



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES

CAMPUS ARAGÓN

“MODELOS HIDRAULICOS DE AGITACIÓN DE OLEAJE Y ESTABILIDAD DE UN ROMPEOLAS DEL PROYECTO DE AMPLIACIÓN DE UNA TERMINAL DE TRANSBORDADÖRES”

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A:

MONTIEL MONTIEL JOSÉ ALBERTO

295259

ASESOR:
ING. JESUS IGNACIO HEREDIA DOMINGUEZ





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Por su invaluable apoyo
a Rocío mi esposa, y a mis padres,
Enrique y Tommy y mis hermanos

Con eterno agradecimiento
A los Ings. Jesús, Ignacio, Mercedes, Domínguez y
Gilberto, García, Santamaría González

MODELOS HIDRAULICOS DE AGITACION DE OLEAJE Y ESTABILIDAD DE UN ROMPEOLAS DEL PROYECTO DE AMPLIACION DE UNA TERMINAL DE TRANSBORDADORES.

	Pág.
1. Introducción	3
2. Antecedentes	3
3. Objetivos	4
4. Fenómenos Oceanográficos	5
4.1. Oleaje normal	5
4.2. Oleaje extremal	6
4.3. Marea de tormenta	6
5. Batimetría	6
6. Estudios Teóricos	6
6.1. Modelación matemática de la refracción del oleaje normal	6
6.1.1. Preparación de la información	6
6.1.2. Presentación de resultados	8
6.1.3. Interpretación de resultados	8
6.2. Modelación matemática de la agitación del oleaje	9
6.2.1. Preparación de la información	9
6.2.2. Modelación matemática	11
6.2.3. Presentación de resultados	15
6.2.4. Interpretación de resultados	15
7. Estudios Experimentales	16
7.1. Modelo hidráulico de agitación de oleaje	16
7.1.1. Ley de semejanza empleada y escala del modelo hidráulico	16
7.1.2. Proyecto del modelo hidráulico	20
7.1.3. Construcción del modelo hidráulico	21
7.1.4. Operación del modelo hidráulico	22
7.1.4.1. Programa de ensayos	22

7.1.4.2.	Condiciones y procedimiento de los ensayos	22
7.1.4.3.	Presentación de la información experimental	24
7.1.4.4.	Resultados de los ensayos	24
7.1.4.5.	Comparación de resultados de agitación de oleaje entre el modelo numérico y el modelo hidráulico	26
7.2.	Modelo tridimensional de estabilidad	27
7.2.1.	Selección de la escala del modelo hidráulico	27
7.2.2.	Proyecto de modelo hidráulico	28
7.2.3.	Construcción del modelo hidráulico	28
7.2.4.	Operación del modelo hidráulico	30
7.2.4.1.	Programa de ensayos	30
7.2.4.2.	Condiciones y procedimientos de los ensayos	31
7.2.4.3.	Presentación de la información experimental	32
7.2.4.4.	Resultados de los ensayos	32
7.3.	Modelo bidimensional de estabilidad	34
7.3.1.	Selección de la escala del modelo hidráulico	34
7.3.2.	Proyecto del modelo hidráulico	34
7.3.3.	Construcción del modelo hidráulico	35
7.3.4.	Operación del modelo hidráulico	36
7.3.4.1.	Programa de ensayos	36
7.3.4.2.	Condiciones y procedimiento de los ensayos	37
7.3.4.3.	Alternativas ensayadas	37
7.3.4.4.	Presentación de la información experimental	39
7.3.4.5.	Resultados de los ensayos	40
7.4.	Sección propuesta para el cuerpo del rompeolas	43
8.	Operatividad	45
8.1.	Condiciones de oleaje	45
8.2.	Zonas consideradas para el análisis	45
8.3.	Oleaje permisible	46
8.4.	Cálculo de la operatividad	46
8.5.	Resultados	46
8.6.	Revisión	47
9.	Conclusiones	50
Bibliografía		54

1. INTRODUCCION

La finalidad de las investigaciones presentadas en esta tesis es proponer un proyecto de ampliación de una terminal de transbordadores mediante Modelos Hidráulicos de Agitación de Oleaje y Estabilidad de un Rompeolas de Protección formado por 2 capas de cubos ranurados de concreto de 10.4 toneladas.

Las investigaciones se apegaron a una serie de ensayos en modelos hidráulicos, reducidos bajo oleaje irregular, midiéndose en el caso del modelo hidráulico de agitación, las alturas de ola a lo largo del canal de acceso, dársena de ciaboga y dársena de operación, considerando taludes de dragado de 3:1, 1:1 y vertical, para el estudio de estabilidad de los cubos de concreto de 10.4 toneladas, se tomaran en cuenta la altura y el período del oleaje, forma de colocación de los elementos, profundidad del pie, número de capas de coraza y talud del rompeolas.

2. ANTECEDENTES

La terminal de transbordadores en cuestión se encuentra ubicada sobre la costa noroeste del Estado de Yucatán, siendo su ubicación las siguientes coordenadas geográficas: 28° 18' latitud noroeste y 89° 39' longitud oeste.

Debido al crecimiento económico de esta zona y a que la actual terminal es insuficiente se ha planeado ampliar dicha terminal. Lo anterior con la finalidad de que puedan atracarse buques con calados mayores a los 7.8 m que actualmente llegan.

Como consecuencia de lo antes mencionado se tiene planeado ampliar la actual zona artificial de operaciones y dragar un canal de acceso de 5.5 Km. de longitud aproximadamente, hasta encontrar una profundidad requerida de 11.30 m.

Partiendo del proyecto de ampliación de la terminal existente, la planeada zona de operaciones contempla áreas de agua para una dársena de ciaboga de 450 m de diámetro y dársena de operación para los nuevos puestos de atraque dragadas a una profundidad de 10.30 m cuyas formas y dimensiones se

muestran en la Fig. No. 2.1. Con el objeto de revisar el proyecto de ampliación se efectuó la realización del "Estudio en modelos hidráulicos de agitación de oleaje y estabilidad de un rompeolas. del proyecto de ampliación de una terminal de transbordadores".

3. OBJETIVOS

El estudio realizado tiene los siguientes objetivos:

3.1. Modelo hidráulico de agitación de oleaje

- Observar y medir las condiciones de agitación que pudieran presentarse en las áreas de agua (canal de acceso y dársenas), considerando la incidencia de 3 direcciones de oleaje en el puerto y 3 taludes de dragado para el canal de acceso y dársenas.
- Valorar la influencia de los taludes de dragado en el comportamiento de la agitación del oleaje.
- Observar en forma cualitativa los fenómenos de reflexión o resonancia que pudieran generarse por efecto de los muelles o paramentos del puerto.
- Calcular la operatividad por agitación en las zonas de atraque para cada condición de oleaje ensayada.
- En base a los puntos anteriores, definir los arreglos necesarios para lograr en el interior del puerto las zonas de calma necesarias para el funcionamiento óptimo del proyecto.

3.2. Modelos hidráulicos de estabilidad

- Probar la estabilidad de los cubos de concreto del cuerpo y morro del rompeolas de protección con relación al ataque frontal y oblicuo del oleaje de diseño.
- Probar la estabilidad de los cubos de concreto del cuerpo del rompeolas de protección con relación al ataque frontal del oleaje de diseño.
- En base a los resultados anteriores, optimizar la sección transversal del cuerpo del rompeolas probando arreglos diferentes a lo indicado en el proyecto original.

4. FENOMENOS OCEANOGRAFICOS

Los fenómenos oceanográficos considerados para el estudio en los modelos hidráulicos de agitación de oleaje y estabilidad fueron los siguientes:

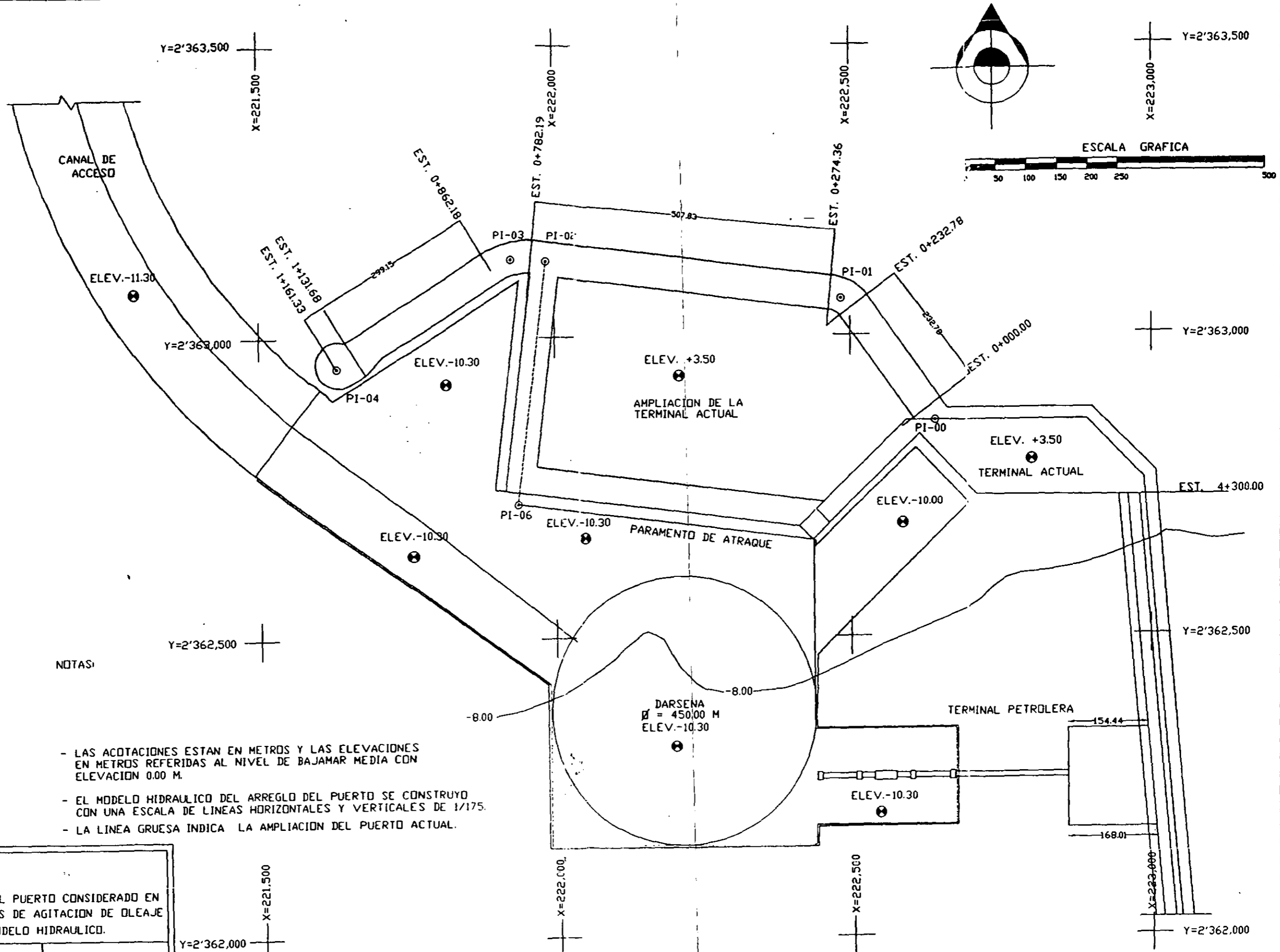
4.1. Oleaje normal

El régimen de oleaje normal considerado para el estudio se tomó de la memoria "Anteproyecto del canal de navegación con profundidad de 11.00 m referidas al N.B.M., y de la dársena de ciaboga para el puerto en estudio, cuyo resumen se presenta en las tablas No. 4.1 a 4.5.

De acuerdo con los datos de oleaje normal presentados en las tablas anteriores, se tiene que los porcentajes de ocurrencia anual por dirección son como sigue: 34.84% para la Noreste, 30.81% para la Este, 18.48% para la Norte, 9.53% para la Oeste.

De acuerdo con lo anterior y dada la orientación del puerto, se concluyó que el estudio de agitación debería ser realizado con 3 direcciones de oleaje, Norte, Noreste y Noroeste, omitiéndose las direcciones Este y Oeste, debido a que el puerto se encuentra completamente protegido para la dirección Este, y la dirección Oeste presenta un porcentaje muy bajo de actuación (23 días al año). Con respecto a los periodos de ola a considerar en el estudio, se determinó asociar cada dirección de oleaje con periodos de 8, 15 y 21 seg., los cuales se consideraron como representativos de los periodos de 5 a 23 seg., que se muestran en las tablas antes mencionadas.

Respecto a las alturas de ola a utilizar en el estudio de agitación, se determinó generar el oleaje en el modelo para cada periodo de ola seleccionada y medir directamente en el modelo hidráulico la altura de ola generada, la cual debería referirse a la zona de aguas profundas por medio del coeficiente de refracción respectivo, obtenido con el análisis de refracción de oleaje que se describirá más adelante.



NOTAS:

- LAS ACOTACIONES ESTAN EN METROS Y LAS ELEVACIONES EN METROS REFERIDAS AL NIVEL DE BAJAMAR MEDIA CON ELEVACION 0.00 M.
- EL MODELO HIDRAULICO DEL ARREGLO DEL PUERTO SE CONSTRUYO CON UNA ESCALA DE LINEAS HORIZONTALES Y VERTICALES DE 1/175.
- LA LINEA GRUESA INDICA LA AMPLIACION DEL PUERTO ACTUAL.

ARREGLO DEL PUERTO CONSIDERADO EN LOS ENSAYOS DE AGITACION DE OLEAJE EN MODELO HIDRAULICO.

