

MFN - 1

38738

**INSTITUTO NACIONAL DE CIENCIA
Y TECNICA HIDRICAS**

**LABORATORIO DE HIDRAULICA
APLICADA**

**ESTUDIO DE LAS CONDICIONES DE AGITACION
EN EL CANAL DE ACCESO E INTERIOR
DEL PUERTO PESQUERO EN CALETA OLIVIA
(Prov. de Santa Cruz)
Segundo Informe de Avance.**



©/H.341
I 24
II

LHA-127-02-93

Ezeiza, Octubre de 1993



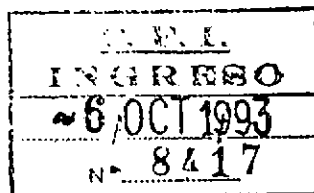
Ref.: Elev. 28 Int. 00000
CFI -Caleta Olivia

Instituto Nacional de Ciencia y Técnica Hidráulica

M FN - 1

Ezeiza, 5 de setiembre de 1993.-

Ing. Agr. Miguel A. BASUALDO
Jefe Area Org. Estatal
Consejo Federal de Inversiones
San Martín 871
1004 Buenos Aires



Me dirijo a Ud. para elevarle 5 (cinco) ejemplares del Segundo Informe de Avance sobre los estudios de agitación en el Puerto Pesquero de Caleta Olivia, Pcia. de Santa Cruz, en cumplimiento de lo establecido en el convenio entre el CFI y el INCYTH firmado el 7 de julio del presente año.

Este Informe presenta los resultados correspondientes a la implementación del modelo de agitación en las zonas II (caleta) y III (interior del puerto), de acuerdo a lo establecido en el Cronograma de Tareas (Anexo I).

Con respecto al pedido de equipamiento de computación solicitado oportunamente por el LHA, el cual fuera rechazado como lo expresa la nota (fax) del 6/9/93, debo informarle que la no disponibilidad de dichos equipos ha redundado en la imposibilidad de efectuar los ensayos preliminares para la zona II, que requiere de equipos computacionales específicos por la gran cantidad de memoria que necesita el modelo matemático. Para solucionar esta dificultad se pide, por nota separada, que el CFI remita parte de los fondos comprometidos al INCYTH, que se hará cargo de efectivizar las adquisiciones necesarias.

Sin otro particular saluda a Ud. muy atentamente,

DR. JULIO C. DE SIO
Director Laboratorio de Hidráulica Aplicada

**INSTITUTO NACIONAL DE CIENCIA
Y TECNICA HIDRICAS**

**LABORATORIO DE HIDRAULICA
APLICADA**

**ESTUDIO DE LAS CONDICIONES DE AGITACION
EN EL CANAL DE ACCESO E INTERIOR
DEL PUERTO PESQUERO EN CALETA OLIVIA
(Prov. de Santa Cruz)
LHA-127-02-93**

Resumen: Se describe la implementación de un modelo matemático de agitación de olas al estudio de un puerto pesquero en Caleta Olivia, y se presentan resultados preliminares.

Descriptores: puertos - olas - difracción de olas - modelos matemáticos - Caleta Olivia - Golfo de San Jorge.

INFORME PRODUCIDO POR

Lic. Carla P. XAVIER VILELA
Dr. Angel N. MENENDEZ
Ing. Fabián A. BOMBARDELLI

EQUIPO DE TRABAJO

Responsables del Proyecto

Ing. Roberto D. CASTELLANO
Dr. Angel N. MENENDEZ

Profesionales

Ing. Fabián A. BOMBARDELLI
Lic. Carla P. XAVIER VILELA

Técnicos

Sr. Carlos A. HASPERT
Sr. Julio A. TORCHIO

INDICE

1	INTRODUCCION	1
2	MODELO MATEMATICO	3
3	AGITACION EN EL INTERIOR DEL PUERTO - FASE I	4
3.1	RED DE CALCULO	4
3.2	CONDICIONES DE BORDE	5
3.3	PARAMETROS DE ENTRADA	5
3.4	ENSAYOS PRELIMINARES	5
3.4.1	Onda incidente	5
3.4.2	Talud	6
3.4.3	Costa adyacente	6
3.4.4	Resultados	7
4	PROPAGACION A LO LARGO DE LA CALETA	10
4.1	RED DE CALCULO	10
4.2	CONDICIONES DE BORDE	11
	CONCLUSIONES	12
	REFERENCIAS	13
ANEXO I	DESCRIPCION Y APLICACION DEL MODELO MATEMATICO DE AGITACION	
ANEXO II	COEFICIENTE DE REFLEXION DE OLAS SOBRE UN TALUD	

LISTA DE FIGURAS

- 3.1 Red de cálculo para el interior del puerto - Fase I
- 3.2 Coeficiente de reflexión de un talud
- 3.3a Perfiles de playa adyacentes a la boca de entrada al puerto. Ubicación de perfiles
- 3.3b Perfiles de playa adyacentes a la boca de entrada al puerto. Perfil 1
- 3.3c Perfiles de playa adyacentes a la boca de entrada al puerto. Perfil 2
- 3.3d Perfiles de playa adyacentes a la boca de entrada al puerto. Perfil 3
- 3.3e Perfiles de playa adyacentes a la boca de entrada al puerto. Perfil 4
- 3.3f Perfiles de playa adyacentes a la boca de entrada al puerto. Perfil 5
- 3.3g Perfiles de playa adyacentes a la boca de entrada al puerto. Perfil 6
- 3.3h Perfiles de playa adyacentes a la boca de entrada al puerto. Perfil 7
- 3.4 Curva de isoamplitud relativa del 12% para un período de 7 segundos y un coeficiente de absorción de talud de 0
- 3.5 Curva de isoamplitud relativa del 12% para un período de 7 segundos y un coeficiente de absorción de talud de 0,10
- 3.6 Curva de isoamplitud relativa del 12% para un período de 7 segundos y un coeficiente de absorción de talud de 0,20
- 3.7 Curva de isoamplitud relativa del 12% para un período de 7 segundos y un coeficiente de absorción de talud de 0,35
- 3.8 Curva de isoamplitud relativa del 12% para un período de 7 segundos y un coeficiente de absorción de talud de 0,50
- 3.9 Curva de isoamplitud relativa del 12% para un período de 7 segundos y un coeficiente de absorción de talud de 0,65
- 3.10 Curva de isoamplitud relativa del 12% para un período de 7 segundos y un coeficiente de absorción de talud de 1

- 3.11 Curva de isoamplitud relativa del 12% para un período de 10 segundos y un coeficiente de absorción de talud de 0
- 3.12 Curva de isoamplitud relativa del 12% para un período de 10 segundos y un coeficiente de absorción de talud de 0,10
- 3.13 Curva de isoamplitud relativa del 12% para un período de 10 segundos y un coeficiente de absorción de talud de 0,20
- 3.14 Curva de isoamplitud relativa del 12% para un período de 10 segundos y un coeficiente de absorción de talud de 0,35
- 3.15 Curva de isoamplitud relativa del 12% para un período de 10 segundos y un coeficiente de absorción de talud de 0,50
- 3.16 Curva de isoamplitud relativa del 12% para un período de 10 segundos y un coeficiente de absorción de talud de 0,65
- 3.17 Curva de isoamplitud relativa del 12% para un período de 10 segundos y un coeficiente de absorción de talud de 1
- 3.18 Curva de isoamplitud relativa del 12% para un período de 15 segundos y un coeficiente de absorción de talud de 0
- 3.19 Curva de isoamplitud relativa del 12% para un período de 15 segundos y un coeficiente de absorción de talud de 0,10
- 3.20 Curva de isoamplitud relativa del 12% para un período de 15 segundos y un coeficiente de absorción de talud de 0,20
- 3.21 Curva de isoamplitud relativa del 12% para un período de 15 segundos y un coeficiente de absorción de talud de 0,35
- 3.22 Curva de isoamplitud relativa del 12% para un período de 15 segundos y un coeficiente de absorción de talud de 0,50
- 3.23 Curva de isoamplitud relativa del 12% para un período de 15 segundos y un coeficiente de absorción de talud de 0,65
- 3.24 Curva de isoamplitud relativa del 12% para un período de 15 segundos y un coeficiente de absorción de talud de 1
- 3.25 Regiones de máxima amplitud relativa de ola

- 3.26 Amplitud máxima en la región A en términos de la absorción del talud
- 3.27 Amplitud máxima en la región B en términos de la absorción del talud
- 3.28 Amplitud máxima en la región C en términos de la absorción del talud
- 3.29 Amplitud máxima en la región D en términos de la absorción del talud
- 3.30 Amplitud máxima en la región E en términos de la absorción del talud
- 3.31 Amplitud máxima en la región F en términos de la absorción del talud
- 3.32 Amplitud máxima para 7 segundos en términos de la absorción del talud
- 3.33 Amplitud máxima para 10 segundos en términos de la absorción del talud
- 3.34 Amplitud máxima para 15 segundos en términos de la absorción del talud
- 3.35 Amplitud máxima para playa totalmente y parcialmente absorbente
- 3.36 Patrón de agitación para $T = 10$ segundos y $K_a = 0,5$
- 4.1 Red de cálculo para la zona de la caleta

1 INTRODUCCION

La Provincia de Santa Cruz proyecta la construcción de un puerto pesquero en las proximidades de Caleta Olivia, en el Golfo de San Jorge, a unos 70 km al sur de la ciudad de Comodoro Rivadavia.

A los efectos de realizar los estudios hidráulicos pertinentes, con fecha 7 de julio de 1993 el Consejo Federal de Inversiones suscribió un convenio con el Instituto Nacional de Ciencia y Técnica Hídricas, el que, a través de su Laboratorio de Hidráulica Aplicada, debe realizar los estudios de propagación de olas y agitación en el interior del puerto mediante modelación numérica.

De acuerdo a lo establecido en el Artículo 6º del Convenio, las tareas, con una duración total de cuatro meses, dieron comienzo dos semanas después de la firma del Convenio, es decir, el 21 de julio de 1993.

En la primera etapa del estudio, cuyos resultados fueron presentados en el Primer Informe de Avance (en adelante, PIA) con fecha 21 de agosto, se llevó a cabo el cálculo de la altura significativa de ola a la entrada del puerto, para la situación de pleamar y distintas condiciones de viento, a partir de la información suministrada sobre el clima de olas en aguas profundas. Para ello, se efectuó la propagación de las olas hasta las cercanías de la costa (zona I) y, luego, a lo largo del interior de la caleta (zona II). Esto significó un adelanto respecto de las tareas comprometidas contractualmente, que sólo preveían el cálculo de transformación de olas en la zona I.

Los cálculos en el interior de la caleta se hicieron, para aguas altas, utilizando el modelo teórico de la teoría de rayos. Esto es admisible aún en la zona II por dos razones:

- a) Las olas tienden a propagarse desde la caleta hacia la restinga, debido al fenómeno de refracción, de modo que las únicas olas que llegan hasta la boca del puerto son las que penetran francamente a través de la boca de la caleta.
- b) Para situaciones de aguas altas, el cambio singular de profundidad que representa la restinga es lo suficientemente pequeño como para no producir efectos significativos de reflexión de olas.

En esta segunda etapa, se implementó el modelo para el estudio de la agitación en el interior del puerto (zona III) a construirse en la primera fase (250 x 250 metros). Obviamente, en esta zona son significativos tanto los fenómenos de reflexión como los de difracción de olas, de modo que se utilizó el modelo teórico de Berkhoff.

Adicionalmente, se implementó el modelo para la zona II (caleta), destinado a simular las situaciones de aguas intermedias y bajas, en las cuales la utilización del modelo de rayos es cuestionable. Aún no pudieron efectuarse corridas de prueba por limitaciones en los equipos de computación, tal como se explica en la nota de elevación.

De esta manera, se da cumplimiento a lo establecido en el Cronograma de Tareas.

2 MODELO MATEMATICO

Tal como se comentó en la sección anterior, se utilizó el modelo matemático completo de transformación de olas, debido a Berkhoff [1].

Este modelo contempla los efectos combinados de refracción, reflexión y difracción de olas. Está plasmado en una ecuación diferencial elíptica, cuya resolución se llevó a cabo por un método numérico mixto: elementos finitos en la zona de estudio y elementos de contorno en la zona exterior. Fue implementado en el programa computacional DIFRAC [2,3,4,5]. Los detalles técnicos se presentan en el Anexo I.

3 AGITACION EN EL INTERIOR DEL PUERTO - FASE I

3.1 RED DE CALCULO

La red de elementos finitos para el interior del puerto fue construida utilizando el generador automático de redes en dos dimensiones ENREDO, versión 6.1, desarrollado en el Centro Atómico Bariloche (Comisión Nacional de Energía Atómica, CNEA).

Se partió de una red regular de 330 X 310 metros, dividida en elementos triangulares trinodales. Esta fue modificada hasta obtener la geometría deseada.

La elección del paso de malla se basó en el criterio de garantizar la cantidad de nodos (N) mínima necesaria para la representación precisa de las olas, $N \geq 6$. Utilizando la relación de dispersión de ondas linealizada,

$$\omega^2 = gk \tanh(kh)$$

donde:

$$\omega = 2\pi/T,$$

$$k = 2\pi/L,$$

T = período de la onda,

L = longitud de la onda,

h = profundidad en la cual la onda se propaga,

g = aceleración de la gravedad,

se calculó la longitud de onda de la ola en el puerto para un dado período de la ola y una dada profundidad dentro del puerto. Tomando períodos de 7, 10 y 15 segundos (valores representativos del rango práctico) y una profundidad de 14,14 metros (profundidad del puerto en la pleamar), se obtienen valores de longitud de onda de 66,6, 106,5 y 169,1 metros, respectivamente. En base a estos valores y al criterio establecido, se seleccionó un paso de malla de 5 metros.

La red final obtenida, mostrada en la Figura 3.1, está constituida por un total de 7289 elementos y 3766 nodos. Del total de nodos, 241 corresponden a los bordes, de los cuales 143 se ubican sobre el talud y 17 sobre la boca de entrada al puerto.

Fueron adjudicados valores de profundidad para cada elemento, correspondientes a la profundidad en el centro del elemento.

3.2 CONDICIONES DE BORDE

El modelo DIFRAC permite simular cuatro tipos de contornos para la región de estudio:

- i) Reflejante: refleja el total de la energía de ola incidente
- ii) Absorbente: absorbe una proporción especificada de la energía incidente
- iii) Transparente: absorbe totalmente la energía incidente
- iv) De radiación: Permite, al mismo tiempo, la entrada de las olas externas (que es la solicitación) y la radiación hacia el exterior de la zona de estudio

Para el presente problema, se efectuaron las siguientes identificaciones:

- a) Muelle: borde reflejante
- b) Talud: borde absorbente
- c) Boca del puerto: borde de radiación

3.3 PARAMETROS DE ENTRADA

Los parámetros que deben ser definidos para la ejecución del programa DIFRAC son:

- i) Características de la onda incidente: período, amplitud en la boca del puerto, ángulo de incidencia respecto de la entrada del puerto
- ii) Características del talud: coeficiente de absorción K_a
- iii) Características de la costa adyacente a la boca del puerto: coeficiente de reflexión K_r ($= 1 - K_a$)

3.4 ENSAYOS PRELIMINARES

3.4.1 Onda incidente

Dado que el modelo matemático de transformación de olas es lineal en la amplitud, los resultados no dependen de su valor absoluto. En consecuencia, se tomó un valor unitario para la amplitud de la onda incidente, de modo que los valores de amplitud calculados en el interior del puerto representan una proporción de aquélla.

En el PIA se presentaron cálculos de detalle de la ola incidente sobre la boca del puerto, en la situación de pleamar, para distintos casos estadísticamente significativos. En base a esos resultados, se tomaron como representativos, para los ensayos preliminares en el caso de pleamar, períodos (T) de 7, 10 y 15 segundos y un ángulo de incidencia normal (90 grados) a la boca del puerto.

3.4.2 Talud

En la Figura 3.2 se muestran curvas experimentales para el coeficiente de reflexión K_r de un talud, en función del parámetro de similitud $\xi = s/(H_i L_0)^{1/2}$, donde s es su pendiente, H_i la altura de la onda incidente y L_0 su longitud de onda en aguas profundas (Fuente: Shore Protection Manual, Volume I, Department of the Army, Corps of Engineers, Vicksburg, Mississippi, USA, 1984). Se observa que esta relación depende también de las características del material que compone el talud. Un análisis detallado de todos los factores intervinientes se presenta en el Anexo II.

Si bien con esta información se puede efectuar una estimación razonable del valor del coeficiente de reflexión del talud del puerto para las condiciones del problema (resulta un valor de K_a de alrededor de 0,40), se decidió, de todos modos, efectuar un estudio paramétrico en relación a la propiedad de absorción de los taludes, con el objetivo de analizar la sensibilidad de los resultados frente a cambios en ese parámetro.

Inicialmente, se utilizaron los valores 0 (reflexión total), 0,35, 0,50, 0,65 y 1 (absorción total). En función de los resultados obtenidos, que muestran que la mayor sensibilidad se da para coeficientes de absorción pequeños (según se comenta más abajo), se agregaron ensayos con 0,10 y 0,20.

3.4.3 Costa adyacente

La costa adyacente a la entrada del futuro puerto es una playa. En la Figura 3.2 se presenta una curva que permite estimar el coeficiente de absorción para esta situación (la correspondiente a playas de material suelto).

Utilizando la batimetría provista por el relevamiento llevado a cabo por el Servicio de Hidrografía Naval (SIHN), se levantaron varios perfiles transversales de la playa para caracterizar su pendiente. Estos se muestran en la Figura 3.3.

Con estos datos se obtuvo un coeficiente de reflexión K_r que varía entre 0,06 y 0,18, es decir, muy próximo a condiciones de absorción total (K_a alrededor de 1). En consecuencia, los ensayos preliminares se efectuaron considerando que la costa adyacente absorbe totalmente la energía de ola incidente.

No obstante, para analizar la sensibilidad de los resultados, se efectuó un ensayo adicional, para la ola de 10

segundos de período y un coeficiente de absorción del talud del puerto de 0,50, tomando un coeficiente de reflexión de la costa de 0,10.

3.4.4 Resultados

En primer lugar, se estudió el patrón de agitación general dentro del puerto, caracterizado por las líneas de isoamplitud. Se encontró que la línea de isoamplitud relativa 0,12 (12% de la amplitud de ola en la boca del puerto) constituye un buen valor de referencia, dada su extensión. Estos resultados, para los distintos períodos de ola y coeficientes de absorción del talud, se muestran en las figuras 3.4 a 3.24.

Se observa que, para todos los períodos de ola, el patrón de distribución de amplitudes sólo cambia suavemente cuando la absorción de energía por el talud varía entre 35 y 100%. El cambio es un poco más acentuado cuando el coeficiente de absorción disminuye hasta el 10%, haciéndose brusco desde allí hasta llegar a 0.

En segundo lugar, se determinaron las zonas en el interior del puerto donde se alcanzan las amplitudes máximas, de modo de representar la variación de esa amplitud en función del coeficiente de absorción del talud, para cada uno de los períodos de ola considerados.

Con vistas a ubicar las regiones de máxima amplitud, fueron identificados los nodos de la red de cálculo que presentaban amplitudes relativas superiores a 0,25, para cada uno de los ensayos. De esta manera se hallaron seis regiones (Figura 3.25): una localizada en el la zona del muelle (A); cuatro en la zona de maniobra de barcos (B, C, D y E), es decir, en la zona media del puerto; y una en el talud adyacente a la entrada del puerto (F).

Las figuras 3.26 a 3.31 presentan las amplitudes relativas máximas por región, para cada período de ola, en función del coeficiente de absorción del talud. Para todos los casos se observa una disminución brusca cuando el coeficiente de absorción varía entre 0 y 0,10. A partir de allí, las tendencias de variación, significativamente más suaves, cambian conforme el período de la ola, con excepción de la región F (región del talud de entrada), donde la tendencia general es de disminución de la amplitud pico con el aumento de absorción de energía por el talud.

Para la ola de 7 segundos (Figuras 3.32), los máximos por región decrecen al variar la absorción desde 0 hasta 35%, manteniéndose prácticamente inalterados a partir de ahí, salvo en las regiones A y E, donde hay un pequeño aumento de amplitud, que no alcanza 0,05 cuando la pérdida de energía en el talud es total ($K_a = 1$).

Para las olas de 10 y 15 segundos de período, hay un aumento

en la amplitud máxima por región a partir de un determinado coeficiente de absorción. En el caso de la ola de 10 segundos (Figura 3.33), hay un aumento generalizado de amplitud a partir de 50% de absorción en adelante. Este alcanza el valor 0,2 en las regiones A, C, D y E, si se comparan las amplitudes para 35% de absorción de energía y para absorción total.

Para la ola de 15 segundos (Figura 3.34), el aumento de amplitud se da de modo claramente diferente en cada región. En la región A empieza a partir del 50% de absorción, habiendo un aumento (absoluto) de 0,09 en la amplitud relativa para el caso de absorción total, en comparación con la amplitud calculada con 35% de absorción. En las regiones B y D este aumento se verifica en los casos donde la absorción de la energía de la onda en el talud es mayor que 65%, y en ambas regiones es del orden de 0,05. En la región C es donde ocurre el mayor aumento (del orden de 0,2), a partir de 35% de absorción. Finalmente, en la región E sólo hay aumento de amplitud para el caso de absorción total de energía por el talud, de apenas 0,02.

La Tabla 3.1 presenta, para cada región, la máxima amplitud relativa alcanzada y las condiciones correspondientes, caracterizadas por el período de ola y el coeficiente de absorción, para el cual sólo se consideró el rango entre 0,35 y 0,65, que es el considerado de interés práctico. Se observa que la región F es la única que muestra una tendencia resonante (amplificación de la altura de ola) para el rango de valores de K_a considerados. Para todas las otras regiones, la amplitud relativa máxima nunca supera el 35%.

Tal como se comentó anteriormente, se efectuó un ensayo adicional incrementando el coeficiente de reflexión de la playa adyacente a la entrada del puerto desde 0 a 0,10, para una ola de 10 segundos de período y un coeficiente de absorción del talud del puerto de 0,50. Se obtuvo una diferencia máxima de amplitud relativa de 0.06 respecto a reflexión 0. El valor medio de esta diferencia resultó ser de 0,003, con una desviación estandar de 0,153. En la Figura 3.35 se presenta la amplitud máxima relativa para cada una de las 6 zonas de máxima amplitud, comparándosela con el caso de absorción total. Estos resultados muestran que, efectivamente, existe poca sensibilidad a cambios en el coeficiente de reflexión de la costa, para el rango de valores considerado.

Finalmente, en la Figura 3.36 se presenta, a título ilustrativo, el patrón de agitación completo para el caso de un período de ola de 10 segundos y un coeficiente de absorción del talud de 0,50.

TABLA 3.1

AMPLITUD RELATIVA MAXIMA EN EL INTERIOR DEL PUERTO - FASE I

REGION	AMPLITUD (%)	T (seg)	Ka
A	34	15	0.65
B	26	15	0.65
C	36	15	0.65
D	33	7	0.35
E	26	7	0.35
F	139	15	0.35

4 PROPAGACION A LO LARGO DE LA CALETA

Tal como se comentó en la Introducción (capítulo 1), el cálculo de la propagación de las olas a lo largo de la caleta mediante el modelo de rayos es aceptable para condiciones de pleamar, pero pierde validez a medida que el nivel de agua disminuye debido, principalmente, a los efectos de reflexión parcial (o total en la situación extrema) sobre la restinga.

En este capítulo se presenta la implementación del modelo completo de Berkhoff a la zona de la caleta (zona II), destinado a simular la propagación de las olas en aguas medias y bajas.

4.1 RED DE CALCULO

La red de cálculo fue construida mediante una técnica de triangularización automática de los contornos de la caleta, que también está implementada en el programa ENREDO.

La red final obtenida (Figura 4.1) tiene un total de 28.513 elementos y 14.553 nodos, con 591 nodos de borde, de los cuales 87 pertenecen a la frontera de radiación y 36 al borde transparente (según se aclara más abajo). El paso de malla resultante es de 7 metros en valor medio, respetándose así el criterio mencionado en el capítulo 3 relativo a la cantidad mínima de nodos necesaria para representar adecuadamente las ondas.

Se dispuso de los datos de profundidad relevados por el Servicio de Hidrografía Naval (SIHN). Para asignar la profundidad asociada a cada elemento de la red, se utilizó un método de interpolación, consistente en promediar todas las profundidades correspondientes a puntos vecinos incluidos dentro de un círculo centrado en el centro de gravedad del elemento y de radio prefijado. La promediación se efectuó ponderando con la inversa de la distancia de cada punto al centro del elemento, es decir:

$$p_e = (p_1/d_1 + p_2/d_2 + \dots + p_n/d_n) / (1/d_1 + 1/d_2 + \dots + 1/d_n),$$

donde:

p_e = profundidad en el centro del elemento e ;
 p_j = profundidad en el punto j ;

d_j = distancia desde el punto j al centro del elemento e .

Este procedimiento se implementó en un programa computacional. Se tomó un radio de 15 metros. En caso de no encontrar ningún punto batimétrico dentro del círculo de búsqueda, el radio se aumentaba en 5 metros, hasta encontrar al menos un punto.

Para representar el futuro canal de acceso al puerto, las profundidades asociadas a los elementos correspondientes fueron adjudicadas directamente, sin interpolación.

4.2 CONDICIONES DE BORDE

Los bordes del dominio de cálculo se trataron de la siguiente manera:

- a) Boca de la caleta: contorno de radiación
- b) Borde de la restinga: contorno parcialmente reflejante
- c) Boca del puerto: contorno transparente

CONCLUSIONES

De los ensayos efectuados para simular la agitación en el interior del puerto (Fase I), para la condición de pleamar (que es la más crítica), pueden extraerse las siguientes conclusiones:

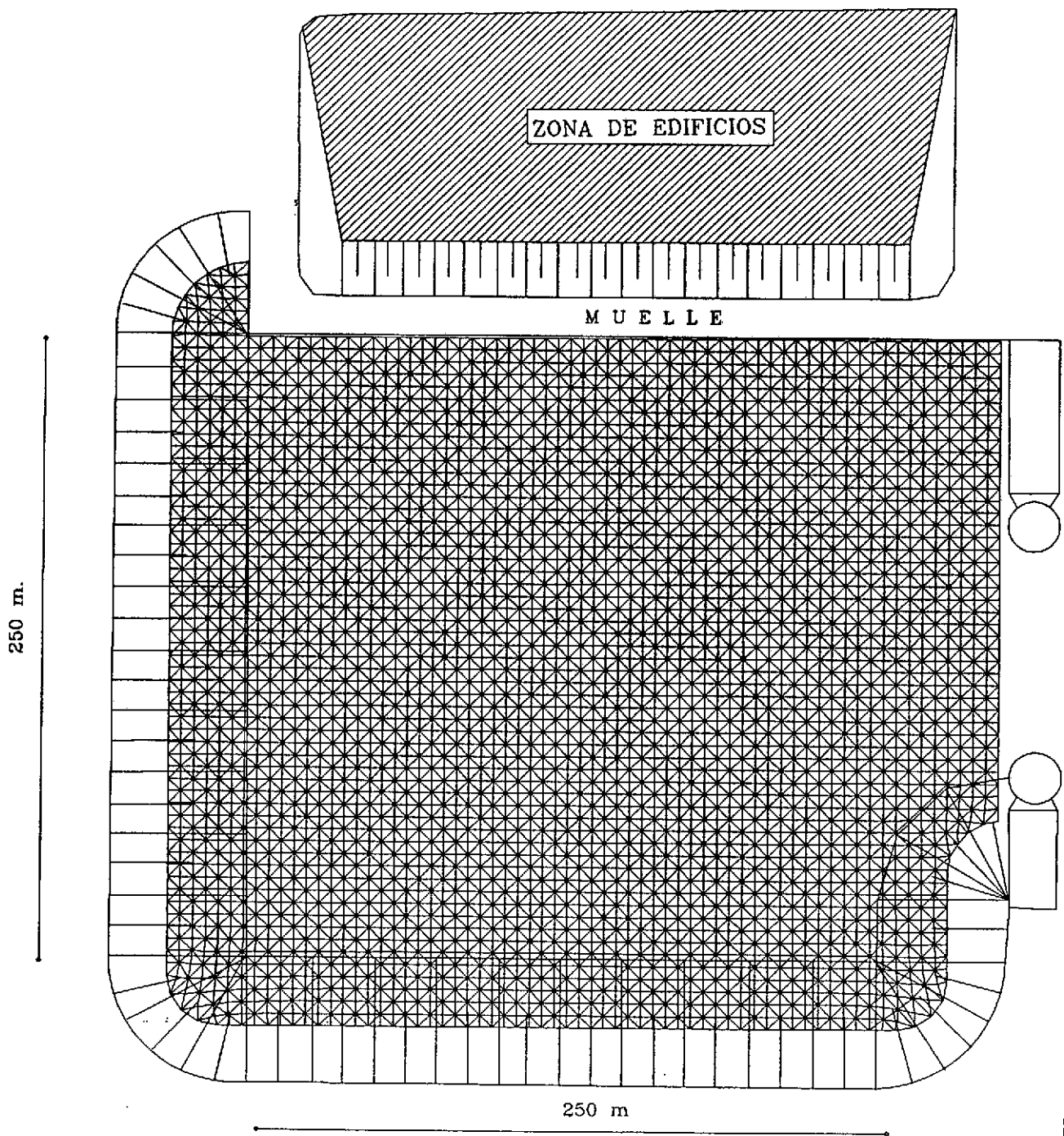
- a) Se identificaron 6 zonas críticas donde las amplitudes relativas de las olas son máximas.
- b) Para el rango práctico de coeficientes de absorción del talud del puerto, sólo una de las 6 zonas (F) muestra una tendencia resonante, es decir, presenta amplitudes algo mayores a la de la onda incidente sobre la boca del puerto.
- c) Para las otras 5 zonas, las amplitudes máximas nunca superan el 35% del valor de la ola incidente.
- d) Los resultados son relativamente poco sensibles a variaciones en el coeficiente de absorción del talud del puerto, dentro del rango de valores prácticos.

Tal como se explicó en la introducción, aún no se efectuaron ensayos preliminares en la zona de la caleta (zona II) por limitaciones en los equipos de computación, las cuales debían ser superadas en base a adquisiciones previstas en el Convenio y no realizadas por dificultades administrativas.

REFERENCIAS

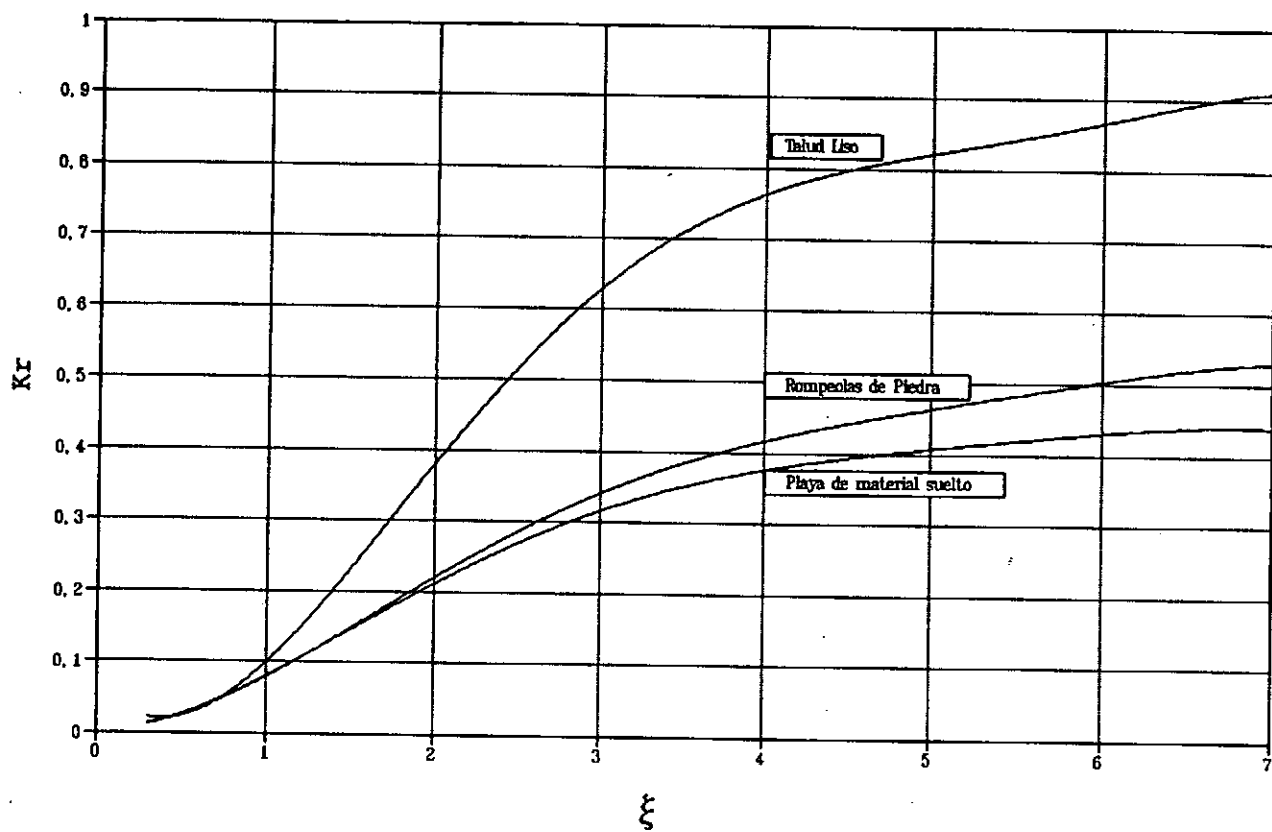
- 1 Berkhoff, J.C.W. (1976), "Mathematical models for simple harmonic linear water waves. Wave diffraction and refraction", Delft Hydraulics Laboratory, Publication N° 163
- 2 Vionnet, C., Menéndez, A.N. (1986), "Simulación numérica de olas para el diseño de puertos", XII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, San Pablo, Brasil
- 3 Vionnet, C. (1987), "Difracción-refracción combinadas en ondas de agua", Informe LHA-INCYTH 064-02-87
- 4 Vionnet, C., Menéndez, A.N. (1987), "Difracción-refracción combinadas para ondas de agua. Cálculo utilizando elementos finitos híbridos. Incluye contornos absorbentes y amortiguamiento por fricción", 5º Encuentro Nacional de Investigadores y Usuarios del Método de los Elementos Finitos, ENIEF'87, Bariloche
- 5 Cavaliere, M.A., Menéndez, A.N., Castellano, R. (1992), "Estudio de las condiciones de agitación por oleaje en un puerto mediante simulación numérica", Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería, vol. 8, 4

FIGURAS



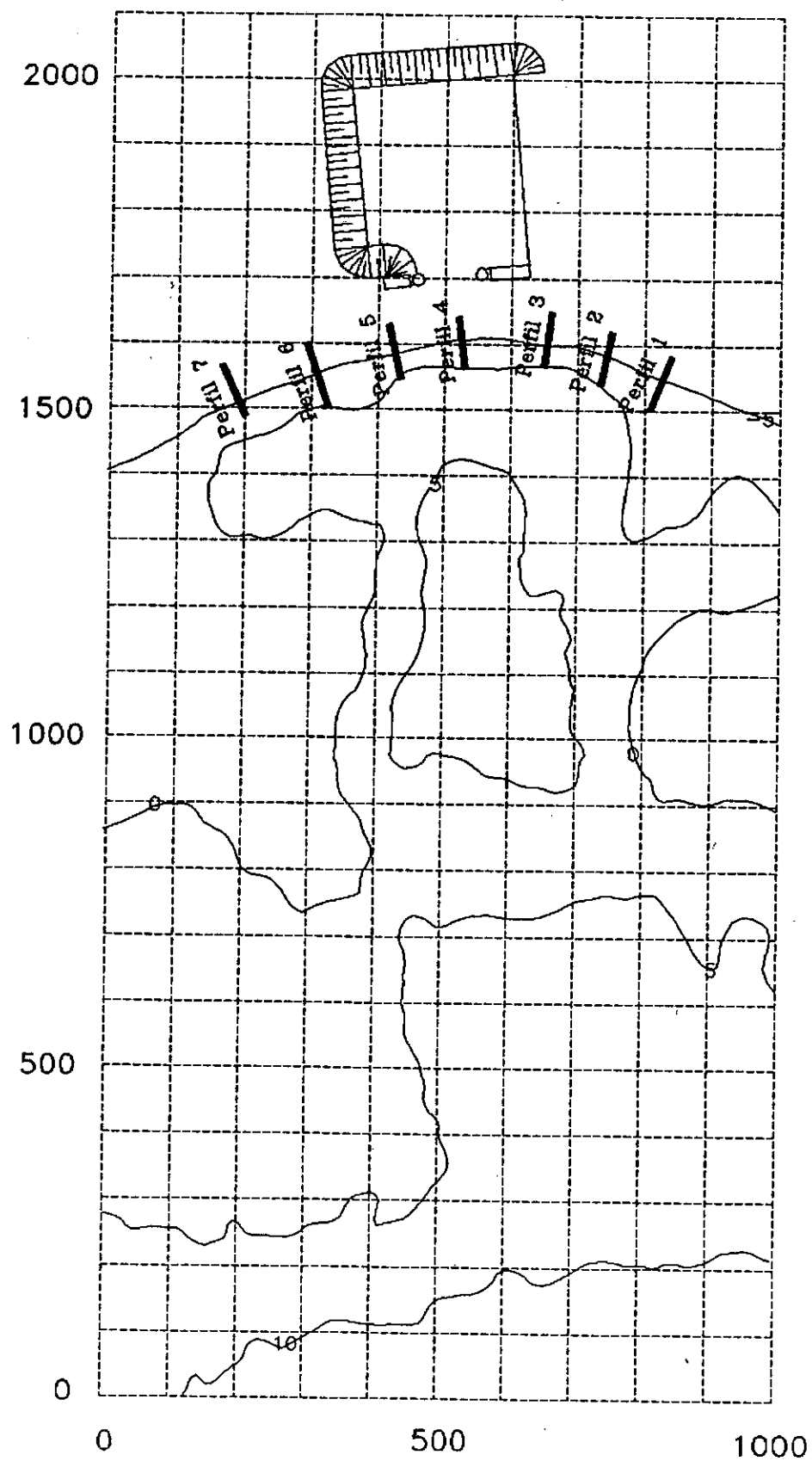
RED DE CALCULO PARA EL INTERIOR DEL PUERTO - FASE I

