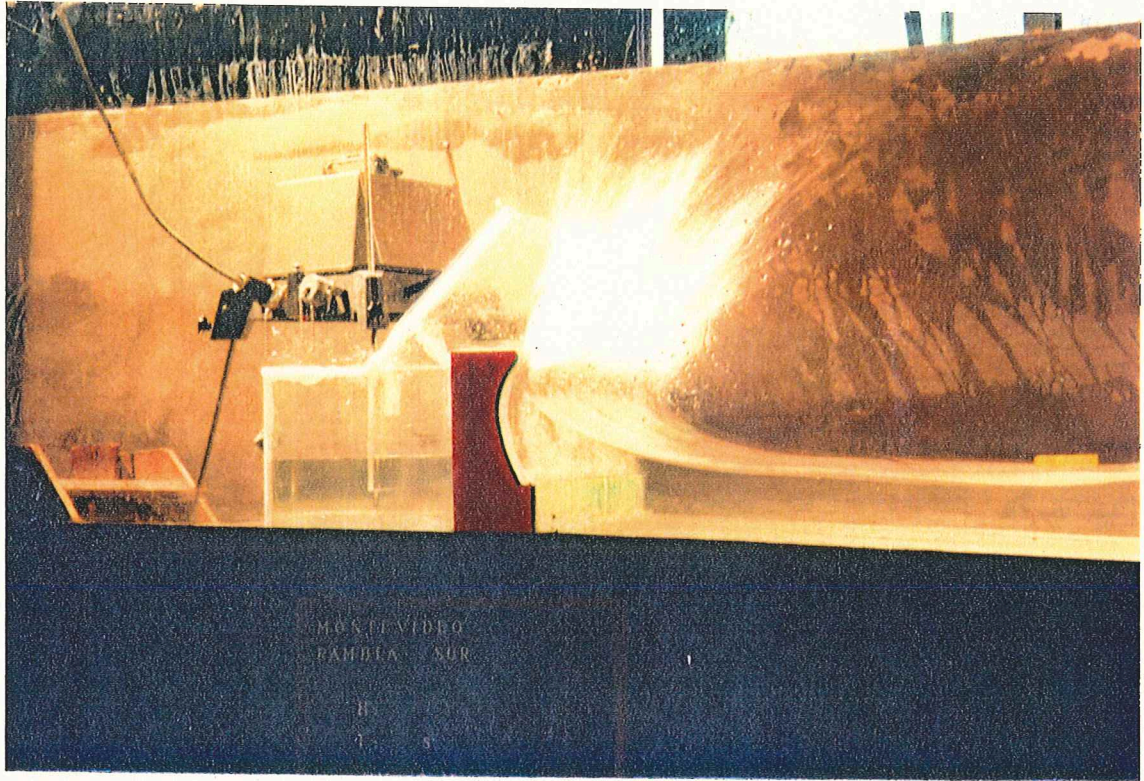
FIGURA 6



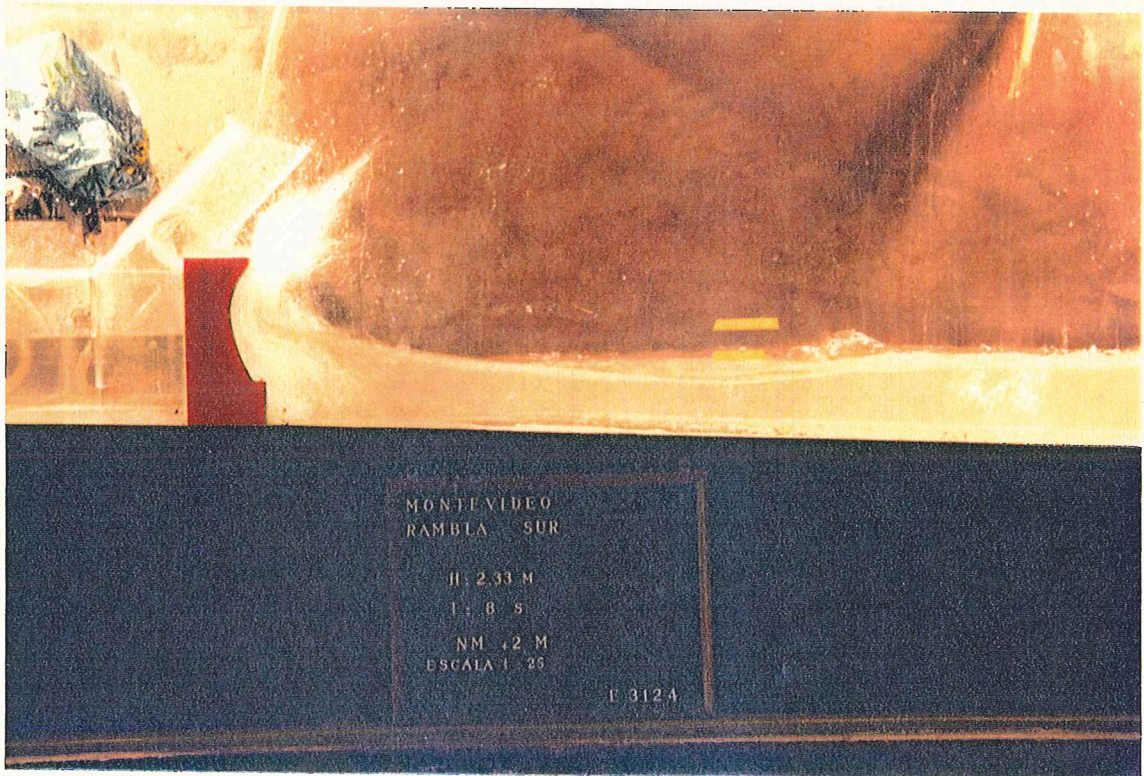
CAUDAL MEDIO DE SOBREPASO PARA NM +2.5 m.
 CON PROTECCION DE GEOTEXTIL AL PIE.