MARZO DE 1999 FIG. No. 2.1

OLEAJE ANUAL DIRECCION NORTE

AGUAS PROFUNDAS OCEAN WAVES

altura metros	periodo en segundos										TOTAL ACUMULATED		
	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23			
0.25	1.83%	0.09%	0.07%					0.01%	0.02%	0.10%	2.13%	2.13%	11.53%
0.5	3.92%	0.26%	0.02%							0.17%	4.39%	6.52%	35.27%
1	4.35%	0.83%	0.22%	0.04%					0.07%	0.01%	5.53%	12.05%	65.21%
1.5	1.76%	1.35%	0.19%	0.04%					0.05%		3.18%	15.42%	83.43%
2	0.09%	0.74%	0.49%	0.11%							1.42%	16.85%	91.17%
2.5	0.16%	0.55%	0.19%	0.19%		0.01%					1.10%	17.95%	97.17%
3	0.02%	0.02%	0.24%	0.11%	0.06%						0.39%	18.34%	97.67%
3.5	0.05%	0.02%									0.27%	18.61%	97.94%
4													
4.5													
5													
5.5													
7.5													

TOTAL	12.19%	3.86%	1.42%	0.49%	0.06%	0.01%	0.00%	0.01%	0.15%	0.29%			
ACUM	12.19%	16.05%	17.47%	17.95%	18.02%	18.03%	18.03%	18.04%	18.19%	18.48%			
	65.95%	86.85%	94.54%	97.17%	97.51%	97.57%	97.57%	97.64%	98.45%	100.00%			

Tabla 4.1 - Características del Oleaje en Aguas Profundas para la Dirección Norte (Ocean Waves)

OLEAJE ANUAL DIRECCION NORESTE

AGUAS PROFUNDAS OCEAN WAVES

altura metros	periodo en segundos										TOTAL ACUMULATED		
	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23			
0.25	3.40%	0.19%	0.07%					0.07%	0.04%		3.78%	3.78%	10.94%
0.5	8.04%	0.41%	0.07%							0.26%	8.78%	12.56%	36.05%
1	9.08%	2.54%	0.22%	0.11%						0.07%	12.04%	24.60%	70.60%
1.5	2.88%	2.62%	0.75%	0.07%	0.04%				0.05%		6.35%	30.95%	88.84%
2	0.49%	1.08%	0.60%	0.15%							2.32%	33.27%	95.49%
2.5	0.19%	0.49%	0.15%	0.04%	0.04%	0.01%					0.90%	34.16%	98.07%
3	0.07%	0.07%	0.11%	0.07%	0.04%						0.37%	34.54%	99.14%
3.5		0.15%	0.04%		0.07%						0.26%	34.80%	99.89%
4		0.04%									0.04%	34.84%	100.00%
4.5													
5													
5.5													
7.5													

TOTAL	24.15%	7.59%	2.02%	0.45%	0.19%			0.07%	0.04%	0.34%			
ACUM	24.15%	31.73%	33.75%	34.20%	34.39%	34.39%	34.39%	34.46%	34.50%	34.84%			
	69.31%	91.09%	96.89%	98.18%	98.71%	98.71%	98.71%	98.93%	99.03%	100.00%			

Tabla 4.2 - Características del Oleaje en Aguas Profundas para la Dirección Noreste (Ocean Waves)

OLEAJE ANJAL DIRECCION ESTE

AGUAS PROFUNDAS OCEAN WAVES

altura metros	periodo en segundos										TOTAL ACUMULATED		
	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23			
0.25	2.52%	0.22%	0.05%					0.02%	0.06%	0.01%	2.99%	2.99%	9.70%
0.5	5.36%	0.50%	0.02%	0.05%	0.01%					0.15%	9.08%	9.08%	29.48%
1	8.60%	1.93%	0.41%	0.14%		0.05%				0.11%	20.32%	20.32%	65.95%
1.5	2.97%	3.23%	0.93%	0.06%	0.04%						27.55%	27.55%	89.41%
2	0.26%	1.21%	0.55%	0.05%							29.62%	29.62%	96.12%
2.5	0.05%	0.45%	0.07%	0.02%	0.05%						30.26%	30.26%	98.22%
3	0.01%	0.11%	0.12%	0.01%	0.01%						30.54%	30.54%	99.11%
3.5		0.04%	0.07%	0.02%	0.02%						30.70%	30.70%	99.64%
4		0.01%	0.05%								30.76%	30.76%	99.84%
4.5											30.76%	30.76%	99.84%
5											30.76%	30.76%	99.84%
5.5				0.05%							30.81%	30.81%	100.00%
7.5													

TOTAL	19.86%	7.70%	2.29%	0.41%	0.14%	0.05%		0.02%	0.06%	0.27%			
ACUM	19.86%	27.56%	29.85%	30.76%	30.40%	30.45%	30.45%	30.48%	30.54%	30.81%			
	64.46%	89.45%	96.89%	99.22%	98.67%	99.83%	98.83%	98.91%	99.11%	100.00%			

Tabla 4.3 - Características del Oleaje en Aguas Profundas para la Dirección Este (Ocean Waves)

OLEAJE ANUAL DIRECCION OESTE

AGUAS PROFUNDAS OCEAN WAVES

altura metros	periodo en segundos										TOTAL ACUMULATED		
	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23			
0.25	0.39%	0.01%	0.01%						0.05%	0.01%	0.47%	0.47%	7.47%
0.5	0.90%	0.09%	0.01%								1.00%	1.47%	23.18%
1	0.98%	0.37%	0.14%								1.51%	2.98%	46.95%
1.5	0.32%	0.97%	0.07%	0.05%							1.42%	4.40%	69.35%
2	0.12%	0.55%	0.35%	0.03%							1.11%	5.51%	86.84%
2.5	0.02%	0.11%	0.30%					0.01%			0.45%	5.96%	93.91%
3		0.01%	0.07%								0.09%	6.04%	95.28%
3.5	0.01%		0.07%								0.09%	6.13%	96.66%
4		0.01%	0.05%								0.06%	6.19%	97.64%
4.5													
5				0.05%							0.05%	6.24%	98.43%
5.5													
7.5				0.10%							0.10%	6.34%	100.00%

TOTAL	2.75%	2.13%	1.08%	0.29%				0.01%	0.05%	0.02%			
ACUM	2.75%	4.88%	5.97%	6.25%	6.25%	6.25%	6.25%	6.27%	6.32%	6.34%			
	43.42%	77.01%	94.11%	98.62%	98.62%	98.62%	98.62%	98.82%	99.61%	100.00%			

Tabla 4.4 - Características del Oleaje en Aguas Profundas para la Dirección Oeste (Ocean Waves)

OLEAJE ANUAL DIRECCION NOROESTE Y ANUAL TOTAL

AGUAS PROFUNDAS OCEAN WAVES

altura metros	periodo en segundos										TOTAL ACUMULATED			TOTAL ANUAL	ANUAL ACUM
	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23					
0.25	0.78%		0.04%						0.07%	0.04%	0.93%	0.93%	9.80%	10.30%	10.30%
0.5	1.64%	0.11%	0.07%							0.04%	1.87%	2.80%	29.41%	22.13%	32.43%
1	1.72%	0.75%	0.15%	0.07%					0.07%	0.04%	2.80%	5.61%	58.82%	33.12%	65.55%
1.5	0.52%	0.64%	0.30%	0.07%							1.53%	7.14%	74.90%	19.91%	85.46%
2	0.26%	0.52%	0.34%	0.11%							1.23%	8.37%	67.81%	3.15%	93.61%
2.5	0.04%	0.37%	0.15%	0.22%		0.04%		0.04%			0.86%	9.23%	96.85%	3.95%	97.56%
3	0.04%	0.11%	0.11%								0.26%	9.49%	99.11%	1.46%	99.02%
3.5	0.04%										0.04%	9.53%	100.00%	0.62%	99.64%
4														0.16%	99.80%
4.5														0.00%	99.80%
5														0.05%	99.85%
5.5														0.05%	99.90%
7.5														0.10%	100.00%

TOTAL	5.05%	2.50%	1.16%	0.49%		0.04%		0.04%	0.15%	0.11%
ACUM	5.05%	7.55%	8.71%	9.20%	9.70%	9.74%	9.78%	9.93%	9.98%	9.99%
	52.94%	79.22%	91.37%	96.47%	96.47%	96.86%	96.86%	97.25%	98.82%	100.00%

ANUAL	63.99%	23.79%	7.97%	2.12%	0.39%	0.10%		0.16%	0.45%	1.03%
ACUM	63.99%	87.78%	95.75%	97.87%	98.26%	98.36%	98.36%	98.52%	98.97%	100.00%

Tabla 4.5 - Características del Oleaje en Aguas Profundas para la Dirección Noroeste y Anual Total (Ocean Waves)

4.2. Oleaje extremal

Para el estudio de estabilidad de los cubos de concreto del cuerpo y morro del rompeolas de protección, se tomaron en cuenta las alturas y períodos del oleaje extremal calculados a la profundidad de 10.00 m, cuyos valores se muestran en la tabla 4.6. se concluyó que para el estudio de estabilidad de los elementos de coraza del cuerpo y morro del rompeolas de protección, se deberían considerar olas de 3.00 a 5.00 m, asociadas con periodos de oleaje de 8.00, 9.00 y 11.00 seg.

4.3. Marea de tormenta

Otro de los fenómenos naturales considerados en el estudio de estabilidad de los elementos de coraza del morro y cuerpo del rompeolas de protección fue la marea de tormenta, la cual es la sobre elevación del nivel del mar provocada por el esfuerzo cortante del viento sobre la superficie del agua durante la presencia de los huracanes. Para el presente estudio se consideraron niveles del mar de + 2.50 m, +1.70 m y 0.00 m.

5. BATIMETRIA

Las condiciones batimétricas que se utilizaron para la representación del modelo hidráulico de agitación de oleaje, corresponden a las mostradas en la figura No. 2.1 de fecha marzo de 1999.

6. ESTUDIOS TEORICOS

6.1. Modelación matemática de la refracción de oleaje

6.1.1. Preparación de la información

La modelación matemática de la refracción del oleaje normal se realizó mediante la técnica numérica desarrollada por Takayama para oleaje irregular empleándose para tal fin los siguientes datos:

TABLA 4.6
Características de Oleaje Extremal y Consideraciones de Cálculo

Características de Oleaje			Profundidad Asociada (m)	Consideraciones de Cálculo
Evento	H (m)	T (s)		

Huracán Gilberto	4.25	9.22	d = 10 m	Profundidad Limitada
Huracán Carla	3.89	8.66	d = 10 m	Profundidad Limitada
Huracán Hilda	5.10	9.64	d > 10 m	Duración Limitada
Huracán Betsy	3.92	11.48	d > 10 m	Duración Limitada
Huracán Inez	3.65	8.28	d = 10 m	Profundidad Limitada
Huracán Beulah	3.29	7.70	d = 10 m	Profundidad Limitada
Huracán Laurie	2.55	9.22	d > 10 m	Duración Limitada

(A) Condiciones de oleaje

Para realizar la simulación numérica de la refracción de oleaje, se consideraron las condiciones de oleaje que se presentan en la tabla 6.1.

(B) Configuración batimétrica de aguas profundas

Las condiciones batimétricas que se utilizaron para propagar el oleaje desde aguas profundas, corresponden a las mostradas en el plano de profundidades No. 411 para el Golfo de México, elaborado por la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) del Departamento de Comercio de Estados Unidos de Norte América.

Las condiciones batimétricas que se utilizaron para la refracción de detalle, en la zona de ubicación del puerto, corresponden a la batimetría mostrada en el figura No. 2.1, mencionado en el punto No. 5 de esta tesis.

DIRECCION DEL OLAJE EN AGUAS PROFUNDAS	ALTURA DEL OLAJE EN AGUAS PROFUNDAS	PERIODO DEL OLAJE EN AGUAS PROFUNDAS	NIVEL DEL MAR
N 45° W	1.00	8.0	N.B.M. (0.00)
		15.0	N.B.M. (0.00)
		21.0	N.B.M. (0.00)
N 45° E	1.00	8.0	N.B.M. (0.00)
		15.0	N.B.M. (0.00)
		21.0	N.B.M. (0.00)
N	1.00	8.0	N.B.M. (0.00)
		15.0	N.B.M. (0.00)
		21.0	N.B.M. (0.00)

Tabla 6.1 Condiciones de oleaje que se utilizaron para las simulaciones numéricas de la refracción del oleaje.

Con los datos anteriores de oleaje y batimetría se discretizaron 6 mallas de profundidades para realizar el cálculo de la refracción de oleaje, la primera malla con una abertura de 3 200 m por lado, iniciándose desde la profundidad de 1 800 m; la segunda malla con una abertura de 1 600 m por lado; la tercer malla con una abertura de 800 m por lado; la cuarta malla con una abertura de 400 m por lado; la quinta malla con una abertura de 200 m por lado y la sexta malla con una abertura de 100 m por lado.

Cabe mencionar que las profundidades de las mallas de discretización se refirieron al N.B.M. (Nivel de Bajamar Media), toda vez que las profundidades indicadas en los planos mencionados anteriormente estaban referidas al citado nivel. La disposición de las mallas de discretización de profundidades, utilizadas en el modelo numérico de la refracción de oleaje, se muestran en la Fig. No. 6.1.

6.1.2. Presentación de resultados

Con la finalidad de visualizar los resultados obtenidos, la distribución espacial del oleaje se representó mediante los vectores de oleaje, definiendo las magnitudes y las direcciones de dichos vectores, con los valores de las alturas y direcciones del oleaje obtenidas en la simulación numérica respectivamente.

Con base en lo anterior, en las figs. 6.2 a 6.10 se muestran las distribuciones espaciales del oleaje representadas con los vectores de oleaje obtenidos en la sexta malla de cálculo y en las figs. 6.11 a 6.19 se presenta la distribución en planta de las alturas de ola unitaria refractada de aguas profundas hasta el sitio de ubicación del puerto.

6.1.3. Interpretación de resultados

De acuerdo con la distribución espacial del oleaje para la dirección norte mostrada en las figs. 6.2 a 6.4, se tiene que el período de oleaje de 21 seg. presenta un cambio en la dirección del oleaje frente al rompeolas y hacia el interior del puerto mayor que el cambio de dirección mostrado por los períodos de 8 y 15 seg. En cuanto a las alturas de olas detrás del rompeolas, éstas son menores de 0.25 m, considerando una ola en aguas profundas de 1.00 m.

Con respecto al oleaje de la dirección noreste, se observa que el período de 21 seg., se refracta hacia el interior del puerto con un ángulo mayor respecto al eje del rompeolas medido en contra de las manecillas del reloj, que el ángulo formado con los períodos de 8 y 15 seg. notándose que las alturas de ola detrás del rompeolas son menores de 0.25 m, como puede observarse en las figs. 6.5 a 6.7.