Figura 3.1



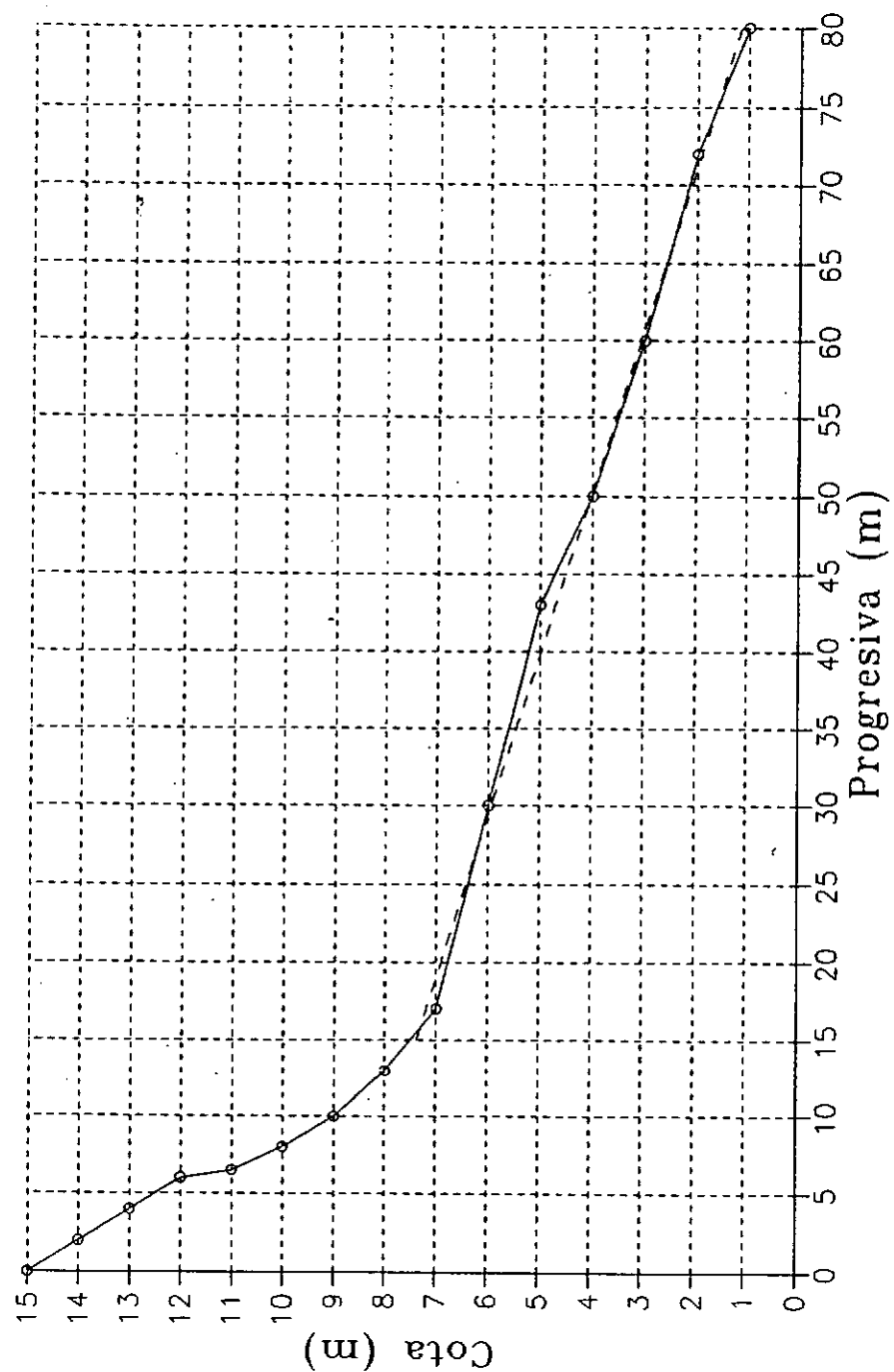
COEFICIENTE DE REFLEXION DE UN TALUD.

Figura 3.2

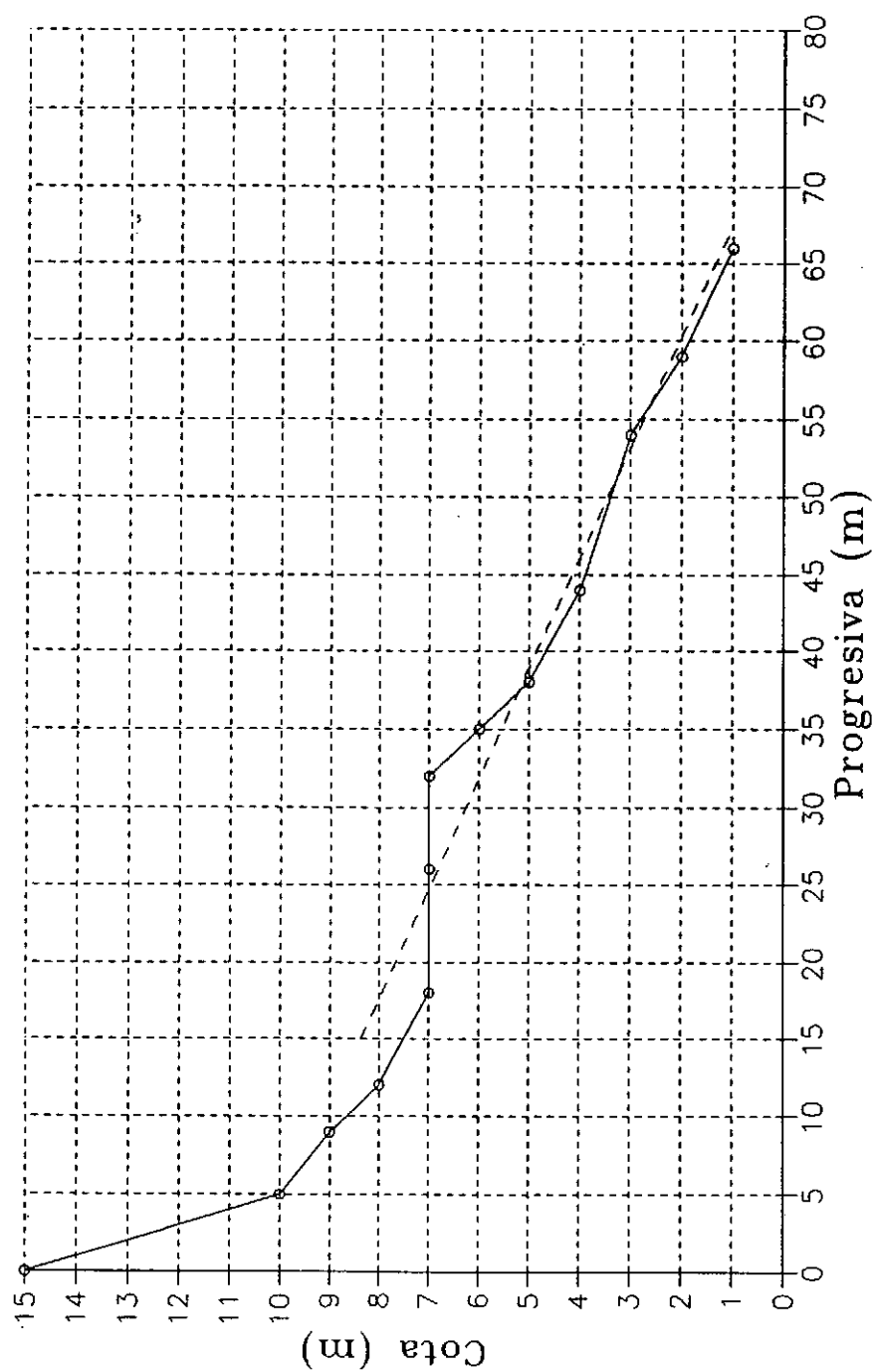


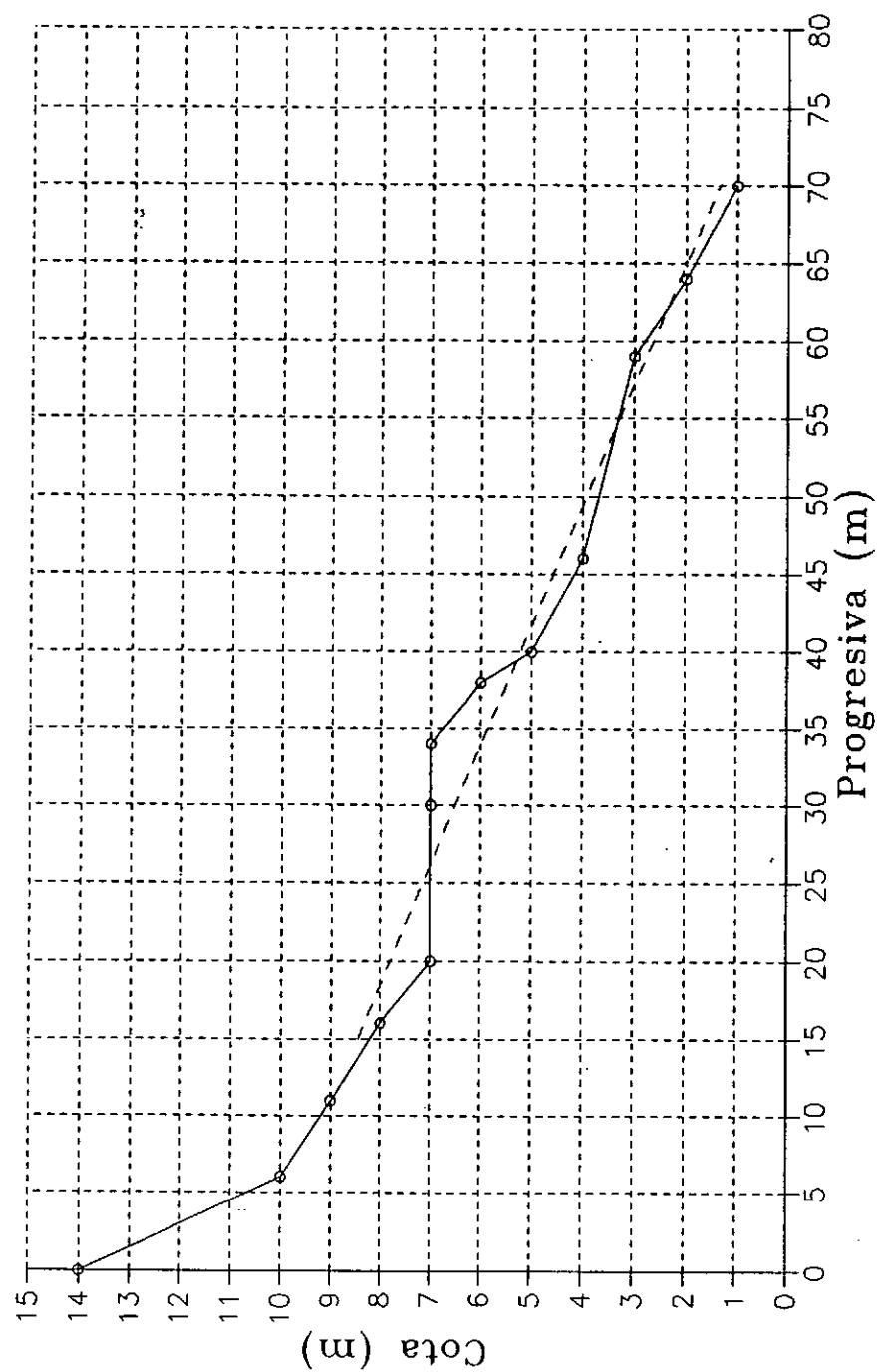
PERFILES DE PLAYA ADYACENTES A LA BOCA DE ENTRADA DEL PUERTO
Ubicacion de perfiles

Figura 3.3a

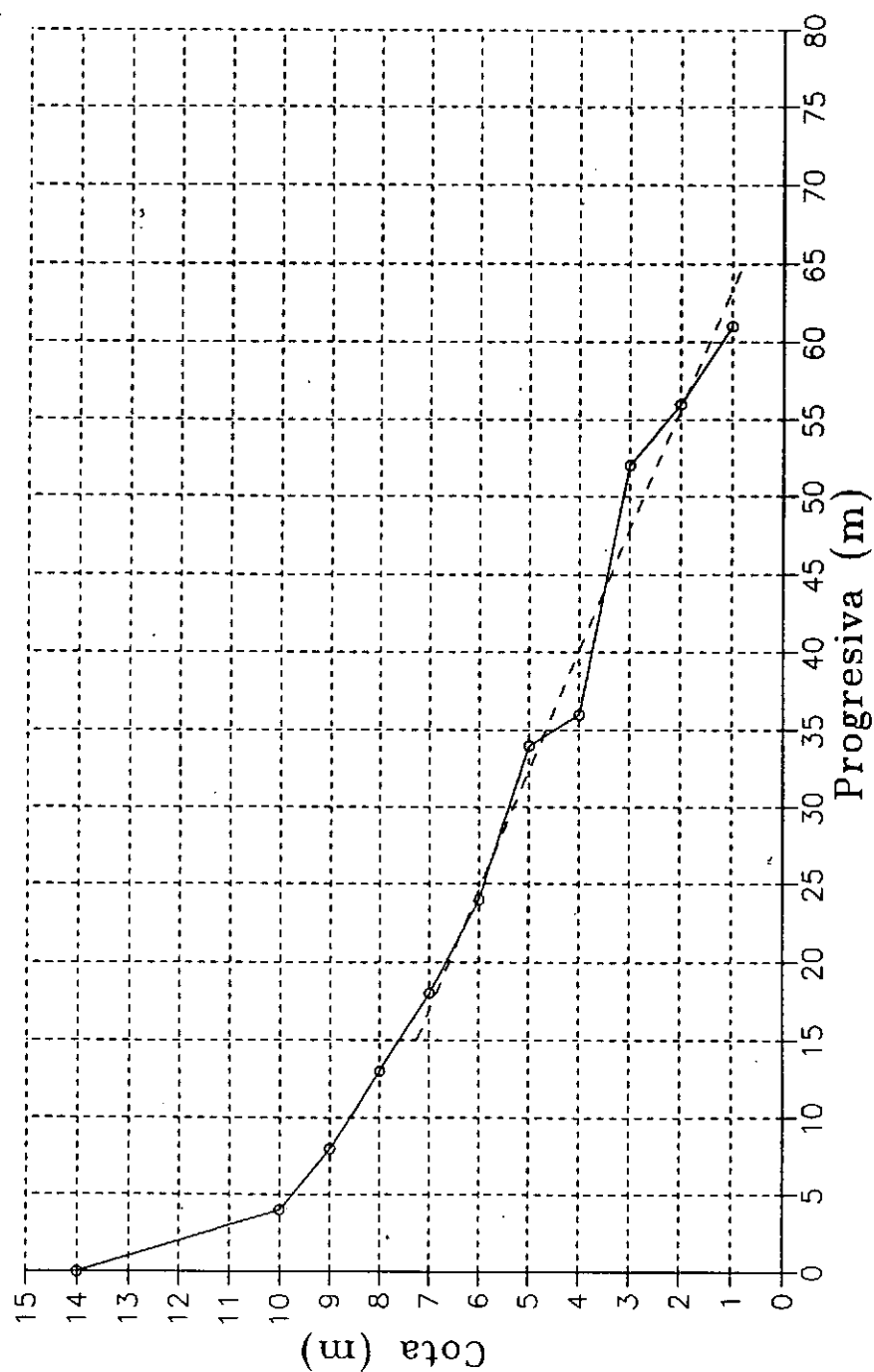


$y = -0.09598 * x + 8.82$
 Regresion lineal considerada entre 15 y 80 m.
 Pendiente resultante 1:10

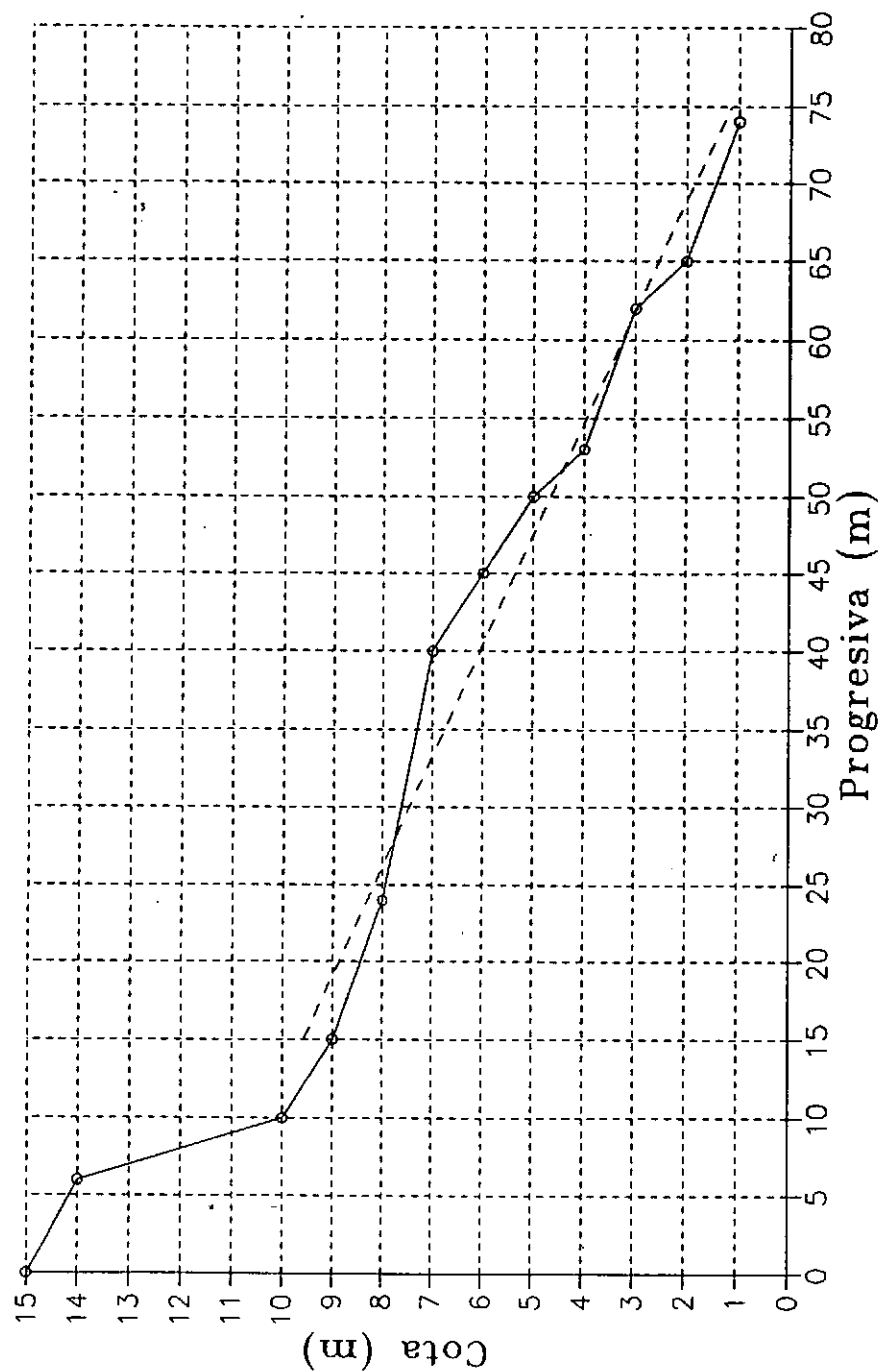




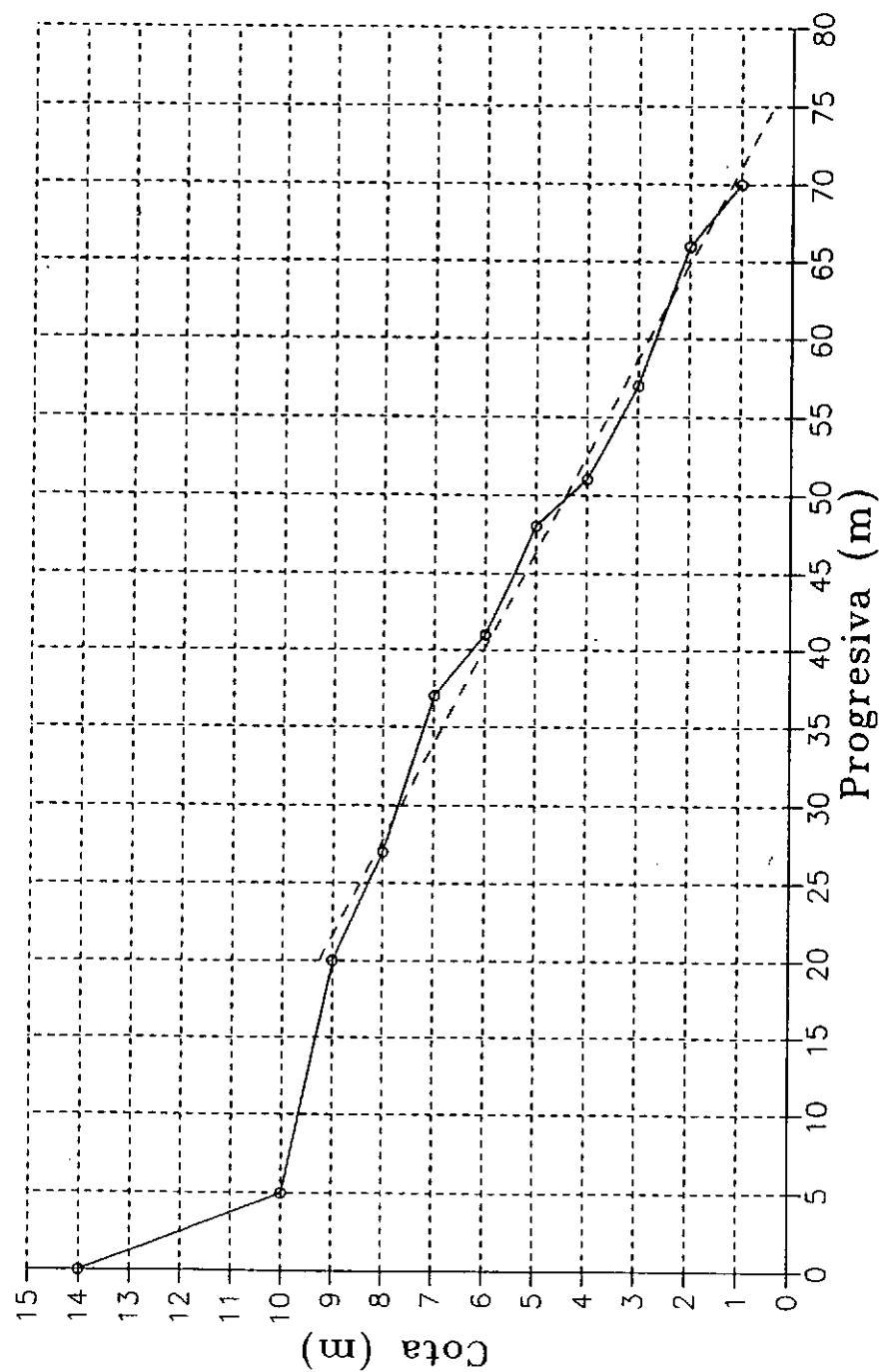
$y = -0.1290 * x + 10.38$
 Regresion lineal considerada entre 15 y 70 m.
 Pendiente resultante 1:7.75



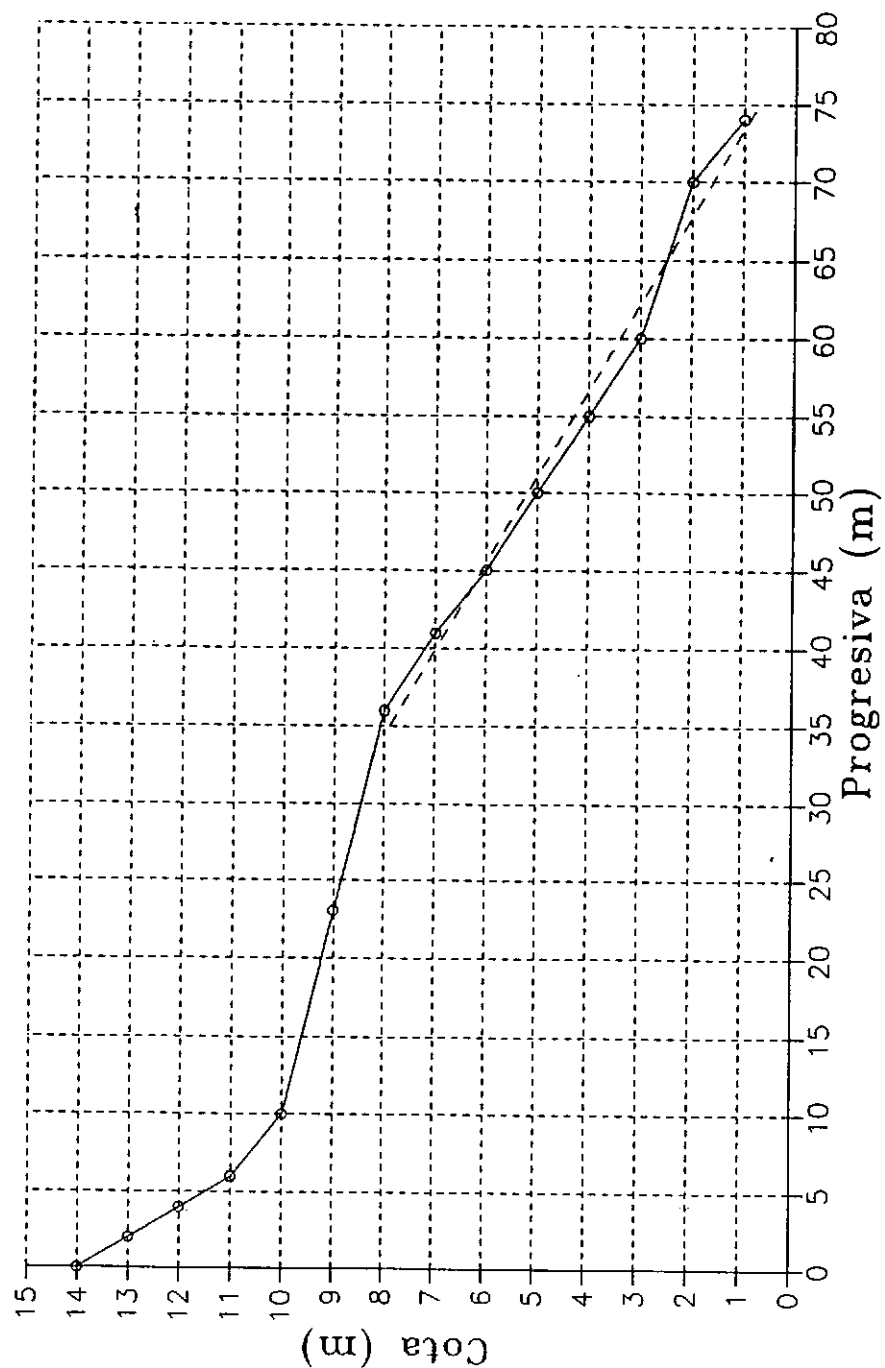
$y = -0.1292 * x + 9.18$
 Regresion lineal considerada entre 15 y 70 m.
 Pendiente resultante 1:7.74



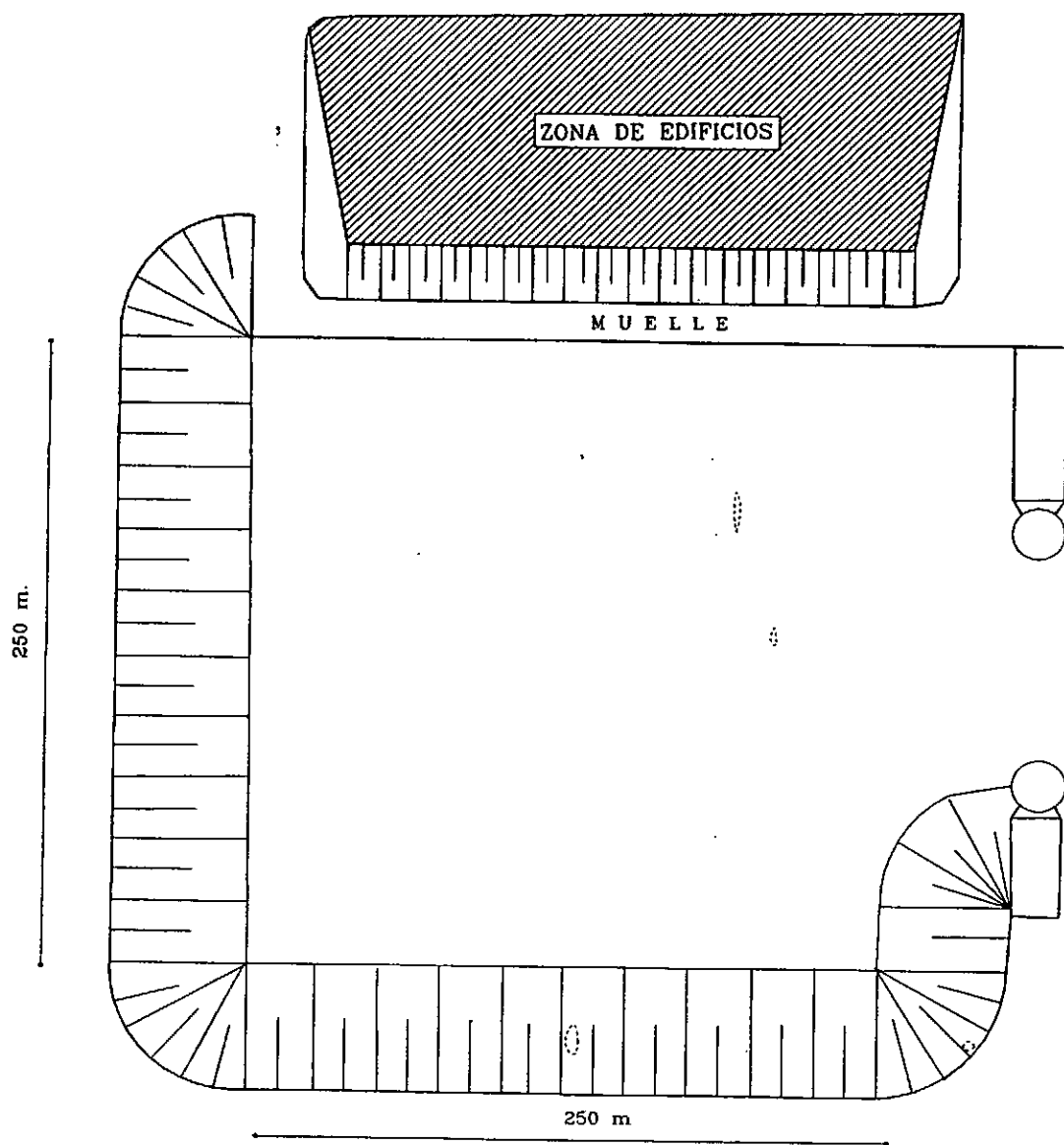
$y = -0.1404 * x + 11.67$
 Regresion lineal considerada entre 15 y 75 m.
 Pendiente resultante 1:7.12



$y = -0.1618 * x + 12.49$
 Regresion lineal considerada entre 20 y 75 m.
 Pendiente resultante 1:6.18



$y = -0.1796 * x + 14.18$
 Regresion lineal considerada entre 35 y 75 m.
 Pendiente resultante 1:5.56

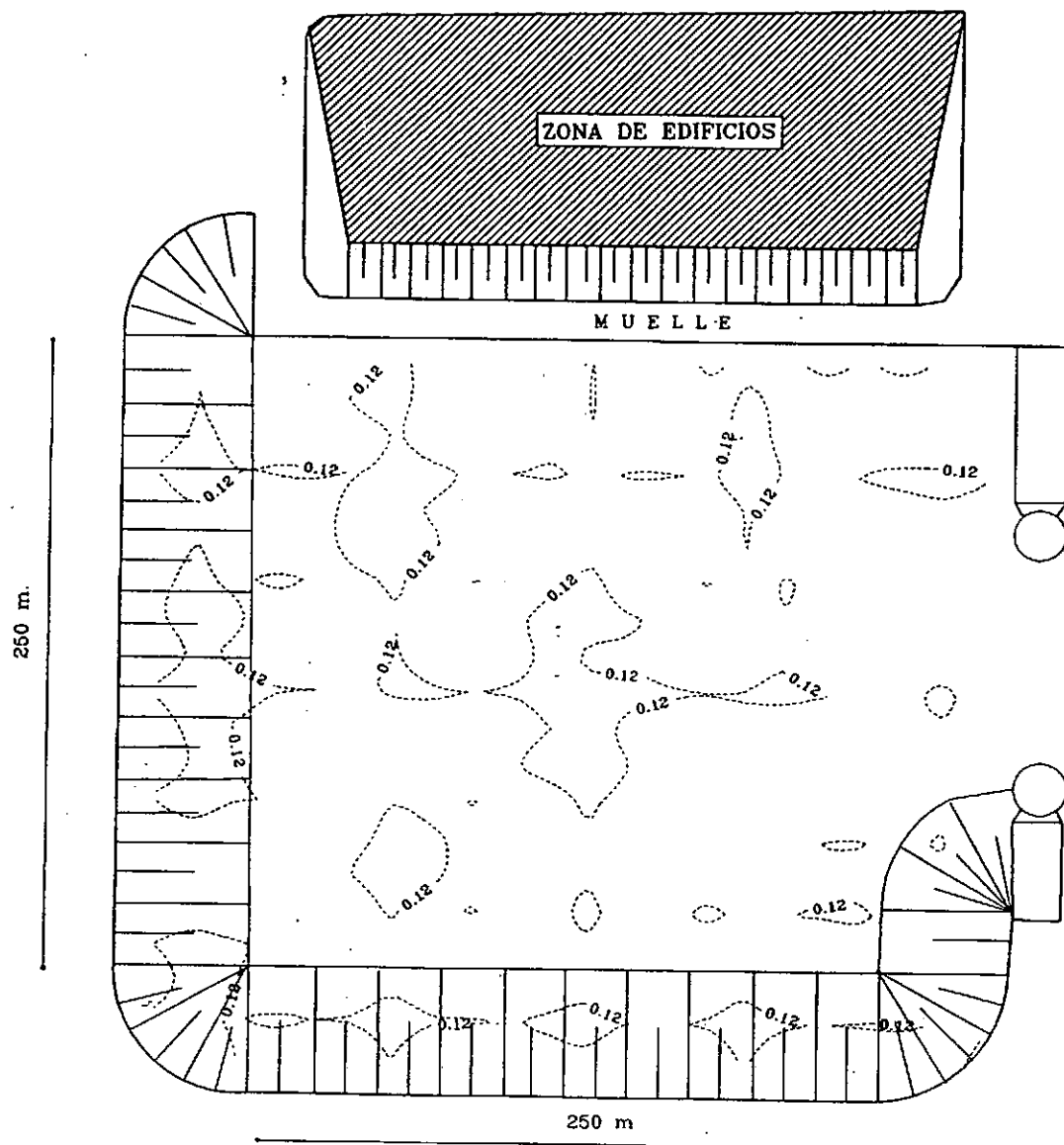


Periodo = 7 segundos

Coefficiente de absorcion = 0.00

CURVA DE ISOAMPLITUD RELATIVA DEL 12% PARA UN PERIODO DE 7
SEGUNDOS Y UN COEFICIENTE DE ABSORCION DEL TALUD DE 0.