FIGURA 7

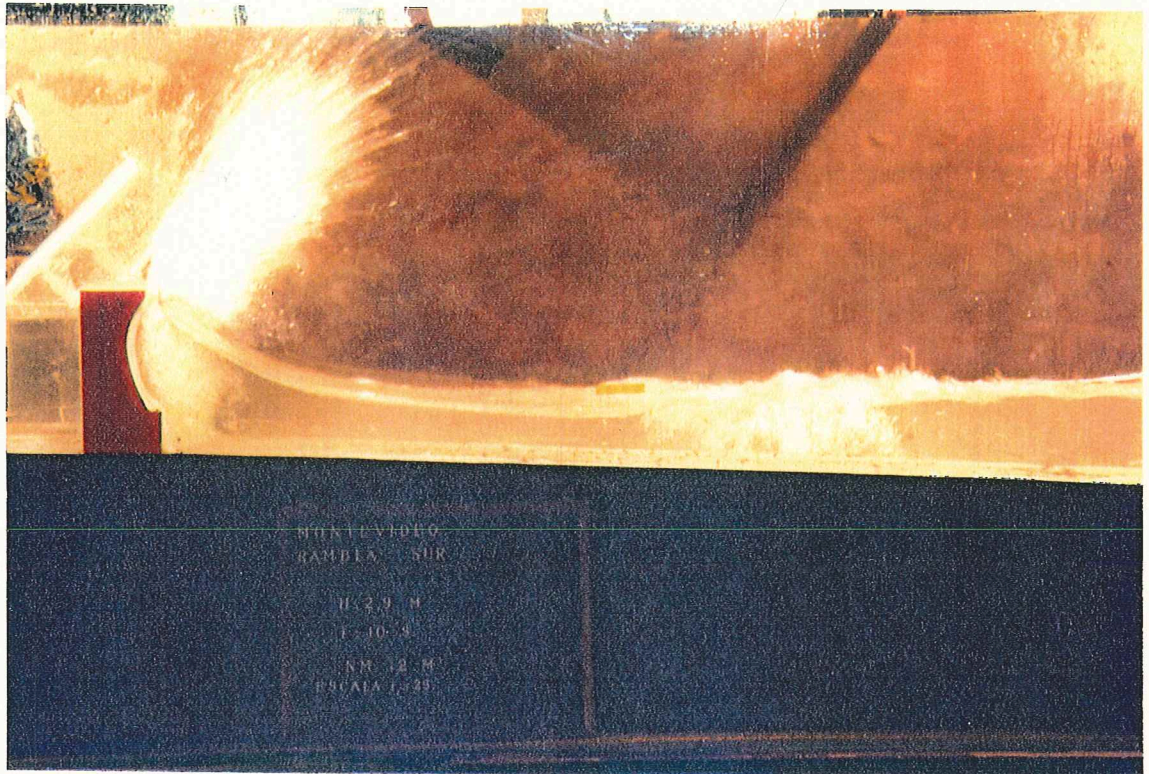
FOTOGRAFIAS



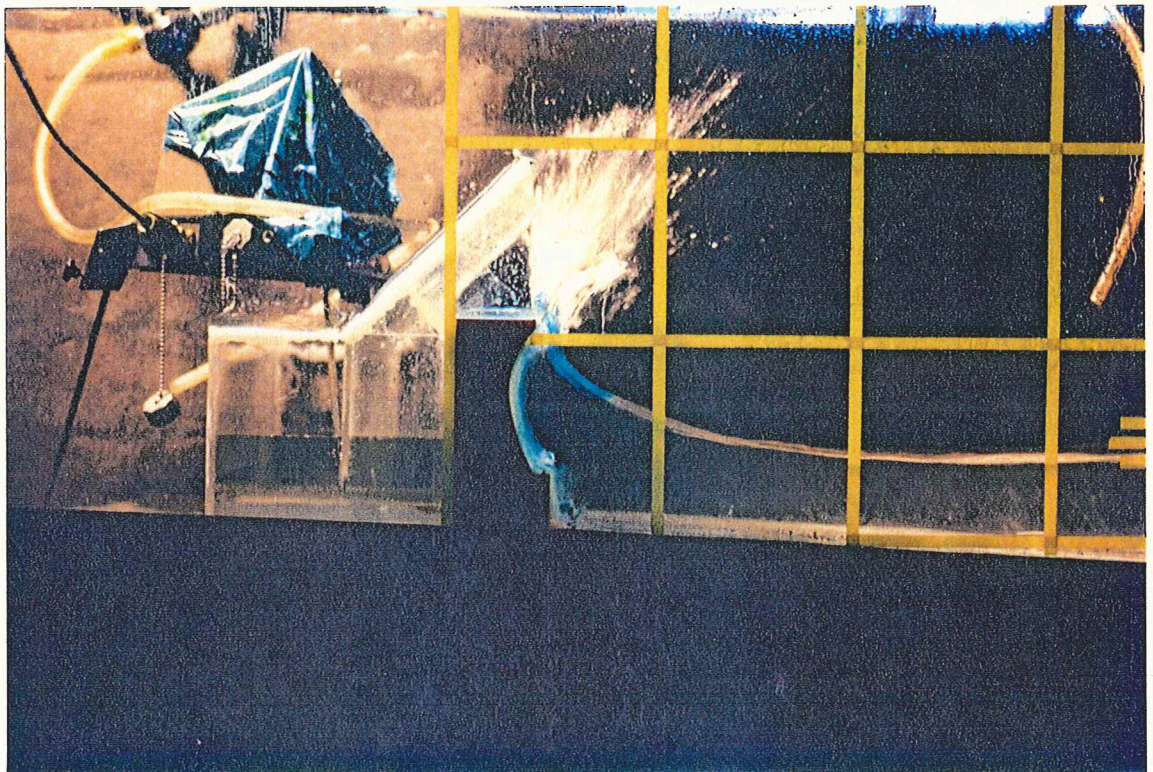
FOTOGRAFIA N° 1



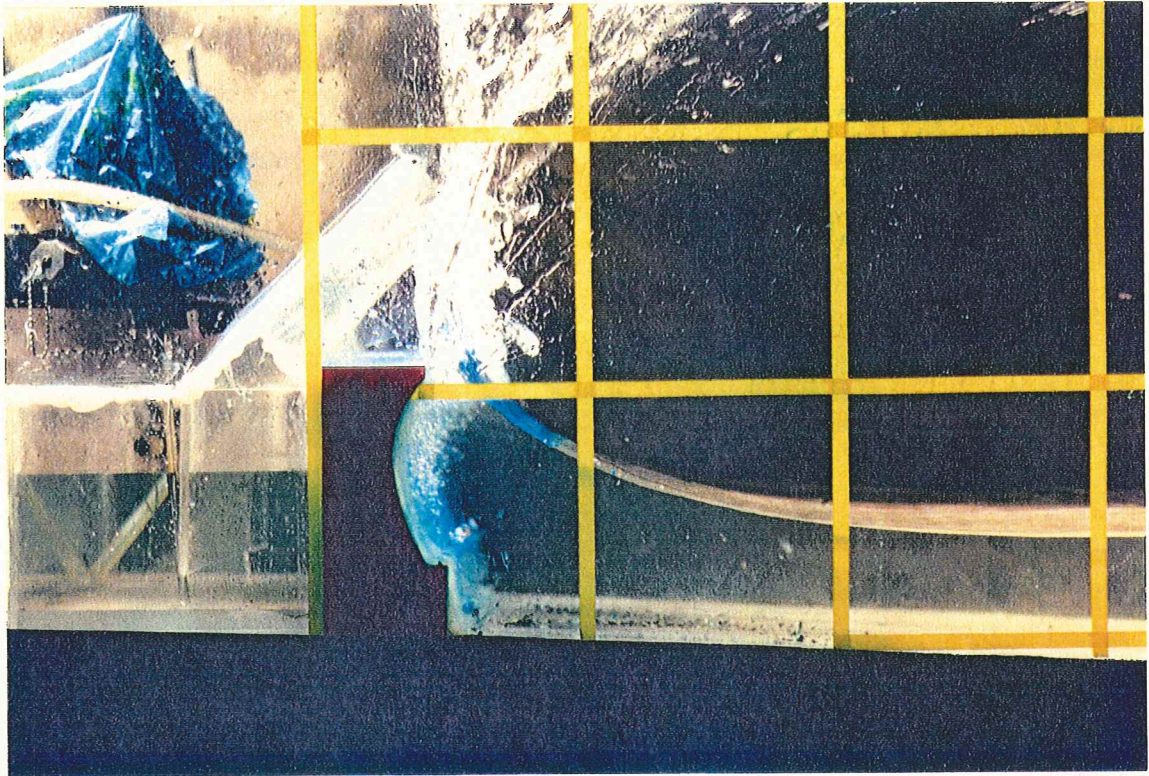
FOTOGRAFIA N° 2



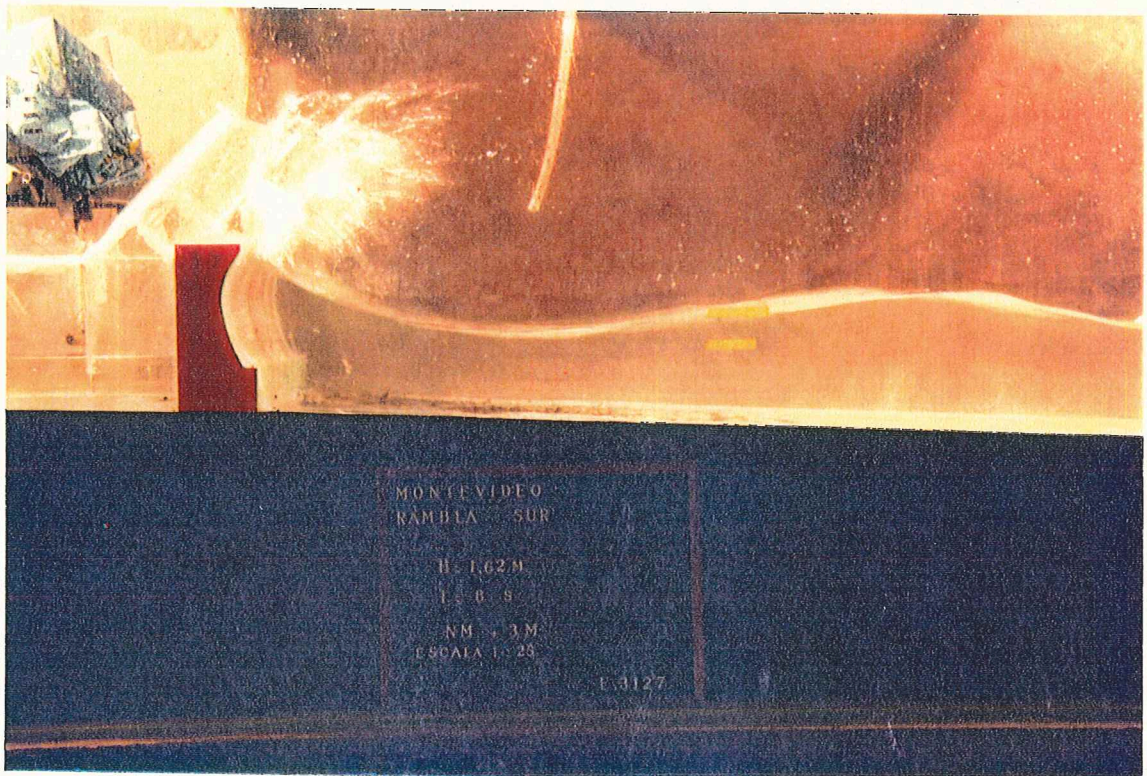
FOTOGRAFIA N° 3



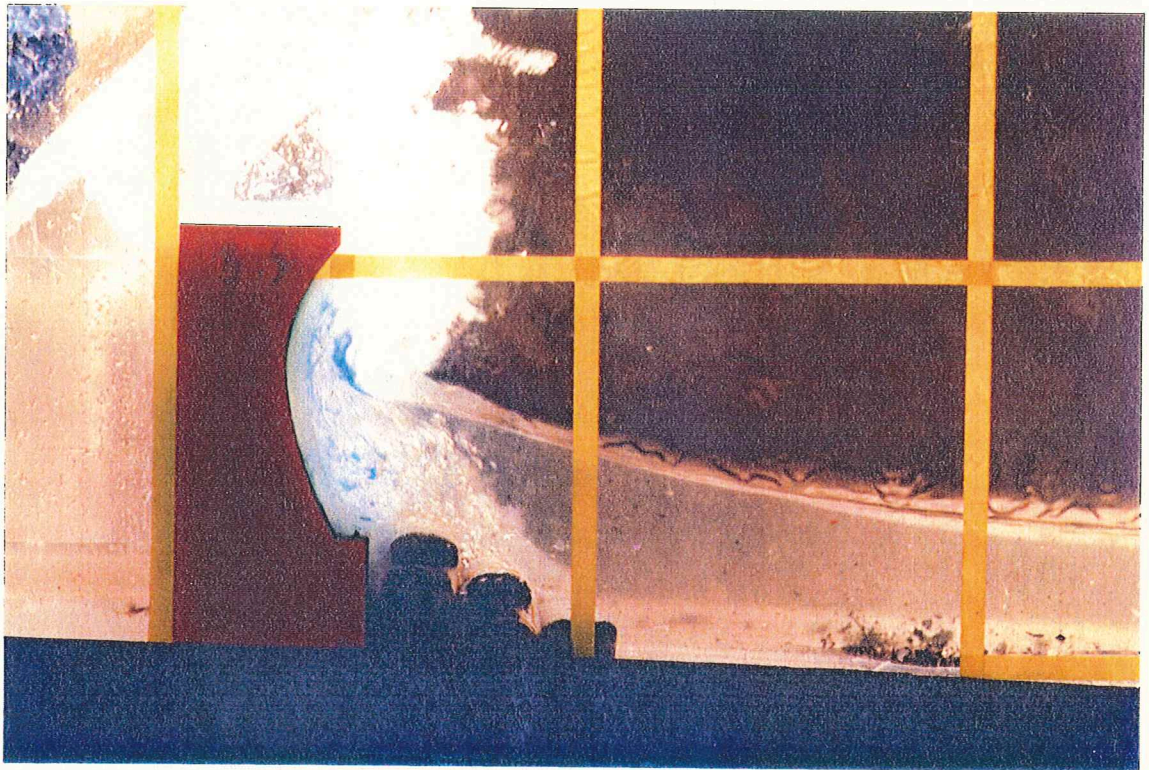
FOTOGRAFIA N° 4



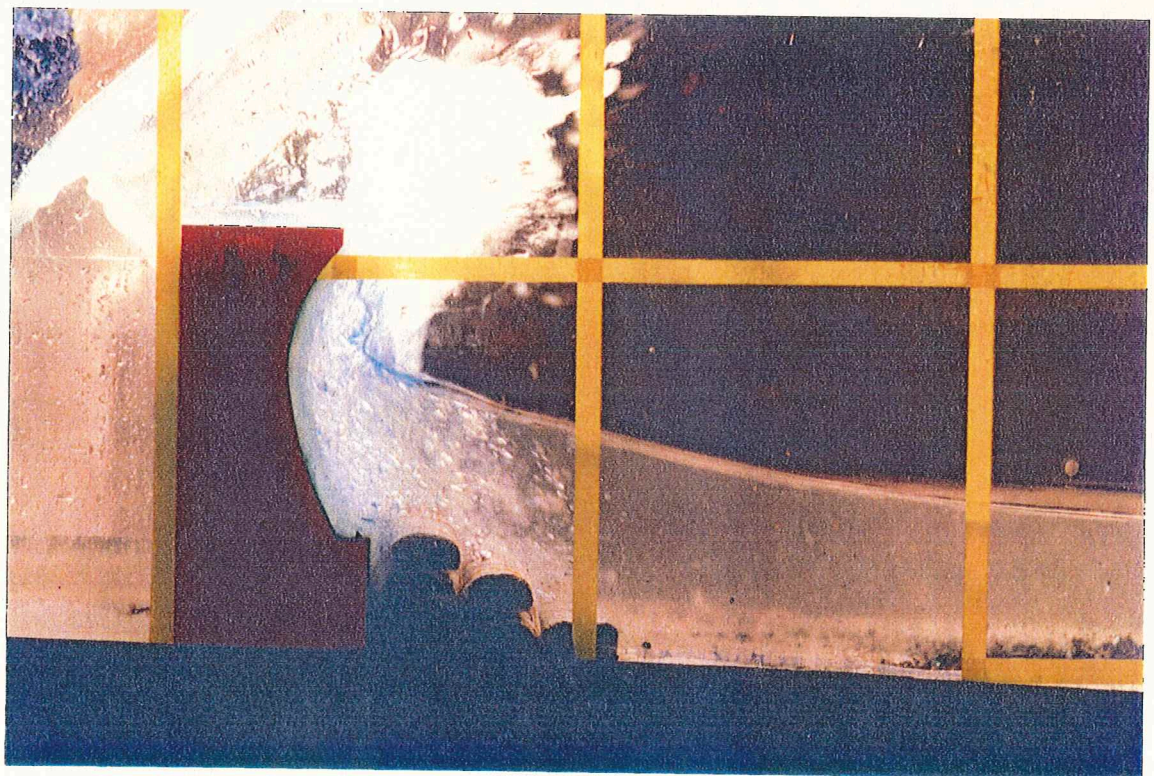
FOTOGRAFIA N° 5