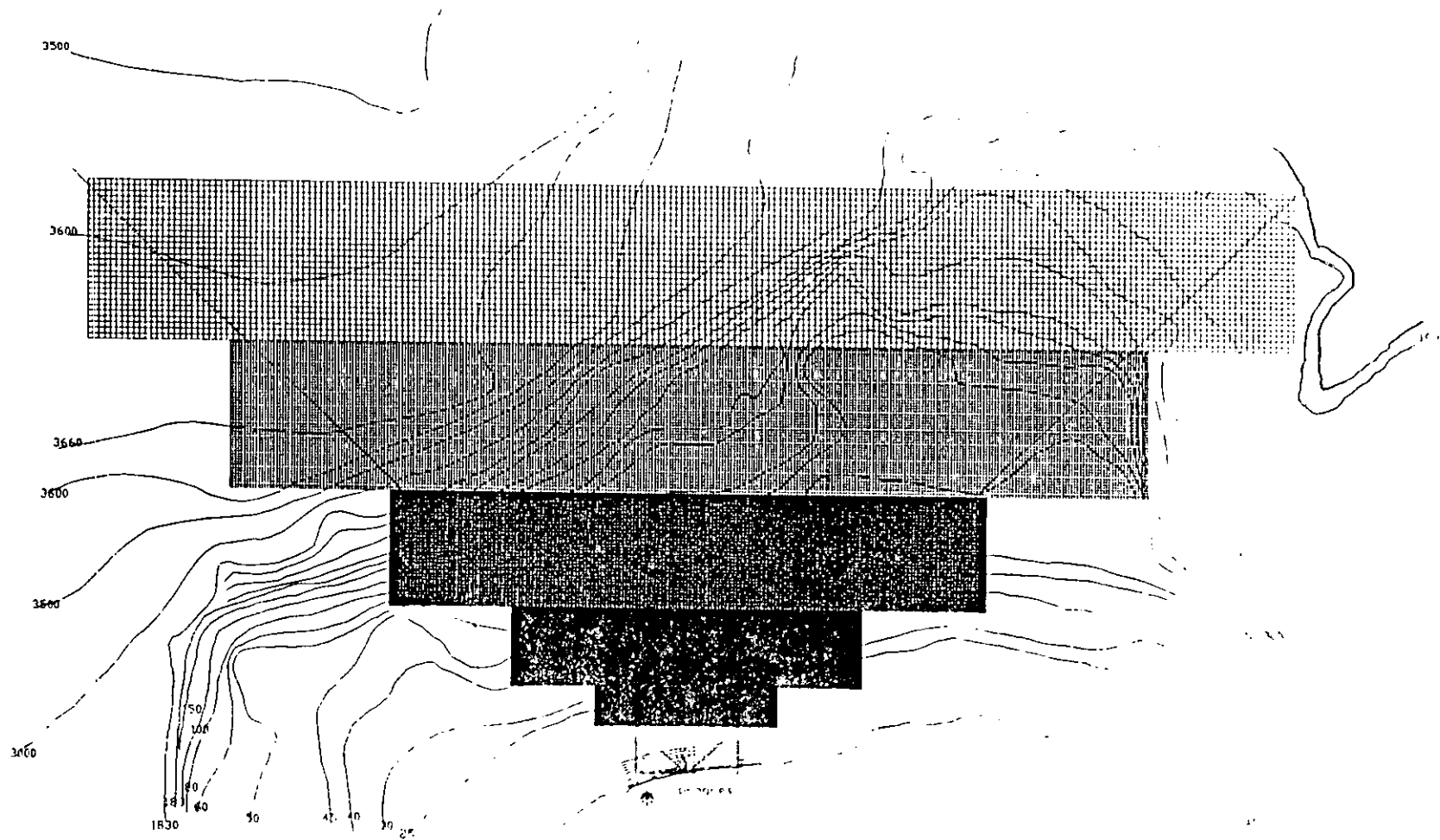
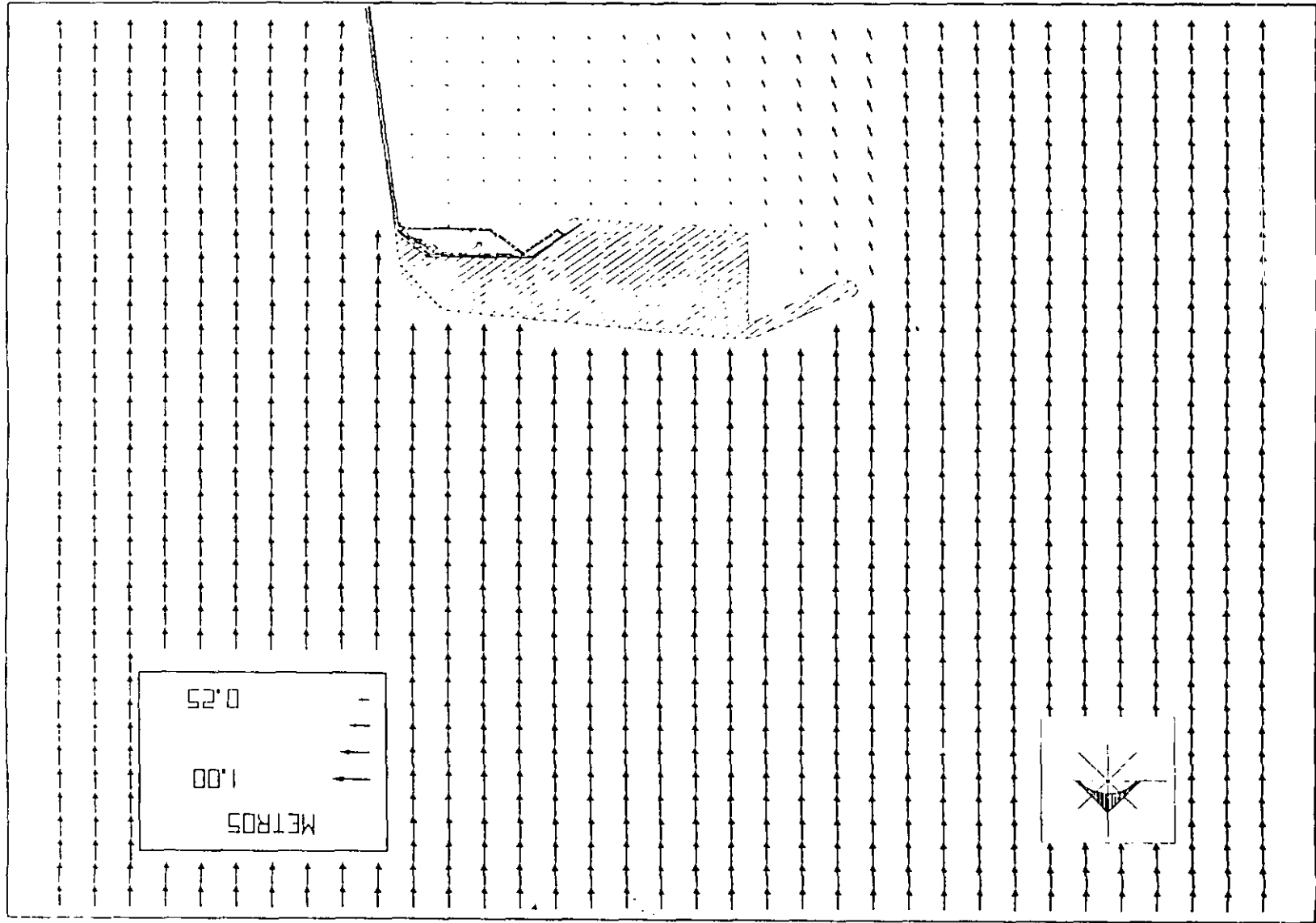


Fig. 6.1 Mallas de cálculo consideradas para el análisis de la Refracción del Oleaje

Fig. 6.2 Distribución espacial del oleaje en la sexta malla de cálculo para la dirección Norte. Ho. 1.0 m. V. lo. 8.0 seg.



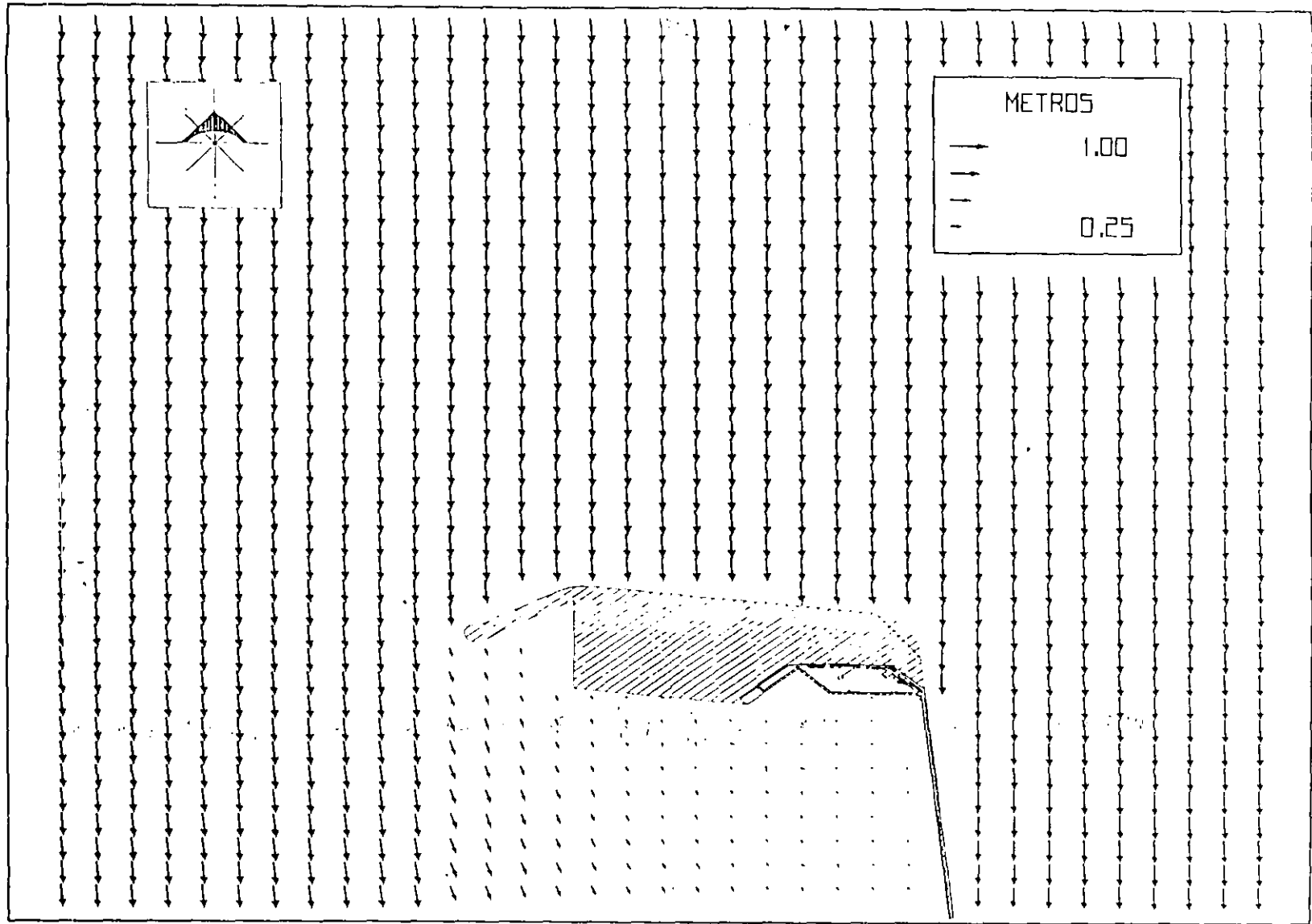


Fig. 6.3 Distribución espacial del oleaje en la sexta malla de cálculo para la dirección Norte. $H_0 = 1.0$ m y $T_0 = 15.0$ seg

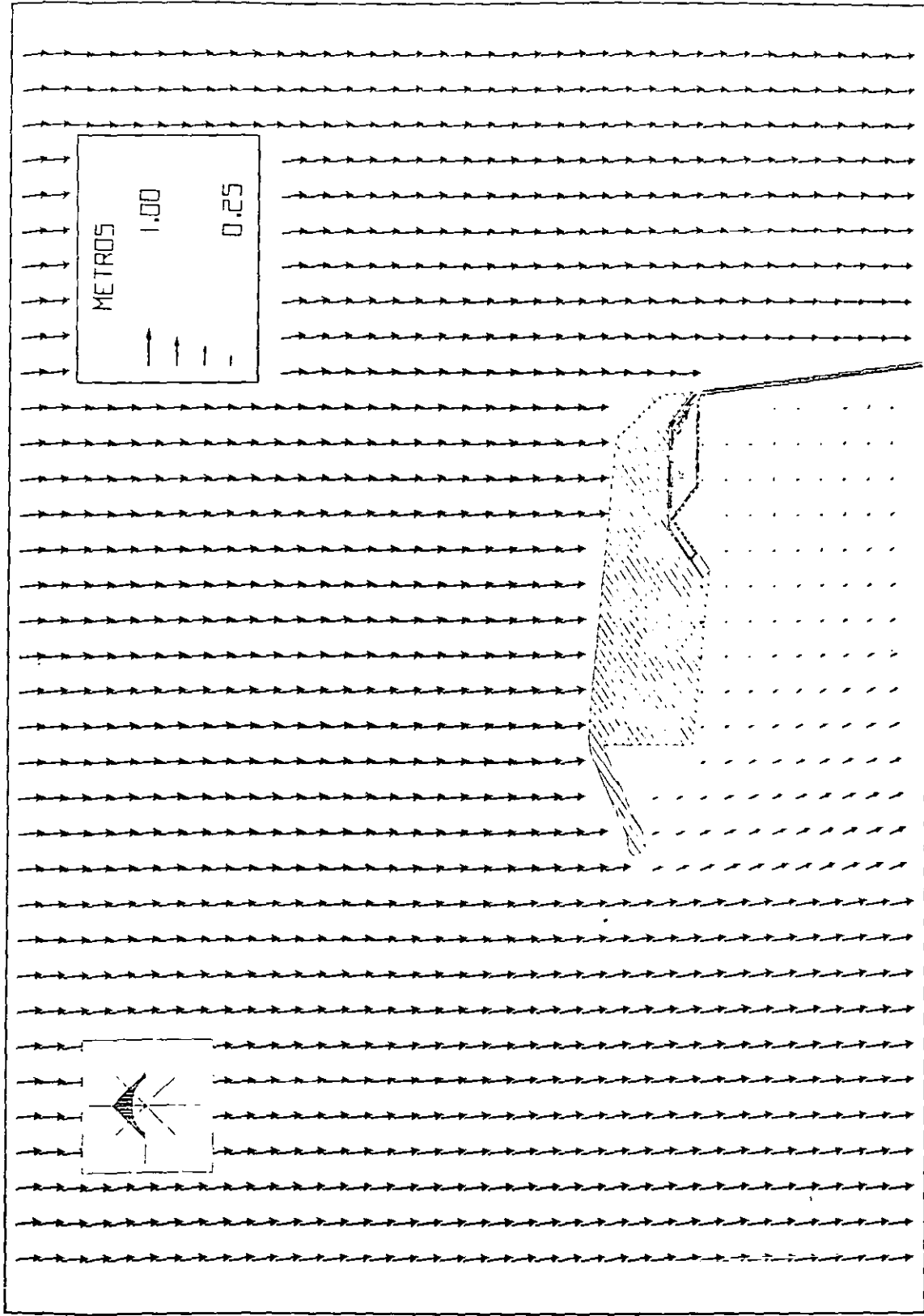


Fig. 6.4 Distribución espacial del oleaje en la sexta malla de cálculo para la dirección Norte. $H_0 = 1.0 \text{ m}$ $T_0 = 21.0 \text{ seg}$

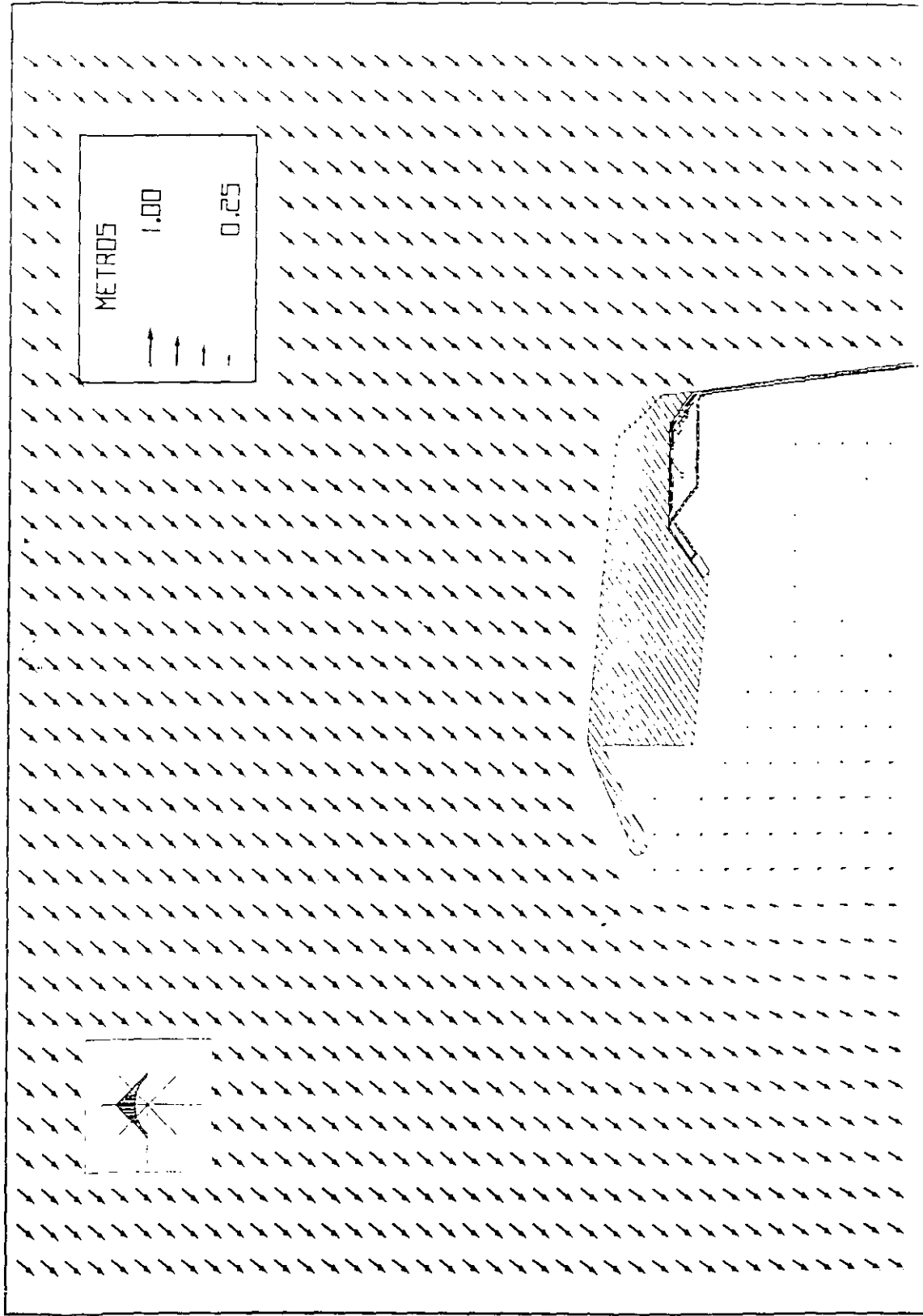


Fig. 6.5 Distribucion espacial del oleaje en la sexta malla de calculo para la direccion Norte 45. Este. Ho. 1 0 m. Y Ho. 8.0 seg.