Figura 3.4

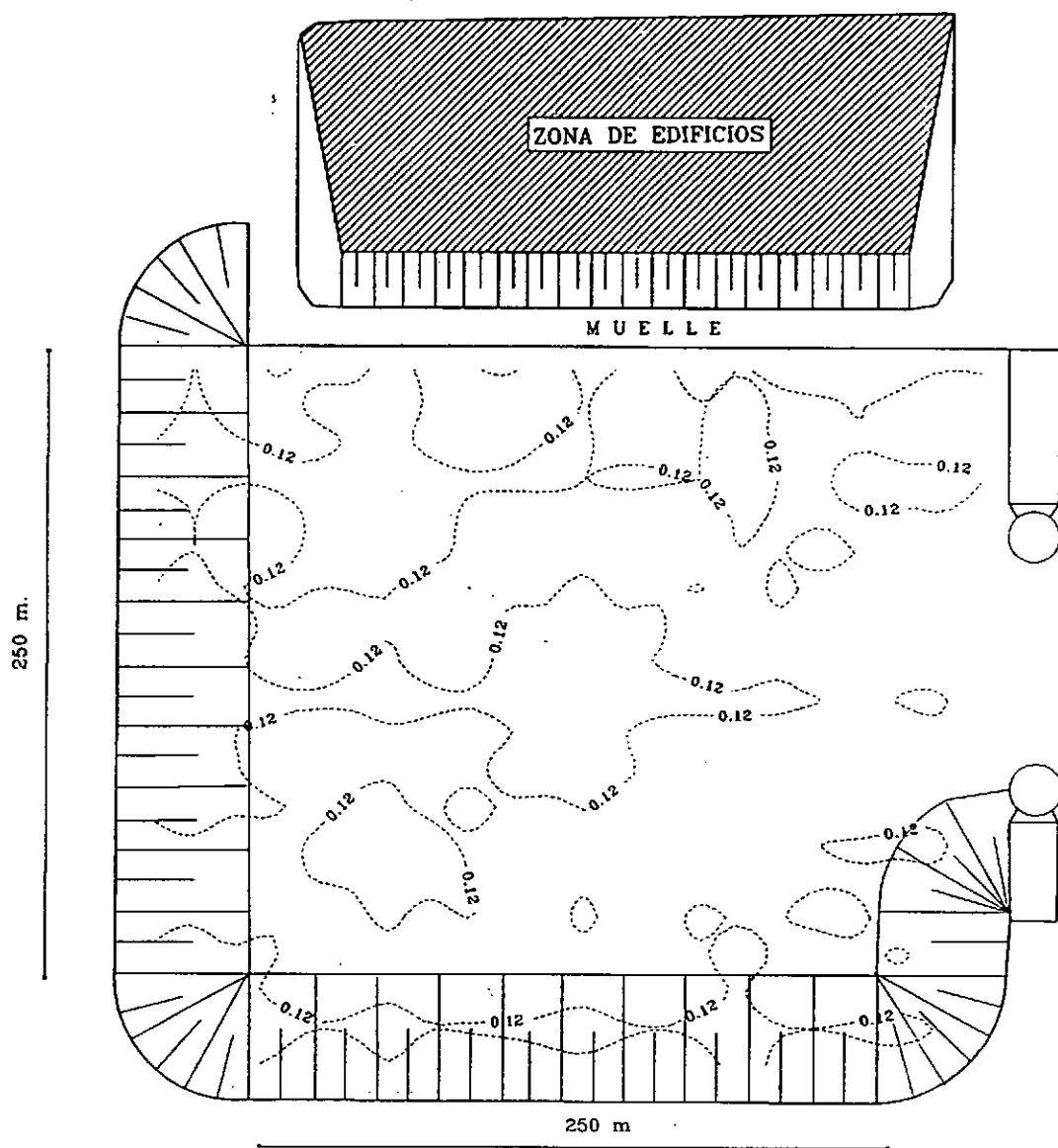


Periodo = 7 segundos

Coefficiente de absorcion = 0.10

CURVA DE ISOAMPLITUD RELATIVA DEL 12% PARA UN PERIODO DE 7 SEGUNDOS Y UN COEFICIENTE DE ABSORCION DEL TALUD DE 0.10.

Figura 3.5

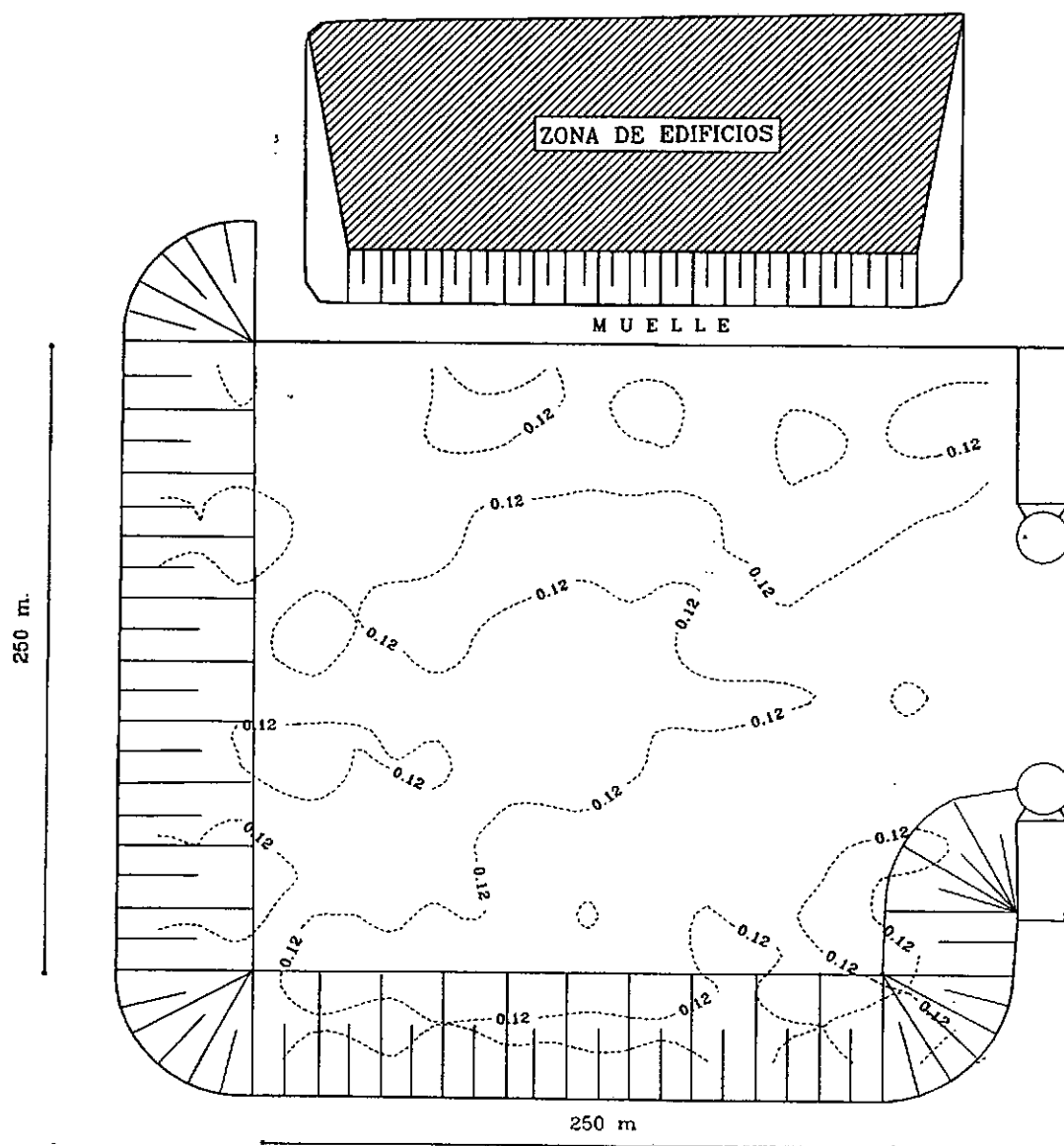


Periodo = 7 segundos

Coefficiente de absorcion = 0.20

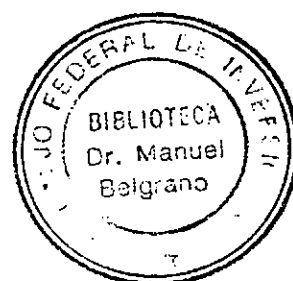
CURVA DE ISOAMPLITUD RELATIVA DEL 12% PARA UN PERIODO DE 7 SEGUNDOS Y UN COEFICIENTE DE ABSORCION DEL TALUD DE 0,20.

Figura 3.6



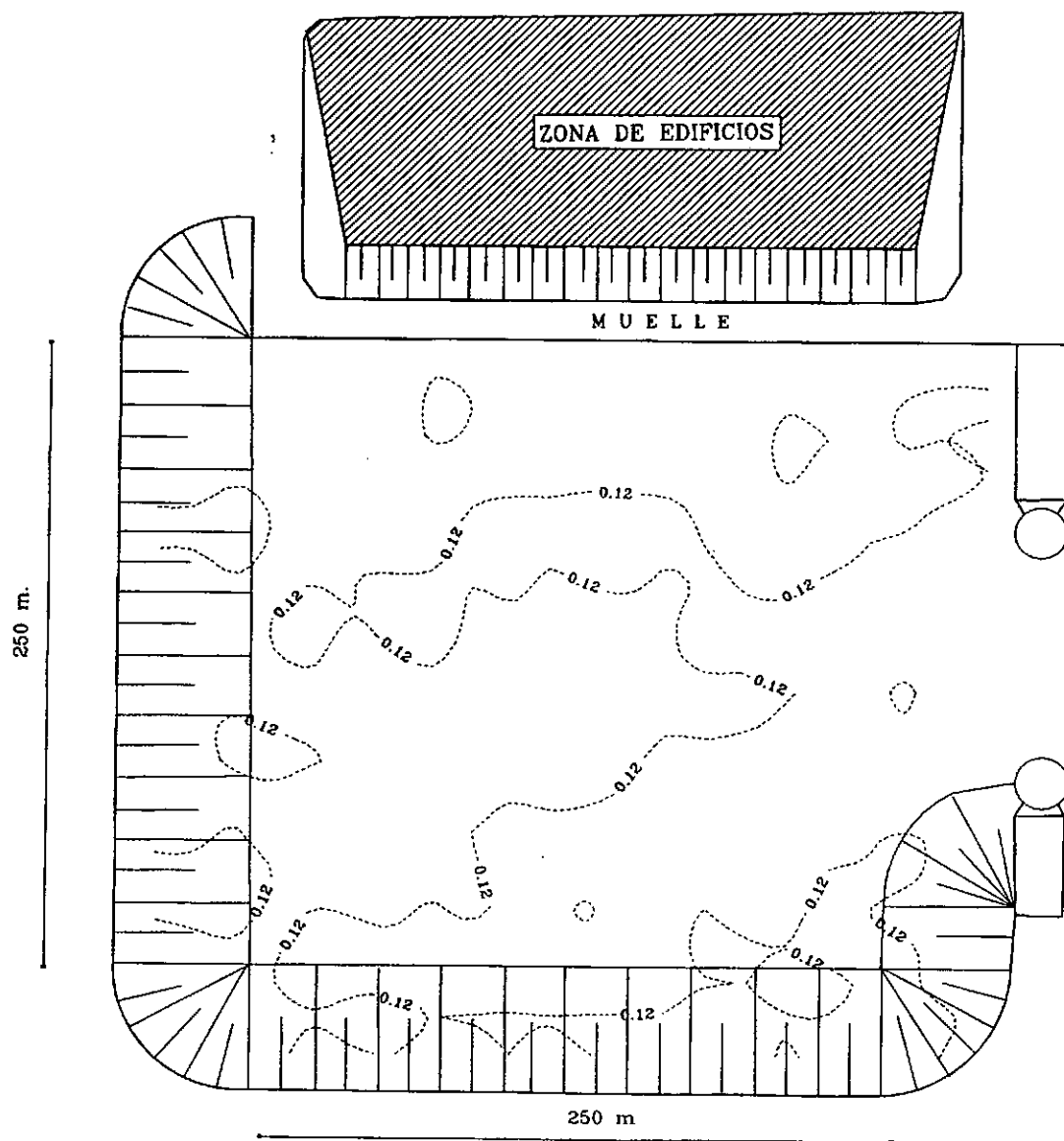
Periodo = 7 segundos

Coefficiente de absorcion = 0.35



CURVA DE ISOAMPLITUD RELATIVA DEL 12% PARA UN PERIODO DE 7 SEGUNDOS Y UN COEFICIENTE DE ABSORCION DEL TALUD DE 0,35.

Figura 3.7

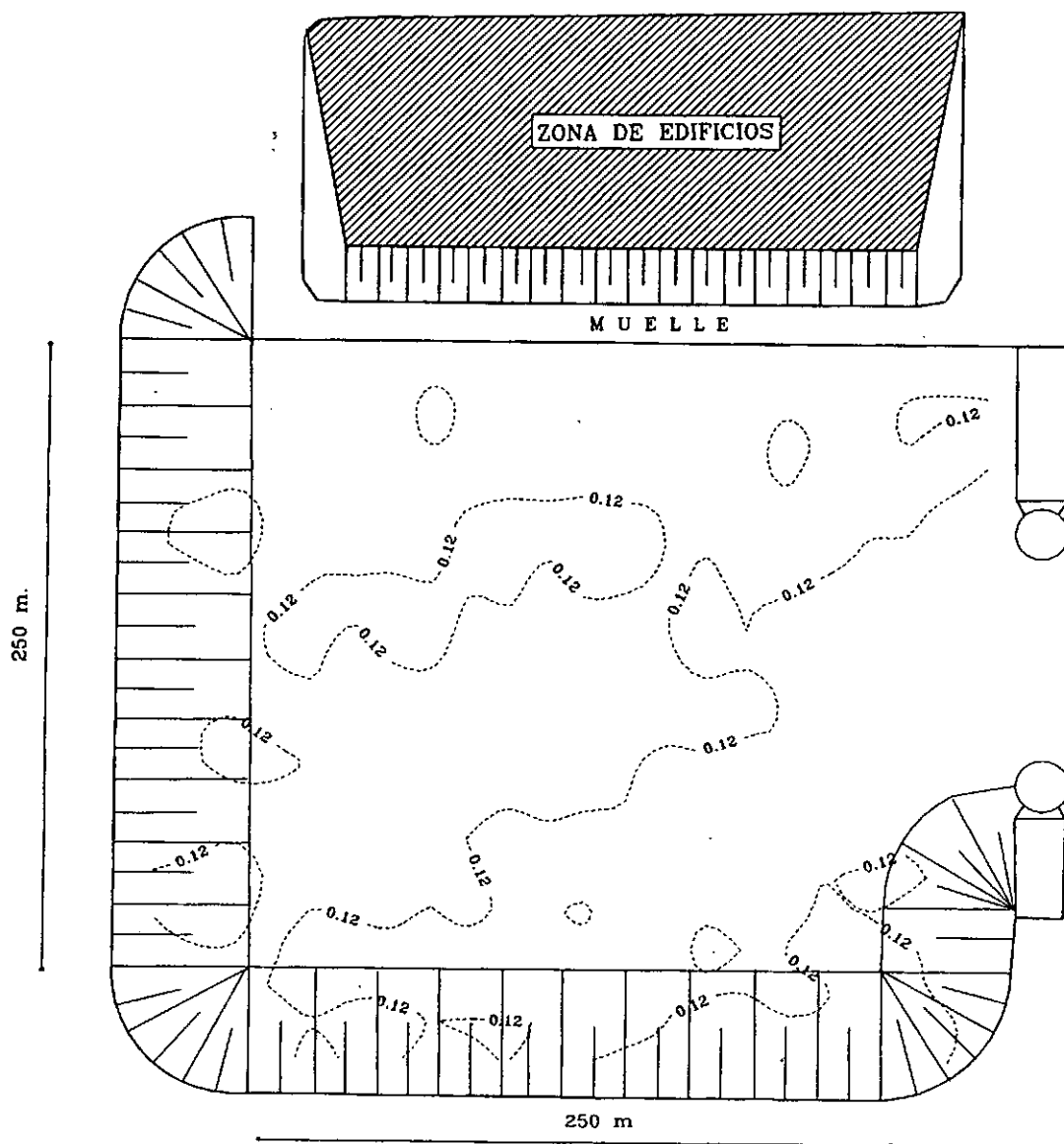


Periodo = 7 segundos

Coefficiente de absorcion = 0.50

CURVA DE ISOAMPLITUD RELATIVA DEL 12% PARA UN PERIODO DE 7 SEGUNDOS Y UN COEFICIENTE DE ABSORCION DEL TALUD DE 0,50.

Figura 3.8

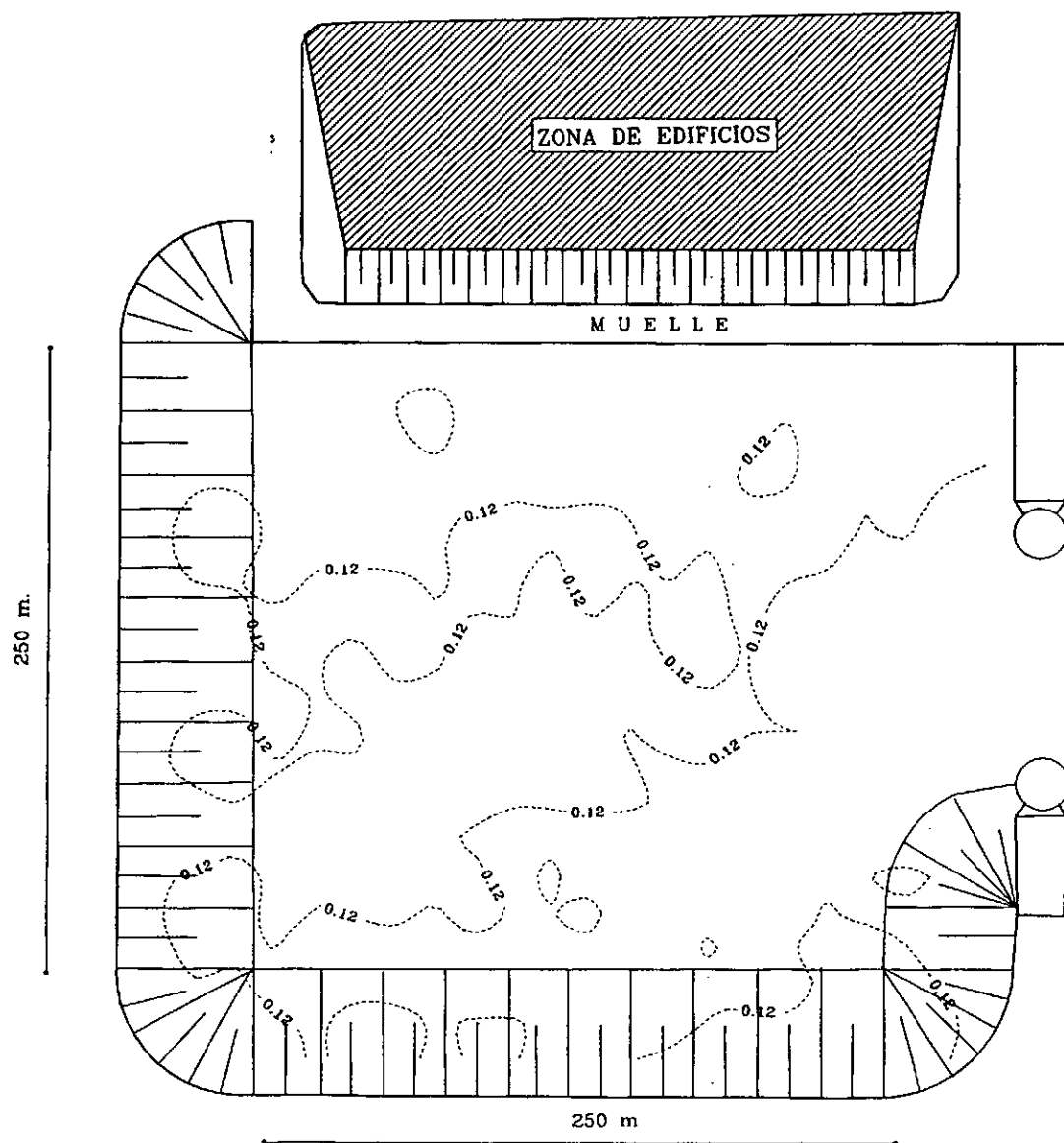


Periodo = 7 segundos

Coefficiente de absorcion = 0.65

CURVA DE ISOAMPLITUD RELATIVA DEL 12% PARA UN PERIODO DE 7 SEGUNDOS Y UN COEFICIENTE DE ABSORCION DEL TALUD DE 0.65.

Figura 3.9

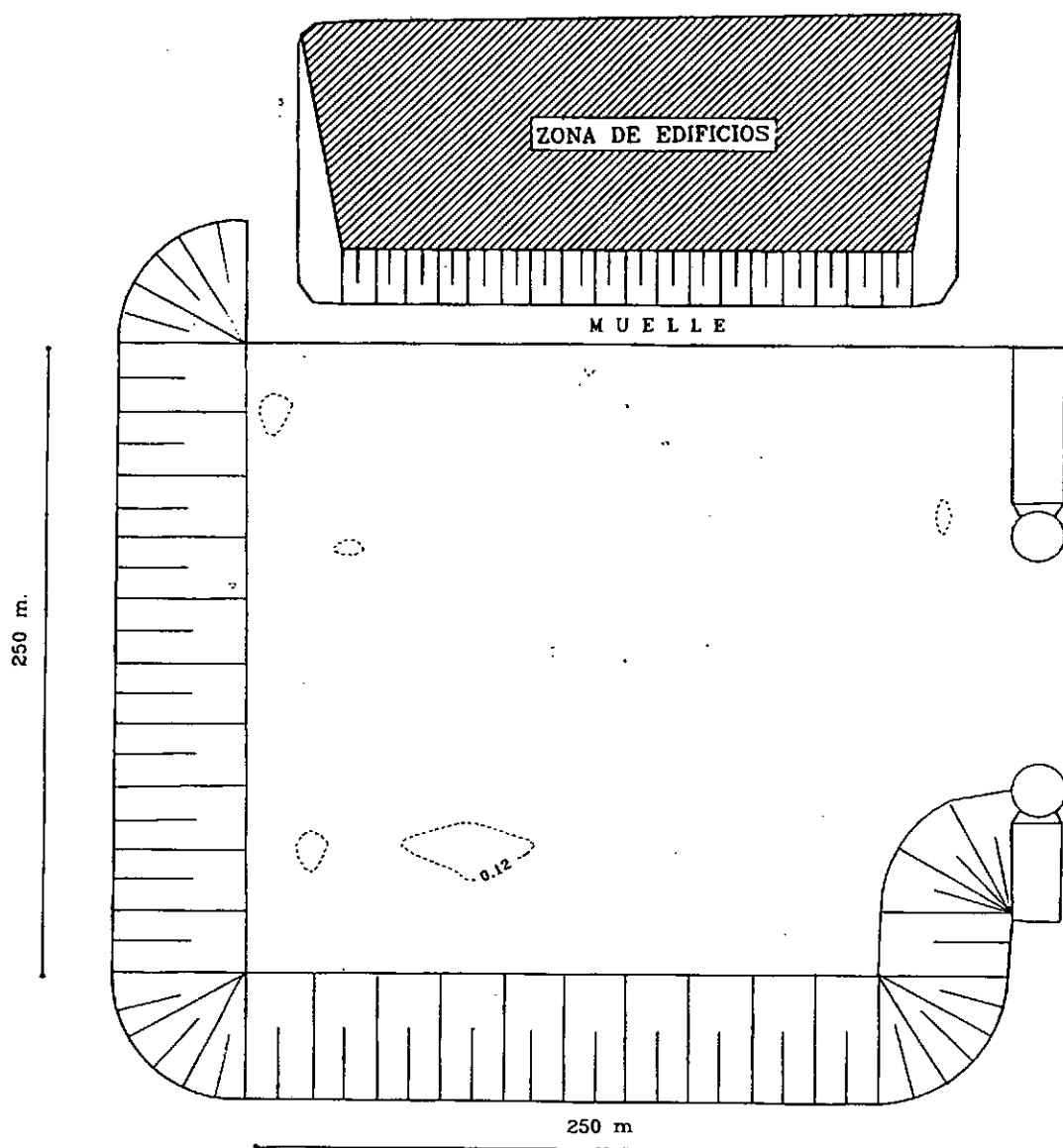


Periodo = 7 segundos

Coefficiente de absorcion = 1.00

CURVA DE ISOAMPLITUD RELATIVA DEL 12% PARA UN PERIODO DE 7 SEGUNDOS Y UN COEFICIENTE DE ABSORCION DEL TALUD DE 1.

Figura 3.10

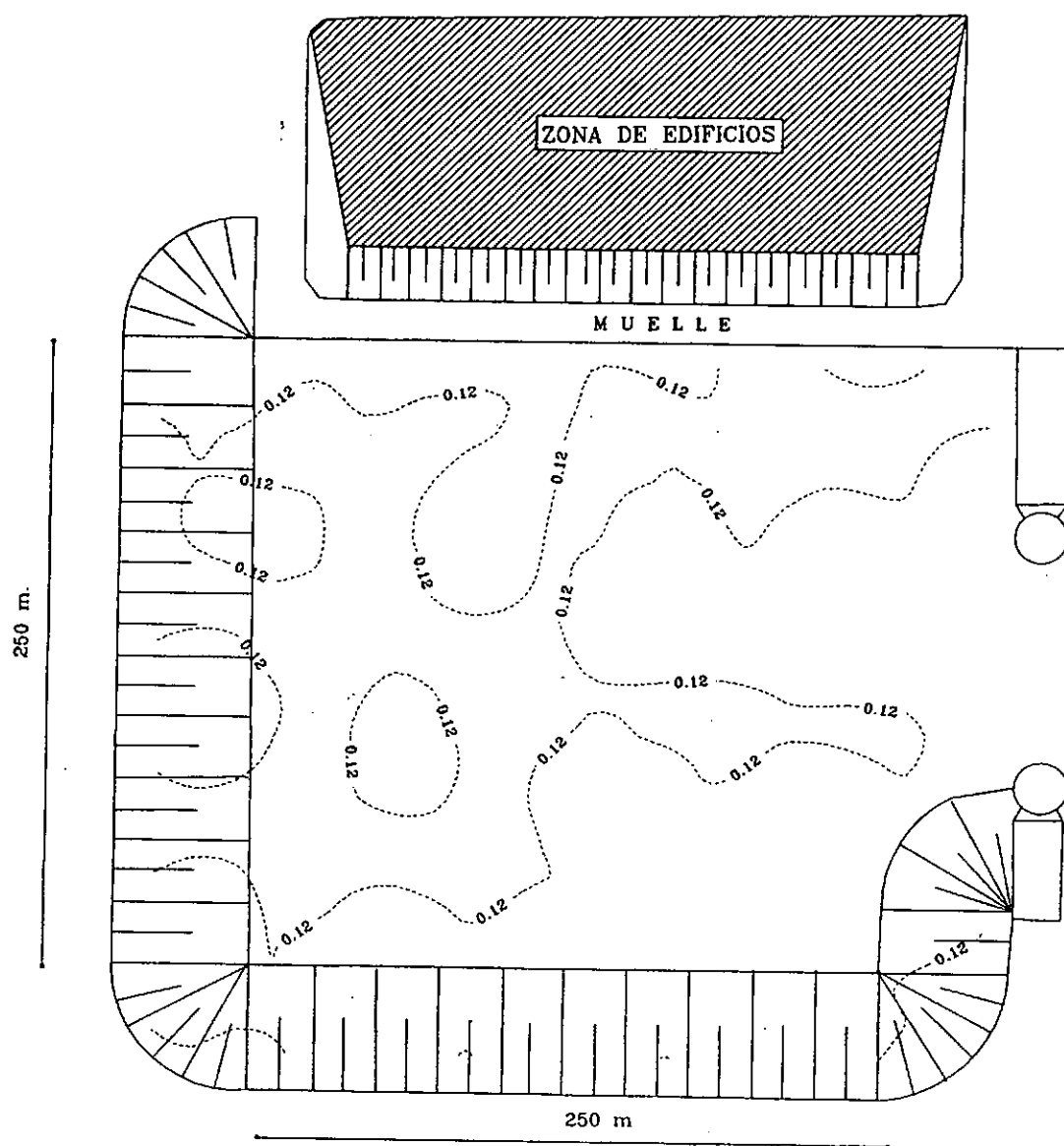


Periodo = 10 segundos

Coefficiente de absorcion = 0.00

CURVA DE ISOAMPLITUD RELATIVA DEL 12% PARA UN PERIODO DE 10 SEGUNDOS Y UN COEFICIENTE DE ABSORCION DEL TALUD DE 0.

Figura 3.11

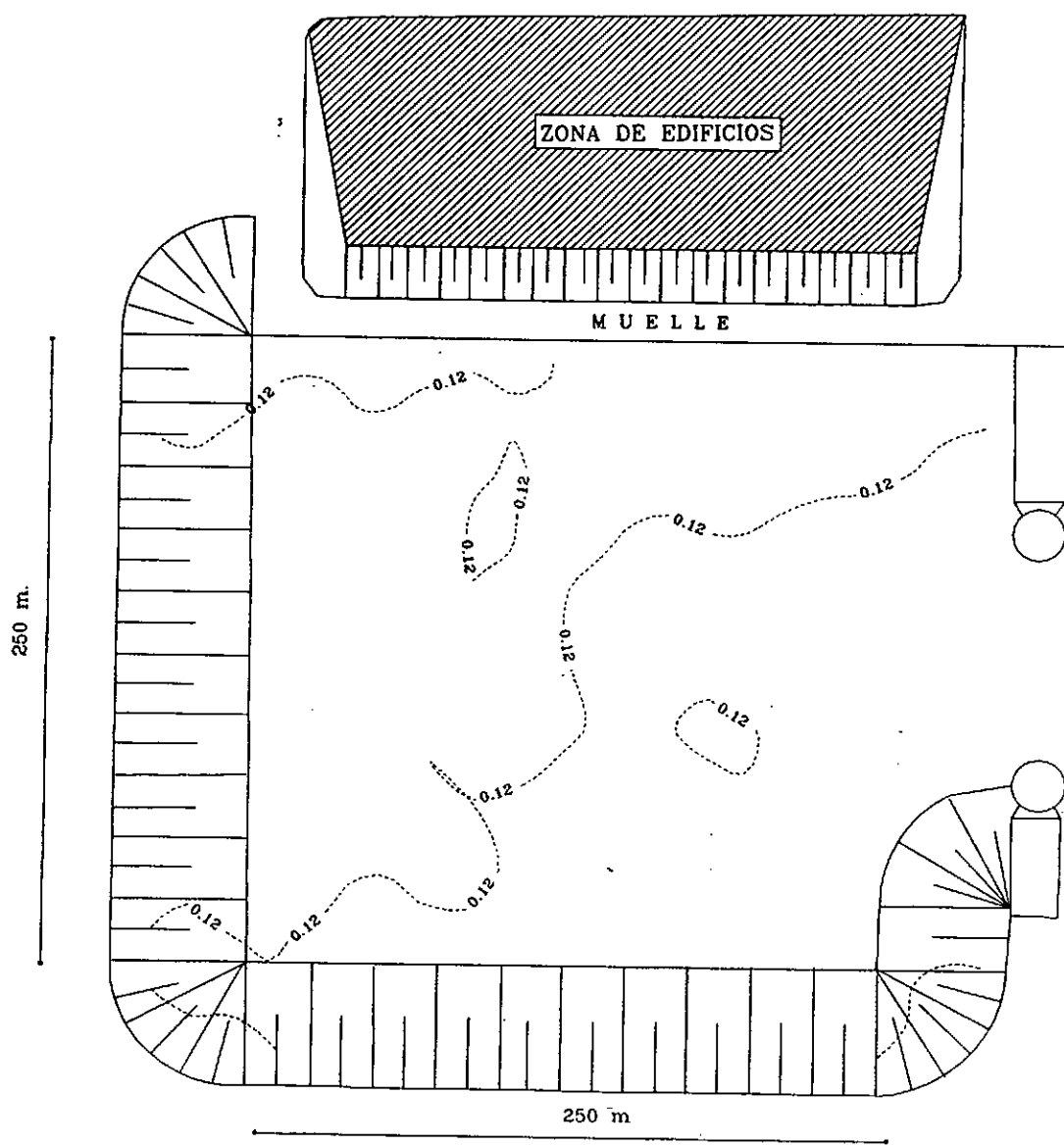


Periodo = 10 segundos

Coefficiente de absorcion = 0.10

CURVA DE ISOAMPLITUD RELATIVA DEL 12% PARA UN PERIODO DE 10 SEGUNDOS Y UN COEFICIENTE DE ABSORCION DEL TALUD DE 0,10.

Figura 3.12

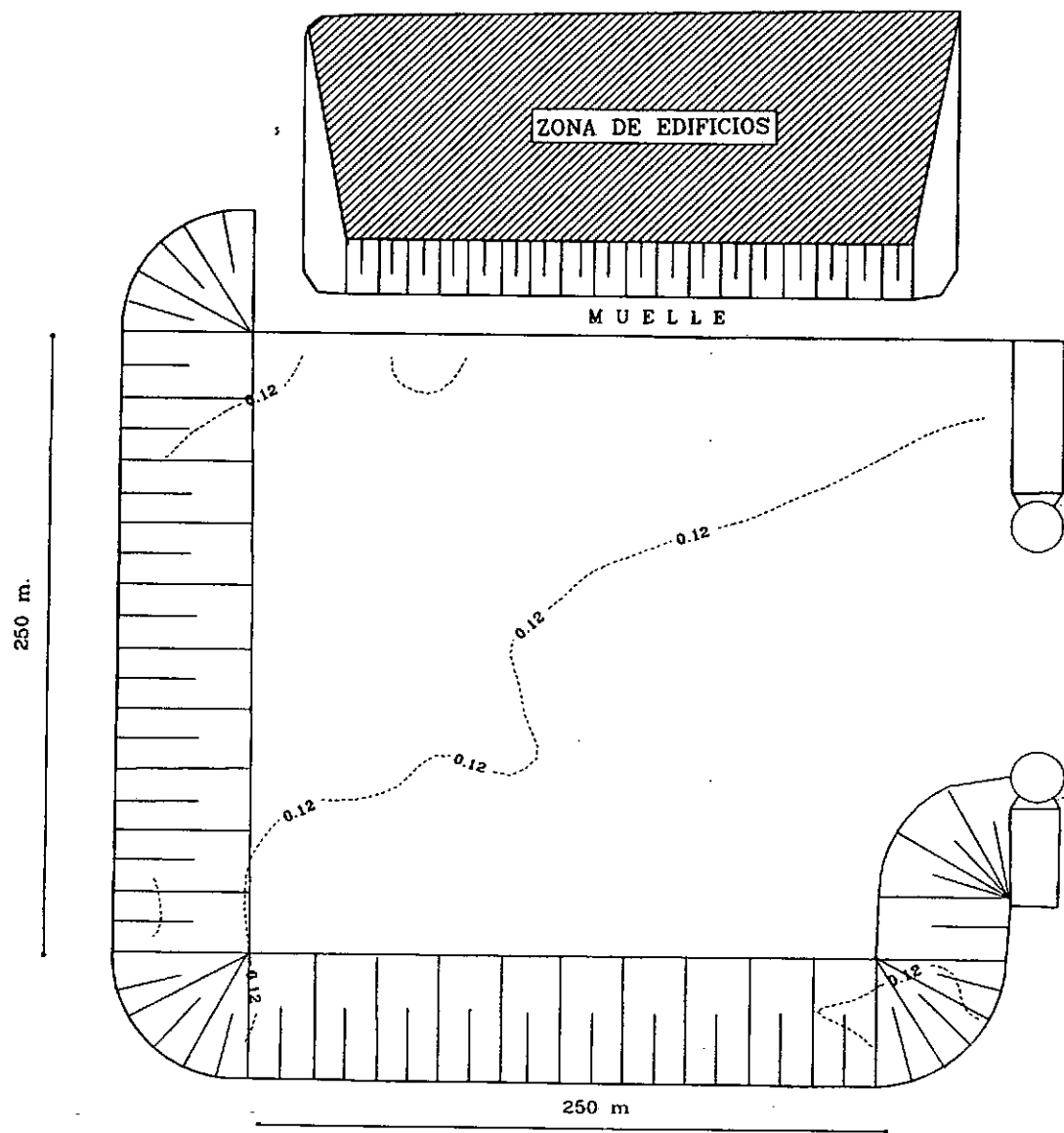


Periodo = 10 segundos

Coefficiente de absorcion = 0.20

CURVA DE ISOAMPLITUD RELATIVA DEL 12% PARA UN PERIODO DE 10 SEGUNDOS Y UN COEFICIENTE DE ABSORCION DEL TALUD DE 0,20.