FOTOGRAFIA N° 6



FOTOGRAFIA N° 7



FOTOGRAFIA N° 8

ANEXO I

Las alturas de ola a ensayar han sido establecidas al pie del muro. La medición de olas se efectúa en el canal de olas en una zona de fondo plano y de profundidad d . La transformación de uno a otro valor se efectuó como se indica a continuación. Los resultados se muestran en las Tablas A.1, A.2 y A.3.

A los efectos de determinar la máxima altura de ola rompiente posible al pie del muro, se utilizó la curva del Shore Protection Manual (Figura A.1), entrando en el eje de abcisas con d_s/gT^2 y obteniendo H_b/d_s y a partir de éste, H_b .

Con H_b y $x_p = (4-9,25m)H_b$ se obtuvo d_b (profundidad en la que ocurre la rompiente, con éste y el período T se obtiene K_s (coeficiente de bajío) y finalmente $H_o = H_b/K_s$. Con H_o y K_s correspondiente al lugar de medición se obtiene $H_p = H_o.K_s$.

TABLA A.1. NM = + 2m

T	d_s/gT^2	H_b/d_s	H_b	x_p	d_b	K_s	H_o	Canal de olas, $d = 11,75m$		
								K_s	H_p	H_m
8	0,00318	1,25	2,50	8,80	2,44	1,174	2,13	0,922	1,96	7,8
10	0,00204	1,30	2,60	9,20	2,46	1,292	2,00	0,962	1,92	7,7
12	0,00142	1,34	2,65	9,35	2,47	1,404	1,89	1,015	1,92	7,7

TABLA A.2. NM = + 2,50 m

T	d_s/gT^2	H_b/d_s	H_b	x_p	d_b	K_s	H_o	Canal de olas, $d = 12,25m$		
								K_s	H_p	H_m
8	0,00398	1,21	3,02	10,70	3,04	1,122	2,69	0,919	2,47	9,9
10	0,00255	1,28	3,16	11,14	3,06	1,231	2,56	0,957	2,45	9,8
12	0,00177	1,30	3,25	11,50	3,08	1,334	2,44	1,008	2,46	9,8