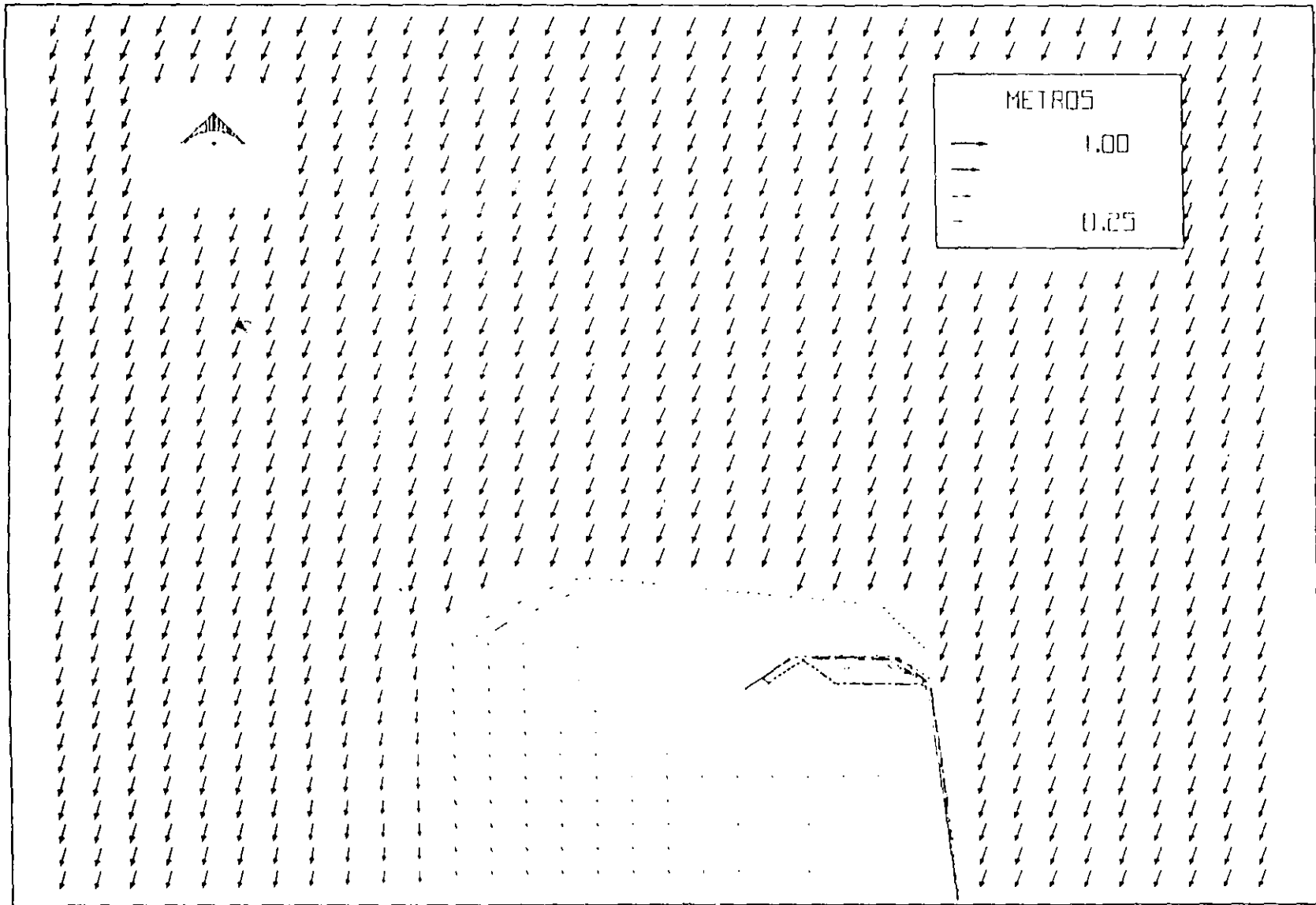


Fig. 6.6. Distribucion espacial del viento en el sexto mallero de la zona para la direccion Norte 45. U = 10 m/s y $t = 150$ seg

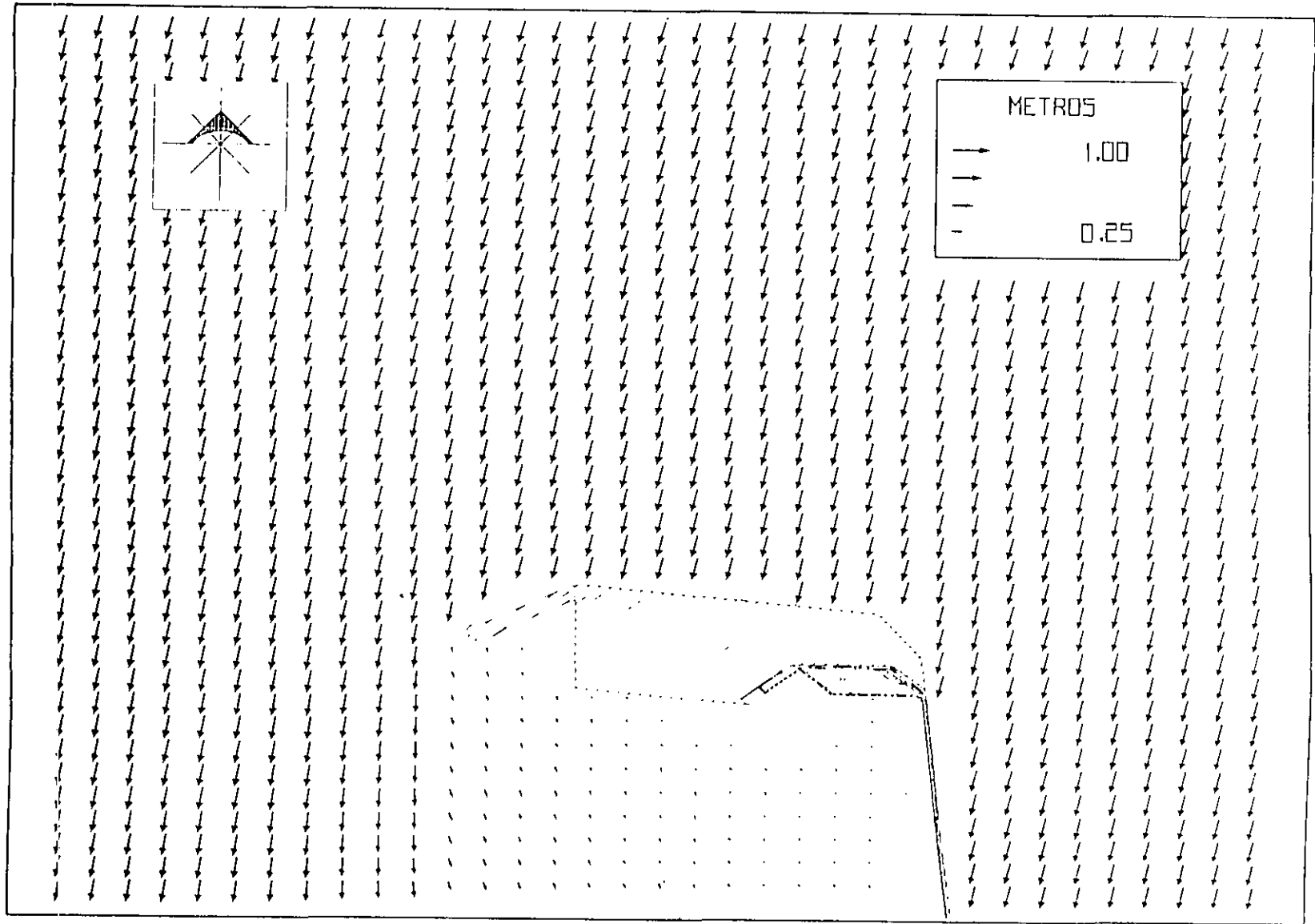


Fig. 6.7 Distribución espacial del oleaje en la sexta malla de cálculo para la dirección Norte 45° Este, $H_b = 1.0$ m y $T_p = 21.0$ seg

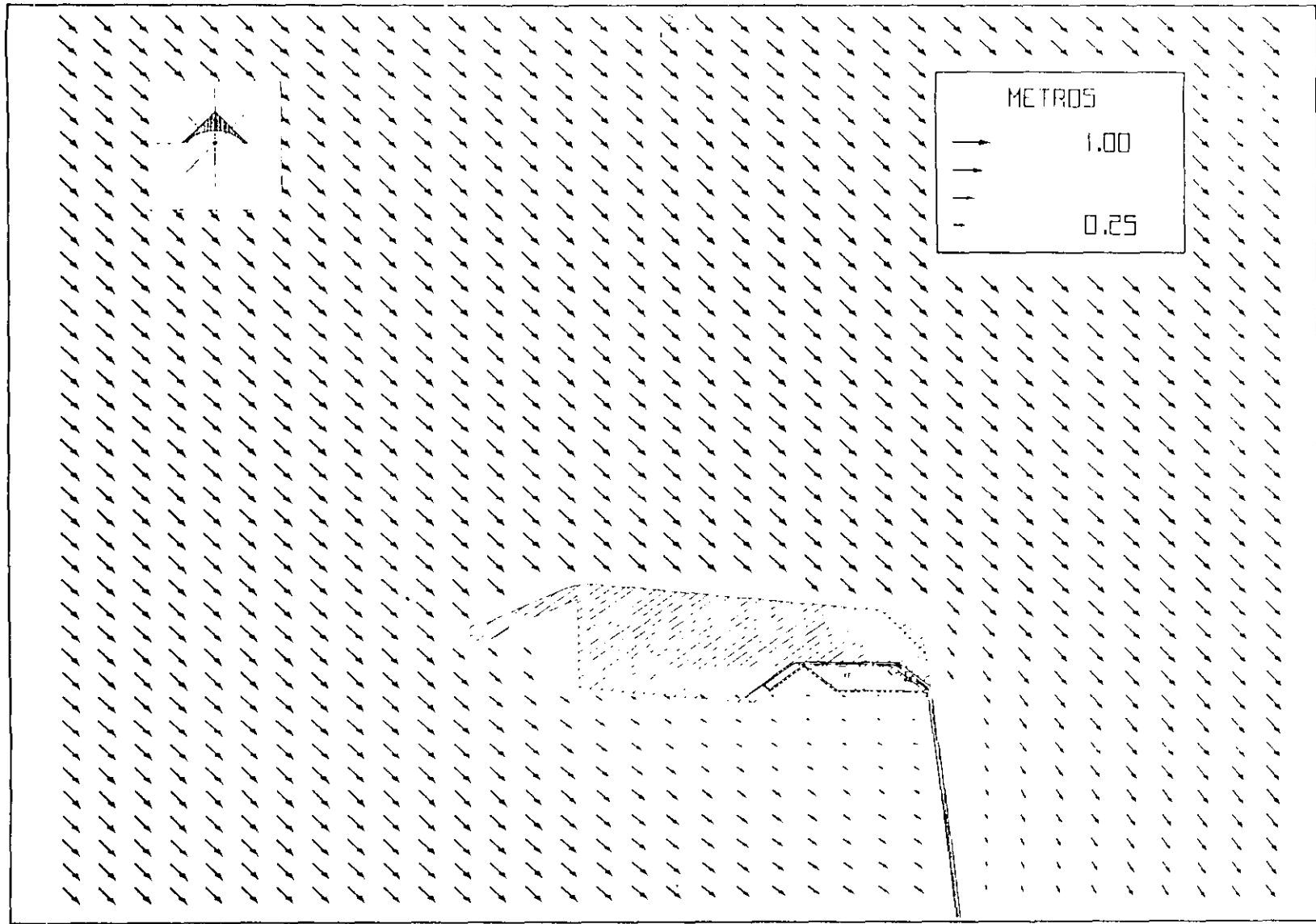


Fig. 6.8 Distribución espacial del oleaje en la sexta malla de cálculo para la dirección Norte 45 Oeste. $H_0 = 1.0$ m y $T_0 = 8.0$ seg

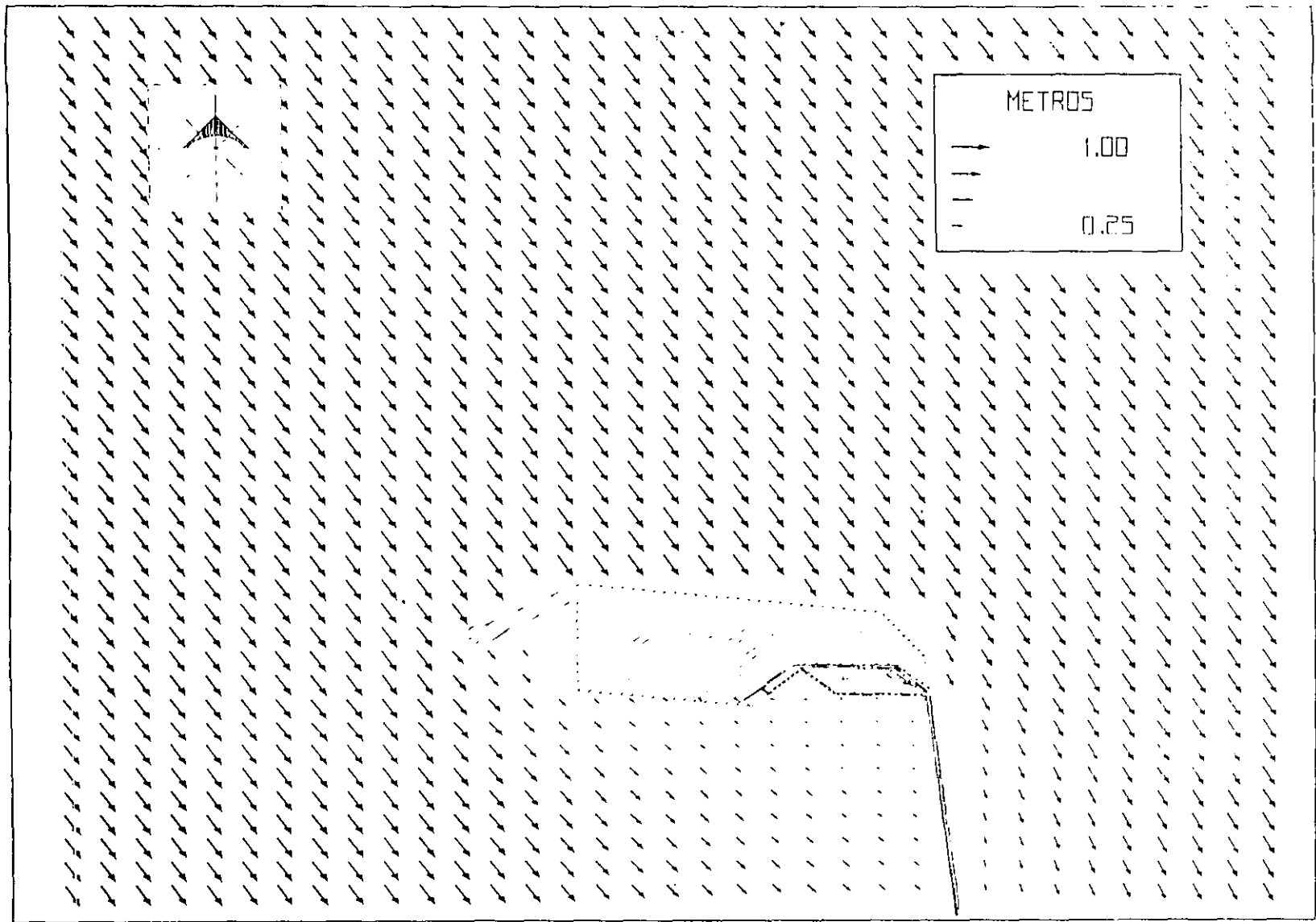


Fig. 6.9 Distribución espacial del oleaje en la sexta malla de cálculo para la dirección Norte 45° Oeste, $H_0 = 1.0$ m y $T_0 = 15.0$ seg