Figura 3.13

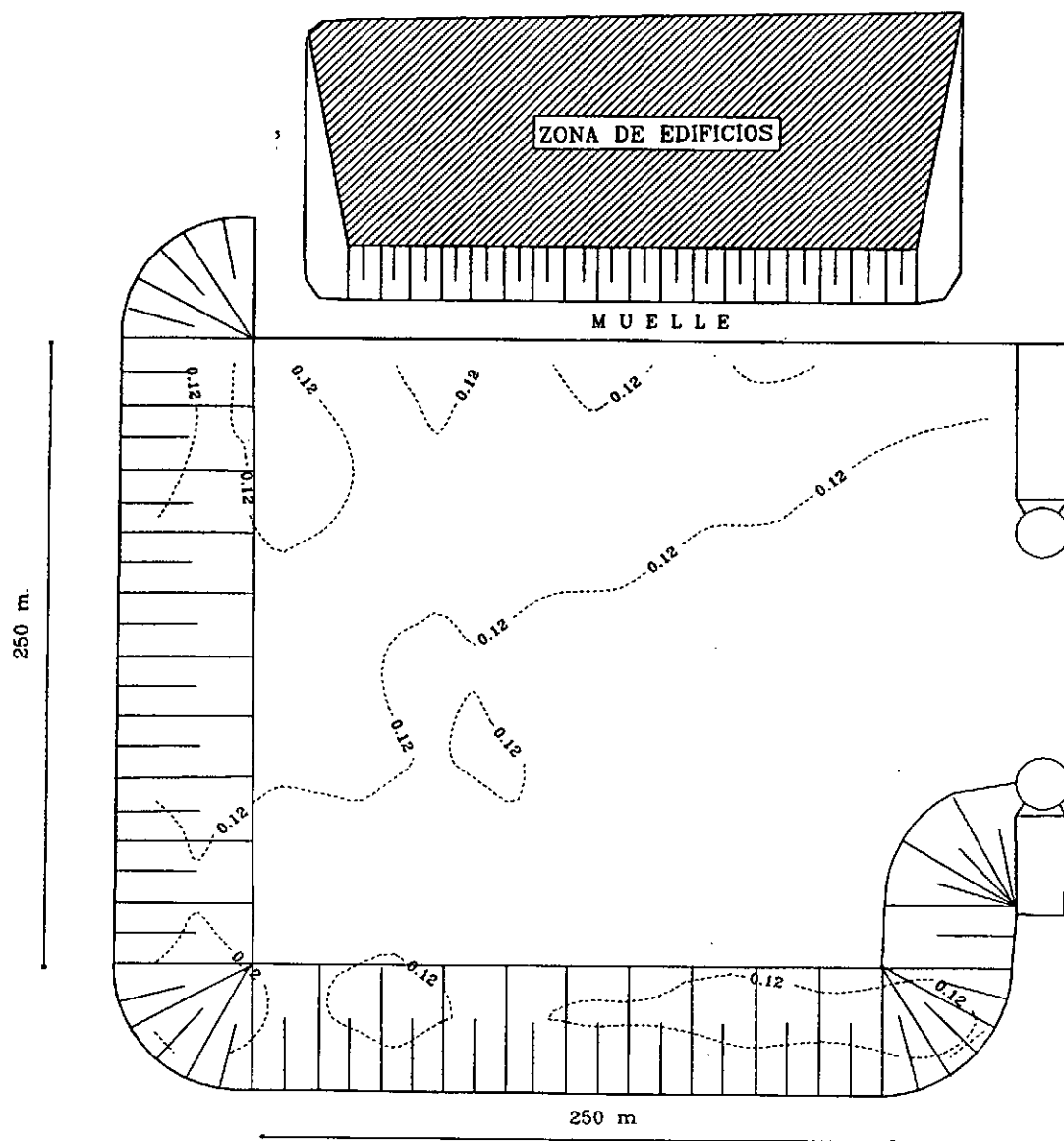


Periodo = 10 segundos

Coefficiente de absorcion = 0.35

CURVA DE ISOAMPLITUD RELATIVA DEL 12% PARA UN PERIODO DE 10 SEGUNDOS Y UN COEFICIENTE DE ABSORCION DEL TALUD DE 0.35.

Figura 3.14

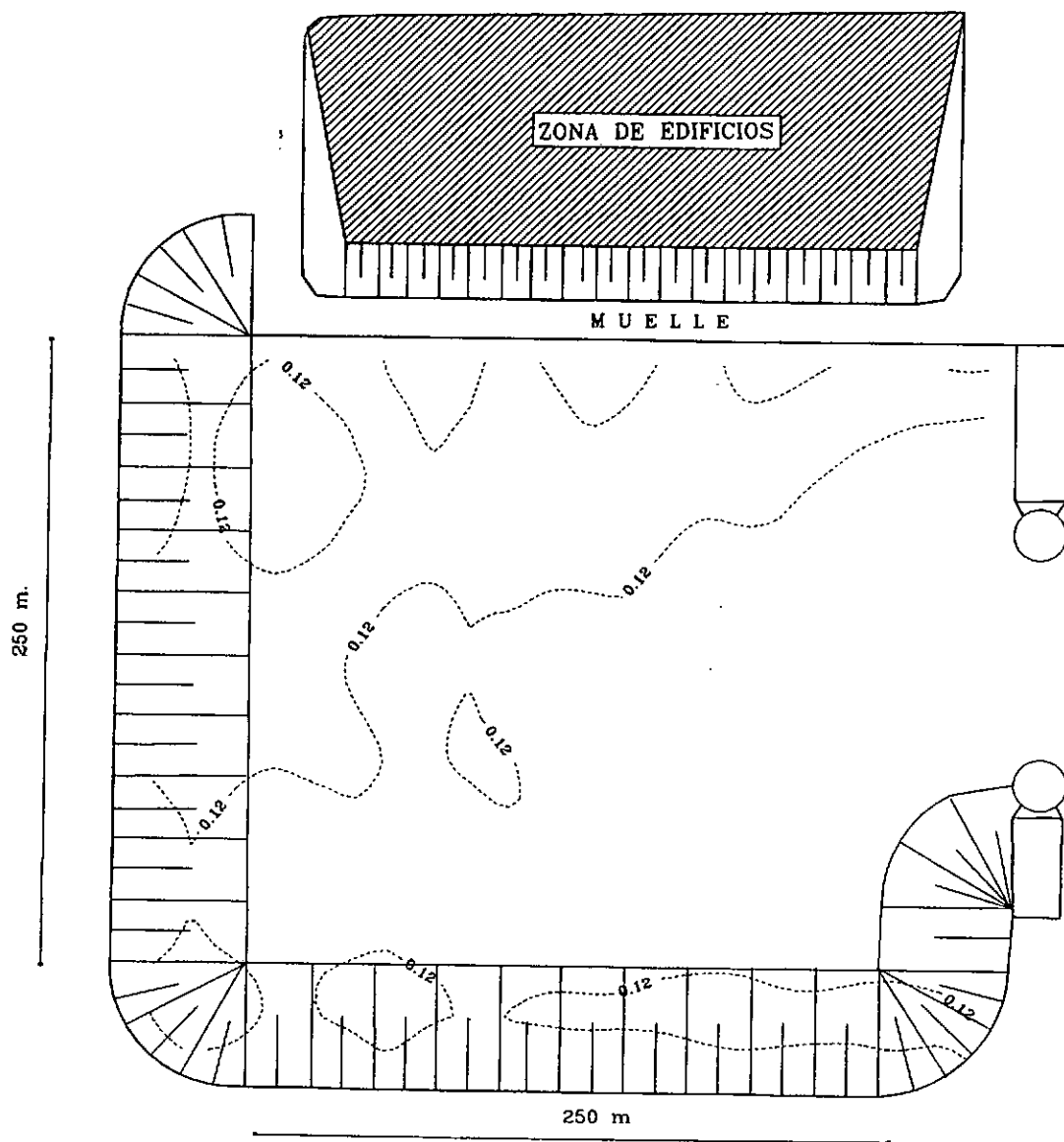


Periodo = 10 segundos

Coefficiente de absorcion = 0.50

CURVA DE ISOAMPLITUD RELATIVA DEL 12% PARA UN PERIODO DE 10 SEGUNDOS Y UN COEFICIENTE DE ABSORCION DEL TALUD DE 0.50.

Figura 3.15

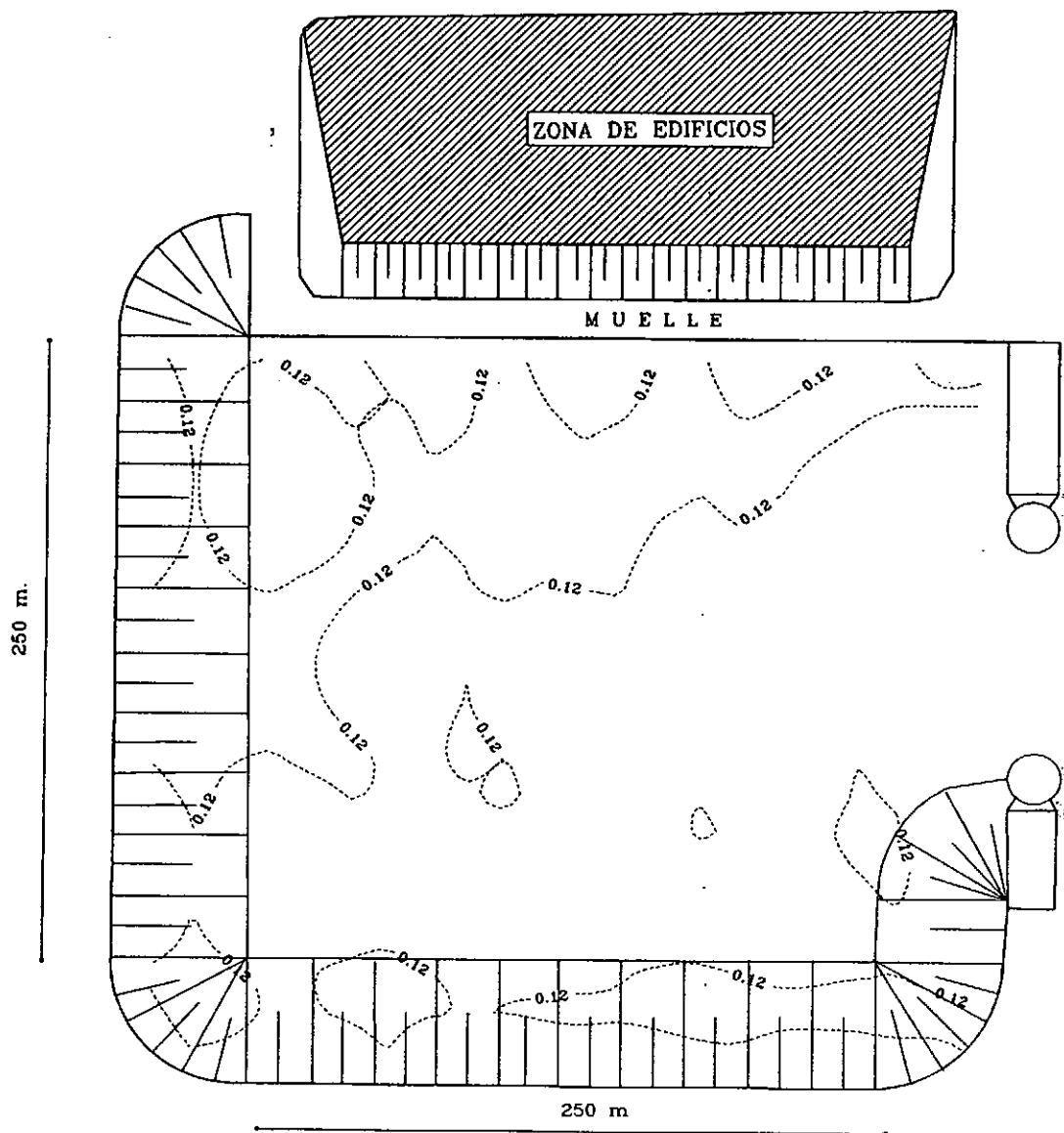


Periodo = 10 segundos

Coefficiente de absorcion = 0.65

CURVA DE ISOAMPLITUD RELATIVA DEL 12% PARA UN PERIODO DE 10 SEGUNDOS Y UN COEFICIENTE DE ABSORCION DEL TALUD DE 0,65.

Figura 3.16

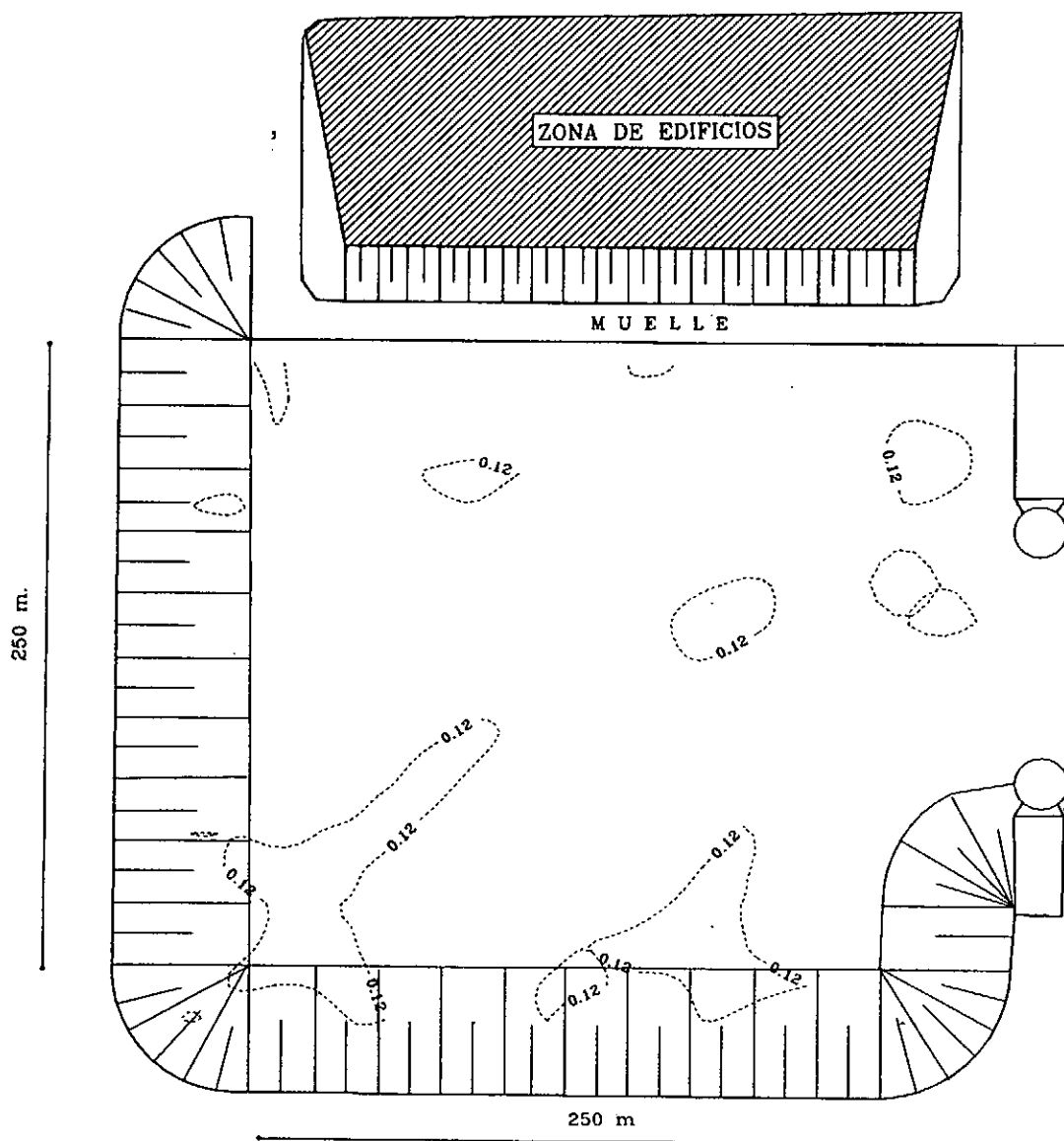


Periodo = 10 segundos

Coefficiente de absorcion = 1.00

CURVA DE ISOAMPLITUD RELATIVA DEL 12% PARA UN PERIODO DE 10 SEGUNDOS Y UN COEFICIENTE DE ABSORCION DEL TALUD DE 1.

Figura 3.17

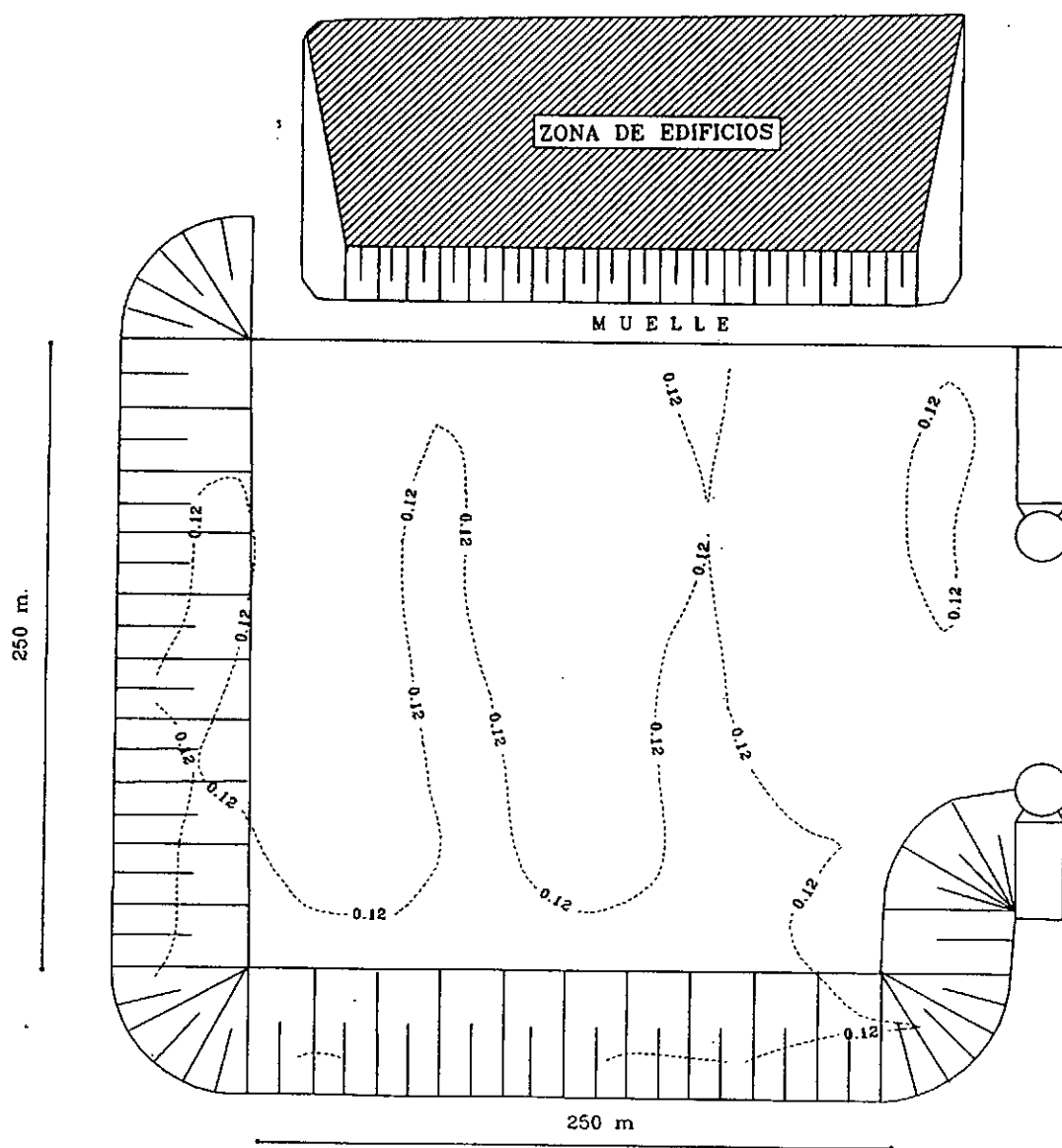


Periodo = 15 segundos.

Coefficiente de absorcion = 0.0

CURVA DE ISOAMPLITUD RELATIVA DEL 12% PARA UN PERIODO DE 15 SEGUNDOS Y UN COEFICIENTE DE ABSORCION DEL TALUD DE 0.

Figura 3.18

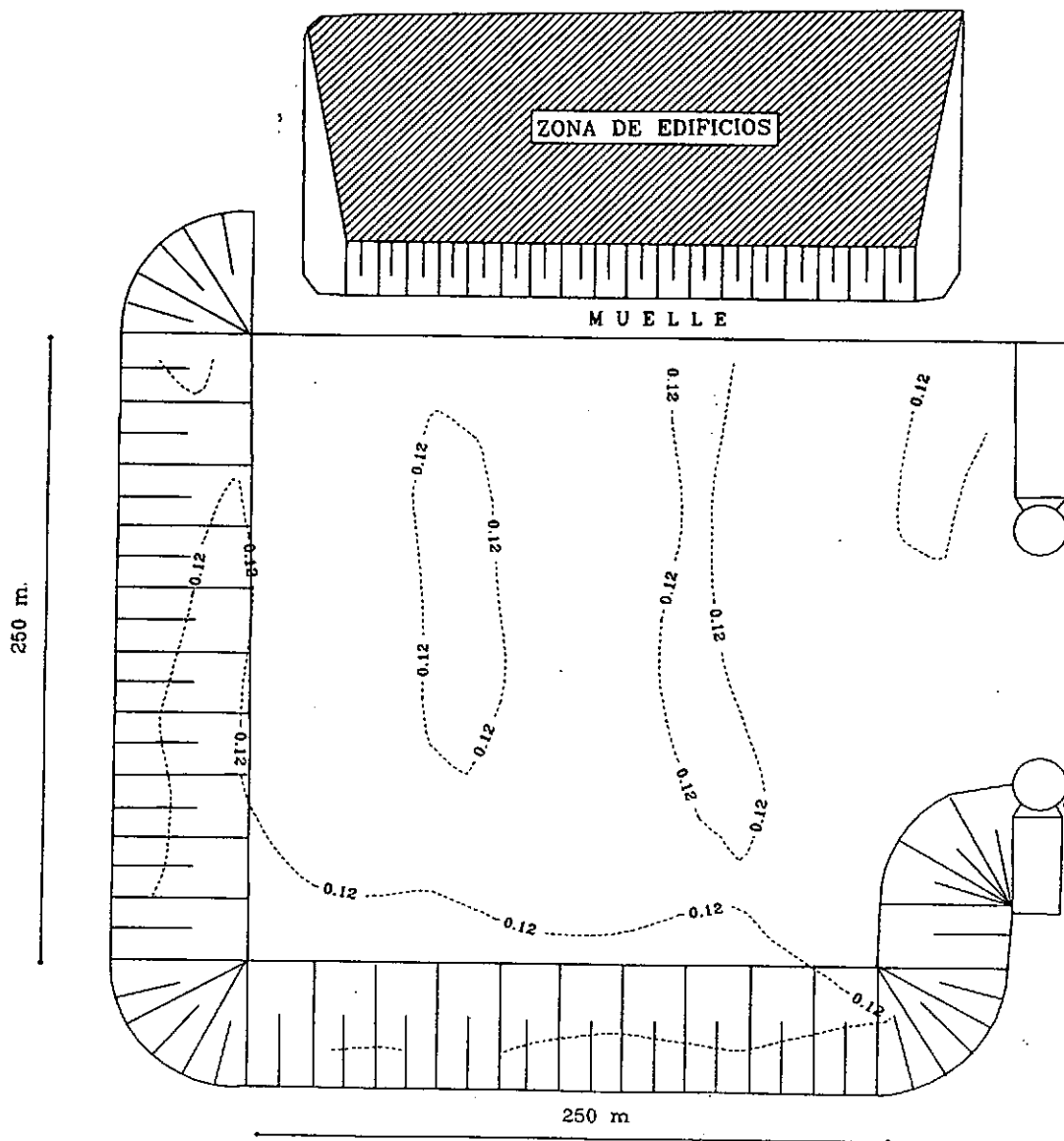


Periodo = 15 segundos

Coefficiente de absorcion = 0.10

CURVA DE ISOAMPLITUD RELATIVA DEL 12% PARA UN PERIODO DE 15 SEGUNDOS Y UN COEFICIENTE DE ABSORCION DEL TALUD DE 0,10.

Figura 3.19

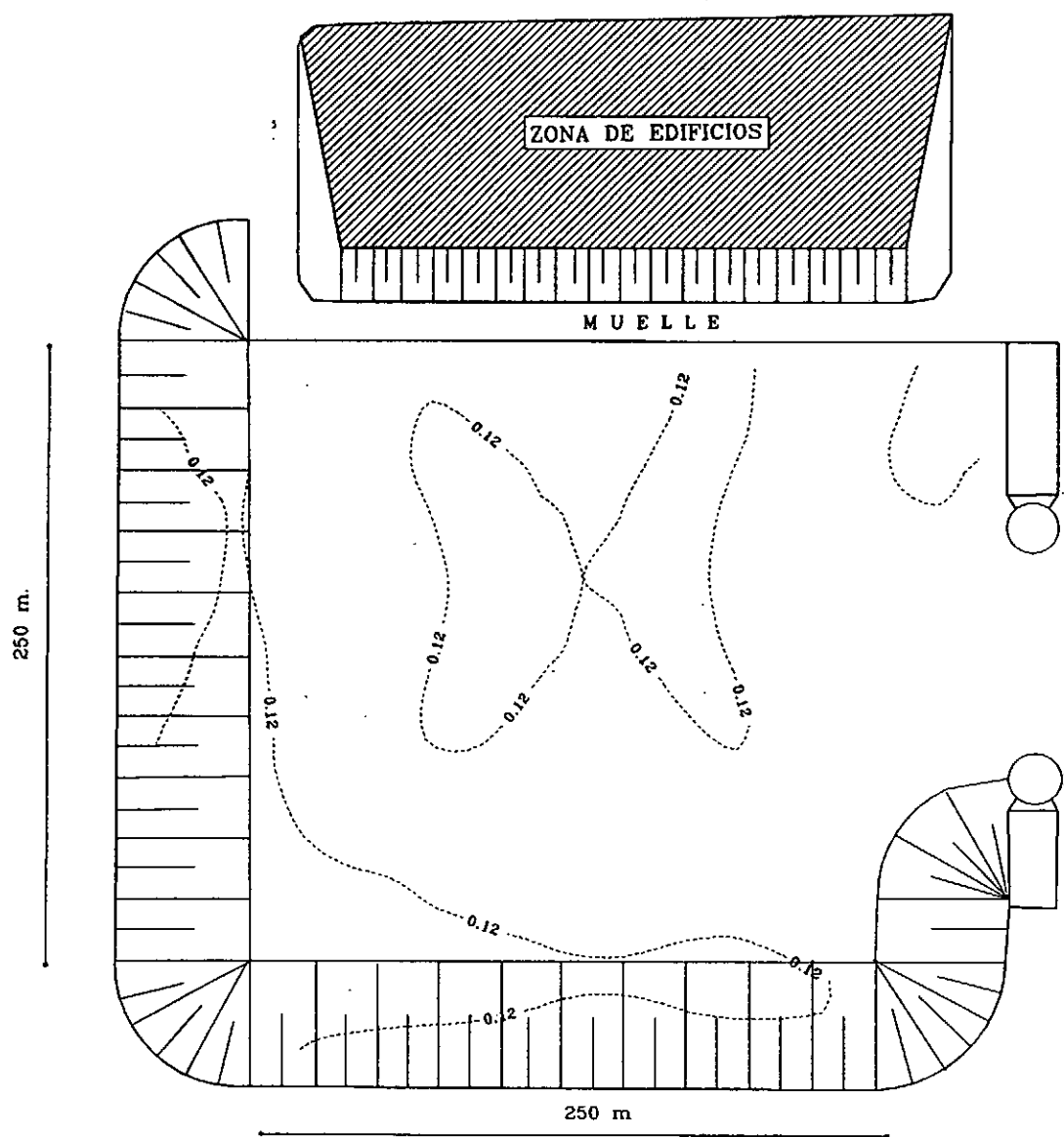


Periodo = 15 segundos

Coefficiente de absorcion = 0.20

CURVA DE ISOAMPLITUD RELATIVA DEL 12% PARA UN PERIODO DE 15 SEGUNDOS Y UN COEFICIENTE DE ABSORCION DEL TALUD DE 0,20.

Figura 3.20

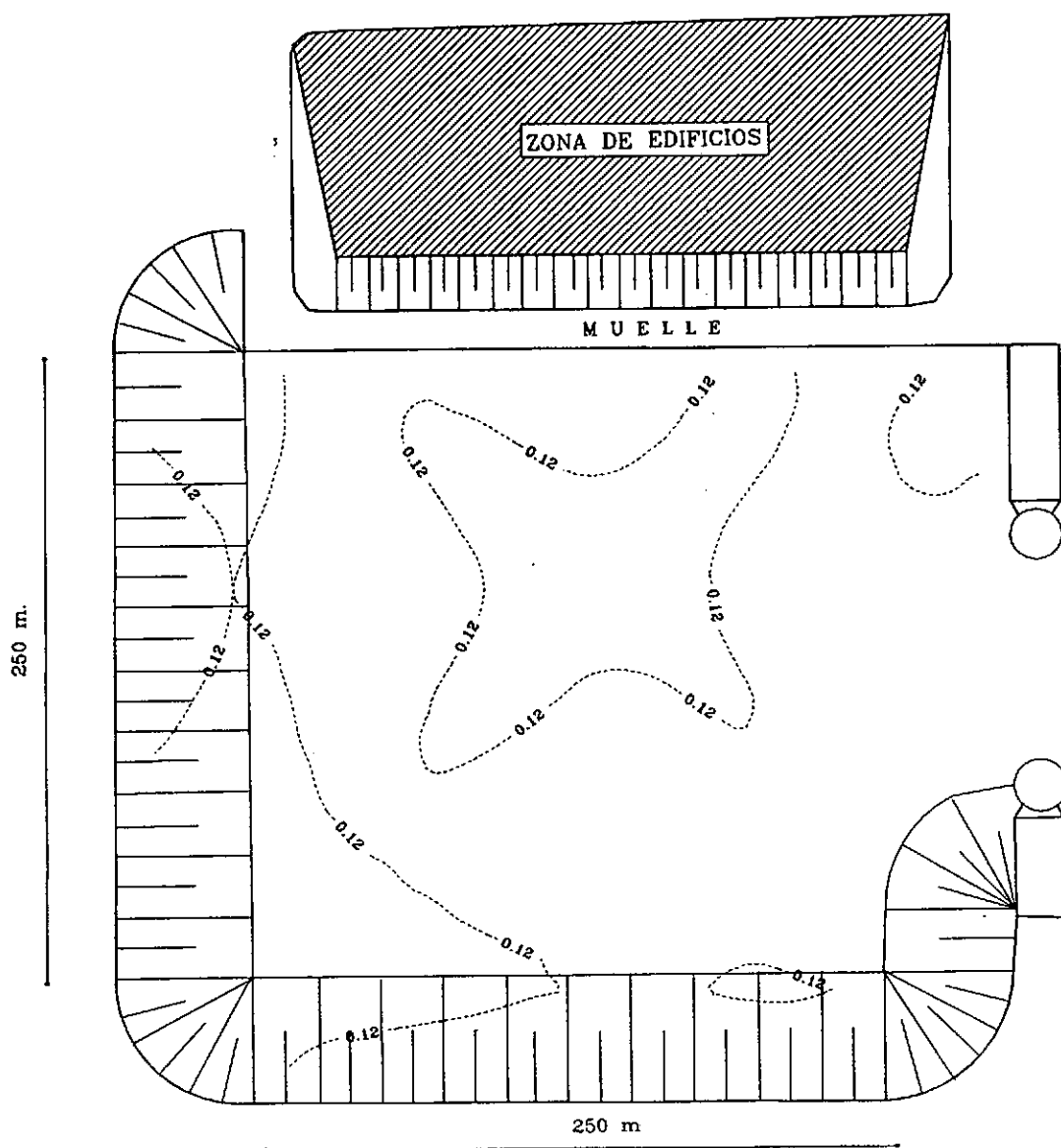


Periodo = 15 segundos

Coefficiente de absorcion = 0.35

CURVA DE ISOAMPLITUD RELATIVA DEL 12% PARA UN PERIODO DE 15 SEGUNDOS Y UN COEFICIENTE DE ABSORCION DEL TALUD DE 0,35.

Figura 3.21

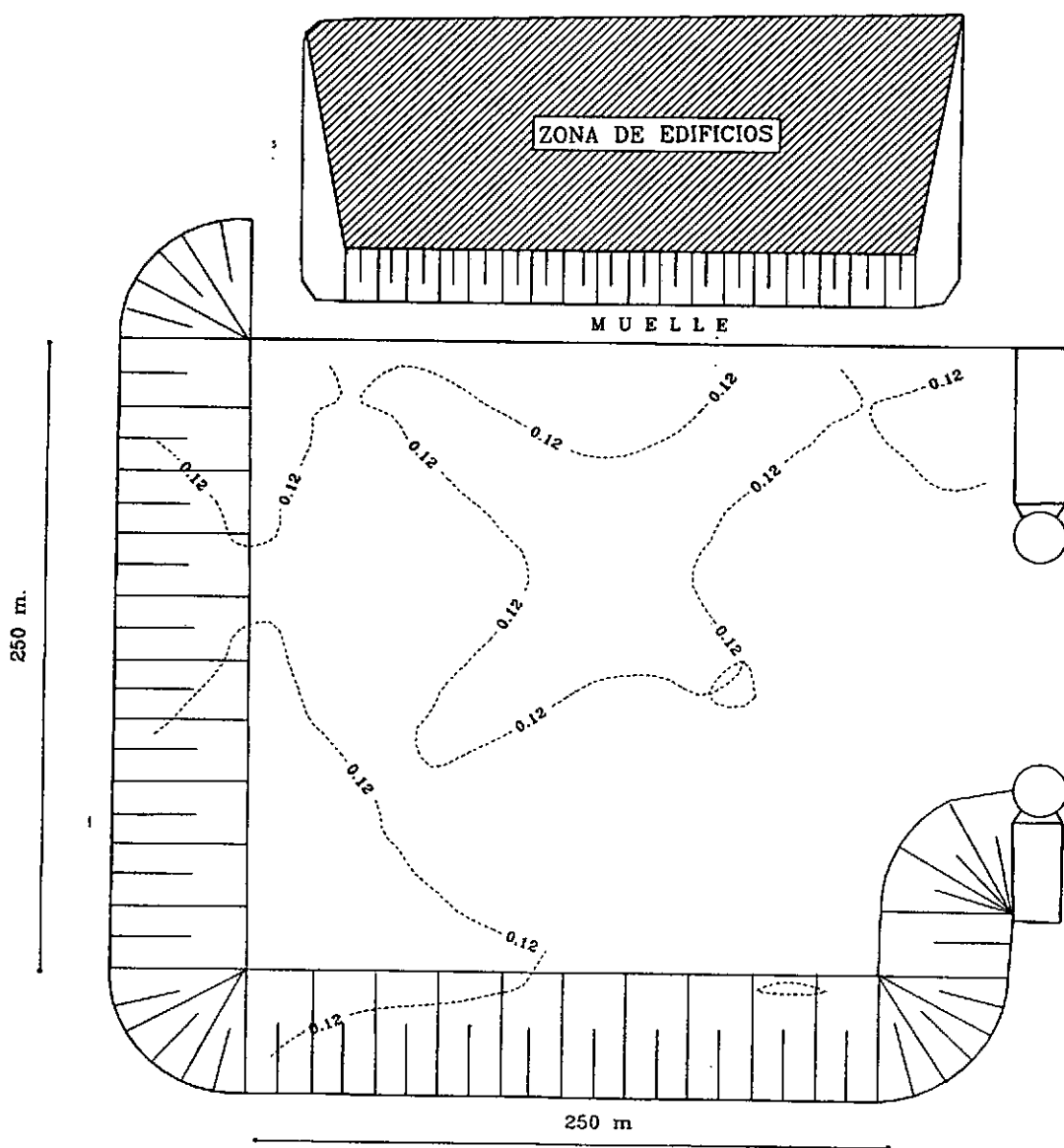


Periodo = 15 segundos.