TABLA A.3. NM = + 3m

T	d_s/gT^2	H_b/d_s	H_b	x_p	d_b	K_s	H_o	Canal de olas, $d = 12,75m$		
								K_s	H_p	H_m
8	0,00480	1,15	3,45	12,20	3,61	1,085	3,18	0,918	2,80	11,8
10	0,00300	1,25	3,75	13,28	3,66	1,188	3,16	0,952	3,00	12,0
12	0,00210	1,30	3,90	13,80	3,69	1,281	3,04	1,002	3,05	12,2

Los resultados de los ensayos se han expresado en función de la altura de ola en aguas profundas (H_o), dividiendo el valor medido por el coeficiente de bajo correspondiente a la profundidad y período de cada caso. Para determinar H_b a partir de H_o se utilizó la figura A.2 , entrando con H_o/gT^2 , obteniendo H_b/H_o y de aquí H_b .

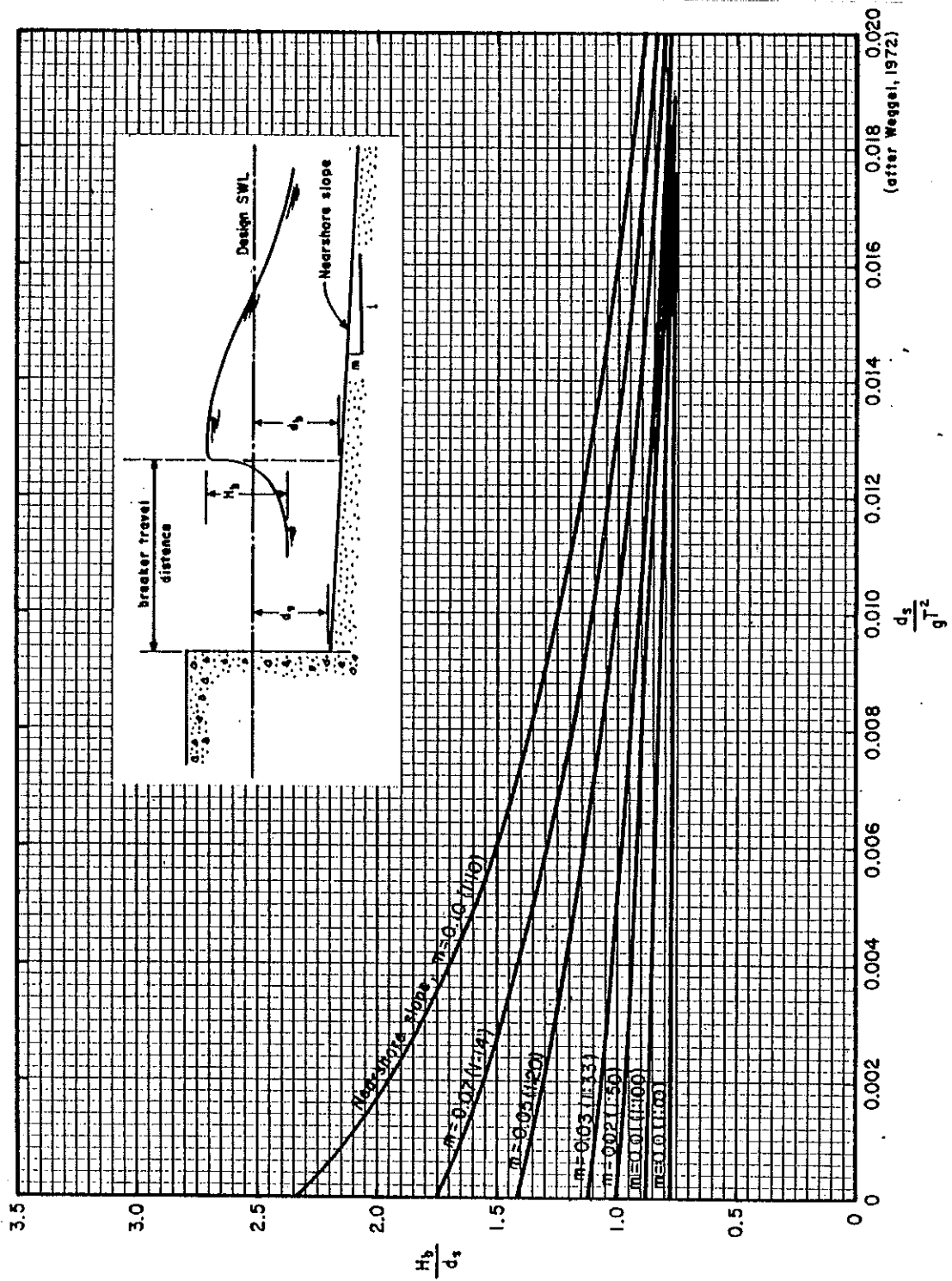
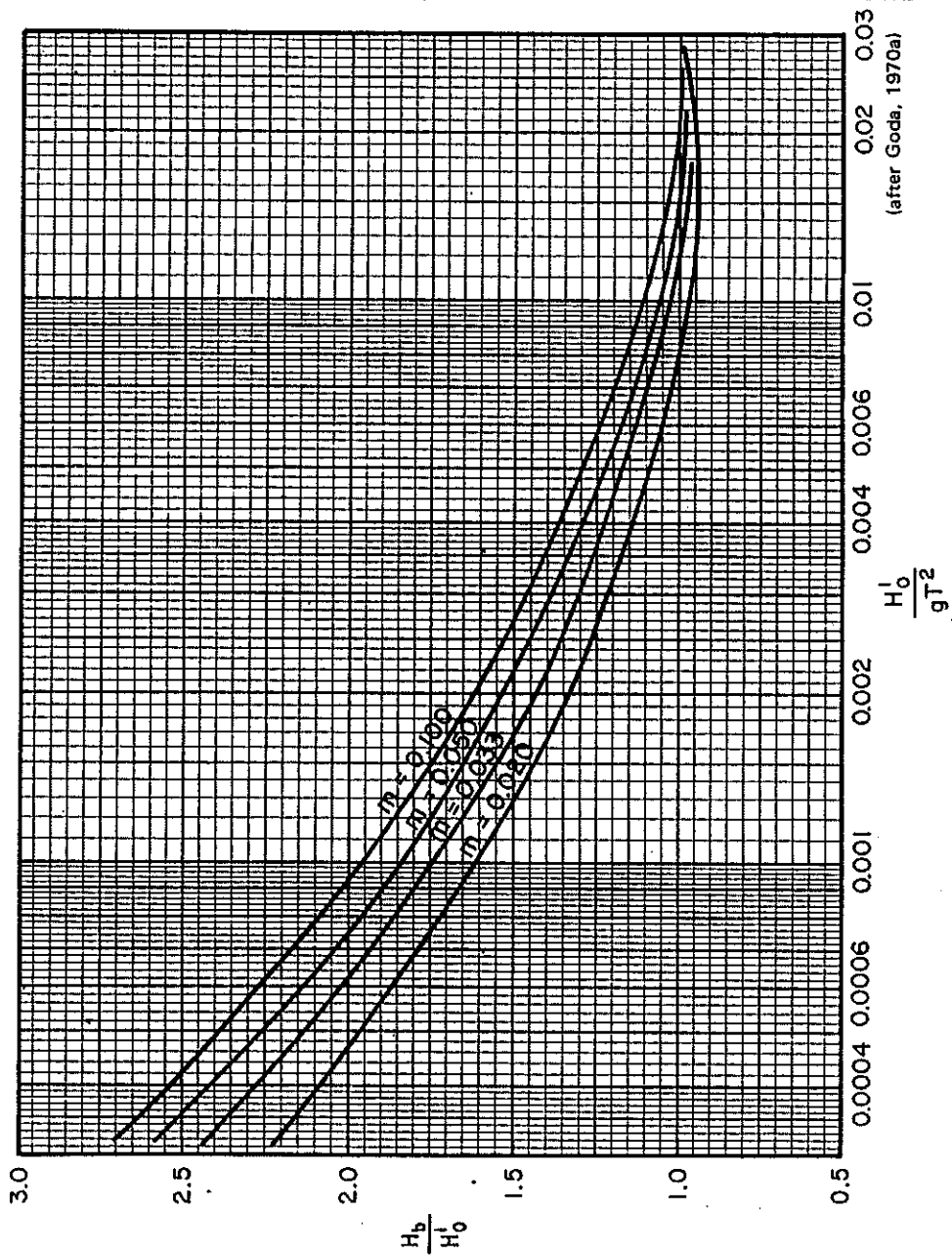


FIGURA A-1



(after Goda, 1970a)

FIGURA A-2