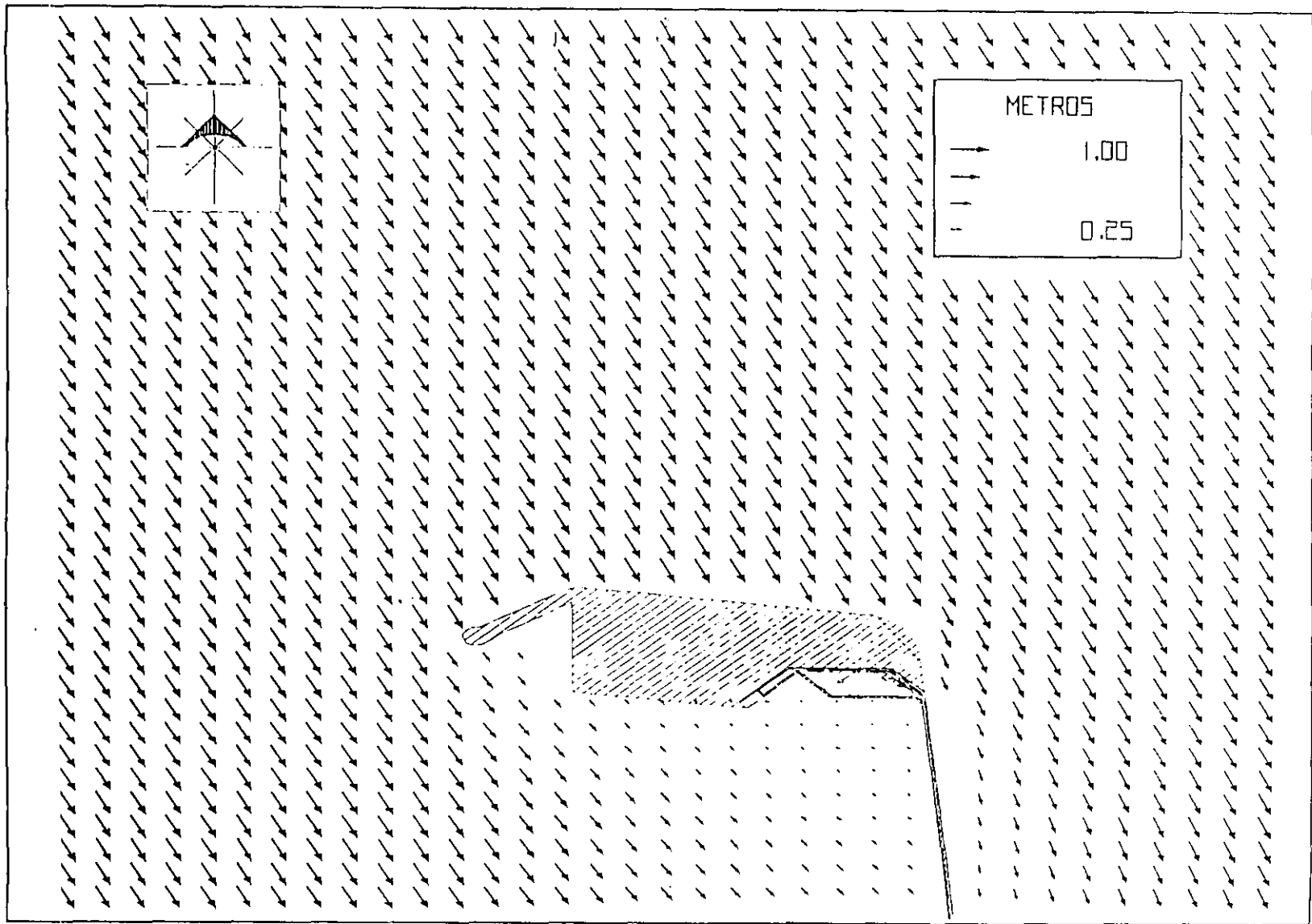


Fig. 6.10 Distribución espacial del oleaje en la sexta malla de cálculo para la dirección Norte 45° Oeste. Ho = 1.0 m y Fo = 21.0 seg

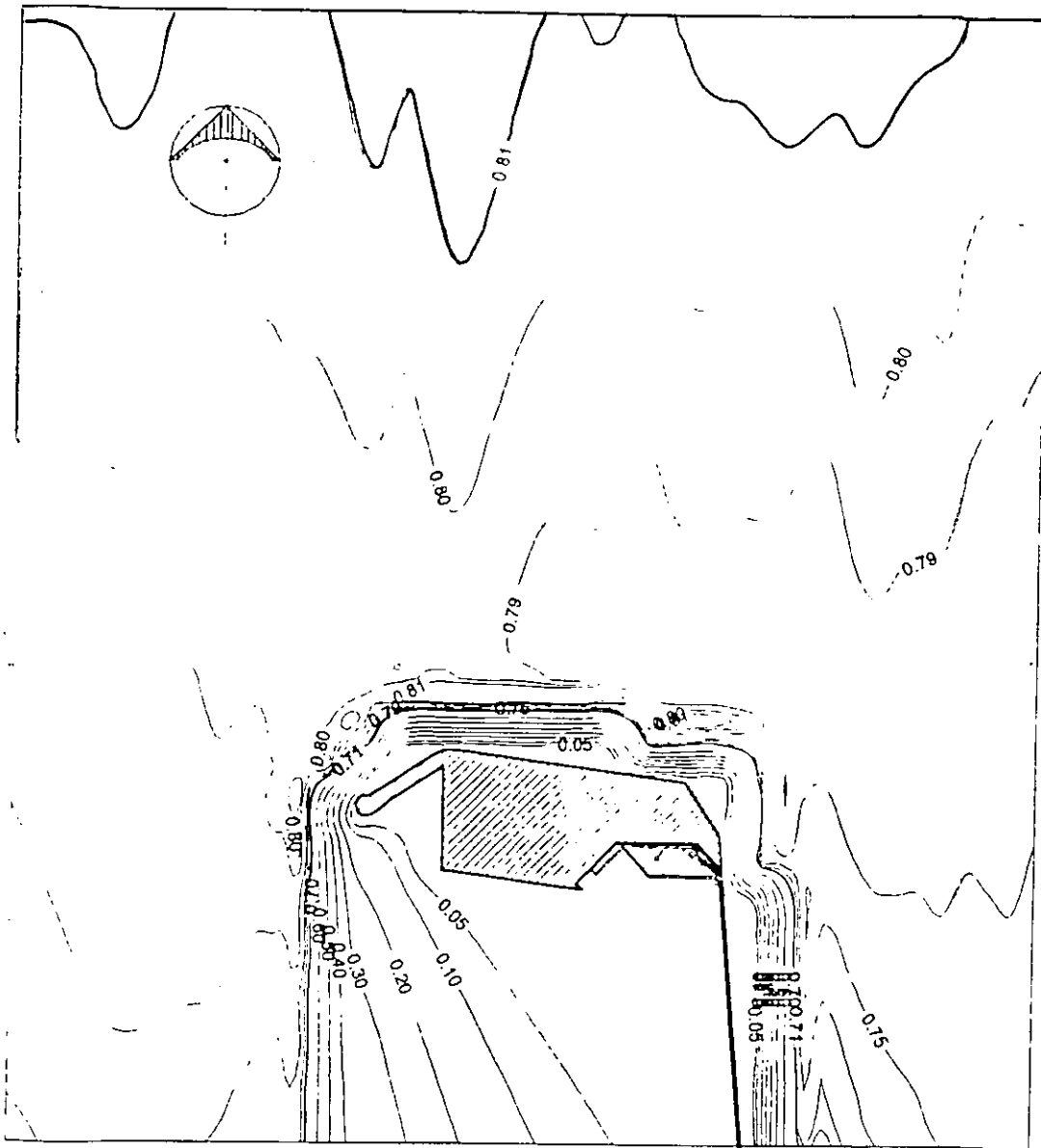


FIG. 6.11 DISTRIBUCION EN PLANTA DE LAS ALTURAS DE OLA REFRACTADAS HASTA LA ZONA DE ESTUDIO, DIRECCION NORTE, $T_0=8.0$ SEG. Y $H_0=1.0$ M.

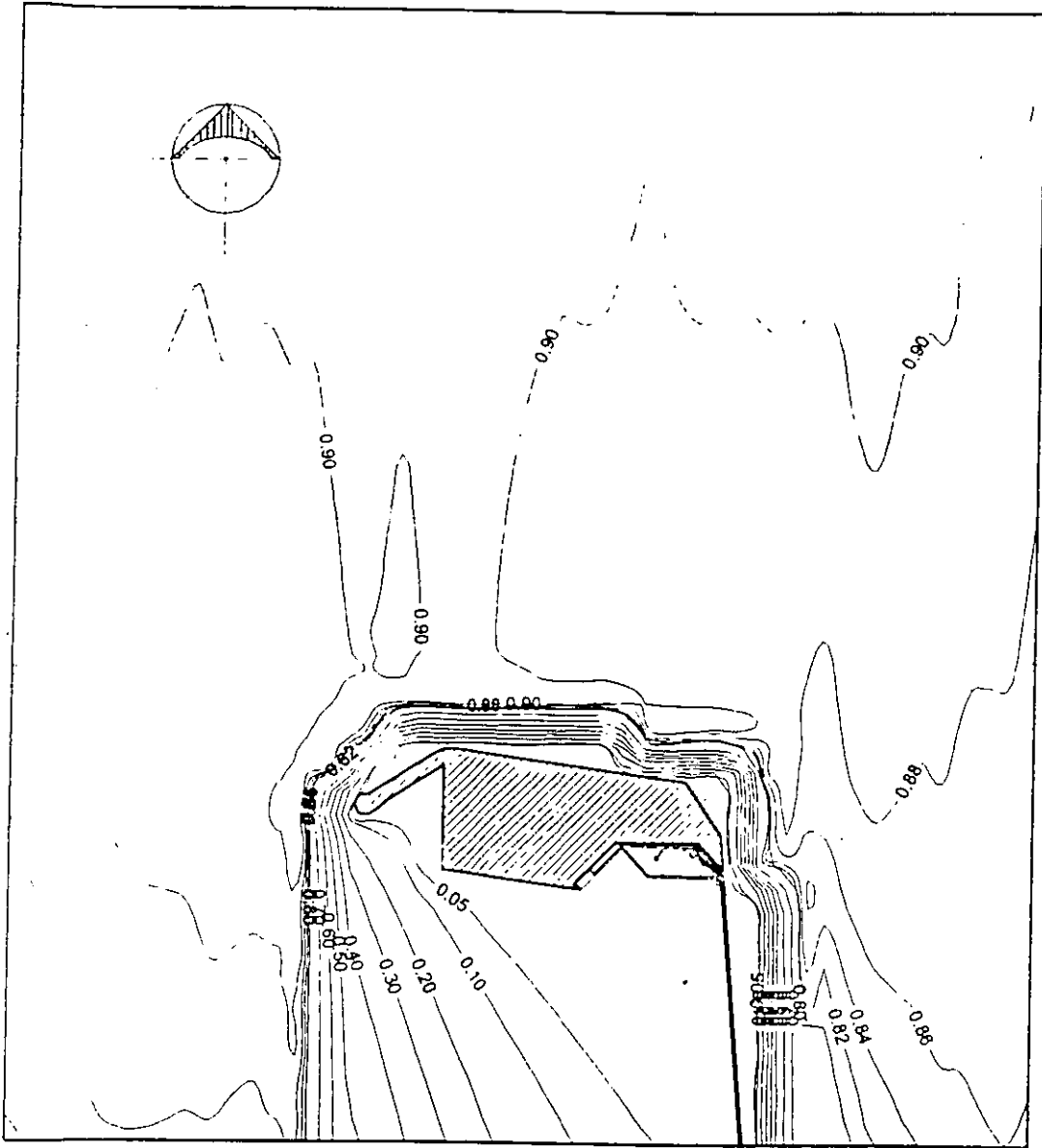


FIG. 6.12 DISTRIBUCION EN PLANTA DE LAS ALTURAS DE OLA REFRACTADAS HASTA LA ZONA DE ESTUDIO, DIRECCION NORTE, $T_0=15.0$ SEG. Y $H_0=1.0$ M.

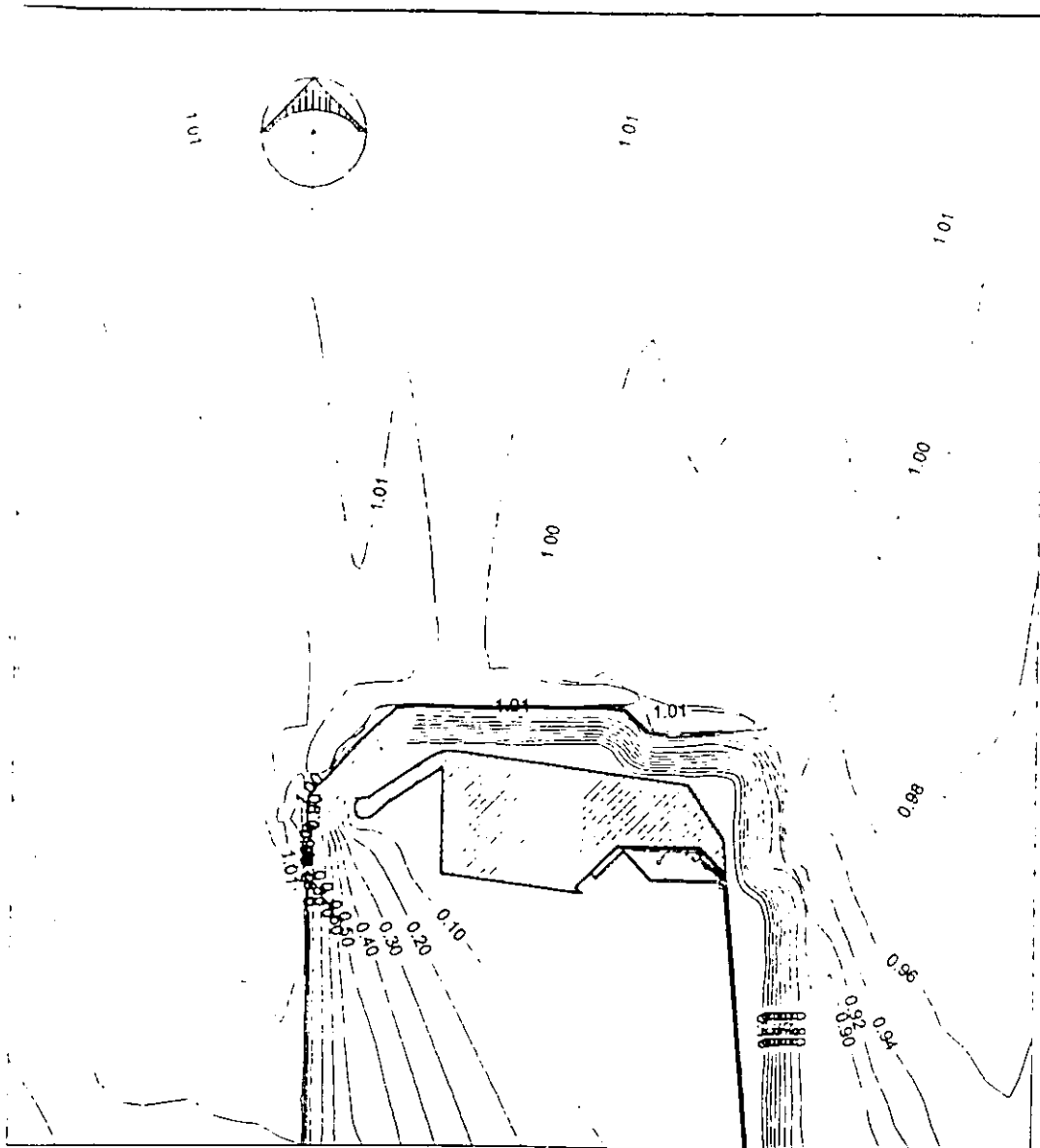


FIG. 6.13 DISTRIBUCION EN PLANTA DE LAS ALTURAS DE OLA REFRACTADAS HASTA LA ZONA DE ESTUDIO, DIRECCION NORTE, $T_0=21.0$ SEG. Y $H_0=1.0$ M.