Coefficiente de absorcion = 0.5

CURVA DE ISOAMPLITUD RELATIVA DEL 12% PARA UN PERIODO DE 15 SEGUNDOS Y UN COEFICIENTE DE ABSORCION DEL TALUD DE 0,50.

Figura 3.22



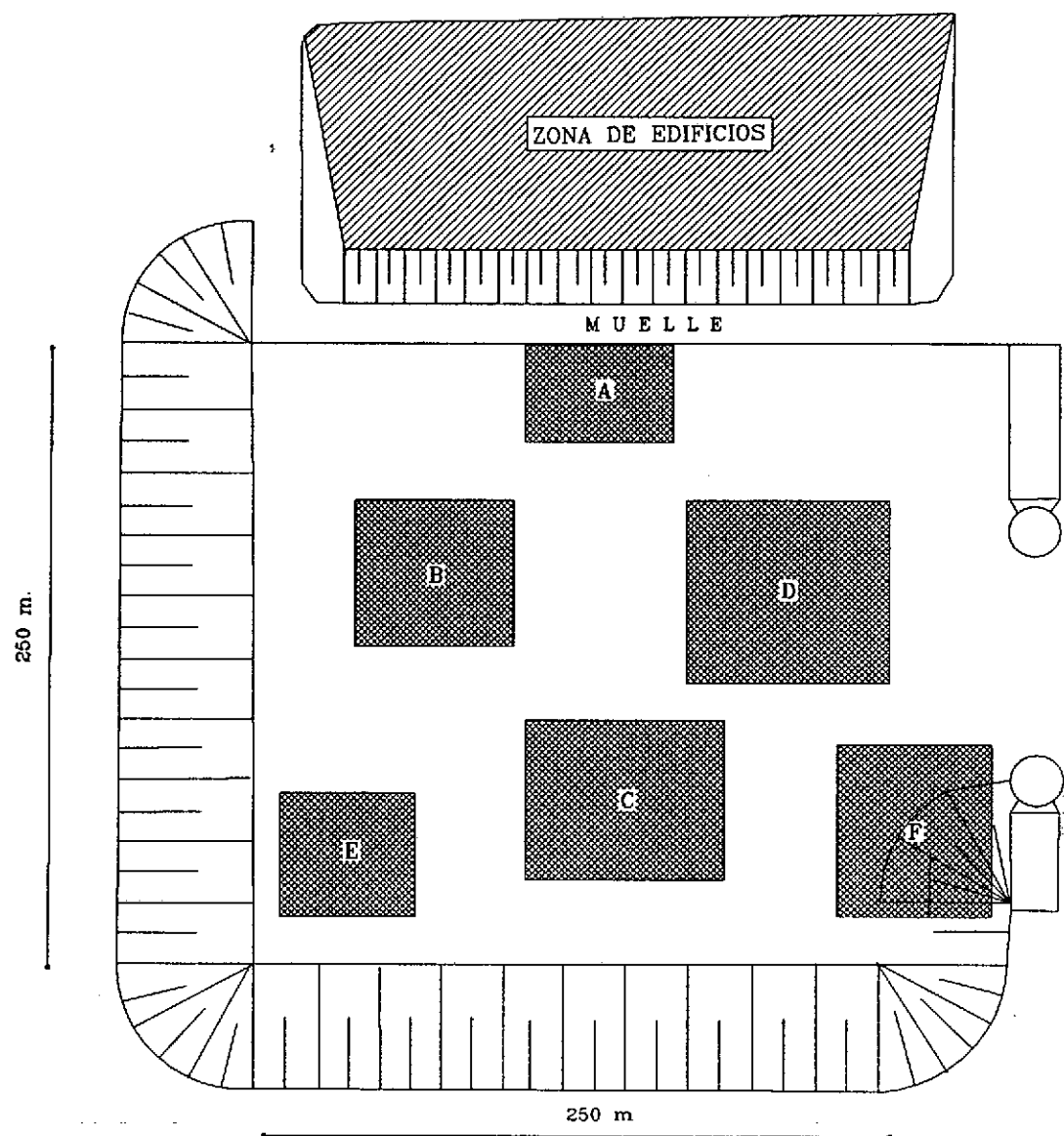
Periodo = 15 segundos.

Coefficiente de absorcion = 0.65

CURVA DE ISOAMPLITUD RELATIVA DEL 12% PARA UN PERIODO DE 15 SEGUNDOS Y UN COEFICIENTE DE ABSORCION DEL TALUD DE 0.65.

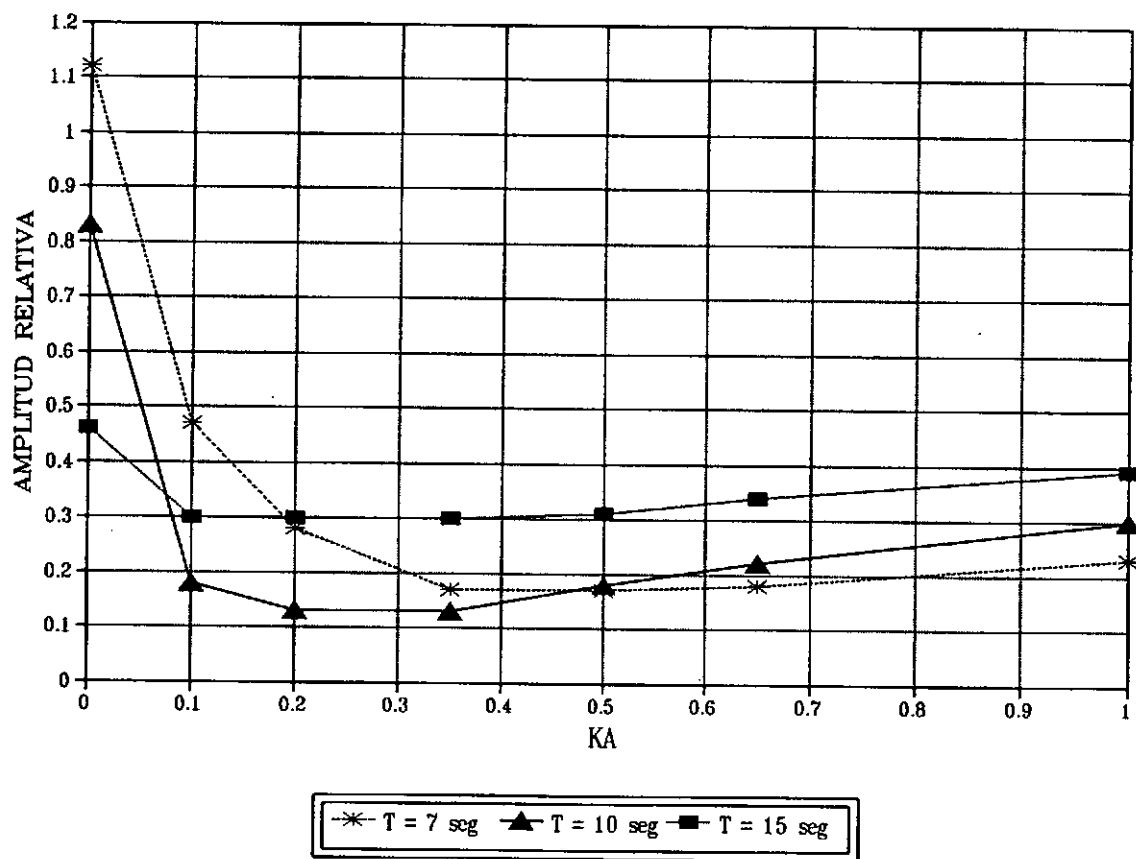
Figura 3.23

Figura 3.24



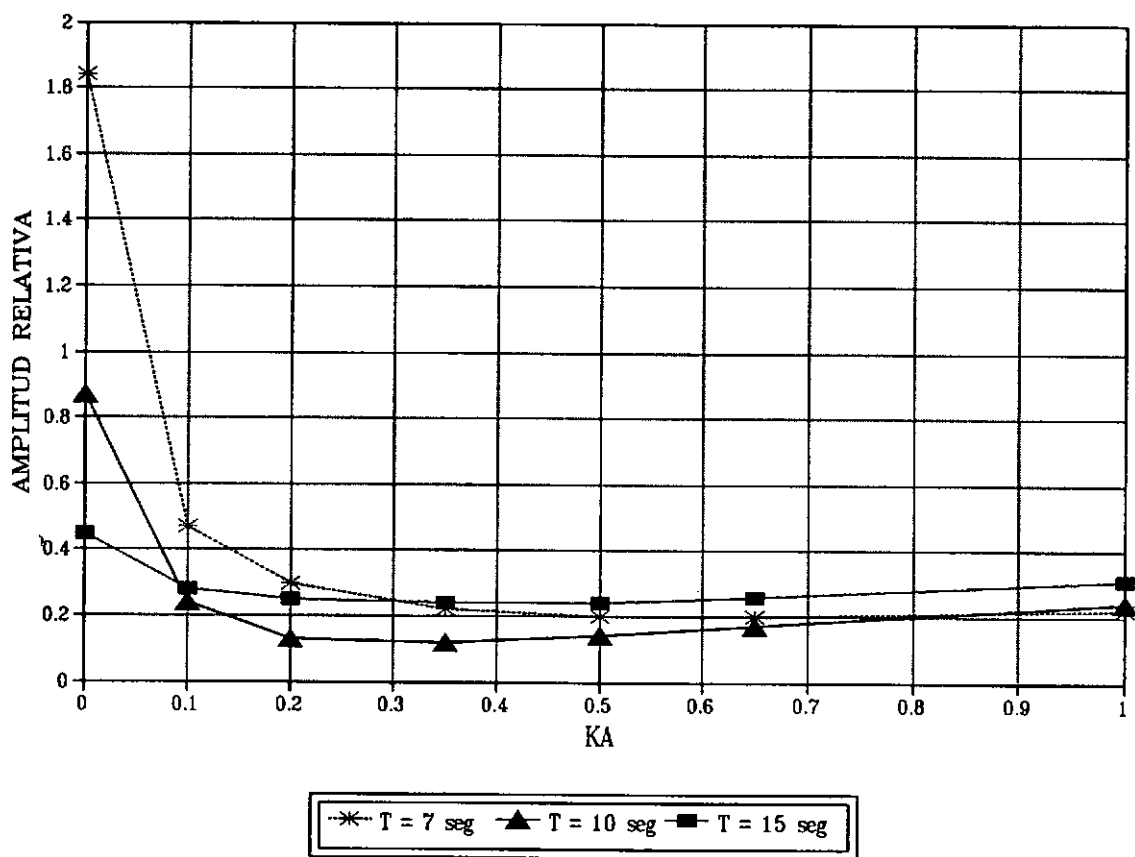
REGIONES DE MAXIMA AMPLITUD DE OLA.