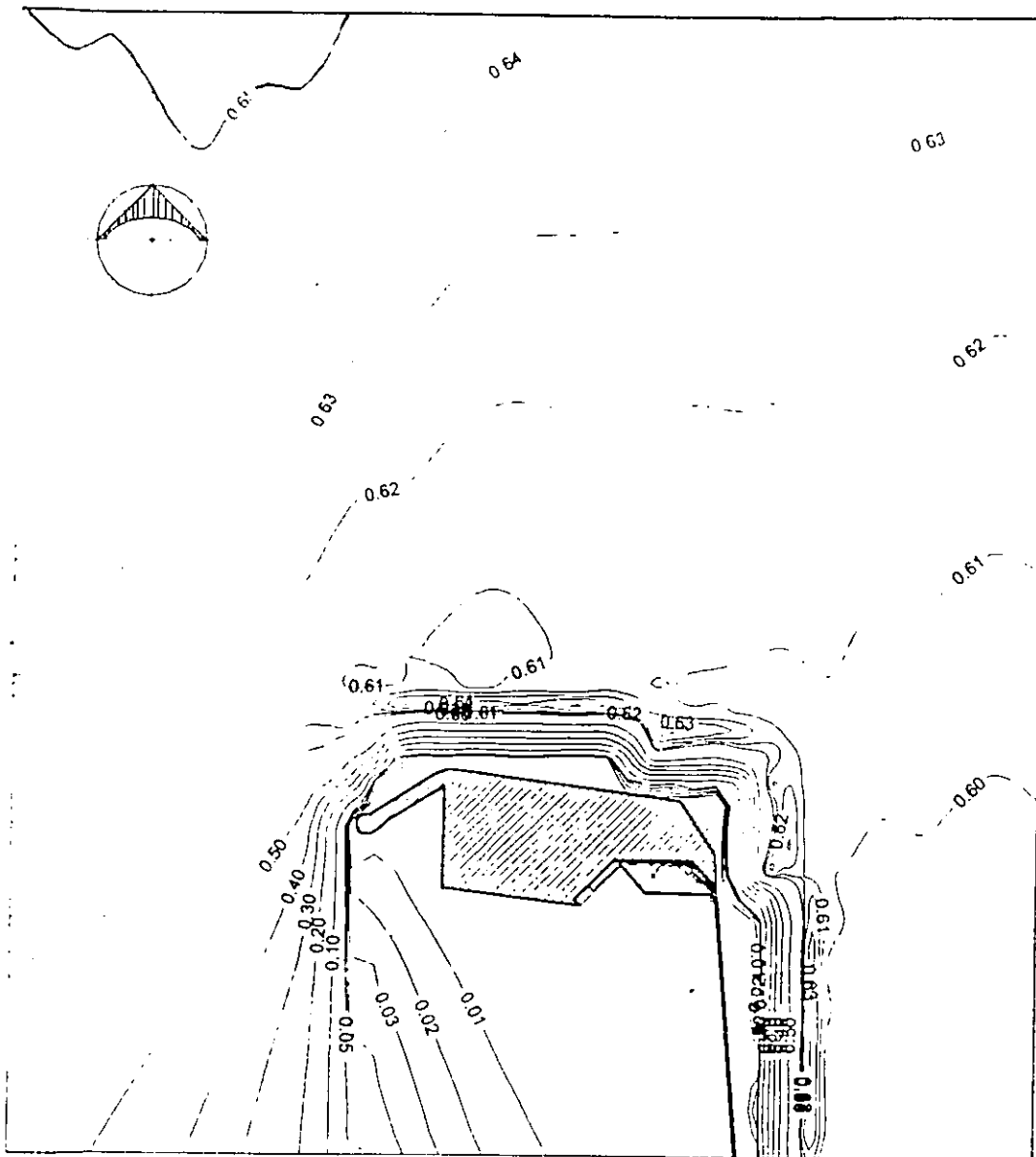


FIG. 6.14 DISTRIBUCION EN PLANTA DE LAS ALTURAS DE OLA REFRACTADAS HASTA LA ZONA DE ESTUDIO, DIRECCION NORTE 45° ESTE, $T_0=8.0$ SEG. Y $H_0=1.0$ M.

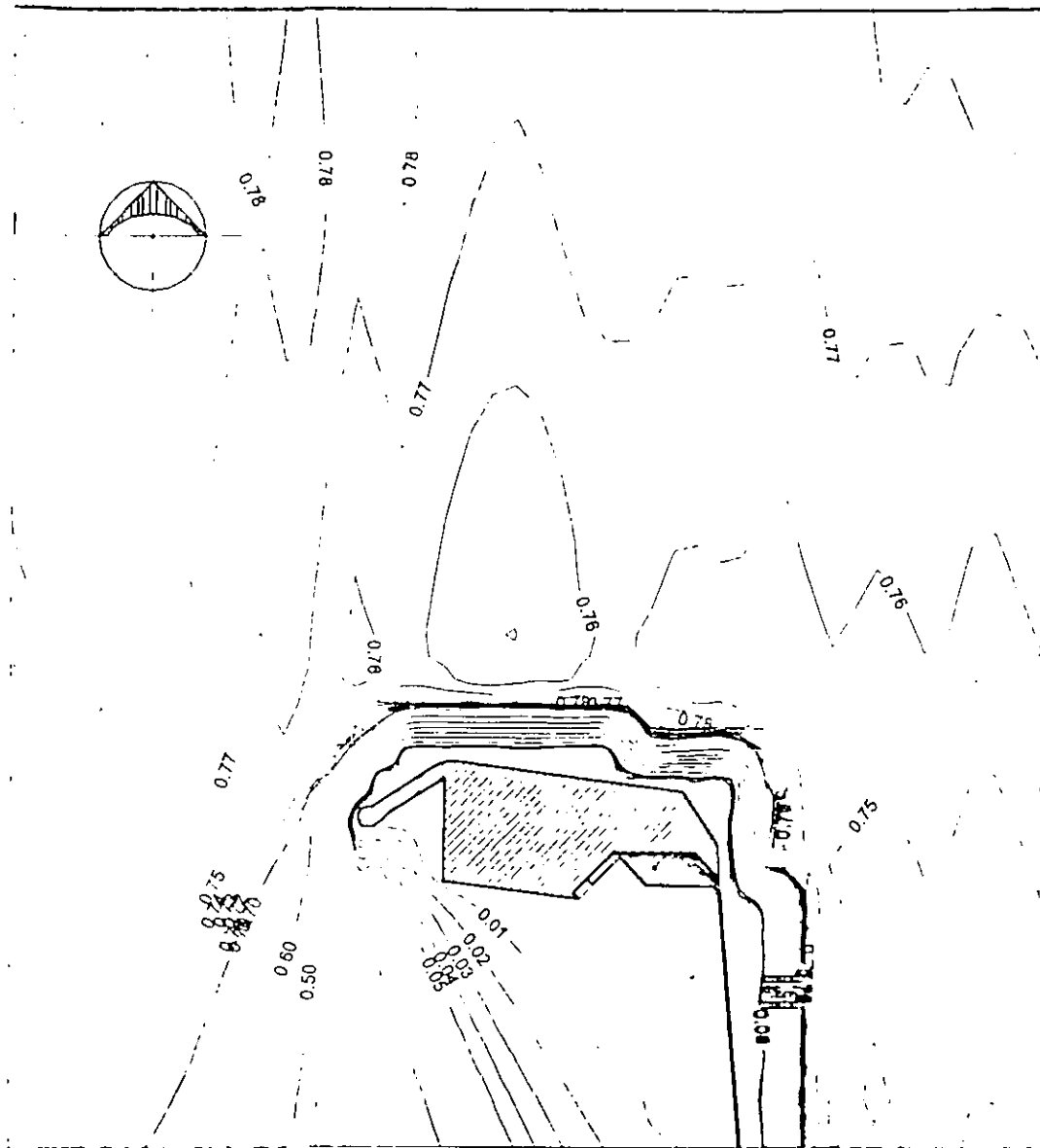


FIG 6 15 DISTRIBUCION EN PLANTA DE LAS ALTURAS DE OLA REFRACTADAS HASTA LA ZONA DE ESTUDIO, DIRECCION NORTE 45°ESTE, $T_0=15.0$ SEG Y $H_0=1.0$ M.

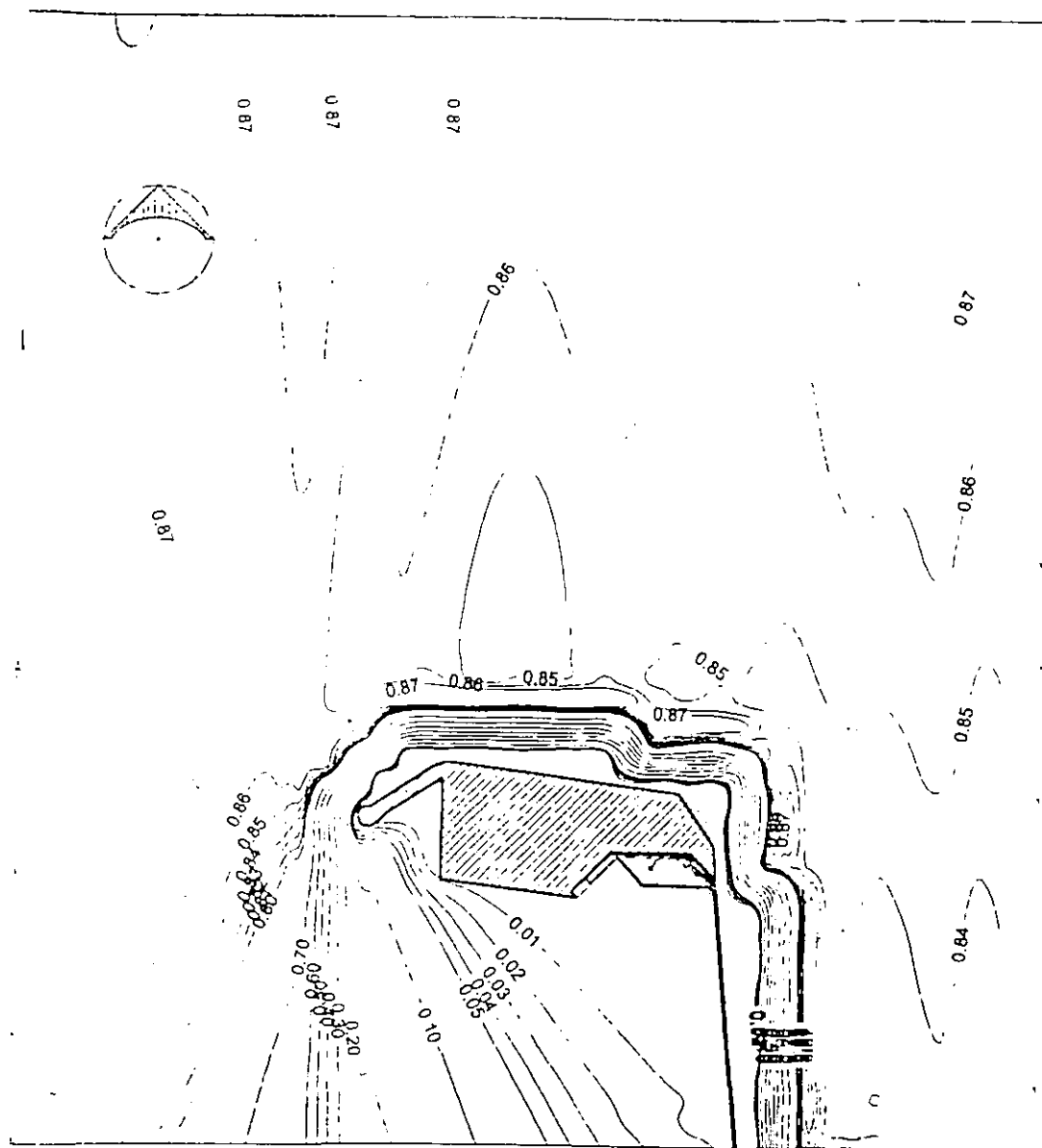


FIG. 6.16 DISTRIBUCION EN PLANTA DE LAS ALTURAS DE OLA REFRACTADAS HASTA LA ZONA DE ESTUDIO, DIRECCION NORTE 45° ESTE, $T_0=21.10$ SEG. Y $H_0=1.0$ M.

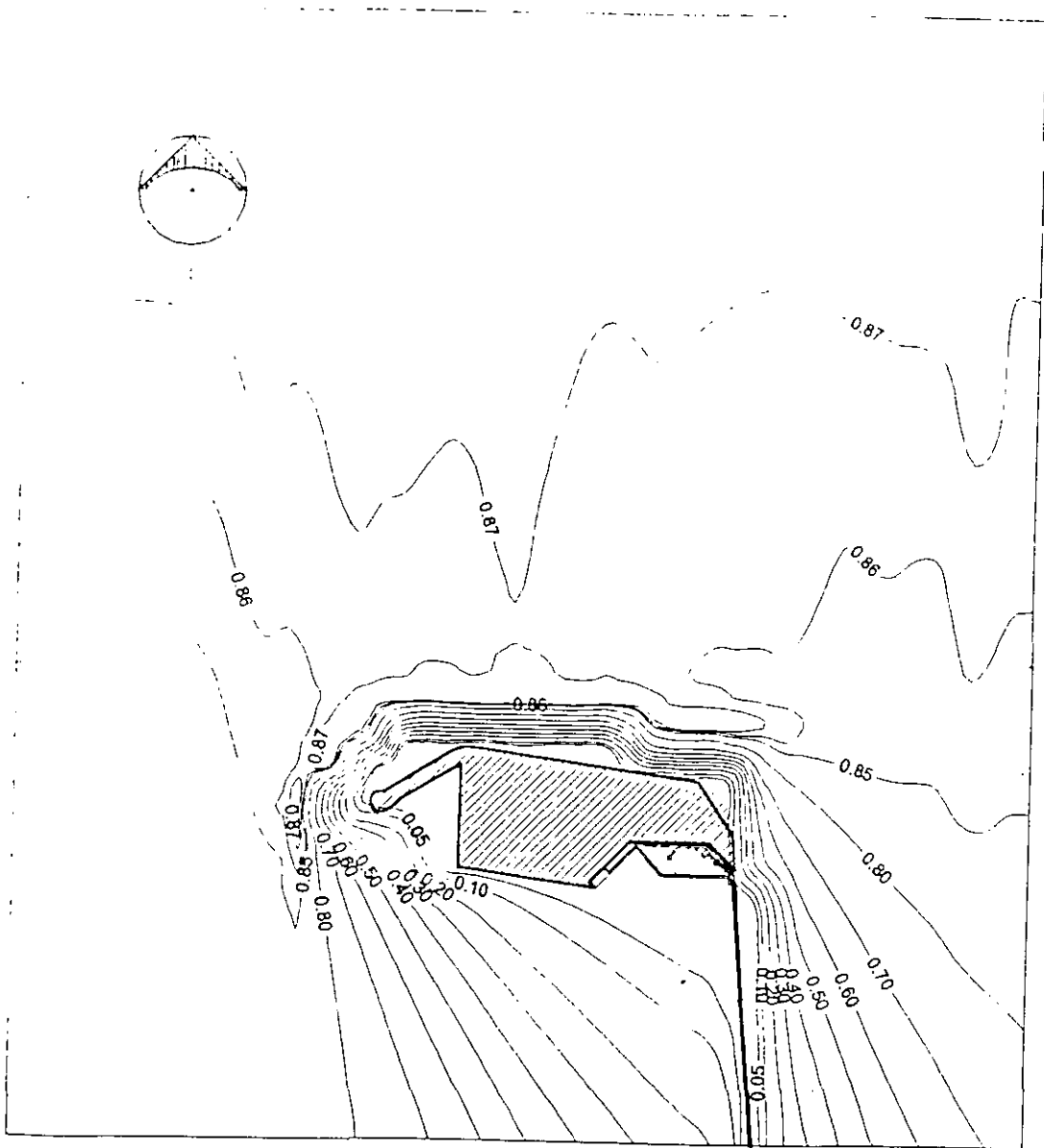


FIG. 6.18 DISTRIBUCION EN PLANTA DE LAS ALTURAS DE OLA REFRACTADAS HASTA LA ZONA DE ESTUDIO, DIRECCION NORTE 45° OESTE, $T_0=15.0$ SEG. Y $H_0=1.0$ M.