Figura 3.25



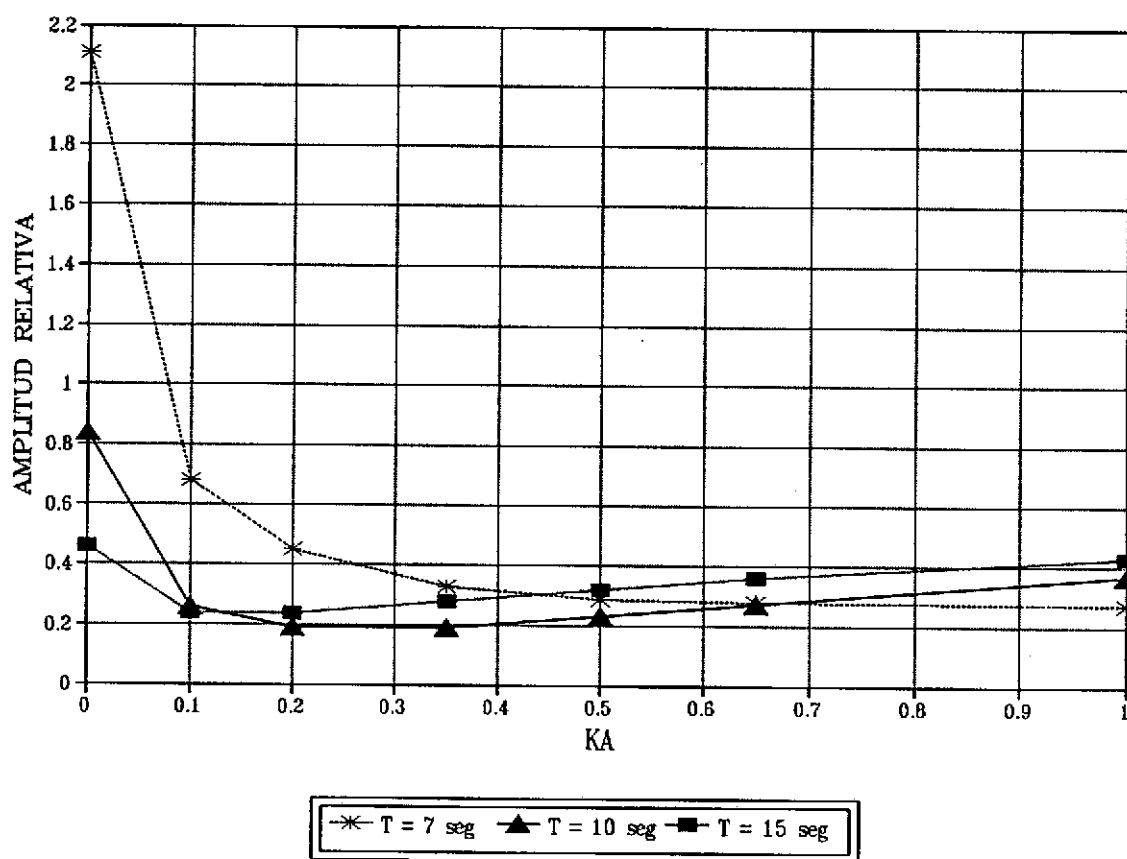
AMPLITUD MAXIMA EN LA REGION A EN
TERMINOS DE LA ABSORCION DEL TALUD

Figura 3.26



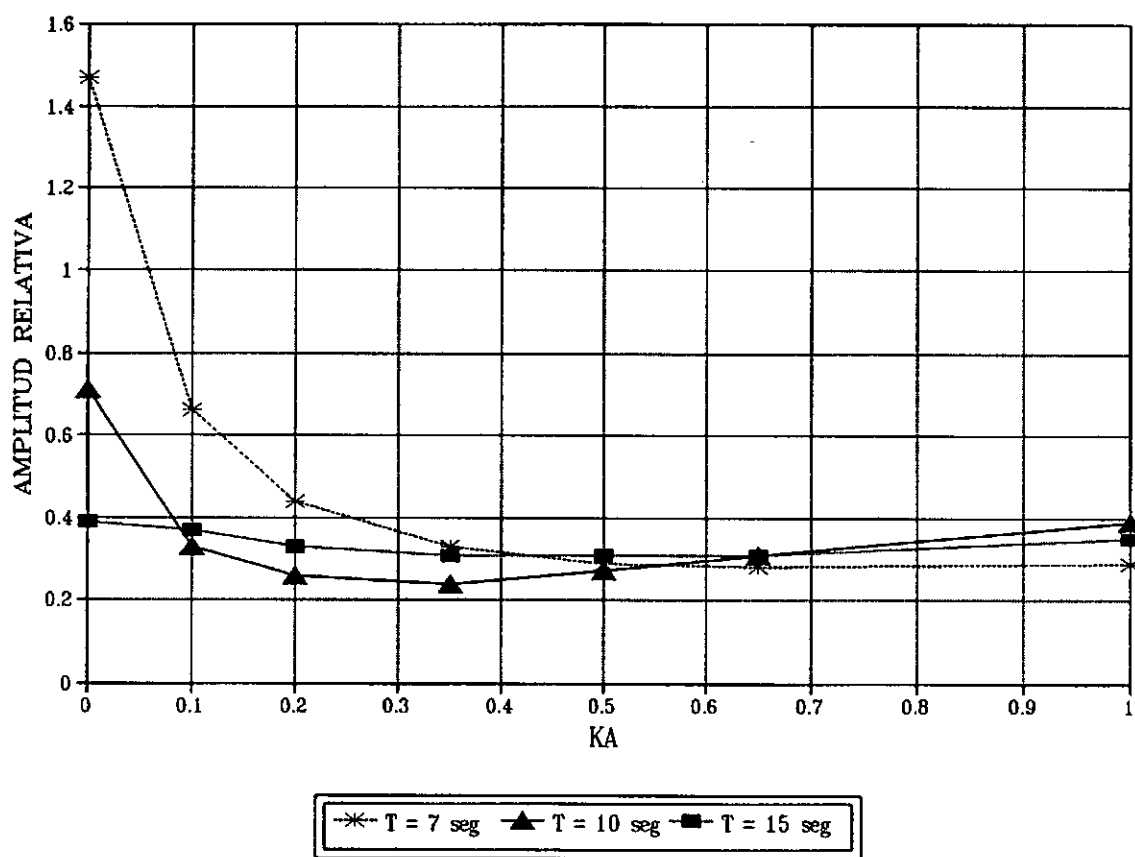
AMPLITUD MAXIMA EN LA REGION B EN
TERMINOS DE LA ABSORCION DEL TALUD

Figura 3.27



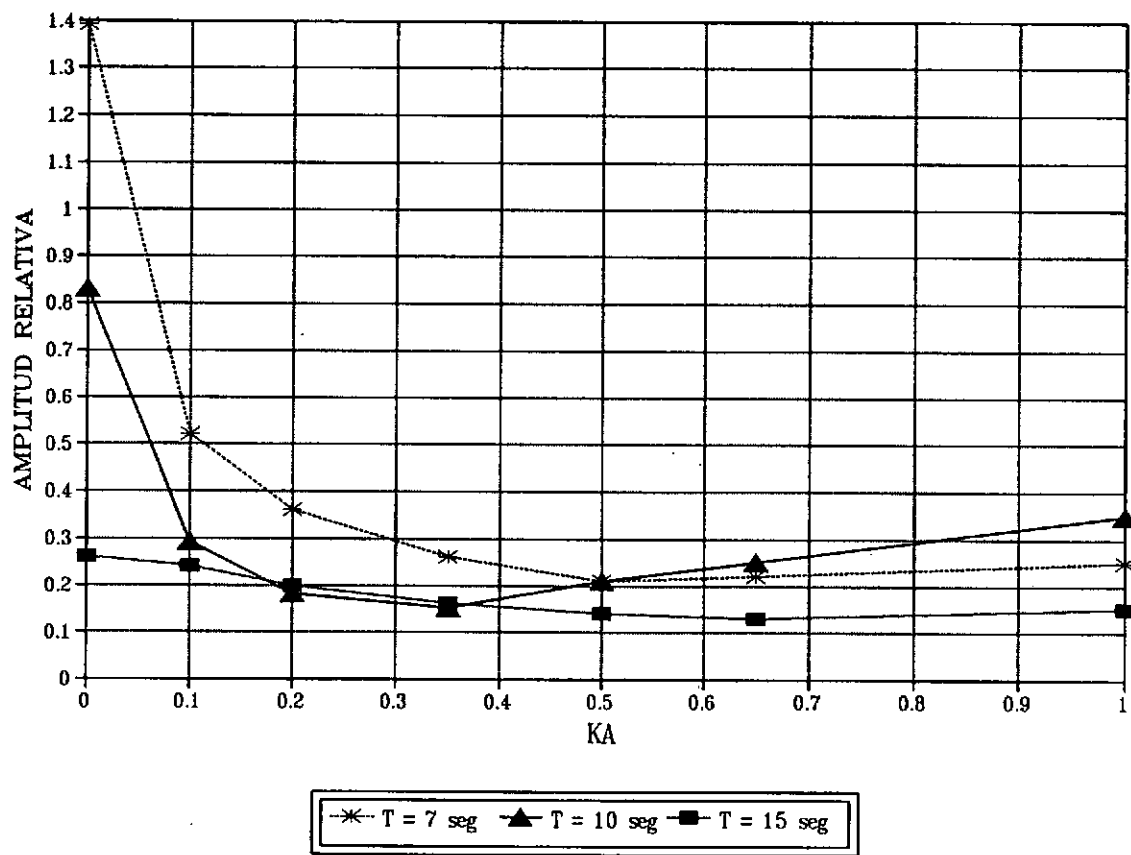
AMPLITUD MAXIMA EN LA REGION C EN
TERMINOS DE LA ABSORCION DEL TALUD

Figura 3.28



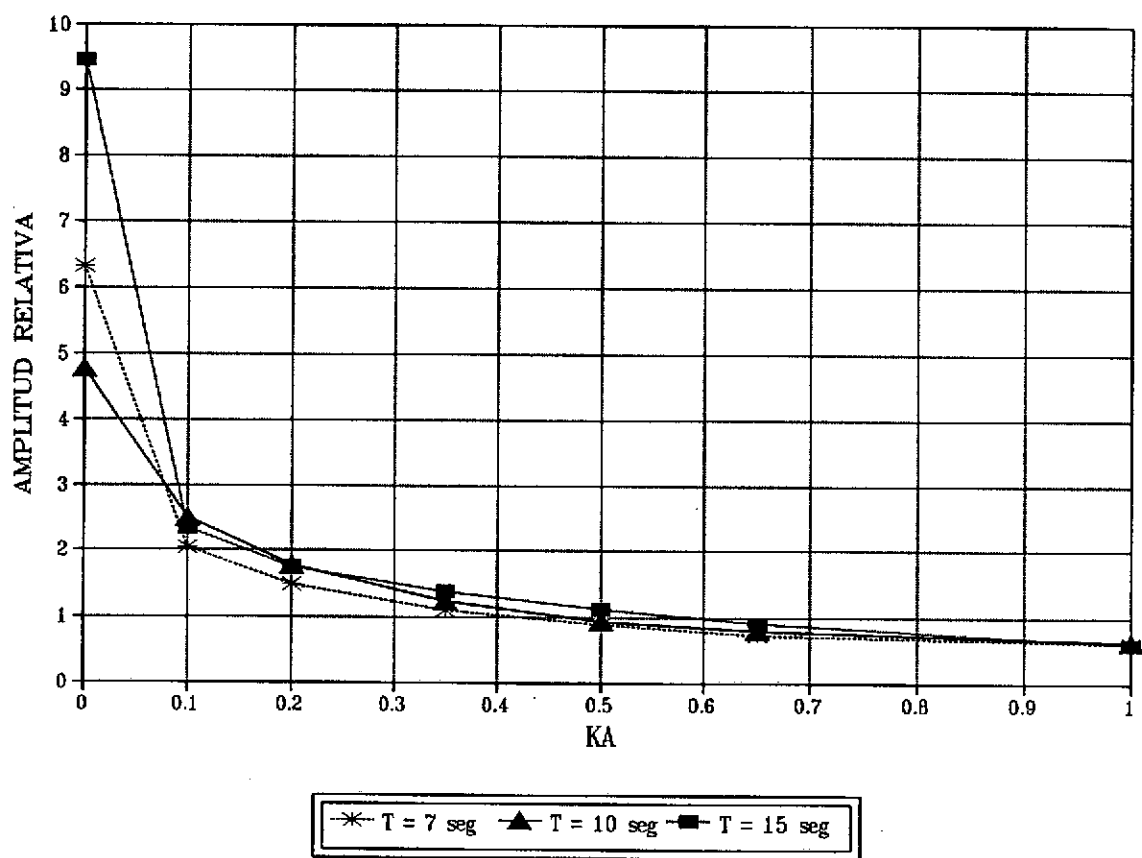
AMPLITUD MAXIMA EN LA REGION D EN
TERMINOS DE LA ABSORCION DEL TALUD

Figura 3.29



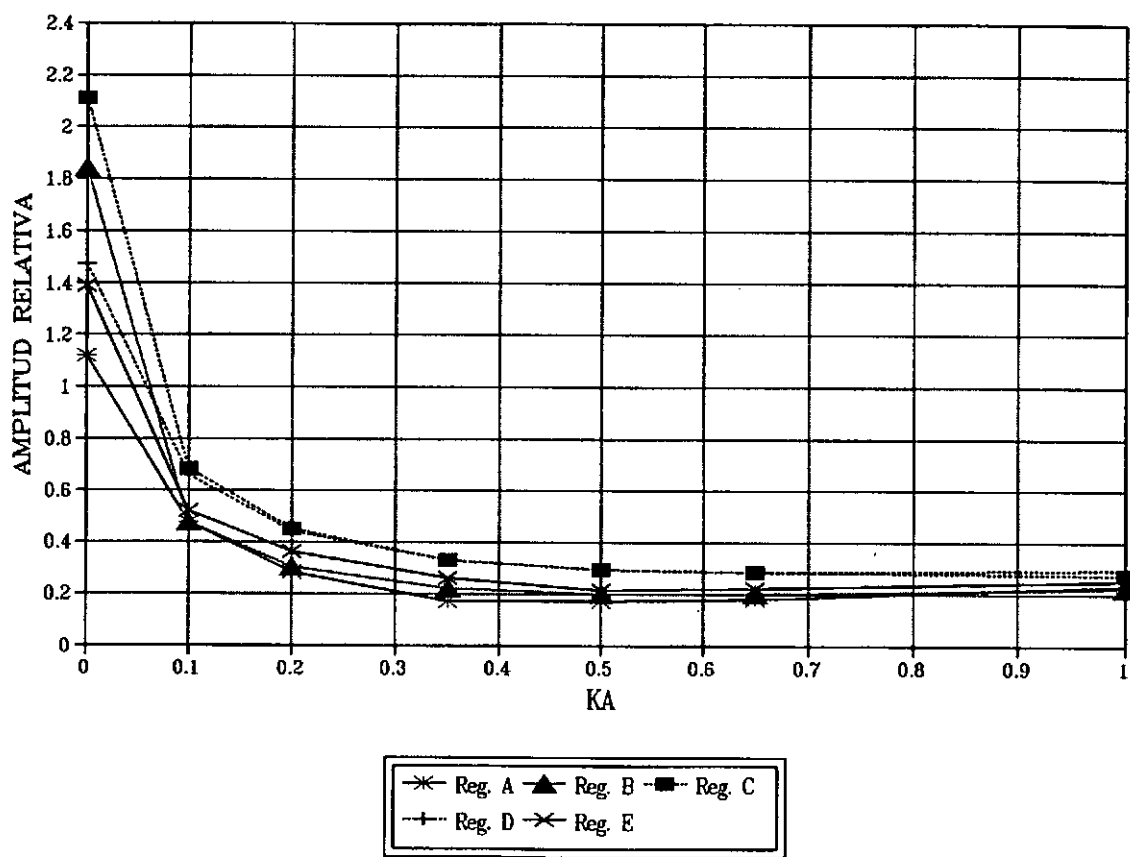
AMPLITUD MAXIMA EN LA REGION E EN
TERMINOS DE LA ABSORCION DEL TALUD

Figura 3.30



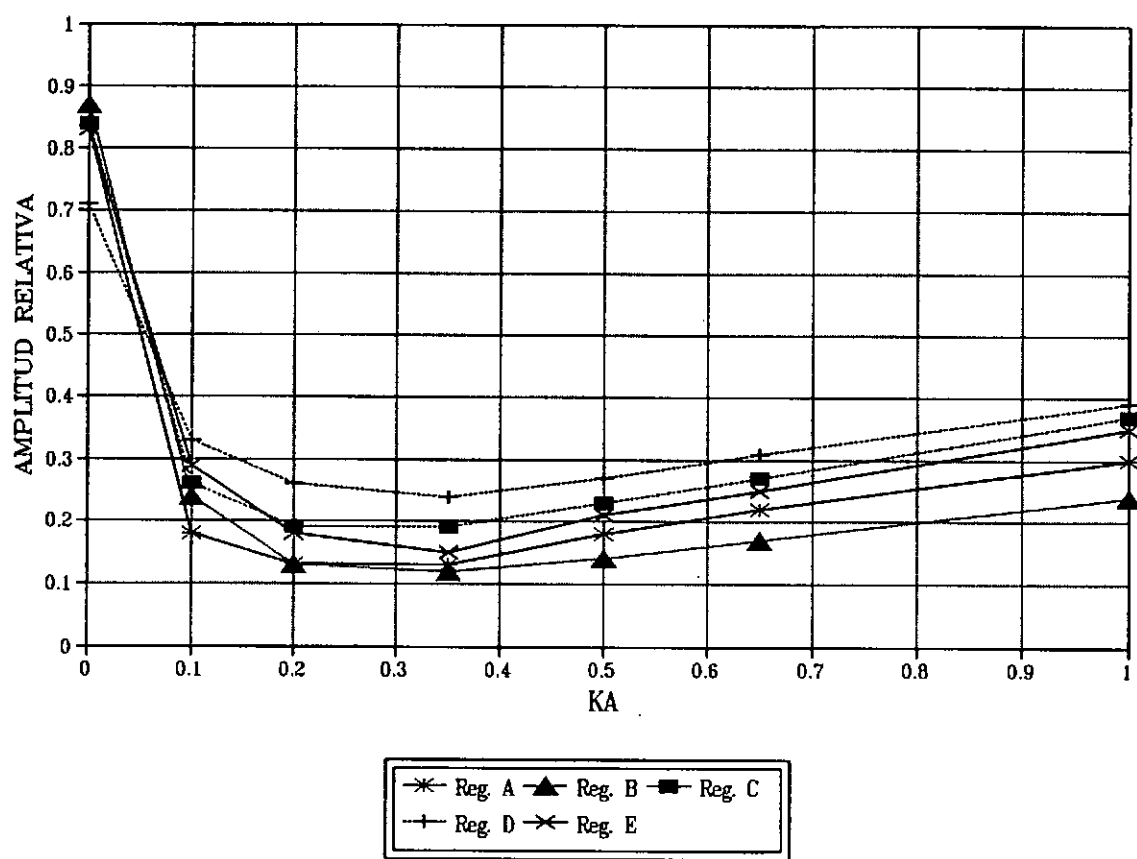
AMPLITUD MAXIMA EN LA REGION F EN
TERMINOS DE LA ABSORCION DEL TALUD

Figura 3.31



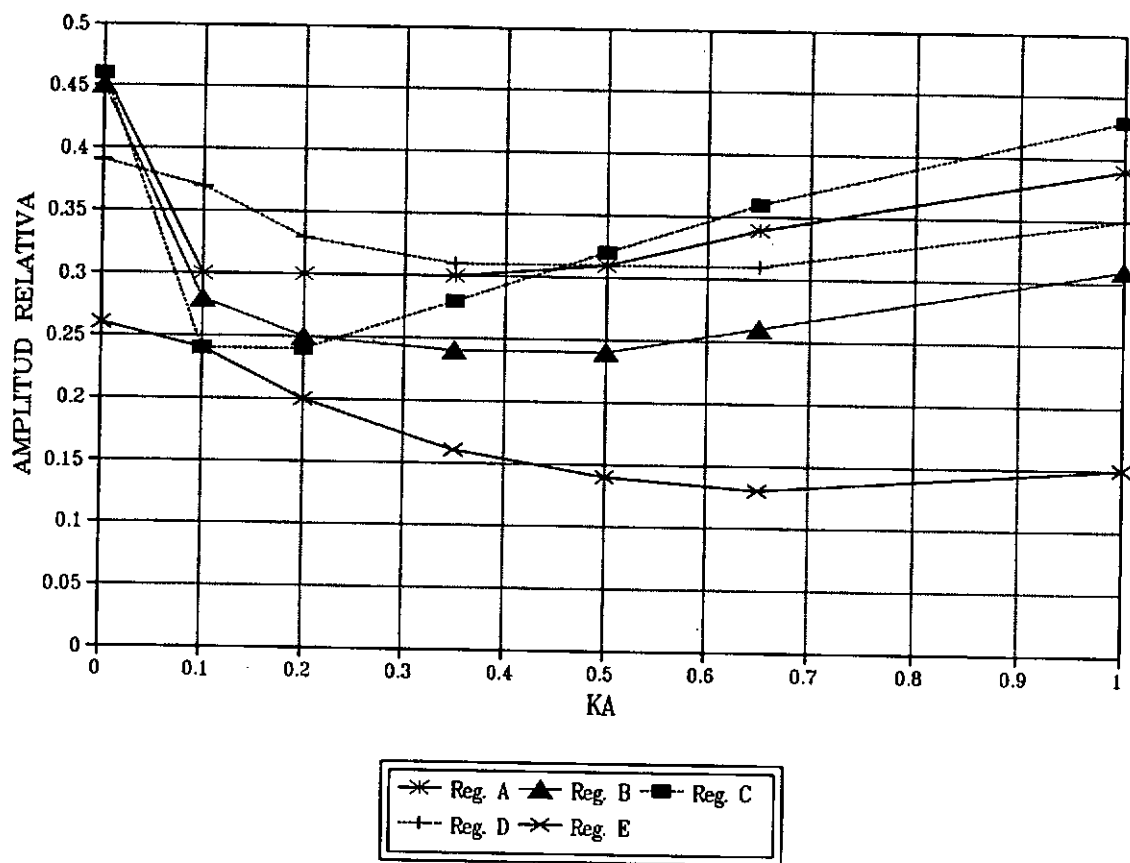
AMPLITUD MAXIMA PARA 7 SEGUNDOS EN
TERMINOS DE LA ABSORCION DEL TALUD

Figura 3.32



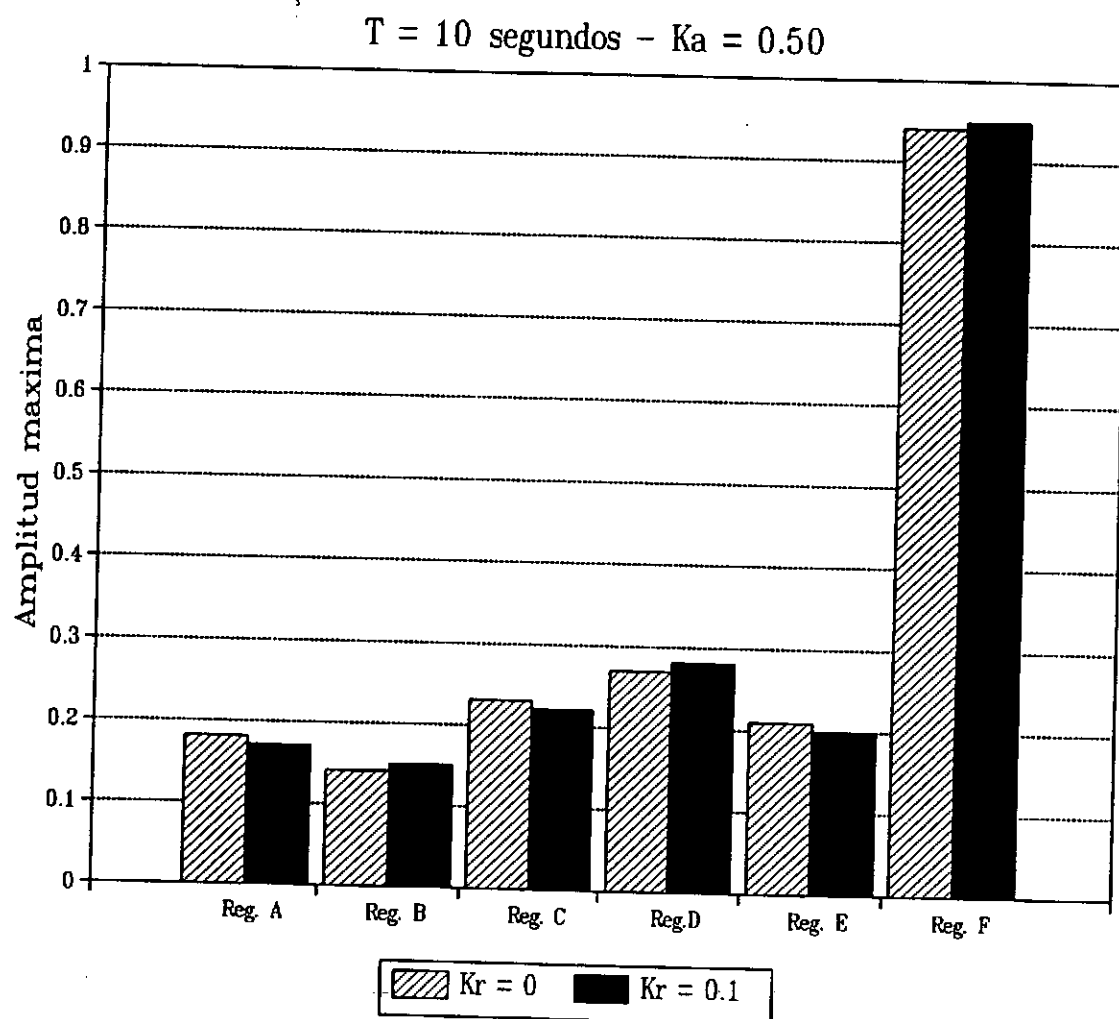
AMPLITUD MAXIMA PARA 10 SEGUNDOS EN
TERMINOS DE LA ABSORCION DEL TALUD

Figura 3.33



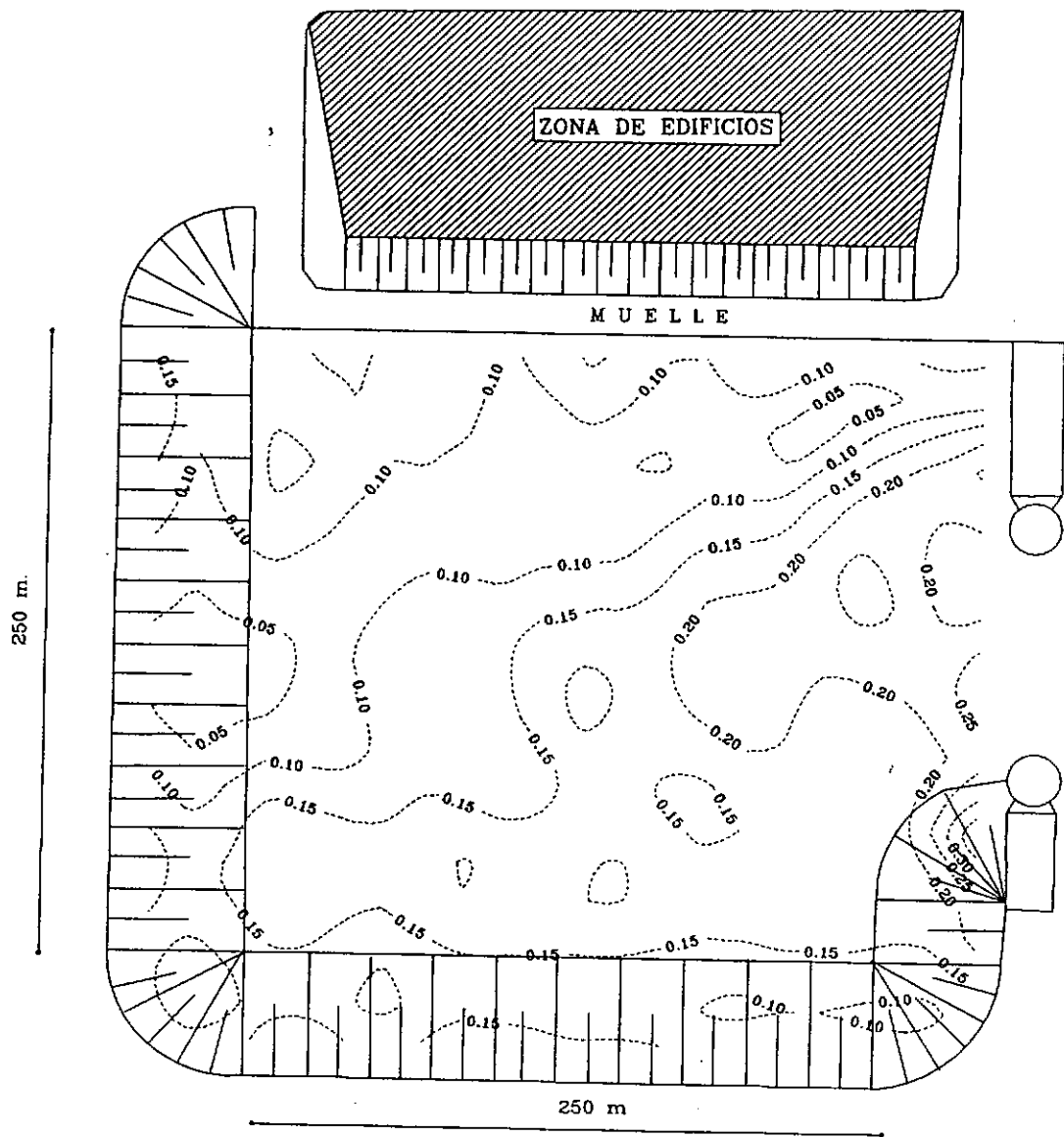
AMPLITUD MAXIMA PARA 15 SEGUNDOS EN
TERMINOS DE LA ABSORCION DEL TALUD

Figura 3.34



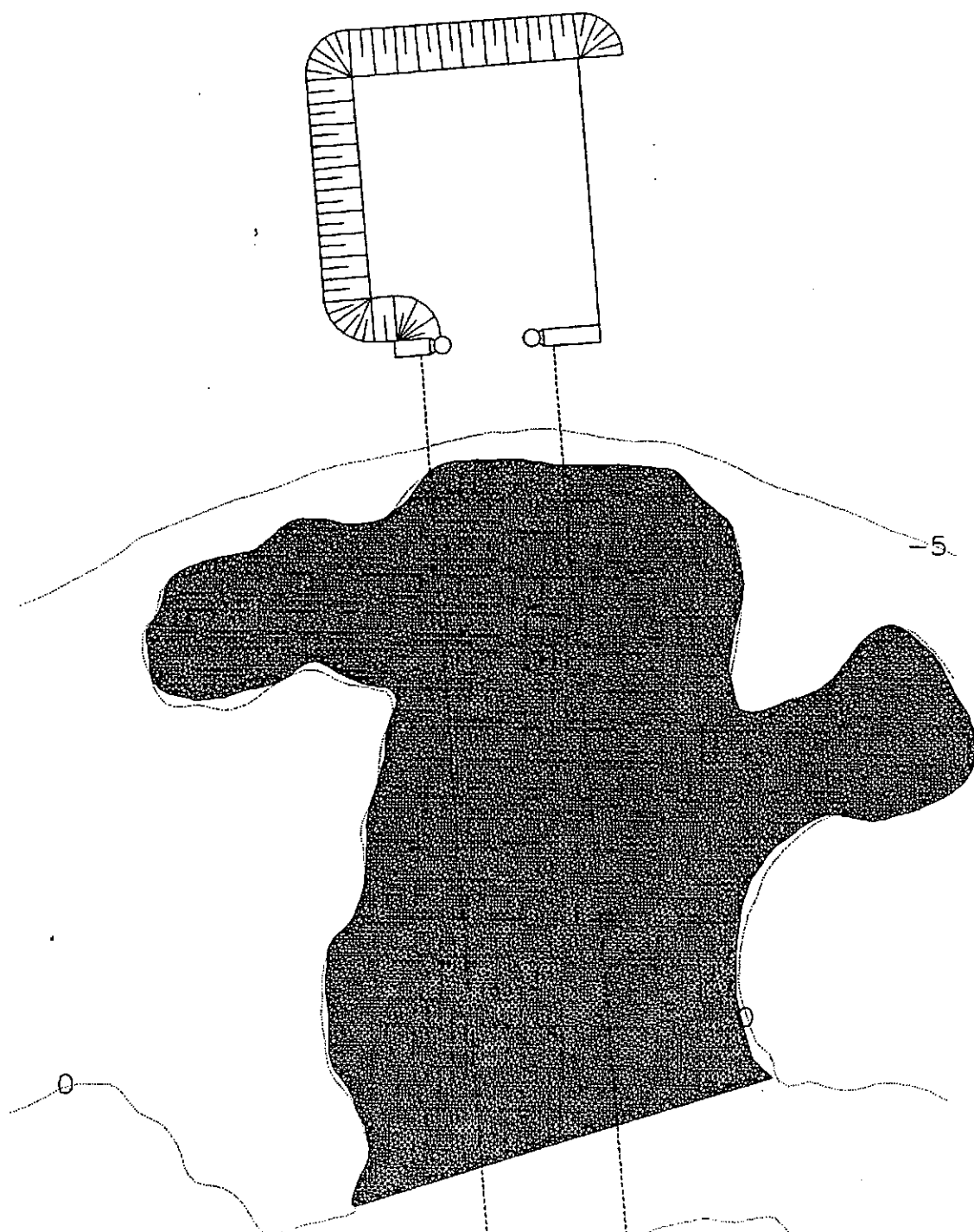
AMPLITUD MAXIMA PARA PLAYA TOTALMENTE
Y PARCIALMENTE ABSORBENTE

Figura 3.35



PATRON DE AGITACION PARA $T = 10$ SEGUNDOS Y $K_a = 0.50$

Figura 3.36



RED DE CALCULO PARA LA ZONA DE LA CALETA

Figura 4.1

ANEXOS

ANEXO I

DESCRIPCION Y APLICACION DEL MODELO MATEMATICO DE AGITACION

Se presentan dos publicaciones en las cuales se describen los detalles técnicos del modelo matemático de agitación utilizado en el presente estudio. Se trata de:

"Difracción-refracción combinadas de ondas de agua. Cálculo utilizando elementos finitos híbridos, incluyendo bordes absorbentes y disipación por fricción"

C.A. Vionnet y A.N. Menéndez

5º Encuentro Nacional de Investigadores y Usuarios del Método de los Elementos Finitos
Bariloche, 1987

"Estudio de las condiciones de agitación por oleaje en un puerto mediante simulación numérica"

M.A. Cavaliere, A.N. Menéndez, R. Castellano

Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería, Vol. 8, 4, 1992.

DIFRACCION-REFRACCION COMBINADAS
DE ONDAS DE AGUA. CALCULO UTILIZANDO
ELEMENTOS FINITOS HIBRIDOS, INCLUYENDO
BORDES ABSORBENTES Y DISIPACION
POR FRICCION

SECRETARIA DE RECURSOS HIDRICOS
INSTITUTO NACIONAL DE CIENCIA
Y TECNICA HIDRICAS

LABORATORIO DE HIDRAULICA
APLICADA

DIFRACCION-REFRACCION COMBINADAS
DE ONDAS DE AGUA. CALCULO UTILIZANDO
ELEMENTOS FINITOS HIBRIDOS. INCLUYENDO
BORDES ABSORBENTES Y DISIPACION
POR FRICCION

LHA-S5-035-87

Ezeiza, julio de 1987

ENIEF'87 - 5to. ENCUESTRO NACIONAL DE INVESTIGADORES Y USUARIOS DEL
METODO DE ELEMENTOS FINITOS

DIRACCION-REFRACCION COMBINADAS
DE ONDAS DE AGUA. CALCULO UTILIZANDO
ELEMENTOS FINITOS HIBRIDOS, INCLUYENDO BORDES
ABSORBENTES Y DISIPACION POR FRICCION

por

Carlos A. VIONNET

y

Angel N. MENENDEZ

INCYTH-Dpto. de Modelos Matemáticos y Est. Espec.
Laboratorio de Hidráulica Aplicada
Ezeiza ARGENTINA

RESUMEN

Este trabajo describe un modelo matemático que resuelve el efecto combinado de la difracción, refracción y reflexión de ondas. Esto permite estimar el grado de agitación, producto del oleaje, presente en el interior de puertos, bahías y en las inmediaciones de estructuras off-shore, información de gran utilidad en proyectos de ingeniería marítima. Se incorporan mecanismos físicos de disipación de energía, incluyendo contornos parcialmente absorbentes, fricción contra el fondo y pérdidas localizadas. Se presentan comparaciones entre resultados numéricos y soluciones analíticas.

ABSTRACT

This paper describes a numerical model which calculates the combined effects of wave diffraction, refraction and reflection. This program is useful in determining the agitation in harbors, bays and in the neighborhood of off-shore structures. Energy dissipation mechanics are incorporated. These include boundary absorption, bottom friction and localized dumping due to, for example, submerged bodies. Comparissons between numerical and analytical solutions are shown.

DESCRIPTORES

Descriptores: Puertos, olas, difracción, refracción, elementos finitos, integrales de contorno, contornos transparentes, resonancia.

INTRODUCCION

El conocimiento del oleaje en puertos y Areas costeras es esencial, desde el punto de vista económico, para estimar y/o modificar las condiciones de operación en sus inmediaciones. Su estudio se enfoca, en general, analizando por separado cada uno de los efectos físicos intervinientes, tales como difracción, retracción, bajo, reflexión y amortiguamiento. Sin embargo, éstos pueden ocurrir simultáneamente y con diferentes grados de interacción entre sí, por lo cual es conveniente adoptar una formulación totalizadora.

Las ondas provenientes de mar adentro, se refractan al ir encontrando zonas de menor profundidad (fig.1). Una vez situadas sobre la región de interés, el problema de estimar la penetración de la onda en el puerto se agudiza por la aparición de difracción y de múltiples reflexiones, las cuales producen ondas estacionarias y, en ciertos casos, el fenómeno de resonancia.

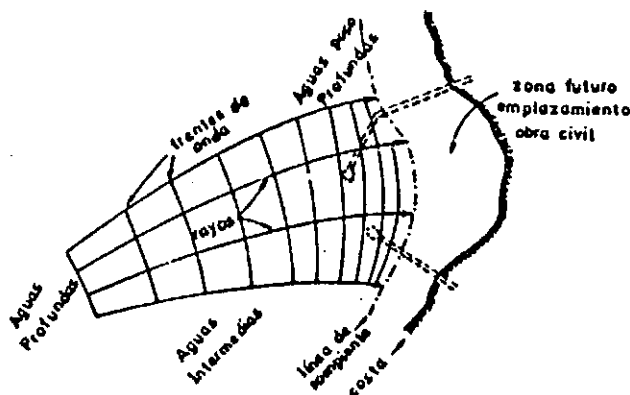


Fig.1 - Efecto de la refracción en la zona de aguas poco profundas

Para determinar las condiciones en las inmediaciones de la obra, partiendo de situaciones conocidas en aguas profundas, se utilizan modelos numéricos de retracción de ondas [1]. Estas, junto a las corrientes [2], intervienen como condiciones de contorno para calcular la agitación en la zona de interés.

El Laboratorio de Hidráulica Aplicada del INCYTH ha encarado un proyecto de investigación y desarrollo para tratar estos aspectos. En el presente trabajo se discute el programa DIFRAC2, el cual constituye una herramienta de gran utilidad en problemas de ingeniería marítima.

FORMULACION DEL PROBLEMA

Desde el punto de vista de la Mecánica de los Fluidos, las olas son ondas gravitatorias, es decir, motorizadas por gradientes de presiones. La teoría aquí utilizada asume un flujo irrotacional, donde la fricción

es luego introducida como una perturbación. Supone además, que la pendiente del fondo es suave, y que la amplitud de la onda, comparada con su longitud y la profundidad local, es lo suficientemente pequeña como para adoptar una formulación lineal. Entonces, es posible expresar el potencial de velocidades de la siguiente manera [3]:

$$\phi(x,y,z,t) = \phi(x,y) \frac{\cosh[k(h+z)]}{\cosh(kh)} e^{-i\omega t} \quad (1)$$

donde z es la coordenada vertical, con origen en la superficie no perturbada del fluido, ω la pulsación de la onda, k el número de ondas respectivo y h la profundidad local, ligadas por la relación de dispersión:

$$\omega^2 = g k \tanh(kh) \quad (2)$$

siendo g la aceleración de la gravedad, y ϕ el "potencial plano reducido", que satisface la denominada ecuación de BERKHOFF [4]:

$$\nabla \cdot (c \operatorname{grad} \phi) + \frac{c g \omega}{c} \phi = 0 \quad (3)$$

en (3), c es la celeridad de fase, $c_g = nc$ la celeridad de grupo, y n el coeficiente de bajío, definido por:

$$n = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right] = \frac{1}{2} (1 + G) \quad (4)$$

Ha sido puesto en evidencia en numerosas ocasiones, tanto desde el punto de vista teórico [5] como experimental [6], lo adecuado de la ecuación elíptica (3) en la predicción de procesos combinados de difracción, refracción y reflexión de ondas que se propagan sobre un lecho de suave pendiente. Mas aún, la ecuación de BERKHOFF se reduce, cuando $kh < (2\pi/20)$, a la clásica ecuación de ondas en aguas poco profundas [2], y cuando $kh > \pi$, a la conocida ecuación de HELMHOLTZ que gobierna los procesos de difracción pura en aguas de profundidad constante o infinita [3].

Ciertas condiciones de borde deben ser satisfechas por la solución de la ecuación diferencial. Así, la velocidad del fluido normal a un contorno debe ser nula:

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \quad (5)$$

donde n es aquí la normal exterior al contorno. Esta condición implica la reflexión total de la onda, tal como ocurre ante la presencia de paredes verticales impermeables. En problemas reales, es común encontrar contornos capaces de restar energía a la onda; hasta apreciar una zona de rompientes (fig.1). En otros casos, la reflexión es solo parcial, por ejemplo al incidir las olas contra un espigón de enrocado, cuya naturaleza porosa impide que la velocidad normal sea nula. Para tales bordes, la condición a cumplir puede ser escrita en la siguiente forma [7]:

$$\alpha \frac{\partial \mathcal{M}}{\partial t} + \frac{c}{\cos \theta} \frac{\partial \mathcal{M}}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

siendo α un coeficiente de absorción adimensional, mientras que θ es el ángulo formado entre la dirección de propagación de la onda y el eje x . Así, $\alpha = 0$ representa reflexión total, y $\alpha = 1$ implica absorción completa. Luego $0 < \alpha < 1$ puede usarse para cualquier situación de absorción parcial. En ciertos procesos donde intervienen efectos inerciales, como ser en zonas de rompientes, α puede devenir complejo [4], a consecuencia del desfase que se produce entre las ondas incidente y reflejada. Sin embargo, dada la enorme dificultad en determinar experimentalmente tales constantes, su utilización práctica se restringe a coeficientes reales.

En el contorno del infinito, el potencial debe verificar la condición de radiación de SUMMERFELD. A tal fin, si se representa al potencial como la superposición del correspondiente a la onda incidente \mathcal{M}^i , conocido, y el que resulta del proceso de "scattering" \mathcal{M}^s , originado por la presencia de obstáculos, dicha condición puede escribirse como:

$$\lim_{r_0 \rightarrow \infty} \sqrt{r_0} \left(\frac{\partial \mathcal{M}^s}{\partial r_0} - i k \mathcal{M}^s \right) = 0 \quad (7)$$

donde r_0 es la distancia medida a partir de un cierto origen ubicado en la región con presencia de bordes.

De esta manera, el problema diferencial queda totalmente planteado. Sin embargo, puede desarrollarse una formulación alternativa que conduce a una vía distinta de solución. En primer lugar, se divide el espacio en dos regiones, una interior A y otra exterior R , separadas por el contorno matemático ∂A (fig.2). En R se considera que la profundidad es constante o infinita. En consecuencia, allí puede plantearse para \mathcal{M}^s una formulación integral indirecta, en términos de una distribución continua de fuentes de intensidad u , desconocida, que se extiende sobre ∂A , obteniéndose:

$$\phi_R^s(P) = - \frac{1}{2} \int_{\partial A} u(Q) H_0^{(0)}(kr) ds(Q) \quad (8)$$

donde r es la distancia entre los puntos P y Q , k el número de ondas sobre ∂A y $H_0^{(0)}$ es la función de HANKEL de primera clase y orden nulo. La solución (8) satisface la condición de borde (7) automáticamente.

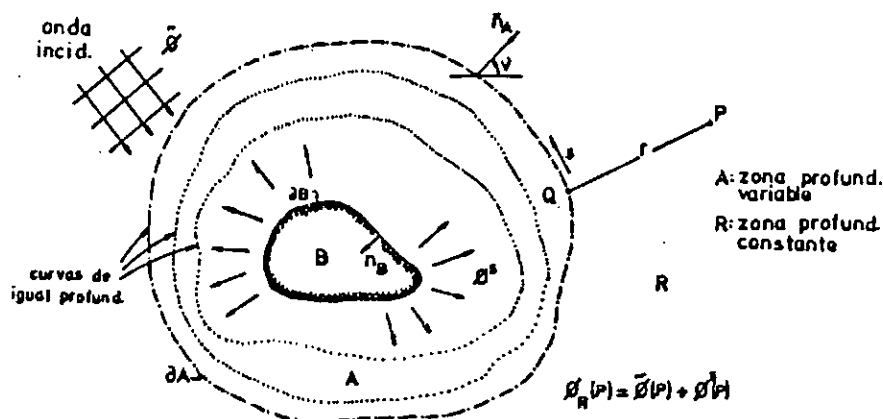


Fig. 2 - División del dominio de cálculo

En la zona interior A, por su parte, puede desarrollarse una formulación variacional para ϕ . La funcional $J(\phi)$ es la "energía compleja" [8], definida como:

$$J(\phi) = J_A(\phi) + J_{FA}(\phi) + J_{DA}(\phi) + J_{CA}(\phi) + J_{CB}(\phi) \quad (9)$$

donde:

$$J_A(\phi) = \iint_A \frac{1}{2} [c \, c_g (\nabla \phi)^2 - \frac{c g w}{c} \phi^2] dx dy \quad (10)$$

representa la suma de las energías cinética y potencial contenidas en A;

$$J_{CA}(\phi) = - \int_{\partial A} c \, c_g \phi \frac{\partial \phi}{\partial n} ds \quad (11)$$

corresponde al flujo de energía irradiado hacia la zona exterior R;

$$J_{CB}(\phi) = - \int_{\partial B} c \, c_g \phi \frac{\partial \phi}{\partial n} ds \quad (12)$$

está asociada al flujo de energía compleja a través del contorno absorbente ∂B ;

$$JFA(\phi) = - \iint_A \frac{i}{2w} F [1 - l^2] (\nabla \phi)^2 dx dy \quad (13)$$

está ligada a la energía disipada por fricción contra el fondo, siendo $F=F(x,y)$ una función de pérdida que depende de la capa límite (laminar o turbulenta) y, l es la longitud de onda adimensionalizada con el valor que toma en aguas profundas.

$$JDA(\phi) = - \iint_A i n w \nabla \phi^2 dx dy \quad (14)$$

representa pérdidas energéticas localizadas, siendo ∇ un coeficiente de amortiguamiento [9,10]

Nótese que no existían contribuciones similares a JFA y JDA en el planteo diferencial original.

La contribución JCB(ϕ) al funcional debe satisfacer la condición (6), para la cual se presentan dos aproximaciones que prescinden del conocimiento previo del ángulo θ [7]:

$$\text{1er. orden:} \quad \frac{\partial \phi}{\partial n} - i \alpha k \phi = 0 \quad \text{en } \partial B \quad (15)$$

$$\text{2do. orden:} \quad i k \frac{\partial \phi}{\partial n} + \alpha k^2 \phi + \frac{1}{2} \alpha \frac{\partial^2 \phi}{\partial s^2} = 0 \quad \text{en } \partial B \quad (16)$$

La solución ϕ_A en la zona A se acopla a la solución ϕ_R en la zona R, estableciendo la continuidad de la altura de la onda y de la velocidad normal sobre el contorno ∂A :

$$\phi_A(P) = \tilde{\phi}(P) + \phi_R^s(P) \quad (17)$$

$$\frac{\partial \phi_A}{\partial n}(P) = \frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial n}(P) + u(P) - \frac{i}{2} \int_{\partial A} u(Q) \frac{\partial H_0^{(w)}(kr)}{\partial n} ds(Q) \quad (18)$$

METODO NUMERICO

En base a la formulación del problema desarrollada en la sección anterior, es natural adoptar el método de los elementos finitos (MEF) para la zona interior A, y el método de los elementos de contorno (MEC) (en particular el método panel) para la zona exterior R.

Entonces, la región A se particiona en "E" elementos finitos triangulares trinodales, quedando así definidos "N" nodos. Luego, el funcional (9) se obtiene como la suma de cada contribución elemental $Je(\phi)$:

$$J(\phi) = \sum_{e=1}^E Je(\phi) \quad (19)$$

El potencial en cada elemento se aproxima de acuerdo a la práctica usual del MEF:

$$\phi^e = \underline{N} \cdot \underline{\phi}^e \quad (20)$$

siendo $\underline{\phi}^e$ el vector columna con las incógnitas nodales en cada elemento, y \underline{N} el vector fila de las funciones de forma adoptadas.

Por su parte, de acuerdo al método de los paneles, se acepta que la función $u(Q)$ se mantiene constante en cada segmento de la frontera ∂A (es decir, sobre cada panel). Entonces, las condiciones de continuidad (17) y (18) conducen a las siguientes expresiones:

$$\frac{1}{2}(\phi_l + \phi_n) = \tilde{\phi}_k - \frac{1}{2} \sum_{j=1}^M u_j H_0^{(1)}(kr_{kj}) \Delta S_j \quad k=1,2,\dots,M \quad (21)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial n_k} = \frac{\partial \tilde{\phi}_k}{\partial n_k} + u_k - \frac{1}{2} \sum_{j=1}^M u_j \frac{\partial H_0^{(1)}(kr_{kj})}{\partial n_k} \Delta S_j \quad k=1,2,\dots,M \quad (22)$$

donde r_{kj} es la distancia entre los puntos medios de los segmentos k y j , ΔS_j es la longitud del segmento j y M es el número de elementos en que se divide el contorno A .

Introduciendo (20) en $J_e(\phi)$ y efectuando la suma indicada en (19), donde $JCA(\phi)$ se evalúa de acuerdo a la expresión (22), se llega a:

$$J(\phi) = \frac{1}{2} \underline{\phi}^t \underline{A} \underline{\phi} + \underline{\phi}^t (\underline{B} \underline{u} - \underline{r1}) \quad (23)$$

y puesto que la solución surge de la condición de estacionariedad del funcional, se obtiene:

$$\underline{A} \underline{\phi} + \underline{B} \underline{u} = \underline{r1} \quad (24)$$

donde:

\underline{A} : matriz compleja y simétrica de $N \times N$ elementos, de estructura banda generada por el MEF.

\underline{B} : matriz compleja de $N \times M$ elementos, obtenida en base al MEC y constituida por las derivadas normales de la función de Hankel.

$\underline{\phi}$: vector complejo conteniendo las N incógnitas del potencial en cada nodo de la red de elementos finitos.

\underline{u} : vector complejo con las M intensidades incógnitas de las fuentes distribuidas en ∂A .

$\underline{r1}$: vector complejo conteniendo las derivadas normales del potencial incidente $\tilde{\phi}$.

Por su parte, la ecuación (21) se expresa matricialmente como:

$$C \underline{\phi} + D \underline{u} = \underline{r_2} \quad (25)$$

donde:

\underline{C} : matriz real constituida por los coeficientes 1/2 de la expresión (21).

\underline{D} : matriz compleja compuesta por las funciones de Hankel.

$\underline{r_2}$: vector complejo, producto del potencial incidente ϕ .

El sistema de ecuaciones lineales complejas (24) y (25), se resuelve utilizando un método directo de solución, obteniéndose primero el vector incógnita \underline{u} , y calculándose luego con estos valores el campo completo del potencial ϕ buscado.

RESULTADOS NUMERICOS

En el proceso de prueba del modelo matemático, existen dos aspectos importantes. Por un lado, en aquellos casos en que la ecuación diferencial (3) admite soluciones analíticas, deben efectuarse las correspondientes comparaciones con las soluciones numéricas para garantizar la bondad del modelo adoptado. En segundo lugar, debe verificarse si la descripción matemática y la solución numérica asociada, concuerdan en buena medida con los procesos físicos observados. Este último aspecto es particularmente importante, puesto que la formulación matemática no incluye todos los efectos físicos intervinientes. Esta verificación se realiza sobre la base de mediciones de campo o de experiencias en escala reducida (modelos físicos). Al respecto, existen suficientes evidencias que confirman la validez de la ecuación de BERKHUFF [6].

Respecto del primer punto, una prueba consistió en simular los efectos de difracción y reflexión que se producen a partir de una onda que incide sobre una pila o isla circular de bordes opacos (fig.3), que constituye un ejemplo simple de estructura off-shore. La fig.4 muestra la red de elementos finitos utilizada, mientras que en la fig.5 se aprecia la variación de la altura de la onda, relativa a la altura de la onda incidente, en torno a la pila. Se observa que los resultados numéricos concuerdan satisfactoriamente con los analíticos. En la fig.6 se graficaron las líneas de igual amplitud relativa, y en la fig.7 puede verse la típica figura de difracción detrás de la pila.

La siguiente prueba se refiere a la agitación en un puerto rectangular, geometría que ha sido ampliamente investigada por numerosos autores [11]. Se utilizaron bordes totalmente reflejantes (fig.8). Se

muestra en la fig.9 la correspondiente solución numérica comparada con la solución analítica que surge de la teoría propuesta por UNLUATA & MEL [11], para un amplio rango de frecuencias. El acuerdo es excelente, excepto en la última parte de la curva, donde los valores numéricos caen por encima de la solución analítica. Quizás sea esta última quien falle, pues una de las hipótesis básicas de la teoría es que $kb \ll 1$, mientras que para $kL=5$ se tiene $kb=O(1)$. En las figs.10-11 se muestran perfiles de la onda estacionaria a lo largo de la línea central del puerto.

Se realizó una tercera prueba para chequear el rendimiento de las aproximaciones de primer y segundo orden en bordes transparentes, a partir de un océano semi-infinito de profundidad constante, limitado por una costa recta infinita (fig.12), y considerando que una porción de la misma es absorbente. Así, para coeficientes crecientes de absorción, se calculó la reflexión parcial de la onda introducida por el borde semi-transparente (fig.13). Una forma alternativa de presentar los resultados es graficando los errores absolutos (fig.14). De esta prueba, surgen dos conclusiones. Por un lado, el ajuste alcanzado es altamente satisfactorio y, por otra parte, se aprecia un rendimiento más parejo y eficiente en la aproximación de segundo orden.

Otra prueba de absorción se presenta en las figs.15, 16 y 17. Se basa en la solución analítica [11] para una onda que se propaga en un océano semi-infinito, y que se introduce en un canal rectangular de longitud semi-infinita. En la fig.15 se muestra la red de elementos finitos adoptada, de longitud $L=1000$ mts. y ancho $b=40$ mts., aplicándose una condición de absorción total (segundo orden) al final del canal. El ajuste conseguido en este caso puede considerarse excelente para todo el rango de frecuencias ensayado (fig.16). La fig.17 muestra un corte de la solución a lo largo del canal para $kL=1$.

Finalmente, se analizó un caso de pérdida de energía por fricción de fondo, adoptándose un canal rectangular semi-infinito de características similares al tratado previamente (figs. 18 y 19). Se observa el decaimiento de la amplitud a medida que la onda penetra en el canal, registrándose una discrepancia no mayor al 10% respecto de lo esperado según cálculos teóricos [3]. Las oscilaciones de la solución se deben a la difracción acaecida en la boca.

CONCLUSIONES

Se presenta el programa DIFRAC2 para resolver el efecto combinado de la difracción, retracción y reflexión de ondas. Las pruebas a las que fue sometido arrojaron resultados altamente satisfactorios.

El programa se utiliza en estudios de ingeniería marítima encarados por el LHA, y, eventualmente se encuentra a disposición de profesionales de la Hidráulica interesados en contar con una herramienta de estas características.

REFERENCIAS

- [1] Vionnet, C.A.; Menéndez, A.N. (1986): "Simulación numérica de olas para el diseño de puertos". XII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, San Pablo (Brasil), Vol.1, pp.439-449.
- [2] Menéndez, A.N. (1985): "Simulación numérica de flujos cuasi-bidimensionales a superficie libre", informe LHA-INCYTH 55-086-85.
- [3] Ippen, A.T. (1966): "Estuary and Coastline Hydrodynamics", Iowa Inst. Hydraulic Research.
- [4] Berkhoff, J.C.W. (1976): "Mathematical models for simple harmonic linear water waves. Wave diffraction and refraction", Publication Nro.163, Delft Hydraulics Lab.
- [5] Jonsson, I.G.; Skovgaard, U. and Brink-Kjaer (1976): "Diffraction and refraction calculations for waves incident on a island", J. Marine Res., Vol.34, nro.3, pp.469-496.
- [6] Berkhoff, J.C.W.; Booij, N. and Radder, A.C. (1982): "Verification of Numerical Wave propagation models for simple harmonic linear water waves", Coastal Engineering, Vol.6 nro.3, pp.255-279.
- [7] Engquist, B. and Majda, A. (1977): "Absorbing boundary conditions for the numerical simulation of waves", Mathematics of Computation, Vol.31, nro.139, pp.629-651.
- [8] Behrendt, L.; Jonsson, I.G. (1984): "The physical basis of the mild-slope wave equation", Proc. 19th. Coastal Eng. conf., Houston, ASCE, New York.
- [9] Dalrymple, R.A.; Kirby, J.; Hwang P.A. (1984): "Wave diffraction due to areas of energy dissipation", J. of Waterways, Port, Coastal and Ocean Eng., Vol.110, Nro.1, pp.67-79.
- [10] Vionnet, C. (1987): "Difracción-retracción combinadas en ondas de agua", Inf. LHA-INCYTH 064-02-87
- [11] Unluata, U.; Mei, C.C. (1978): "Long wave excitation in harbours - an analytical study". Rep. no. 1/1. Parsons Lab., MIT.

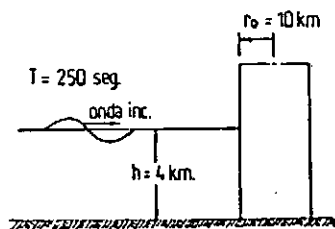


Fig.3 - Pila circular

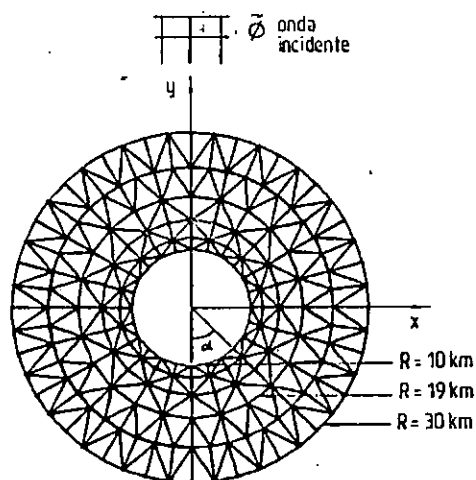


Fig.4 - Red Elem. Finitos

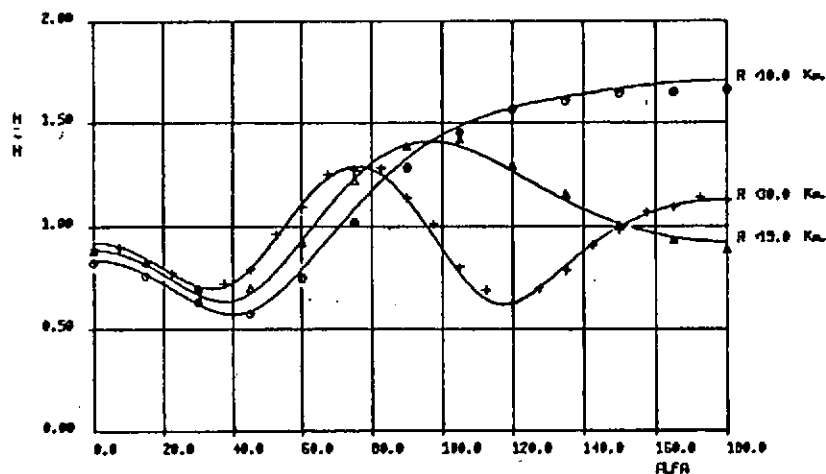


Fig.5 - Variación de la altura relativa de la onda en torno a la pila circular (H: altura onda incid.)

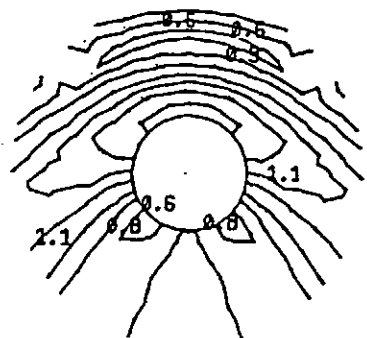


Fig.6 - Líneas de igual amplitud relativa $c/0.1$ u.

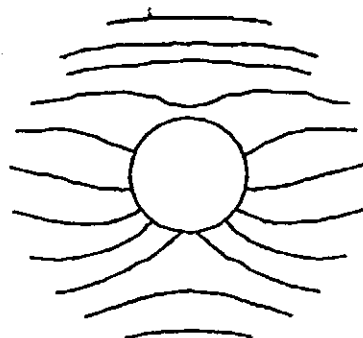


Fig.7 - Líneas de igual fase cada $1/4$ rad.

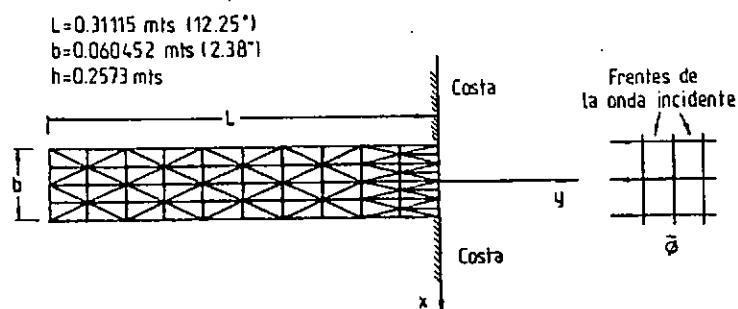


Fig.8 - Red de Elementos Finitos (Puerto Rectang.)

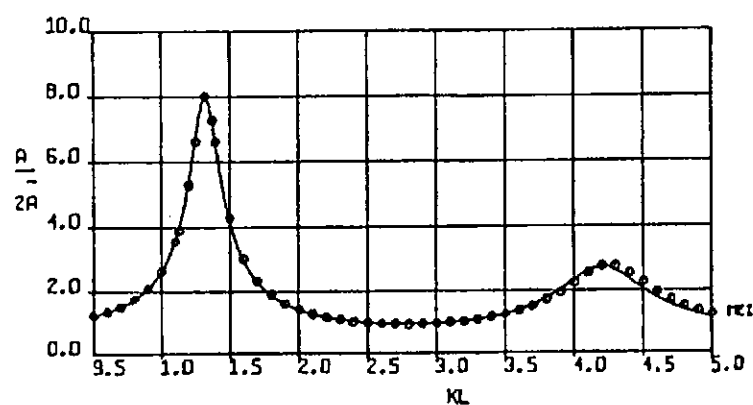


Fig.9 - Solución Analítica (UNLUATA & MEL - 1973)
 o Solución numérica (MEF)

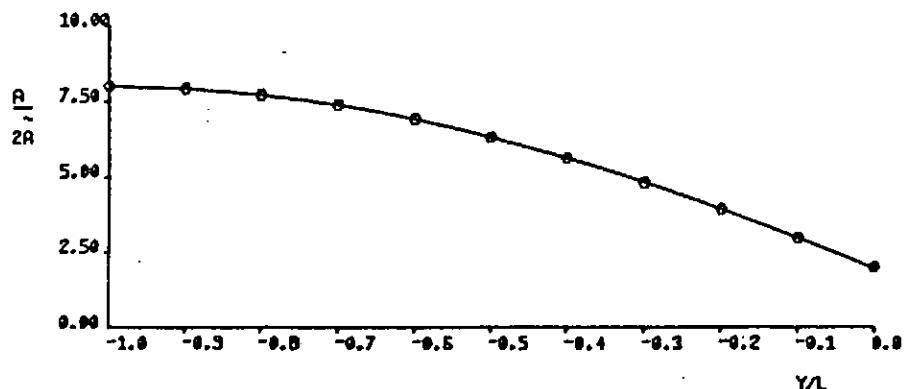


Fig.10 - Perfil onda estacionaria en el interior del puerto rectangular ($KL=1.324$)

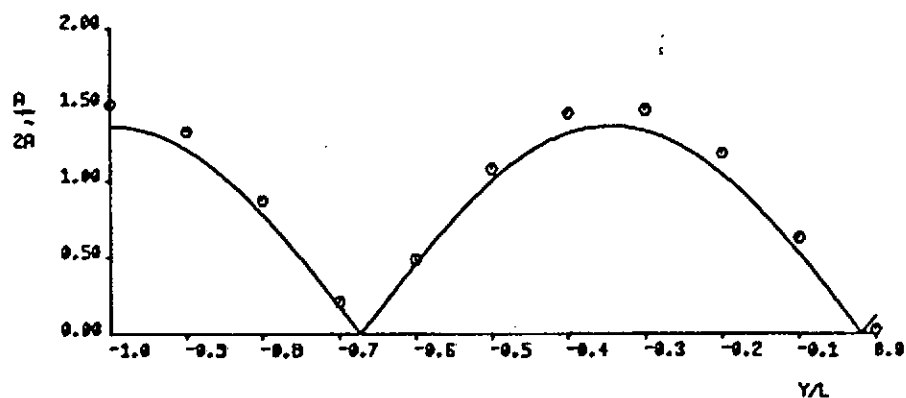


Fig.11 - Perfil onda estacionaria en el interior del puerto rectangular ($KL=5.$)

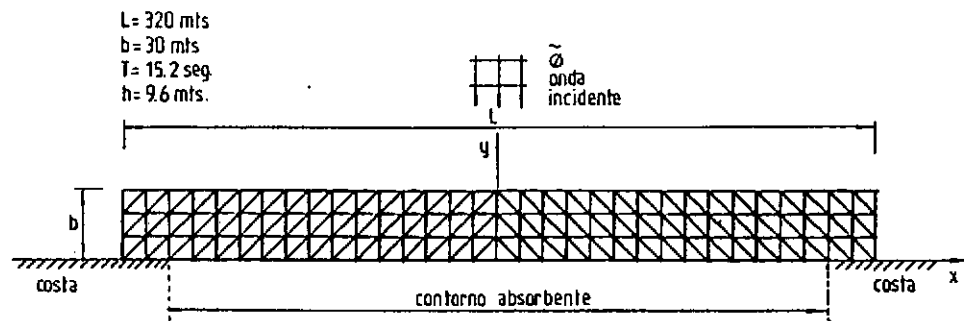


Fig.12 - Red de Elementos Finitos
Longitud contorno absorbente = 280 mts.

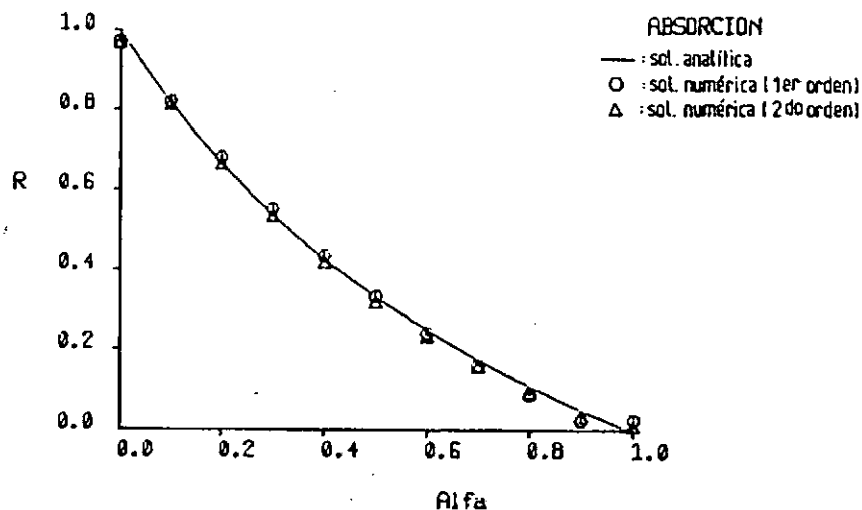


Fig.13 - Comparación entre las aproximaciones de 1er. y 2do. orden sobre una costa parcialmente transparente (α : coeficiente de absorción)

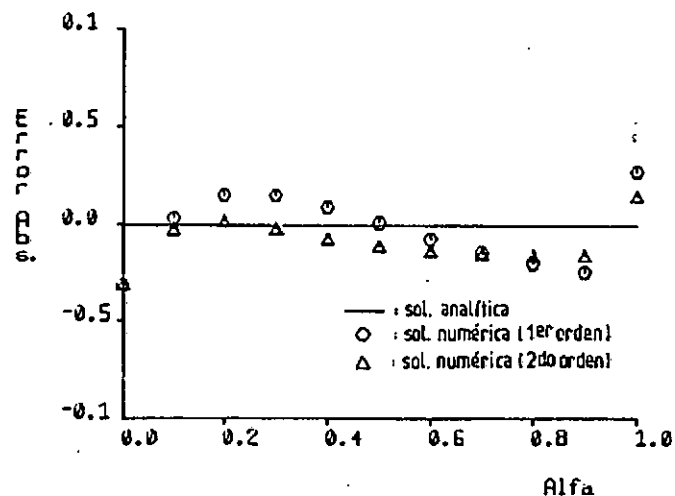


Fig.14 - Errores absolutos de los resultados correspondientes a la fig.13.

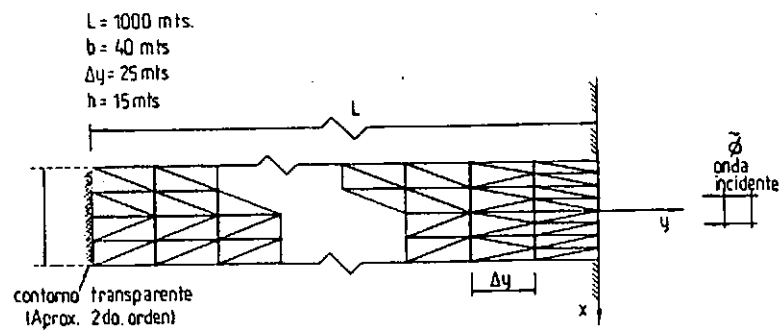


Fig.15 - Red de Elementos Finitos (Canal Semi-infinito)

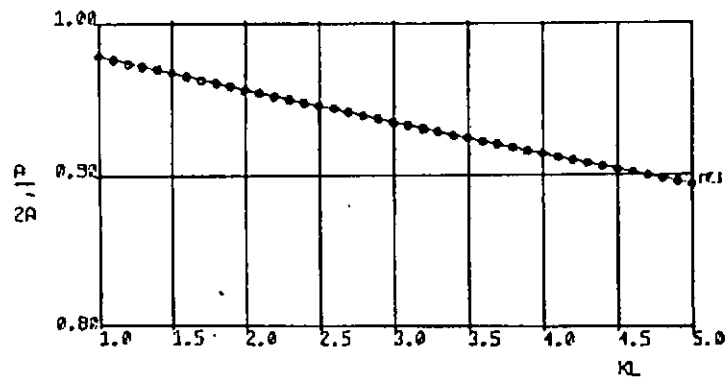


Fig.16 - Solución analítica (UNLUATA & MEI - 1973)
o Solución numérica (MEF)

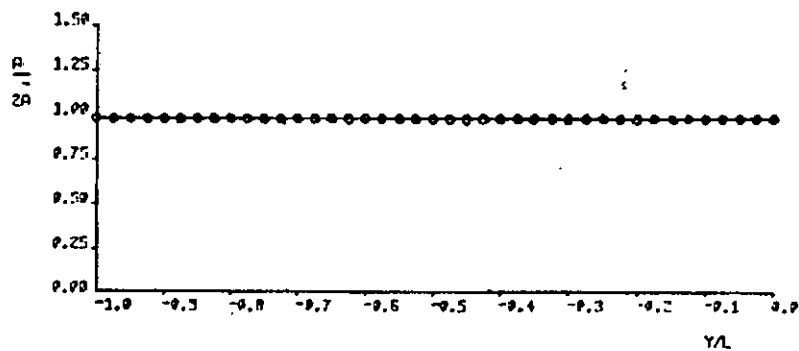


Fig.17 - Amplitud relativa de la onda a lo largo de la línea central del canal semi-infinito
- Solución analítica (UNLUATA & MEI)
o Solución numérica (MEF)

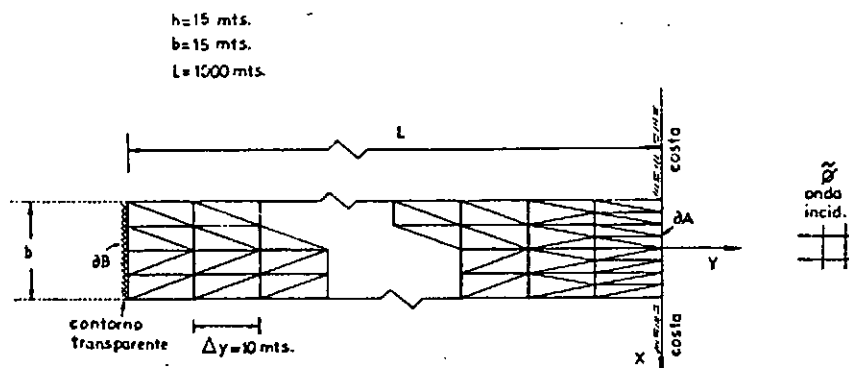


Fig.18 - Red de Elementos Finitos (Canal semi-infinito)

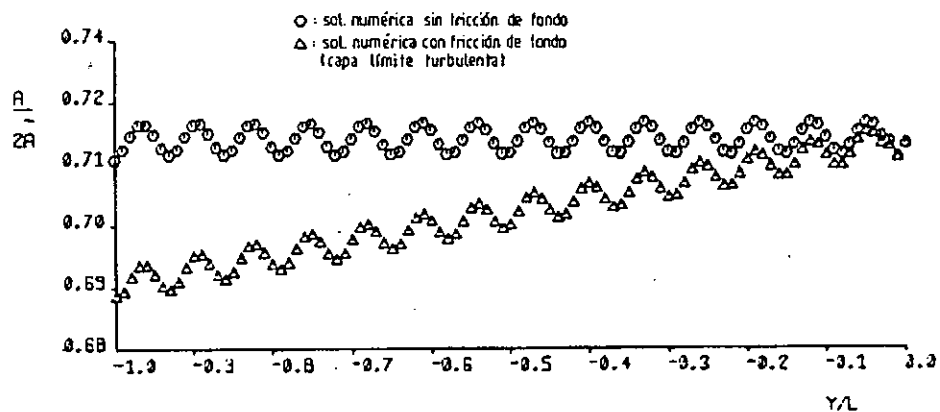


Fig.19 - Variación de la amplitud relativa de la onda a lo largo de la línea central del canal

ESTUDIO DE LAS CONDICIONES DE AGITACION POR OLEAJE EN UN PUERTO MEDIANTE SIMULACION NUMERICA

MIGUEL A. CAVALIERE
ANGEL N. MENENDEZ
y
ROBERTO CASTELLANO

*Laboratorio de Hidráulica Aplicada - I.N.C. y T.H.,
Casilla de Correo 21, 1802 Aeropuerto de Ezeiza,
Argentina.*

RESUMEN

Se describe una aplicación del sistema computacional DIFRAC para estudiar las condiciones de agitación por oleaje dentro de un puerto, teniendo en cuenta el efecto combinado de difracción, refracción y reflexión de las olas. Se presentan resultados para la amplitud y dirección de propagación del oleaje en su interior y de las condiciones de resonancia en las distintas dársenas del puerto.

SUMMARY

An application of the computational model DIFRAC for the study of wave conditions inside a harbor is described. It takes account of the combined effect of diffraction, refraction and reflection of waves. Results for wave amplitude and wave front propagation direction into the harbor are presented, together with an analysis of resonance conditions for the different docks.

INTRODUCCION

Un puerto constituye un área de aguas calmas no sólo para garantizar la permanencia en amarra de las embarcaciones bajo adecuadas condiciones de seguridad, sino además para permitir las operaciones que éstas deban realizar: embarque de pasajeros, manipuleo de cargas, abastecimiento, reparación, mantenimiento, etc.

En zonas expuestas a la acción del oleaje, es habitual que se deba recurrir a la construcción de estructuras de protección que limiten su penetración al puerto. Las dimensiones y orientación del acceso al puerto surgen de una solución de compromiso entre las facilidades requeridas por las embarcaciones para acceder al puerto y la energía de oleaje máxima admisible dentro del espejo de agua protegido. La construcción de

Recibido: Noviembre 1991

estas estructuras (obras de abrigo) tiene, habitualmente, una importante incidencia en el costo total del puerto, afectando la rentabilidad en el caso de tratarse de un puerto comercial. Proteger en exceso supone inversiones iniciales innecesariamente altas; por el contrario, proteger en defecto significa costos operativos elevados.

Para la depuración de un proyecto portuario, específicamente en lo que se refiere a protección del oleaje, el ingeniero hidráulico ha recurrido tradicionalmente a los modelos hidráulicos, es decir, a la simulación física del problema en escala reducida. Mediante esta técnica el ingeniero proyectista tiene la posibilidad de "ver" cómo las obras interactúan con el oleaje, facilitándole la interpretación de la compleja hidrodinámica, originada en la coexistencia de los fenómenos de difracción, refracción y reflexión, y la formulación de diagnósticos y propuestas de soluciones. La principal dificultad con la simulación física es su alto costo en infraestructura (superficies cubiertas del orden de 500 a 1000 m², equipo para generación de olas, instrumentación electrónica específica para la adquisición de datos), implementación (costo de construcción) y operación (energía eléctrica, personal auxiliar). Además, para escalas del orden de 1:150 a 1:200 los efectos de escala comienzan a distorsionar los resultados.

Estos inconvenientes, sumados a la reciente formulación de modelos teóricos confiables de agitación por oleaje, el persistente incremento de la potencia de cálculo de las computadoras, a costos cada vez menores, y los avances en los métodos de resolución numérica de ecuaciones diferenciales y de las técnicas de visualización de resultados, han colocado a la simulación numérica en una posición ventajosa tanto desde el punto de vista técnico como económico.

En este trabajo se presenta un estudio de las condiciones de agitación por oleaje en un puerto deportivo a construirse en Punta del Este (Uruguay). El objetivo es ilustrar el alcance de este tipo de modelos desde un punto de vista práctico.

MODELO NUMERICO

El estudio se realizó con el sistema computacional DIFRAC, desarrollado en el Laboratorio de Hidráulica Aplicada (LHA) del INCYTH. Este modelo permite simular el efecto combinado de refracción, difracción y reflexión de olas, tal como se presenta en los recintos portuarios. Sus detalles técnicos ya han sido expuestos en oportunidades anteriores^{1,2}. En lo que sigue se presenta sólo una breve reseña.

La formulación matemática del problema de agitación se basa en la teoría lineal de ondas de pequeña amplitud de tipo armónico y en la hipótesis de que la pendiente del fondo es suave³. Bajo esas condiciones, el potencial (complejo) plano de velocidades Φ , reducido al nivel medio del agua, satisface la ecuación

$$\nabla \cdot (\alpha \nabla \Phi) + K^2 \alpha \Phi = 0 \quad (1)$$

donde α es el producto de las celeridades de fase y de grupo y K un coeficiente de modulación vertical de la amplitud de oscilación, relacionado a la frecuencia mediante una relación de dispersión.

La amplitud A del oleaje puede calcularse a partir del potencial plano reducido a través de la siguiente expresión:

$$A = \frac{\omega}{g} |\Phi| \quad (2)$$

donde ω es la pulsación de la ola y g la aceleración de la gravedad.

La ecuación (1), conocida como Ecuación de Berkhoff, ha sido exhaustivamente verificada en su capacidad de simular adecuadamente el fenómeno de agitación^{2,4}. En particular, Booij⁵ analizó su comportamiento en problemas con pendientes relativamente fuertes, comparando sus resultados con un modelo tridimensional, y obtuvo acuerdos satisfactorios a pesar de apartarse de una de las hipótesis básicas de la formulación.

Los contornos físicos del recinto portuario pueden comportarse como totalmente reflejantes o parcialmente absorbentes. Estos últimos representan estructuras en las cuales hay disipación de energía, tales como rompeolas, escolleras de enrocado, etc.

El puerto se comunica, a través de su entrada, con el mar, que constituye un dominio "infinito" donde se superponen el oleaje incidente y el de "scattering", resultante de la acción reflejante y difractante del conjunto de estructuras que componen el puerto. El potencial de "scattering" debe satisfacer la condición de radiación de Sommerfeld.

Con vistas a su resolución numérica, el dominio del problema es dividido en una región interior finita, donde se concentran todos los contornos físicos relevantes, y una región exterior infinita. En la primera es posible reemplazar la formulación diferencial por una variacional. Para la región exterior, en cambio, puede adoptarse una formulación integral indirecta en términos de una distribución de fuentes, lo cual trae como ventaja la posibilidad de resolver el problema exterior sólo sobre el contorno matemático de separación de ambas regiones, denominado frontera de radiación.

En base a esta reformulación del problema, es natural adoptar el método de los elementos finitos para la zona interior y el método de los elementos de contorno para la zona exterior.

DESCRIPCION DEL PUERTO

El proyecto estudiado corresponde a una marina a construirse, sobre el litoral atlántico de la República Oriental del Uruguay, destinada al amarre de embarcaciones deportivas. Este estudio fue efectuado por la LHA a requerimiento de la consultora LATINOCONSULT S.A.⁶.

En la Figura 1 se presenta un esquema del puerto y se identifican distintas zonas. El acceso desde el mar se logra a través de un canal de navegación de aproximadamente 300 metros de longitud, a cuyos lados se desarrollan dos escolleras de enrocado. La distribución general de las zonas de amarra es de tipo ramificada, distinguiéndose cuatro dársenas (A,B,C,D) y dos canales (zonas E a I). La profundidad en toda la marina es constante, salvo en el canal de acceso. La sección transversal del canal es de tipo trapezoidal, con taludes laterales suaves.

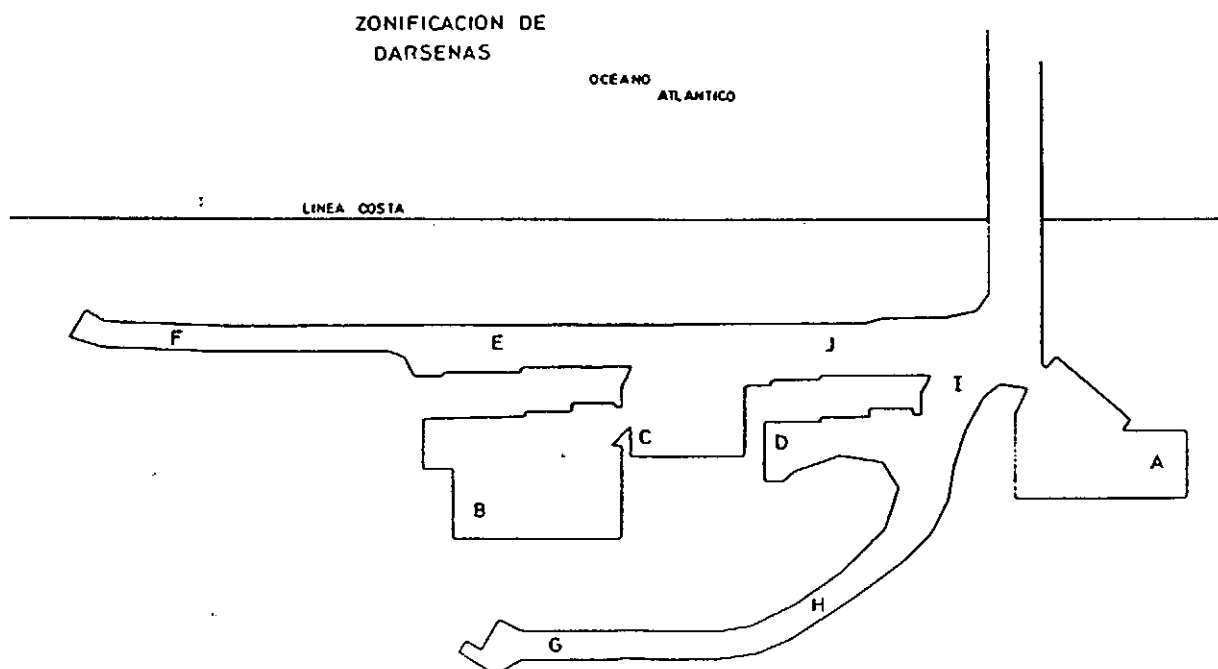


Figura 1. Esquema del puerto.

IMPLEMENTACION DEL MODELO

La frontera de radiación, que separa las zonas interior y exterior, se ubicó en la boca del canal de acceso, uniendo a las dos escolleras. La mayor parte de las paredes internas de la marina están constituidas por un tablestacado vertical que, desde el punto de vista hidrodinámico, constituye un contorno impermeable sobre el cual el oleaje se refleja totalmente. El tratamiento de estos contornos resultó, entonces, trivial dado que constituyen una condición de borde de tipo natural. Las escolleras y las zonas protegidas con taludes inclinados se trataron como contornos parcialmente absorbentes, con coeficientes de absorción determinados por el proyectista de la obra.

La malla de elementos finitos, mostrada en la Figura 2, fue generada en forma automática, a partir de la planimetría del contorno del puerto, utilizando el programa ENREDO, desarrollado por el grupo de Mecánica Computacional del Centro Atómico de Bariloche de la CNEA. Para lograr una adecuada representación numérica del problema, fue necesario trabajar con una malla de 13657 elementos y 7411 nodos, con lo cual las longitudes de onda más cortas estudiadas fueron representadas, al menos, con 5 elementos. Teniendo en cuenta que el potencial plano Φ es complejo el número de incógnitas se duplica. Esto significó un requerimiento de 7 MBytes de memoria para el almacenamiento de los datos y tiempos de máquina en MicroVax del orden de los 80 minutos de CPU por ensayo.

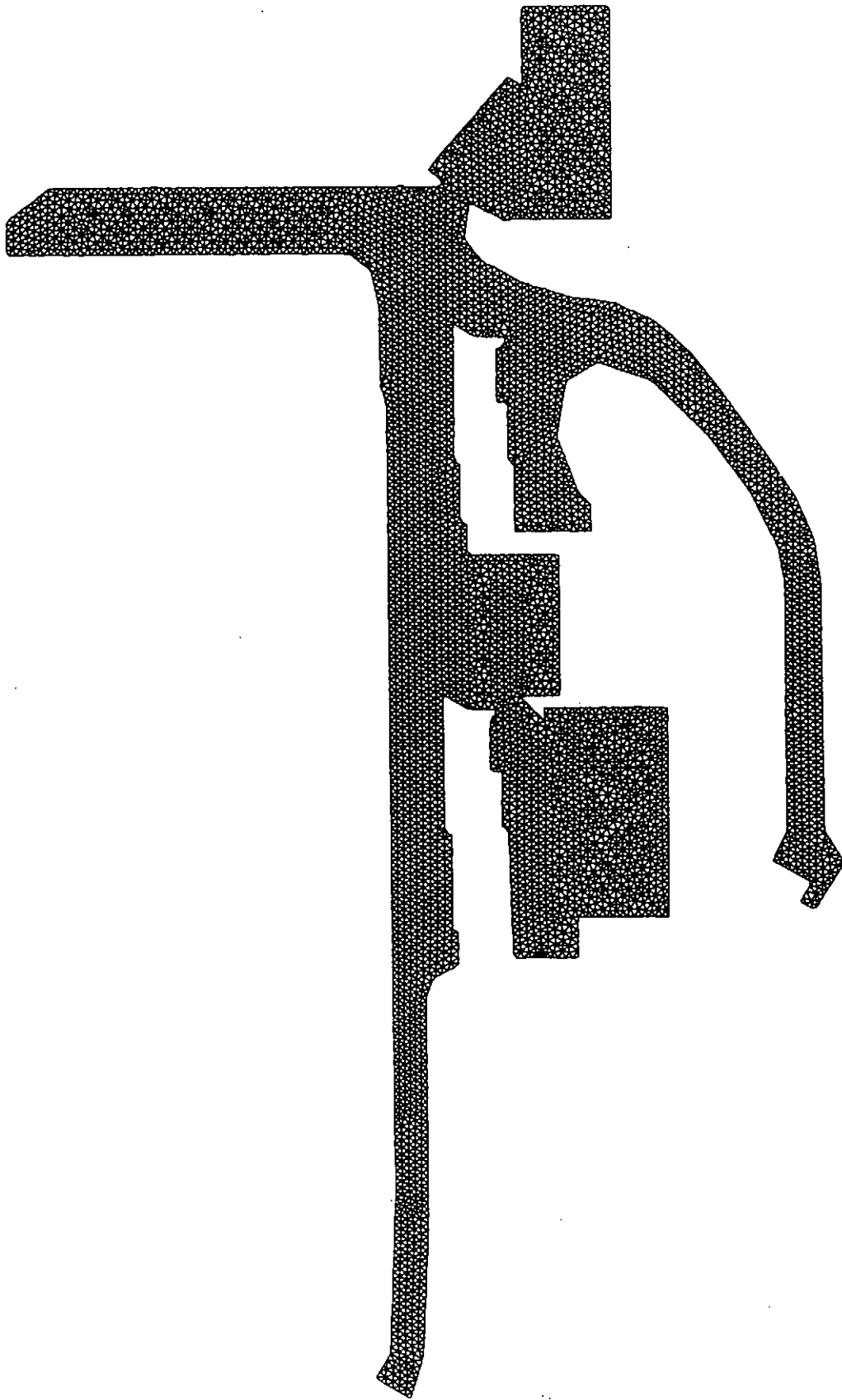


Figura 2. Malla de elementos finitos.

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

Se efectuaron ensayos para diferentes condiciones del oleaje incidente, analizándose la efectividad de las estructuras de abrigo. En la Figura 3 se muestra una vista tridimensional de la superficie libre en la zona interior del puerto correspondiente a uno de los ensayos. Se observa que el nivel de agitación es marcadamente distinto en las diferentes dársenas.

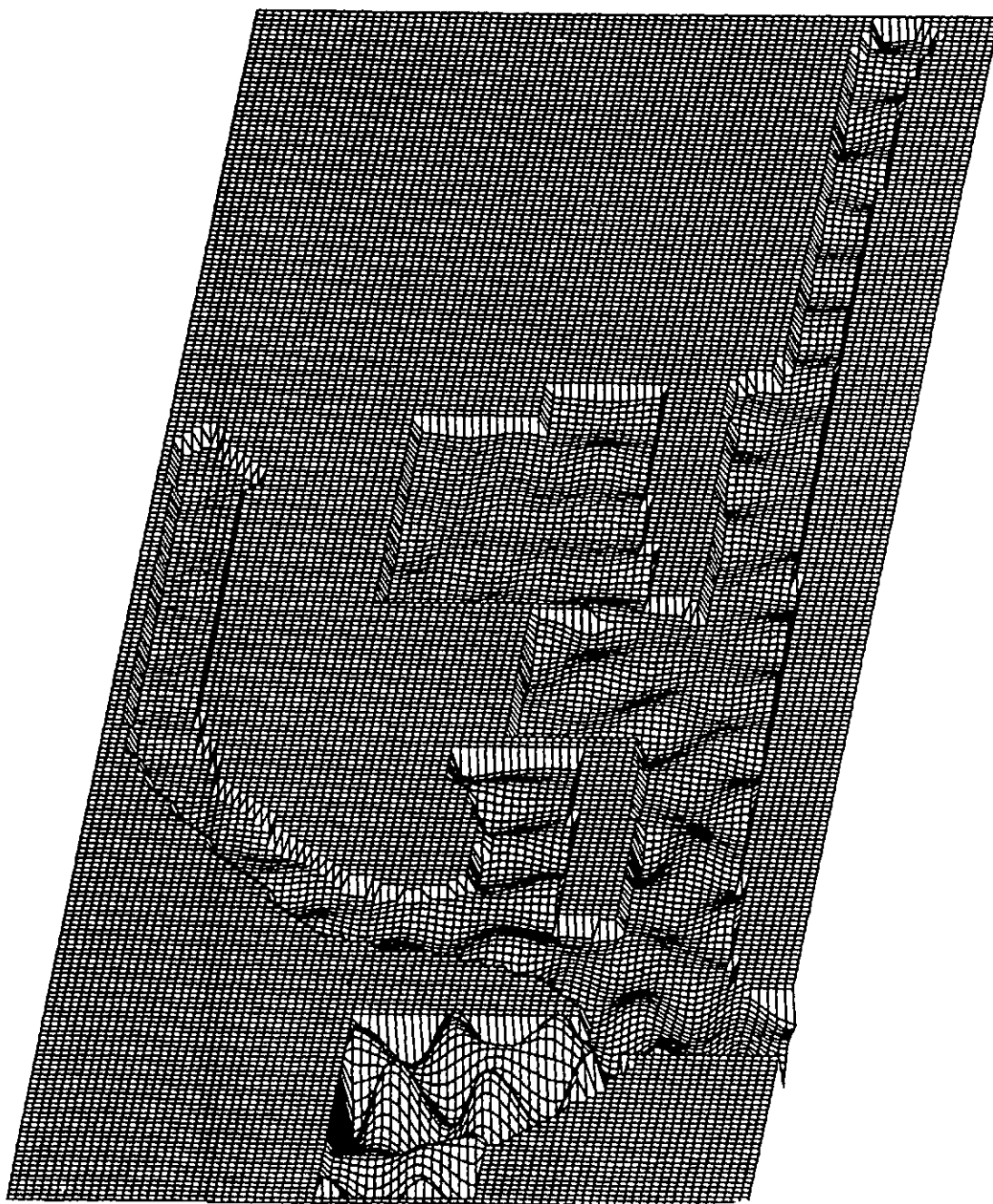


Figura 3. Vista tridimensional del interior del puerto.

En la Figura 4 se representa la amplitud del oleaje a lo largo del canal de acceso. Se observa que la atenuación es muy importante. Para olas con períodos comprendidos entre 5 y 7 segundos, que son las más frecuentes en esa región, la atenuación alcanza el 90 %, siendo algo más leve para períodos mayores. Se determinó que los taludes del canal de acceso juegan un rol muy importante en este proceso, dado que producen un efecto de refracción sobre las olas, orientándolas hacia las escolleras que protegen el canal, las cuales disipan gran parte de la energía de las olas incidentes.

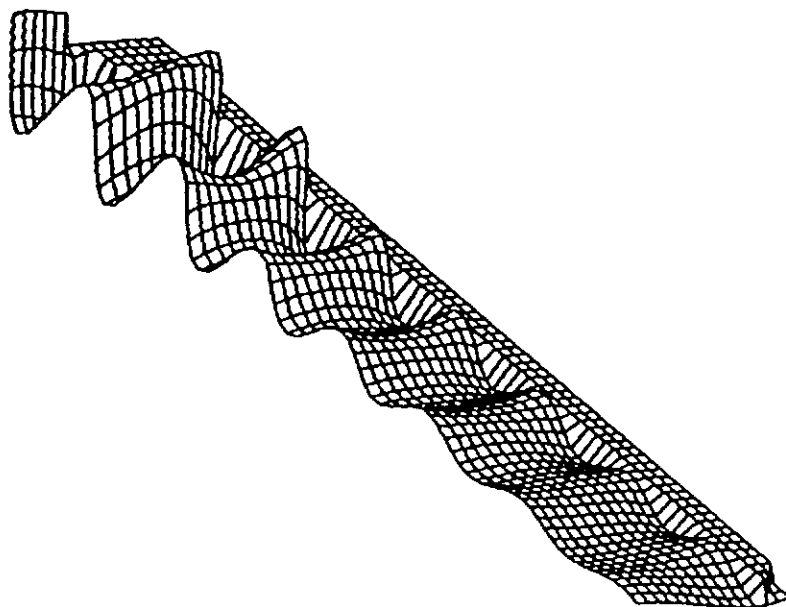


Figura 4. Atenuación del oleaje en el canal de acceso.

En la Figura 5 se presenta una vista tridimensional de detalle de la Dársena A, donde la agitación es mayor. La Figura 6 muestra las líneas de isoamplitud, relativa a la amplitud de la ola incidente, sobre todo el puerto. Dado que el modelo es de tipo lineal, estos resultados son independientes de la amplitud del oleaje incidente.

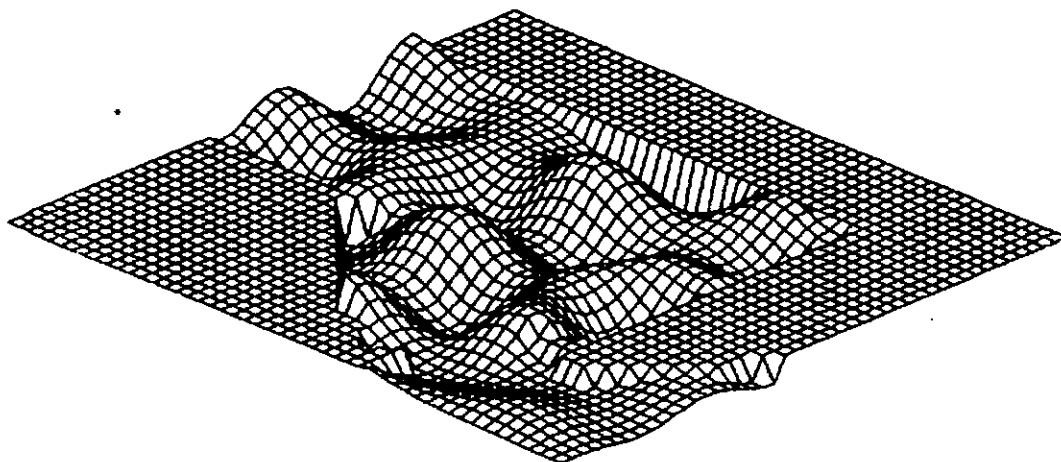


Figura 5. Vista tridimensional del oleaje en la Dársena A.