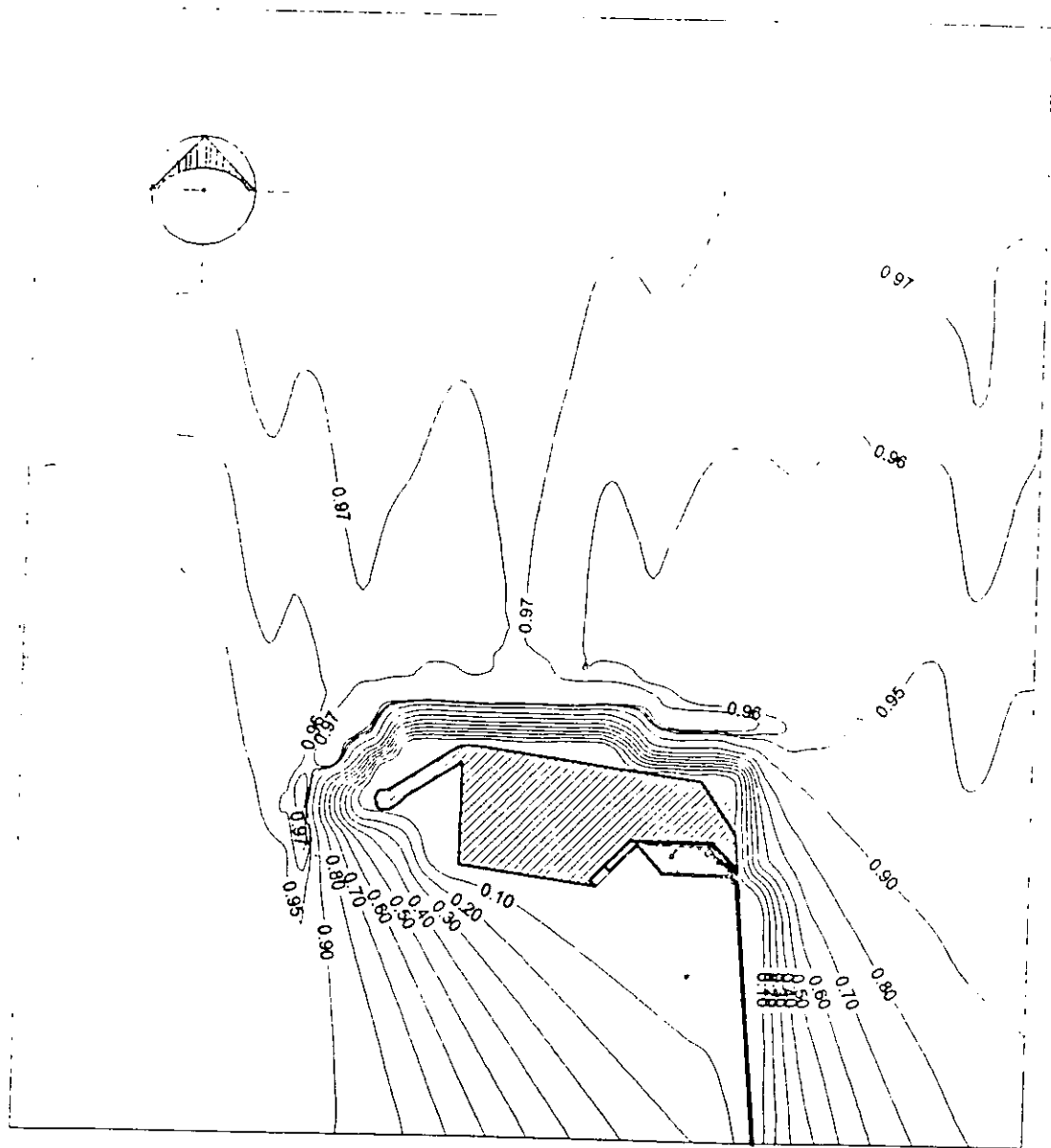


FIG. 6.19 DISTRIBUCION EN PLANTA DE LAS ALTURAS DE OLA REFRACTADAS HASTA LA ZONA DE ESTUDIO, DIRECCION NORTE 45° OESTE, $T_0=21.0$ SEG. Y $H_0=1.0$ M.

Para la dirección noroeste mostrada en las figs. 6.8 a 6.10. se observa mayor penetración del oleaje de 8 seg. de período en las zonas protegidas del rompeolas comparada con los períodos de 15 y 21 seg., pudiéndose observar que las alturas de ola detrás del rompeolas llegan a ser superiores a 0.25 m.

De acuerdo con la distribución en planta de las alturas de ola para la dirección norte mostrada en las figs. 6.11 a 6.13, se puede decir que para períodos de 8 y 15 seg. las alturas de ola detrás del rompeolas son del orden de 0.05 m y en los paramentos de atraque menores de 0.05 m, llegándose a incrementar a 0.10 m detrás del rompeolas para el período de 21 seg.

Para la dirección noreste mostrada en las figs. 6.14 a 6.16. las alturas de ola detrás del rompeolas y en los paramentos de atraque son del orden de 0.01 m para períodos de ola de 8, 15 y 21 seg., respectivamente.

Con respecto a la dirección noroeste mostrada en las figs. 6.17 a 6.19. se puede decir que las alturas de ola detrás del rompeolas y en los paramentos de atraque son del orden de 0.10 m para los períodos de ola de 8, 15 y 21 seg. analizados, considerando una ola unitaria en aguas profundas.

De acuerdo con lo anterior se puede concluir que el oleaje de la dirección noroeste provoca la mayor penetración del oleaje en el puerto, seguida por las direcciones norte y noreste. En cuanto a las alturas de ola, considerando una ola unitaria en aguas profundas, se tendría una altura de ola de 0.20 m detrás del rompeolas y una altura de ola del orden de 0.10 m en el paramento de atraque más cercano al rompeolas.

6.2. Modelación matemática de la agitación del oleaje

6.2.1. Preparación de la información

(A) Condiciones de oleaje

Para la realización de la simulación numérica del fenómeno de agitación de oleaje en el puerto, se tomaron en cuenta las condiciones de oleaje que se presentan en la tabla No. 6.2.

DIRECCION DEL OLAJE EN AGUAS PROFUNDAS	PERIODO DEL OLAJE	TALUD	ALTURA DE LA OLA PROMEDIO FRENTE AL ROMPEOLAS	ALTURA DEL OLAJE FRENTE AL ROMPEOLAS
N	8 SEG.	1:1	1.20	1.23 m
		3:1	1.20	
		VERTICAL	1.30	
	15 SEG.	1:1	0.96	0.90 m
		3:1	0.88	
		VERTICAL	0.86	
	21 SEG.	1:1	1.10	1.00 m
		3:1	1.00	
		VERTICAL	0.91	
NE	8 SEG.	1:1	1.10	1.20 m
		3:1	1.00	
		VERTICAL	1.50	
	15 SEG.	1:1	1.10	1.10 m
		3:1	1.20	
		VERTICAL	1.00	
	21 SEG.	1:1	1.20	1.26 m
		3:1	0.90	
		VERTICAL	1.70	
NW	8 SEG.	1:1	1.40	1.50 m
		3:1	1.50	
		VERTICAL	1.60	
	15 SEG.	1:1	1.10	1.10 m
		3:1	1.10	
		VERTICAL	1.10	
	21 SEG.	1:1	1.00	1.10 m
		3:1	1.10	
		VERTICAL	1.20	

Tabla 6.2 Condiciones de oleaje consideradas para realizar la simulación numérica de agitación de oleaje.

La altura de ola incidente utilizada en el modelo matemático de agitación de oleaje, fue determinada mediante el promedio de las alturas de ola medidas frente al rompeolas en el modelo físico de agitación considerando los ensayos realizados con talud 1:1, 3:1 y vertical para cada período y dirección del oleaje, como se muestra en la tabla No. 6.2.

(B) Batimetría y disposición del puerto

La batimetría y el arreglo geométrico del proyecto de ampliación de la terminal portuaria considerados para la simulación numérica de la agitación del oleaje, corresponden a la figura No. 2.1.

6.2.2. Modelación matemática

Para el cálculo de la agitación del oleaje en el interior del puerto, se aplicó el principio del fenómeno de la difracción del oleaje, el cual se presenta cuando la propagación del mismo es interrumpida por un obstáculo natural o artificial, lo que provoca que el oleaje gire en el extremo del obstáculo y penetre detrás del mismo.

En este capítulo se presenta en forma resumida el desarrollo del modelo matemático de agitación del oleaje utilizado en el presente estudio, el cual se basa en la velocidad potencial del oleaje, la cual es una función que expresa totalmente las características del oleaje, incluyendo la velocidad de la partícula de agua, la presión dinámica dentro del agua y la variación de la superficie del agua con el tiempo.

De acuerdo con lo anterior, para obtener la altura de la ola en cualquier punto detrás de un obstáculo con coordenadas $P(x, y)$, es necesario encontrar la velocidad potencial, cuya expresión en su forma tridimensional es:

$$\Phi = - \frac{i g H}{2\sigma} \phi(x, y) \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh k h} \exp(i \sigma t)$$

Siendo :

- H = Altura del oleaje incidente
- σ = Frecuencia angular
- K = Número del oleaje
- h = Profundidad del agua
- g = Aceleración de la gravedad
- i = Número imaginario
- $\phi(x,y)$ = Expresión compleja del coeficiente de difracción, cuya ecuación se expresa como:

$$|\phi(x,y)| = K_D$$

Donde el valor de (phi) se calcula con la teoria de Sommerfeld en la forma siguiente, usando coordenadas polares:

$$\phi(r, \theta) = \frac{1}{\sqrt{2}} \exp \left[i \left(kr \cos(\theta - \alpha) + \frac{\pi}{4} \right) \right] \left[\left(C(\gamma_1) + \frac{1}{2} \right) - i \left(S(\gamma_1) + \frac{1}{2} \right) \right]$$

$$+ K_R \frac{1}{\sqrt{2}} \exp \left[i \left(kr \cos(\theta + \alpha) + \frac{\pi}{4} \right) \right] \left[\left(C(\gamma_2) + \frac{1}{2} \right) - i \left(S(\gamma_2) + \frac{1}{2} \right) \right]$$

Siendo K_R el coeficiente de reflexión del rompeolas

$$\gamma_1 = \sqrt{4 \frac{K_R}{\pi} \cos(\theta - \alpha)}$$

$$\gamma_2 = \sqrt{4 \frac{K_R}{\pi} \cos(\theta + \alpha)}$$

$$C(\gamma) = \int_0^\gamma \cos\left(\frac{\pi}{2} X^2\right) dX$$

$$S(\gamma) = \int_0^\gamma \sin\left(\frac{\pi}{2} X^2\right) dX$$

Los coeficientes $C(\gamma)$ y $S(\gamma)$ son los coeficientes de la integral de Fresnel.

Para el cálculo de la altura de ola significativa en un punto de coordenadas (X, Y), dentro del puerto, se utiliza la siguiente expresión:

$$(H_{1/3})_d = \sqrt{\sum_{nm} \left[H_{1/3} \left(\frac{1 - (\cos \theta_m / 2)^{2.5}}{N - \sum_m (\cos \theta_m / 2)^{2.5}} \right)^{1/2} \phi(X, Y, f_n, \alpha_m) \right]^2}$$

Siguiendo los pasos que se mencionan a continuación:

- a) El espectro frecuencial se divide en N partes. Como cada parte tiene el mismo espectro, es decir: $S_d(f_n) = S_0 / N$, en tales circunstancias, $H_{1/3}$ del oleaje incidente, se descompone en las componentes de oleaje regular, que son:

$$H_n = \sqrt{8 S_d(f)} = \sqrt{8 \frac{S_0}{N}} = \sqrt{\frac{8}{N}} * \frac{H_{1/3}}{\sqrt{16}} = \frac{H_{1/3}}{\sqrt{2N}}$$

$$f_n = [b / \ln(2N / (2n - 1))]^{1/4}$$

$$(n = 1, 2, \dots, N)$$

donde:

$$a = 0.257 H_{1/3}^2 * T^{4/3} \text{ y } b = 1.03 T^{4/3}$$

- b) El rango de la dirección del oleaje “ α ” se divide en “M” partes. Como cada valor de $\delta \alpha_m (= \Delta \alpha)$ es igual, y el rango de “ α ” variará según el valor de $S_{\text{máx}}$.

Cuando $S_{\text{máx}} = \infty$, corresponde al caso de oleaje regular.

El rango de la dirección, donde más del 90% de la energía se incluye, es como sigue:

$$\begin{array}{ll}
 -60^\circ < \alpha < 60^\circ & \text{Para } S_{\text{máx}} = 10 \\
 -30^\circ < \alpha < 30^\circ & \text{Para } S_{\text{máx}} = 75 \\
 -15^\circ < \alpha < 15^\circ & \text{Para } S_{\text{máx}} = 200
 \end{array}$$

c) Por lo anterior, el oleaje incidente se divide en un número de $N \times M$ de componentes del oleaje regular.

d) El valor de f_n ($n = 1, \dots, N$), se calcula con la ecuación de H_n .

e) El valor $\phi(X, Y, f_n, \alpha_m)$, se calcula en el punto (X, Y) , para $m = 1, 2, \dots, M$ con $n = 1$

f) Los valores de $(\cos(\frac{\theta_m}{2}))^{2s}$ y $\sum_m (\cos(\frac{\theta_m}{2}))^{2s}$, se calculan para $m = 1, 2, \dots, M$ con $n = 1$

g) El valor de $\phi(X, Y, f_n, \alpha_m)$, se calcula en el punto (X, Y) para $m = 1, 2, \dots, M$, creciendo el valor de n hasta N .

h) Los valores de $(\cos(\frac{\theta_m}{2}))^{2s}$ y $\sum_m (\cos(\frac{\theta_m}{2}))^{2s}$, se calculan para $m = 1, 2, \dots, M$, creciendo el valor de n hasta N .

i) El valor de $(H_{1/3})_d$ en el punto (X, Y) se calcula la ecuación para la altura de la ola significativa indicada anteriormente.

6.2.3. Presentación de resultados

Los resultados obtenidos de la modelación matemática de la agitación del oleaje en el interior del puerto, se muestran en las figs. 6.20 a 6.22.