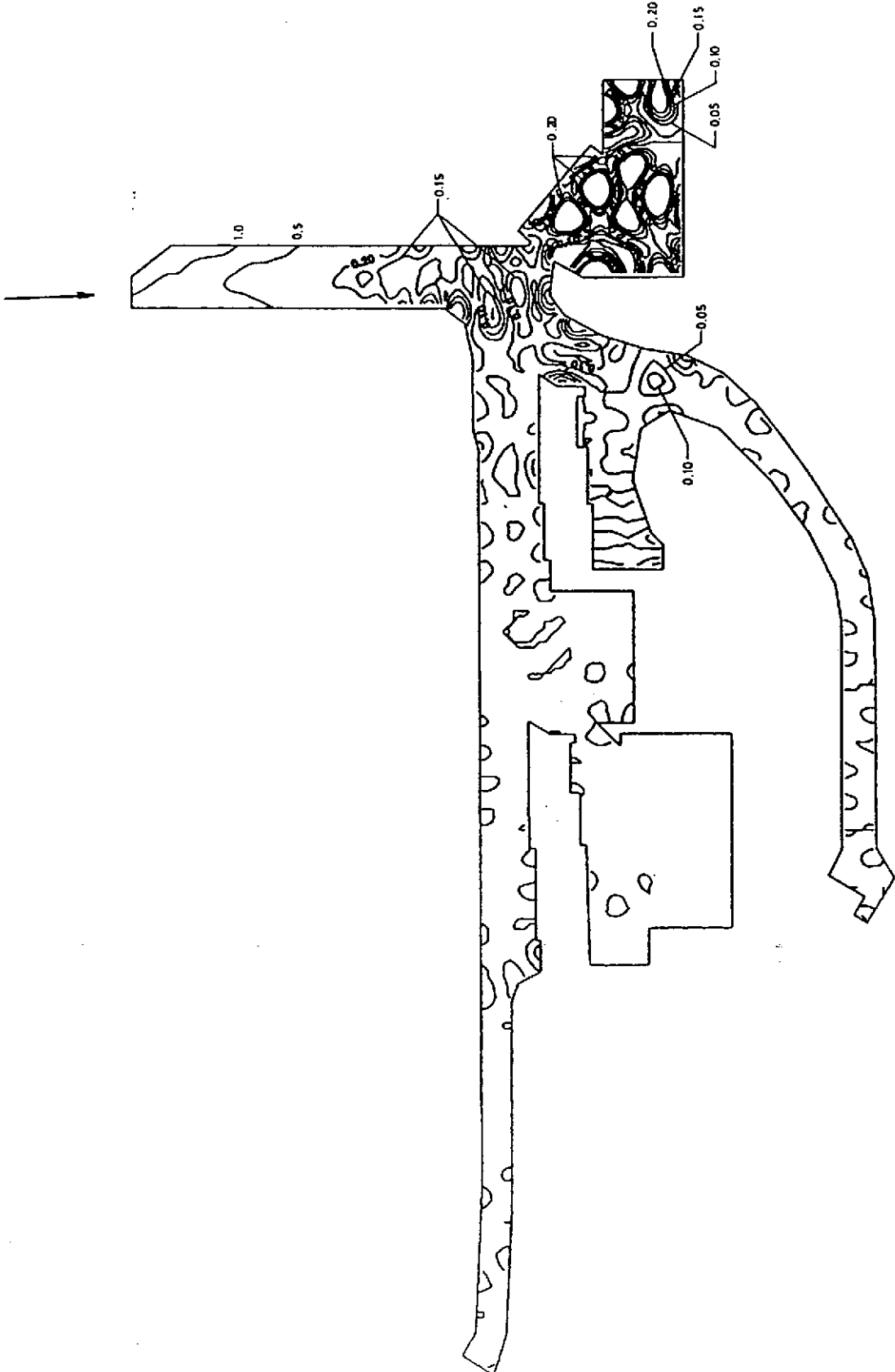


Figura 6. Líneas de isoamplitud.

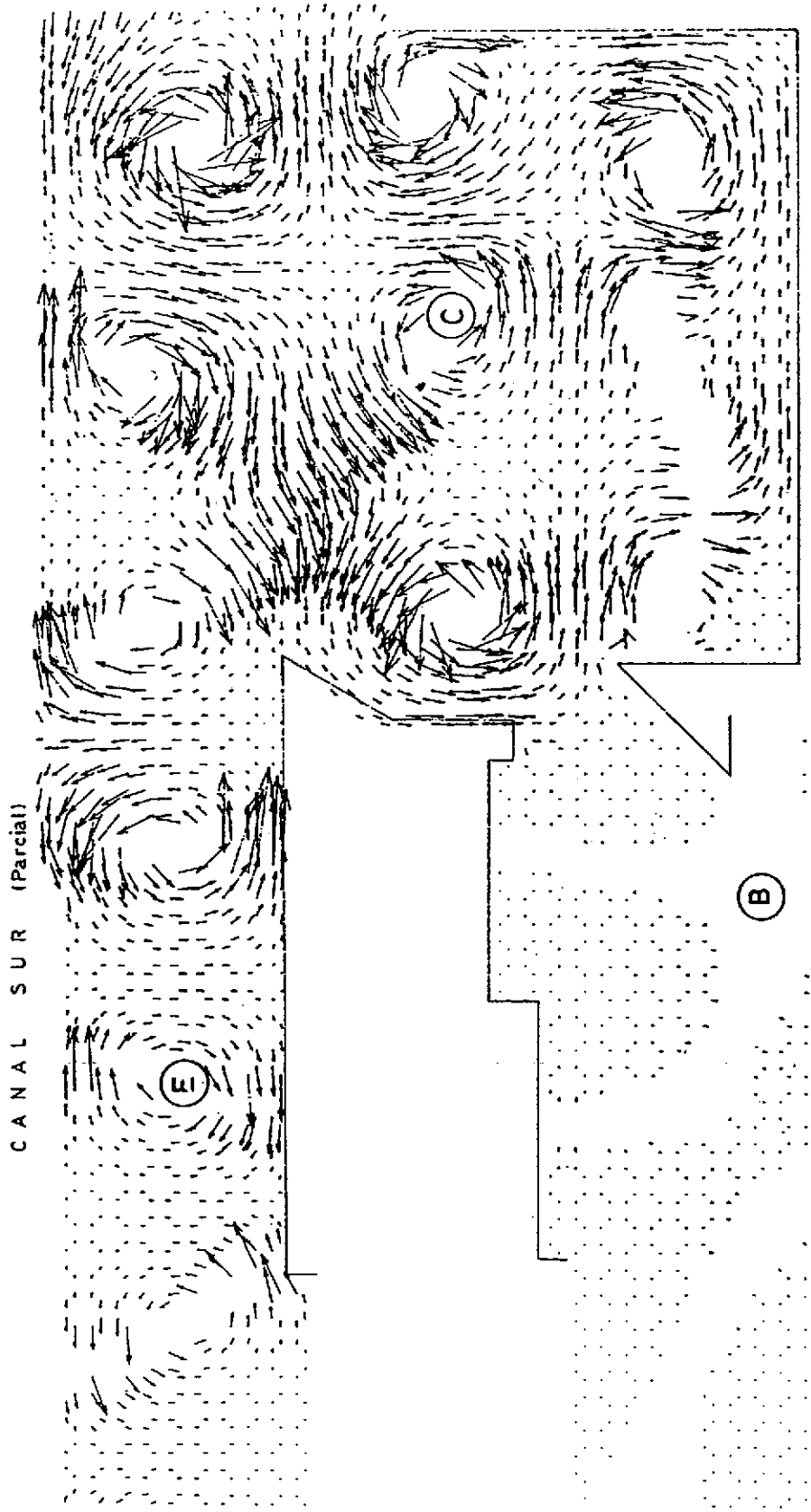


Figura 7. Campo de vectores número de onda.

La dirección de propagación del oleaje dentro de la marina es un parámetro importante de analizar desde el punto de vista práctico, ya que, según cómo estén orientadas las embarcaciones respecto de aquella, las alturas máximas de ola admisible son diferentes. En la Figura 7 la dirección de propagación del oleaje en un sector de la marina se representa mediante el campo de vectores número de onda.

Este fue graficado sólo donde la amplitud relativa supera el 5 %. El módulo de los vectores está escalado respecto del correspondiente a una onda progresiva del mismo período. En la zona B se observa que los vectores número de onda son muy pequeños, lo cual corresponde a un sistema de ondas estacionarias. En las zonas C y E se distingue la presencia de puntos anfifrónicos, alrededor de los cuales giran los frentes de onda (normales al vector número de onda local).

Como todo sistema físico sometido a oscilaciones forzadas, los puertos pueden estar sujetos a fenómenos de resonancia⁷. Por ello, es importante analizar la agitación para todo el rango de períodos de olas factibles de existir. Se efectuaron una larga serie de ensayos para períodos comprendidos entre 9 y 60 segundos, con incrementos de entre 1 y 2 segundos, determinándose, en cada ensayo, la máxima amplitud en cada zona del puerto. En la Figura 8 se muestra el comportamiento de las Dársenas A y D. Se observa que la dársena A presenta varios picos, dos de ellos de relativa importancia. En particular, se ve que para un período de 9 segundos hay un pico secundario que prácticamente duplica la amplitud respecto de otras dársenas. Esta es, precisamente, la condición que corresponde a la vista tridimensional presentada en la Figura 3.

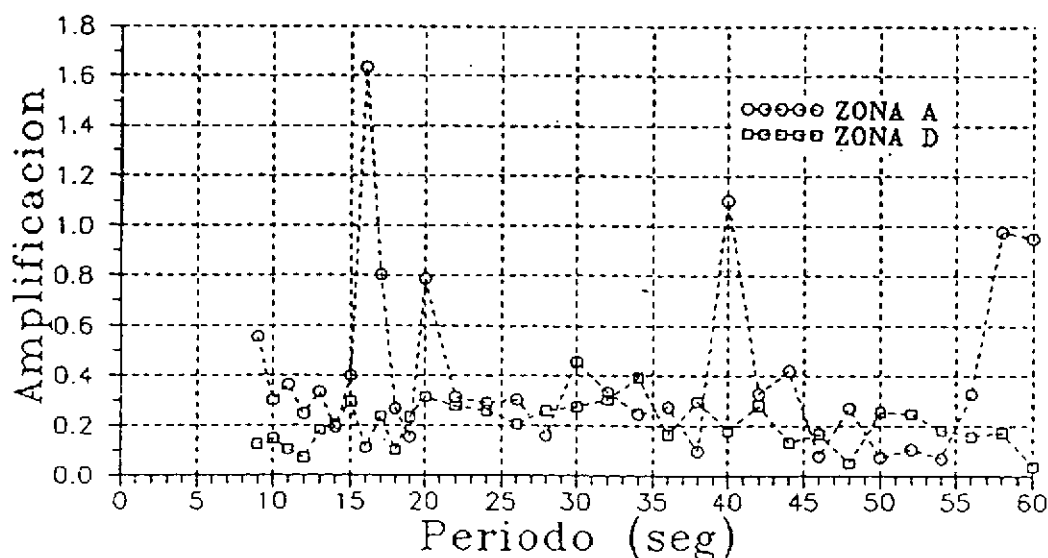
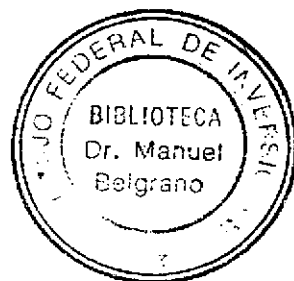


Figura 8. Curva de Resonancia.



CONCLUSIONES

A través de la presentación de una aplicación, se ha ilustrado el alcance práctico de los resultados obtenidos con un modelo numérico de agitación por oleaje en el interior de un puerto desarrollado en el LHA. El estudio requirió de una estrecha colaboración entre los encargados del proyecto de la obra y los responsables del desarrollo y la operación del modelo, lo cual se tradujo en un pleno aprovechamiento de los resultados obtenidos.

REFERENCIAS

1. C.A. Vionnet y A.N. Menéndez, "Difracción-Refracción combinadas de ondas de agua. Cálculo utilizando elementos finitos híbridos, incluyendo bordes absorbentes y disipación por fricción", *ENIEF'87*, San Carlos de Bariloche, (1987).
2. C.A. Vionnet, "Difracción-Refracción combinadas en ondas de agua", *Informe LHA-INCyTH 064-02-87*, (1987).
3. J.C.W. Berkhoff, "Computation of combined refraction-diffraction", *Proc. 13th. Conf. on Coastal Engineering*, Vancouver, (1972).
4. J.C.W. Berkhoff, N. Booij y A.C. Radder, "Verification of numerical wave propagation models for simple harmonic linear waves", *Coastal Engineering 6*, Elsevier Publishers, pp. 255-279, Amsterdam, (1982).
5. N. Booij, "Gravity waves on water with non-uniform depth and current", *Report No. 81-1*, Delft University of Technology, (1982).
6. M.A. Cavaliere, R. Castellano y A.N. Menéndez, "Estudio de las condiciones de agitación en la marina de Punta del Este. Informe de avance No. 1", *Informe LHA-INCyTH 112-01-90*, (1990).
7. C.A. Vionnet, "Resonancia de puertos inducida por ondas gravitatorias", *Informe INCyTH 064-05-88*, (1988).

ANEXO II

COEFICIENTE DE REFLEXION DE OLAS SOBRE UN TALUD

Puesto que el coeficiente de reflexión constituye un parámetro de ingreso básico del sistema computacional DIFRAC, se hace necesario contar con una estimación suficientemente segura de su valor a los efectos de no introducir incertidumbres en la predicción de las condiciones de agitación superiores a las propias de la modelación matemática y de los datos de base. En consecuencia, se realizó una consulta a las principales publicaciones relacionadas con el tema, a fin de rescatar metodologías empleadas por otros autores frente a problemas similares.

II.1 DESCRIPCION DEL FENOMENO

Cuando un tren de olas incide sobre una costa natural o una estructura hecha por el hombre, parte de la energía que transporta se disipa, parte se refleja y parte se transmite; ésto último en el supuesto que el obstáculo sea impermeable o exista sobrepaso.

Dado que la energía del oleaje es proporcional al cuadrado de la altura de la ola, de acuerdo al esquema anterior, es posible sentenciar:

$$H_i^2 = H_r^2 + H_d^2 + H_t^2 \quad (1)$$

donde:

H_i = altura de la onda incidente,
 H_r = altura de la onda reflejada,
 H_d = altura de la onda disipada,
 H_t = altura de la onda transmitida.

Si se definen los coeficientes de reflexión, disipación y transmisión como los cocientes entre las alturas de las olas homónimas y la incidente, respectivamente, se tiene:

$$1 = K_r^2 + K_d^2 + K_t^2 \quad (2)$$

Resulta oportuno destacar que la altura de la ola incidente se

define en una posición exterior al pie del talud de la costa o la estructura, donde la profundidad es d_i , tal como se observa en la Figura II.1.

De su definición se extrae como conclusión que los tres coeficientes tienen vinculación con las respectivas energías (reflejada, disipada y transmitida) aunque la relación no es de simple proporcionalidad. Para la condición de inexistencia de transmisión de energía, la disipación de la energía de la ola incidente en una costa o una obra artificial se produce mediante diversos mecanismos, entre los que se destacan claramente:

- a) la generación de turbulencia por remolinos de eje horizontal originados en la rugosidad de la pendiente del obstáculo
- b) la pérdida friccional por "run-up" de la ola
- c) la pérdida de cantidad de movimiento por pérdida de masa en el caso de los rompeolas impermeables
- d) la transferencia de cantidad de movimiento a bloques que tienen capacidad de movimiento
- e) la rompiente de la ola.

Como consecuencia de la vinculación establecida entre los coeficientes y las energías, y puesto que existe una relación estrecha entre los propios coeficientes, se tiene que todos estos factores ejercen influencia sobre el coeficiente de reflexión. Por lo tanto, todo factor que modifique la energía disipada tiene ingerencia sobre el coeficiente de reflexión.

En la enumeración anterior se observa que los factores antedichos incluyen características de la onda incidente y de la costa o estructura que la recibe. En los párrafos subsiguientes se analizan estas influencias.

II.2 FORMULAS DE PREDICCIÓN

En la bibliografía especializada ([II.1] y [II.2]) se han identificado tres casos típicos para los que se ha determinado el coeficiente de reflexión:

- a) pendientes suaves impermeables
- b) revestimientos armados con una o más capas de "rip-rap"
- c) rompeolas de piedra amontonada.

II.2.1 Fórmulas para pendientes suaves

La primera cuantificación del coeficiente de reflexión para **pendientes suaves** data de 1951 y se debe a Miche. La propuesta de este investigador es de aplicación cuando d_i/H_i es mayor que 5 y $H_i/L \ll 1/7$. Para estas condiciones la interacción de la ola y

la estructura tiene un control dominante sobre el coeficiente de reflexión [II.1]. Miche propuso que, para estos casos, el coeficiente de reflexión resulta proporcional a la relación entre la pendiente crítica de la ola y la pendiente de la ola incidente (ambas en aguas profundas) siendo constante para otros rangos. La pendiente crítica de la ola se define como:

$$(H_0/L_0)_{crit} = (2 \theta/\pi)^{1/2} (\sin^2 \theta)/\pi \quad (3)$$

donde:

H_0 = altura de la ola en aguas profundas,
 L_0 = longitud de onda de la ola en aguas profundas,
 θ = ángulo que forma la pendiente de la estructura con la horizontal, en radianes.

Por lo tanto, en términos matemáticos, resulta:

$$K_r = 1 \quad \text{para } H_0/L_0 \leq (H_0/L_0)_{crit} \quad (4)$$

$$K_r = [(H_0/L_0)_{crit}] / [H_0/L_0] \quad \text{para } H_0/L_0 > (H_0/L_0)_{crit}$$

donde:

K_r = coeficiente de reflexión

Seelig y Ahrens informan en [II.1] que los resultados que brinda Miche son conservativos respecto de valores obtenidos de experiencias de laboratorio.

Battjes (1974) recomienda la ecuación que sigue, válida para pendientes suaves:

$$K_r = 0.1 \xi^2 \quad (5)$$

donde:

ξ = parámetro de similitud de oleaje, definido como:

$$\xi = \tan \theta / (H_i/L_0)^{1/2} \quad (6)$$

H_i = altura de la ola incidente al pie de la estructura
 L_0 = longitud de la onda incidente en aguas profundas

Esta fórmula da resultados más realistas que la de Miche ajustándose bien a los valores hallados en experiencias de laboratorio para $\xi < 2.3$, donde la rotura de las olas se vé inducida por la pendiente de la estructura. Para valores mayores de ξ , la fórmula de Battjes arroja guarismos que se encuentran muy por encima de la nube de puntos experimentales.

En la Figura II.2 se aprecia una serie de observaciones del coeficiente de reflexión realizadas por diferentes investigadores, de las que se deduce que el mejor ajuste viene dado por la expresión:

$$K_r = \alpha \xi^2 / (\xi^2 + \beta) \quad (7)$$

donde α y β son coeficientes empíricos con valores 1 y 6.2 respectivamente. Datos de laboratorio obtenidos por Ahrens,

Ursell, Dean y Yu [II.1] determinaron que β se incrementa a medida que la pendiente decrece y es mayor para olas irregulares que para monocromáticas.

Para pendientes tales que $\cotg \theta < 6$, los coeficientes recomendados son $\alpha = 1$ y $\beta = 5.5$ con la ecuación (7) o la siguiente, dependiendo de cual dé un valor menor:

$$K_r = \alpha \tanh (0.1 \xi^2) \quad (8)$$

II.2.2 Fórmulas para playas de arena

Chesnutt (1978) ofrece la serie de datos de laboratorio y de playas más extensa; los valores hallados por Chesnutt y Galvin (1974) y Chesnutt (1978) sugieren la siguiente fórmula para determinar el coeficiente de reflexión:

$$K_r = \alpha \xi^2 / (\xi^2 + \beta) \quad (9)$$

con $\beta = 5.5$. Seelig y Ahrens aconsejan emplear $\alpha = 0.5$ si se buscan valores medios del coeficiente de reflexión.

II.2.3 Fórmulas para rompeolas de piedra amontonada

Un límite conservativo del coeficiente de reflexión para estas estructuras viene dado por la ecuación (9) con $\alpha = 0.6$ y $\beta = 6.6$.

II.2.4 Fórmulas para protecciones

En el Laboratorio de Hidráulica Aplicada del INCYTH ([II.4]) se ensayaron protecciones de roca en base a colchones, para los cuales se estableció el coeficiente de reflexión, el "run-up" de la ola y la estabilidad. Se estudiaron taludes impermeables y permeables.

Los resultados se resumen en la Figura II.3 en función de la pendiente del talud. La expresión ajustada a los valores experimentales viene dada por:

$$K_r = C_k [H_s / (g T^2)]^{-0.03} \cotg \theta^{-0.06} \quad (10)$$

donde:

C_k = coeficiente experimental que depende de la configuración del talud (permeable o impermeable)

T = período del oleaje

H_s = altura significativa de la ola (promedio del tercio superior de las alturas de ola)

En la citada figura se aprecia que el coeficiente de reflexión es en promedio un 30 % mayor para los taludes impermeables que para los permeables.

II.3 INFLUENCIA DE LA ROTURA DE LA OLA

Si $ds/H_s < 5$ o H_s/L es grande, adquiere relevancia la rotura

de la ola en la disipación de la energía y, por consiguiente, se modifica el coeficiente de reflexión. La relación adimensional que permite cuantificar este tipo de pérdida es el cociente entre la altura de la ola incidente y la altura máxima posible de la ola en rompiente al pie de la estructura, dada esta última por la fórmula de Goda:

$$H_b = 0.17 L_0 (1.0 - \exp (- 4.712 d_s (1.0 + 15 m^{1.333})/L_0)) \quad (11)$$

donde:

m = tangente de la pendiente del fondo que da hacia el mar
 L_0 y d_s tienen el significado ya referido.

Como ocurre una pérdida adicional de energía, la energía reflejada resulta menor, por lo cual decrece el coeficiente de reflexión. Esta circunstancia se tiene en cuenta mediante el producto por un coeficiente de reducción cuya expresión es la siguiente:

$$\alpha_1 = \exp (- 0.5 (H_i/H_b)^{1.3}) \quad (12)$$

II.4 INFLUENCIA DE LA RUGOSIDAD DE LA SUPERFICIE

Esta característica se relaciona estrechamente con la formación de remolinos de eje horizontal a lo largo de la pendiente de la estructura. Cuanto más rugosa sea la superficie, mayor es la producción de torbellinos, lo cual origina mayores pérdidas y menor energía reflejada. Este efecto, que tiene lugar en las estructuras de piedra armada, es tenido en cuenta a través del diámetro representativo d de la roca que las constituye. Para una capa de roca, se tiene un coeficiente α_2 :

$$\alpha_2 = \exp (- 1.7 (d/L)^{1/2} \cotg \theta - 0.5 (H_i/H_b)^{1.3}) \quad (13)$$

donde:

L : longitud de onda al pie de la estructura

$d = (W/\gamma)$

W : peso de la piedra

γ : peso específico de la piedra

Seelig y Ahrens afirman en [II.1] que cuantas más capas de piedra se tengan, mayor es la disipación. El coeficiente α_2 debe multiplicarse entonces por un factor de corrección α' que se encuentra tabulado en función del número de capas y la relación d/H_i .

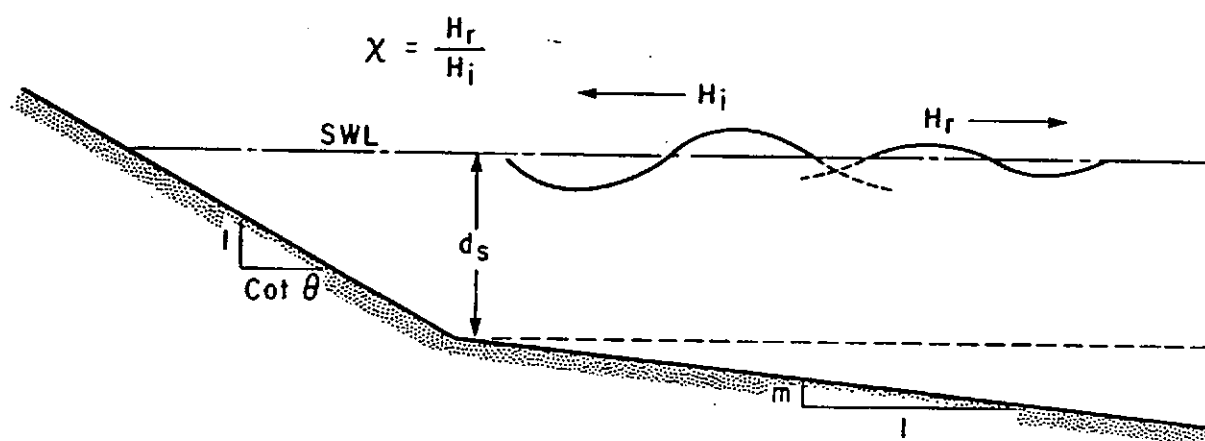
Finalmente, en la Figura II.4 se han volcado los ajustes más representativos del coeficiente de reflexión en función del parámetro de similitud del oleaje. Esta figura, presentada en escala semilogarítmica en [II.1], se muestra en escala lineal en la Figura 3.2.

REFERENCIAS

- II.1 Seelig, W.N., Ahrens, J.P. (1981), "Estimation of wave reflection and energy dissipation coefficients for beaches, revetments, and breakwaters", U. S. Army, Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center, Technical Paper N° 81-1
- II.2 Shore Protection Manual (1984), Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, Mississippi, Volume II
- II.3 Ippen, A.T. et al. (1966), Estuary and coastline hydrodynamics, Iowa Institute of Hydraulic Research
- II.4 Brea, J.D., Hopwood, H.J., Amores, G. (1989), "Estudio de protecciones de colchones Reno sometidas a oleaje", Informe final, Informe LHA-INCYTH-091-04-8

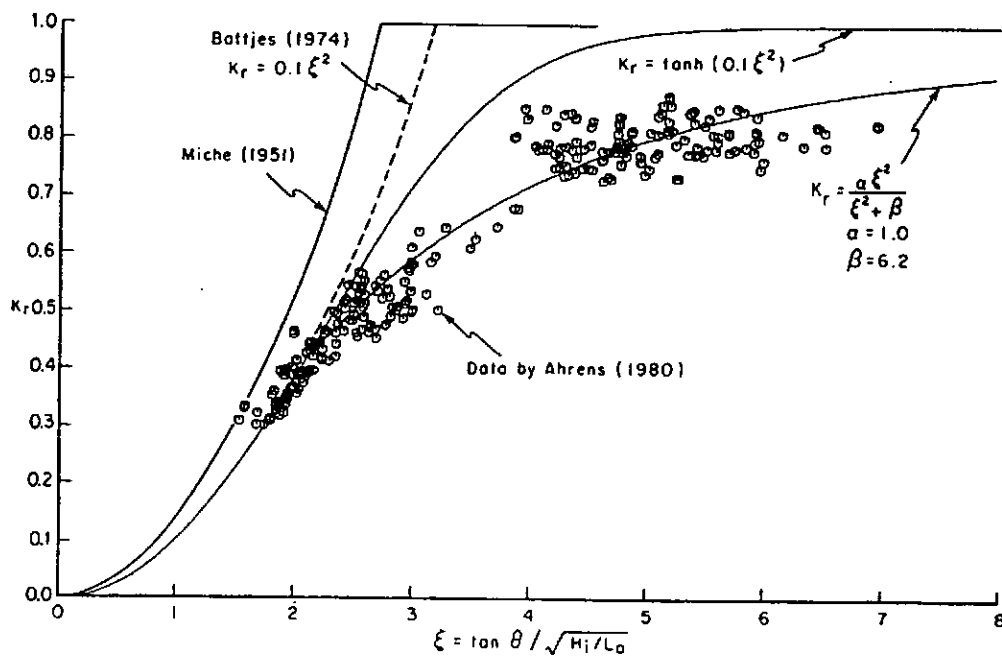
LISTA DE FIGURAS

- II.1 Definición de magnitudes de la reflexión de olas
- II.2 Comparación de coeficientes de reflexión de ola para una pendiente de 1:2,5 y de varias fórmulas para predecirlos
- II.3 Coeficientes de reflexión de ola para protecciones constituídas por colchones
- II.4 Coeficientes de reflexión de ola para distintos tipos de bordes en función del parámetro de similitud de oleaje



DEFINICION DE MAGNITUDES DE LA REFLEXION DE OLAS.

Figura II.1



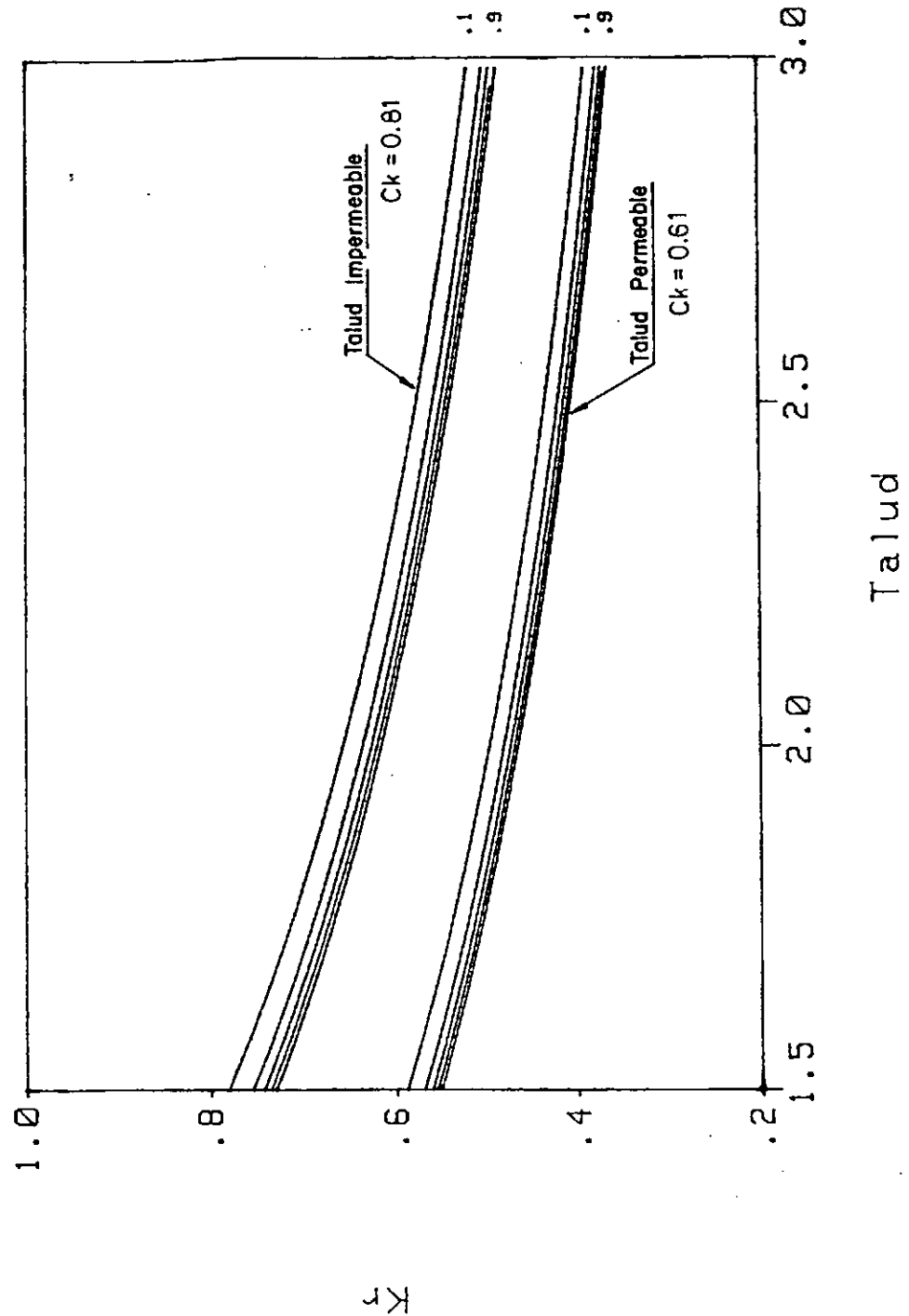
COMPARACION DE COEFICIENTES DE REFLEXION DE OLA PARA UNA PENDIENTE DE 1:2.5 Y DE VARIAS FORMULAS PARA PREDECIRLOS.

Figura II.2

$$K_r = f(TALUD)$$

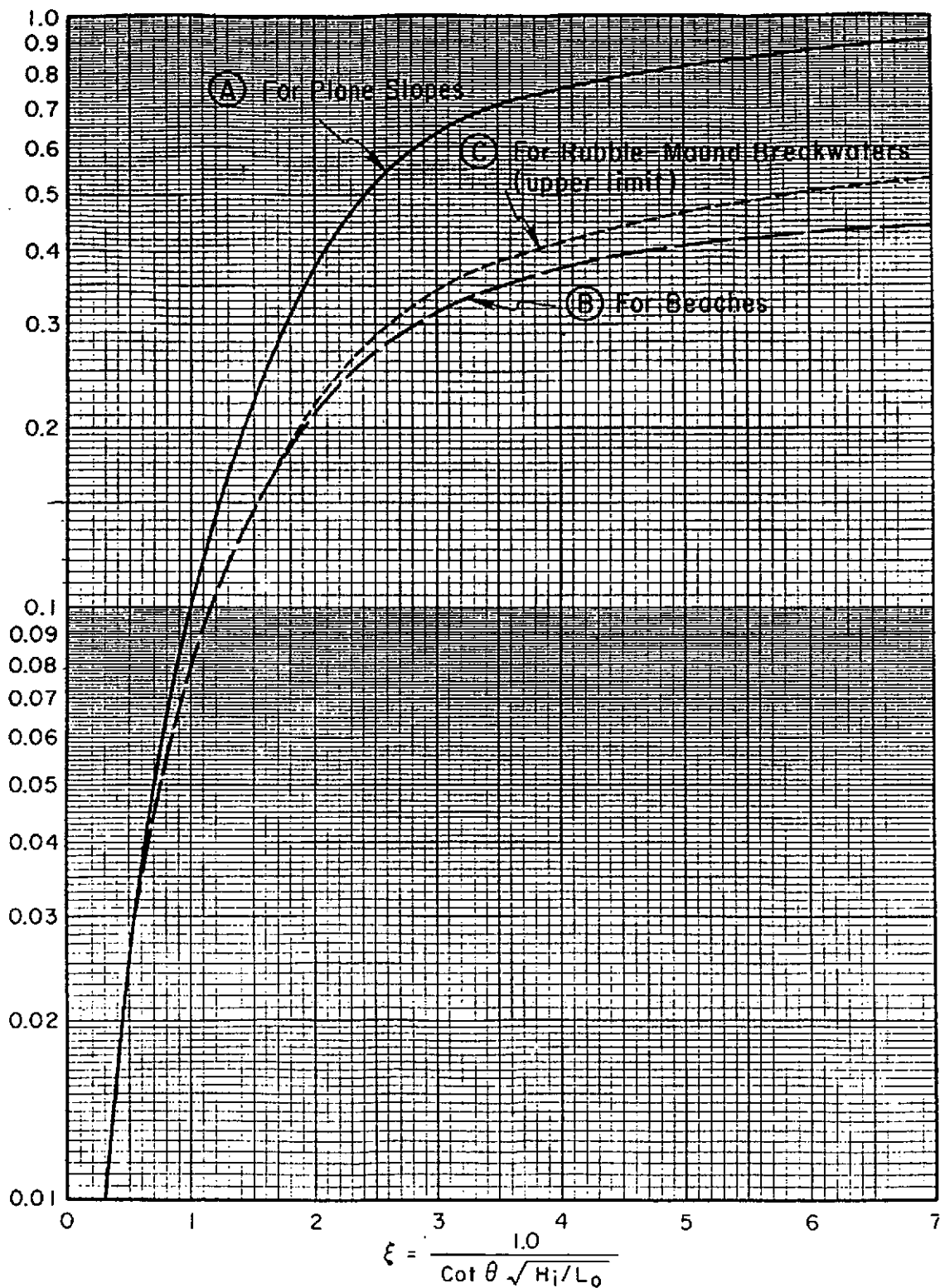
$$100 * H_s / g T^2 = cte$$

$$K_r = C_k \left(\frac{H_s}{g T^2} \right)^{-0.03} \cotg \theta^{-0.03}$$



COEFICIENTES DE REFLEXION DE OLA PARA
PROTECCIONES CONSTITUIDAS POR COLCHONES.

Figura II.3



COEFICIENTES DE REFLEXION DE OLA PARA DISTINTOS TIPOS DE TALUDES EN FUNCION DEL PARAMETRO DE SIMILITUD DEL OLEAJE.

Figura II.4