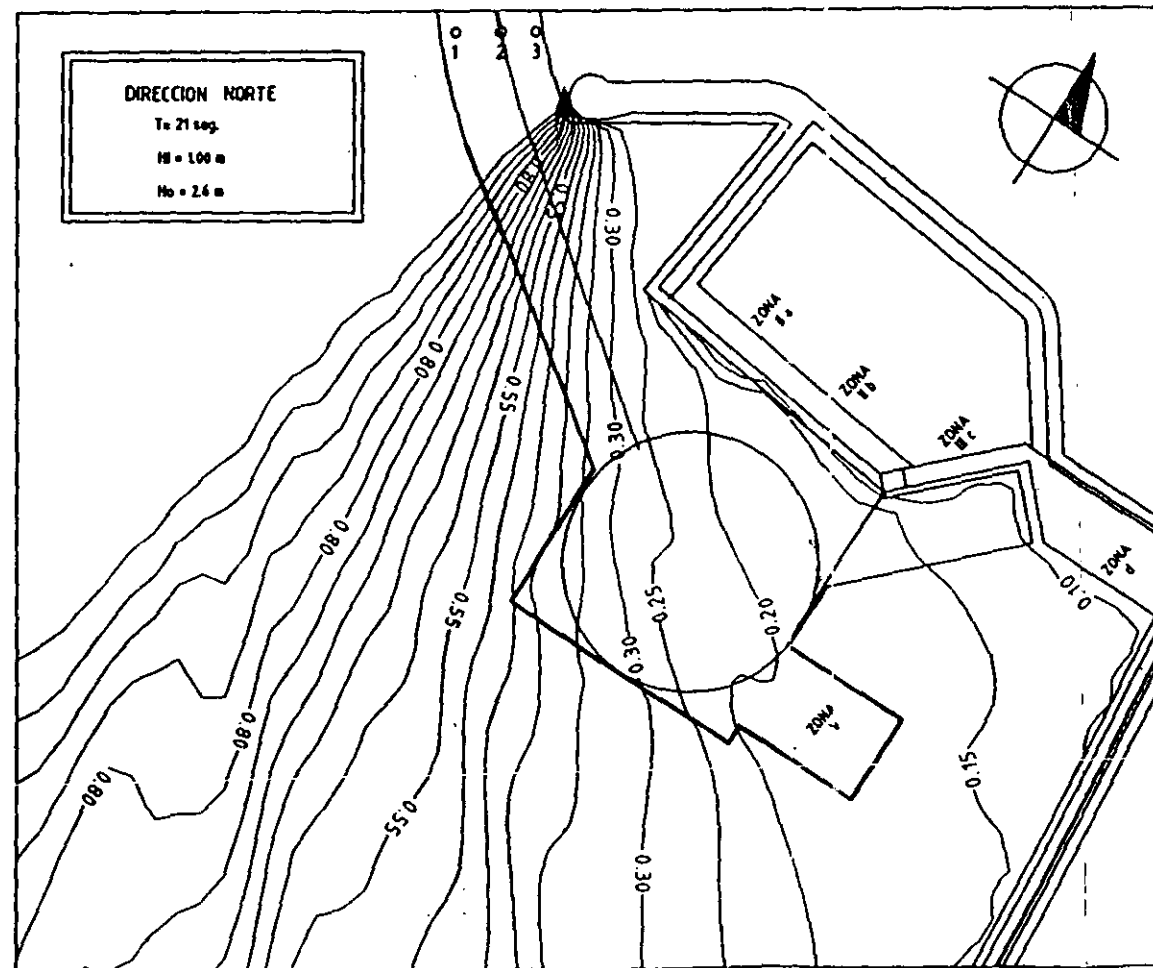
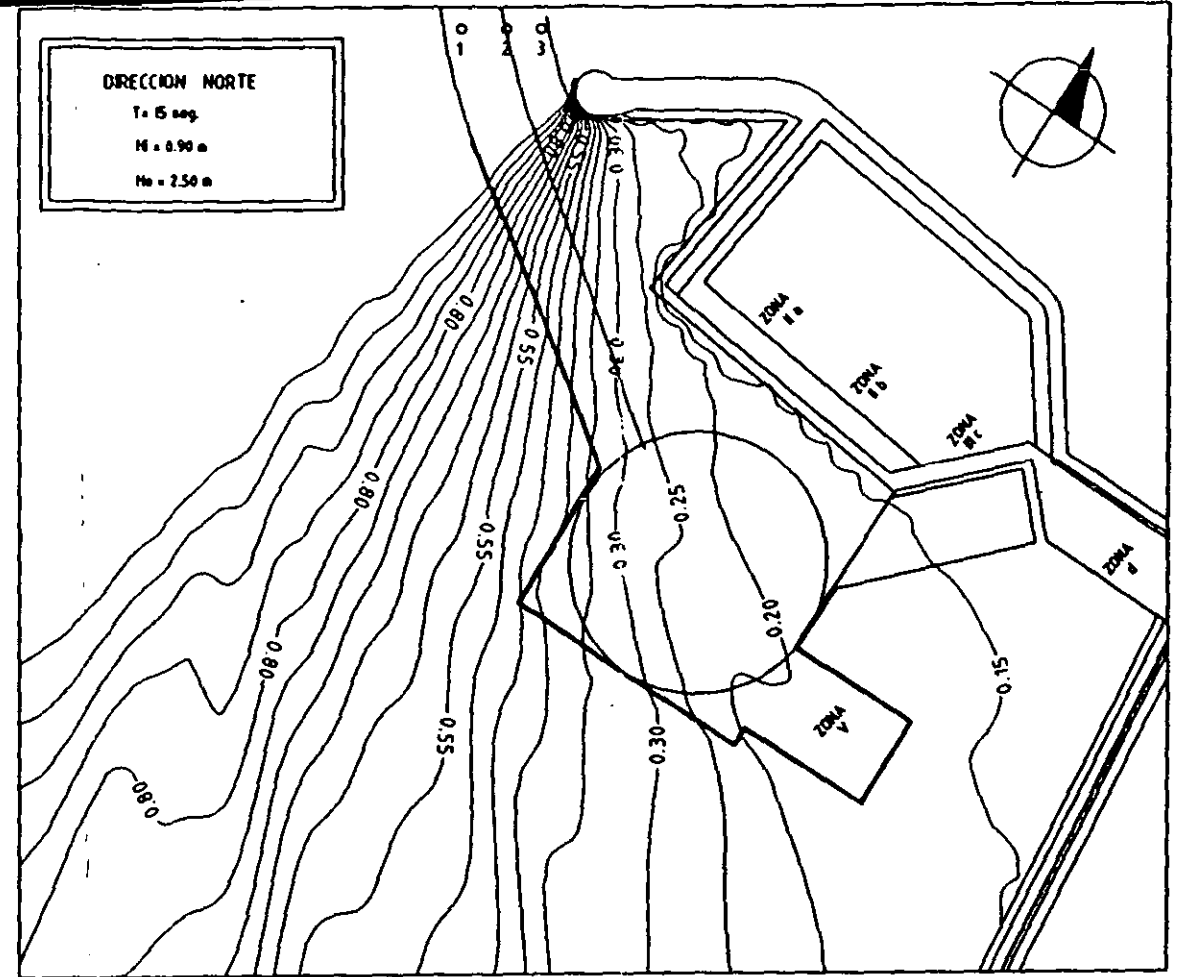
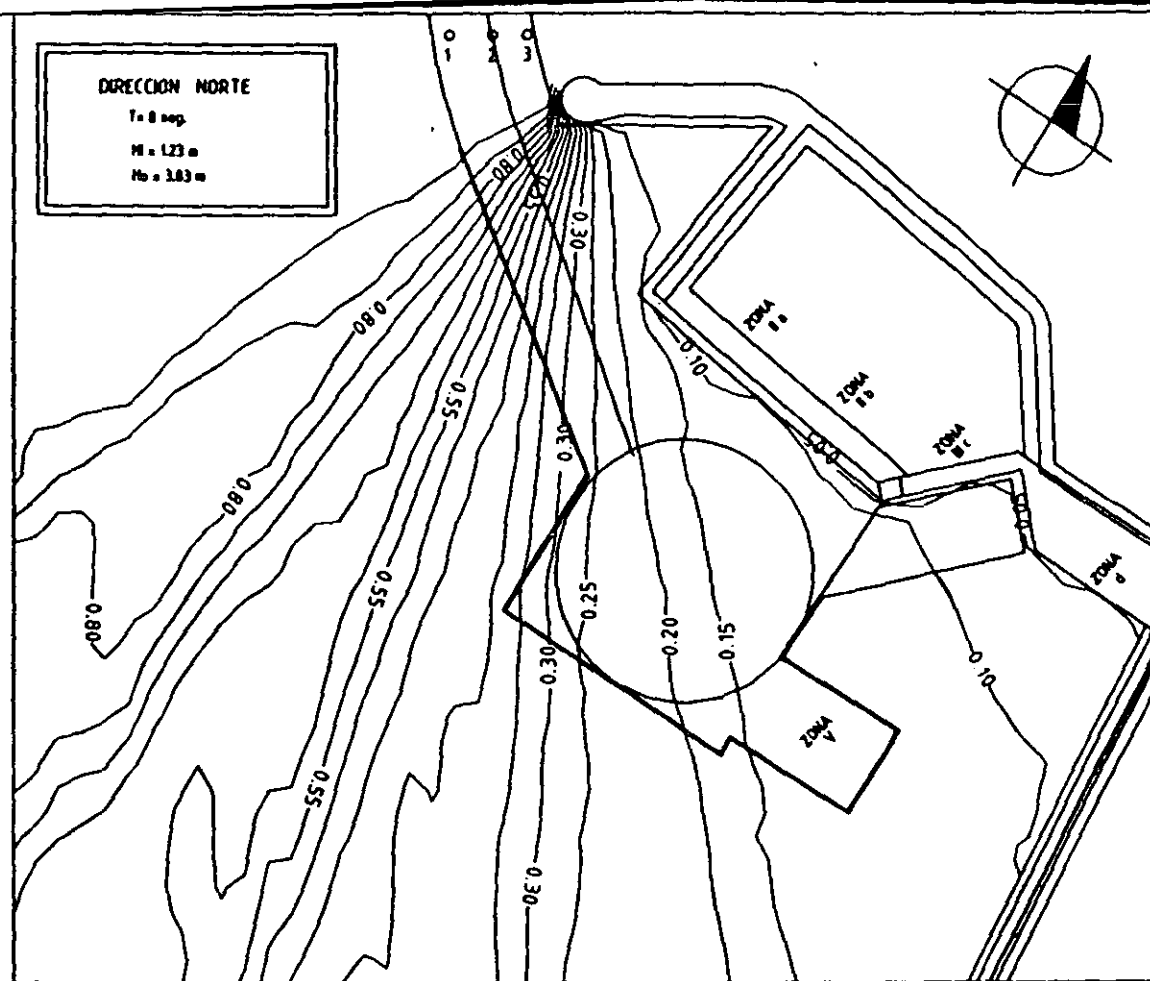
6.2.4. Interpretación de resultados

En la tabla No. 6.3 se presenta un resumen de los valores del coeficiente de agitación en las zonas de atraque del puerto, obtenidas mediante la aplicación del modelo numérico, para las direcciones Norte, Noreste y Noroeste del oleaje, asociadas con periodos de 8, 15 y 21 seg.

De acuerdo con los resultados del modelo numérico de agitación del oleaje, se tiene lo siguiente:

- a) Para un oleaje incidente de 8 seg. de periodo, la dirección Noroeste presenta los mayores coeficientes de agitación 0.10 en las zonas de atraque para Cruceros, Contenedores, y Graneleros, excepto en la zona de atraque para Petroleros, cuyo coeficiente máximo de agitación se presentó para la dirección Norte, alcanzando un valor de 0.15.
- b) Para un oleaje incidente de 15 seg. de periodo, las direcciones Norte y Noroeste generaron los máximos coeficientes de agitación siendo de 0.15 en las zonas de atraque para Cruceros, Contenedores y Graneleros, y de 0.20 en la zona de atraque para Petroleros.
- c) Para un oleaje incidente de 21 seg. de periodo, la dirección Noroeste generó los coeficientes de agitación máximos, siendo de 0.15 para las zonas de atraque para Cruceros, Contenedores y Graneleros, excepto en la zona de atraque para Petroleros, cuyo coeficiente máximo de agitación fue de 0.20.

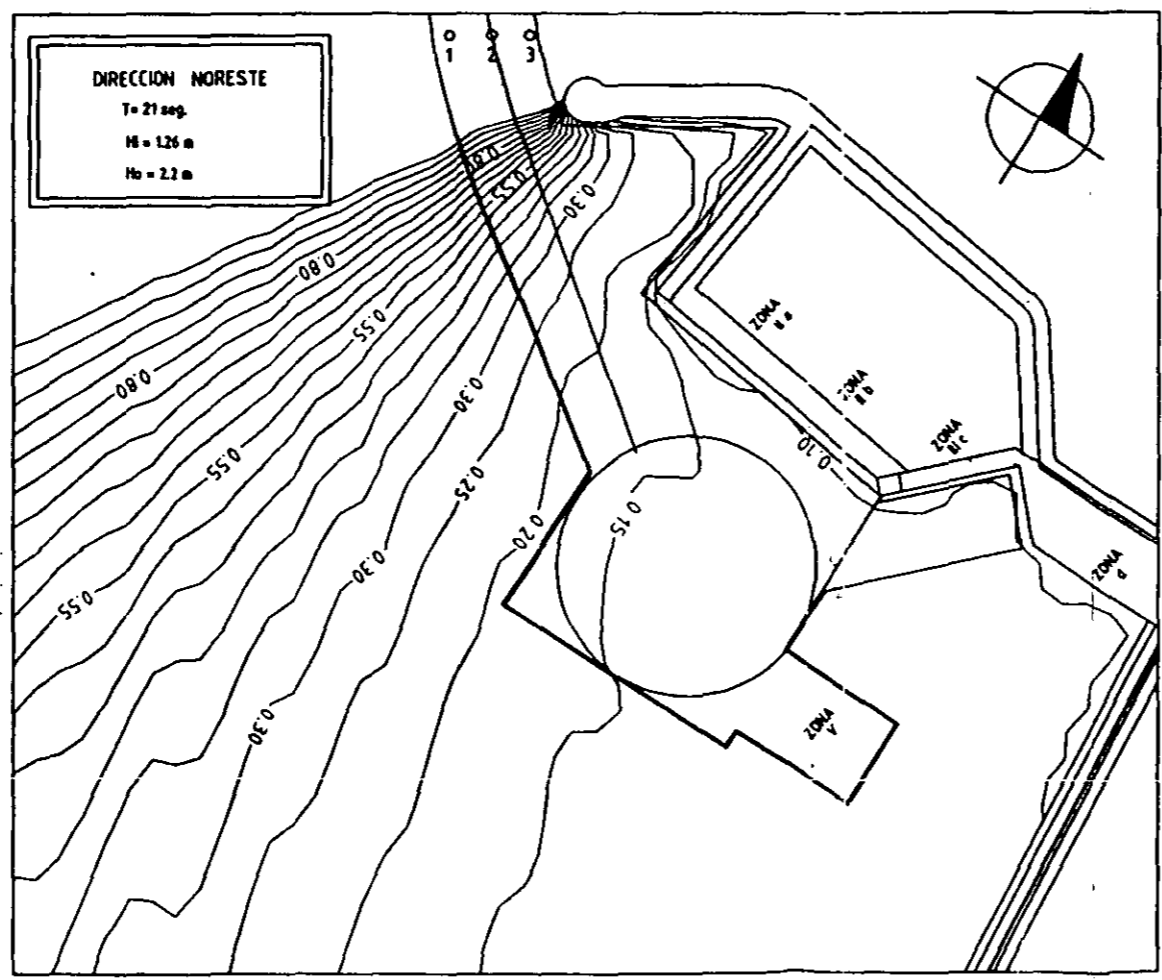
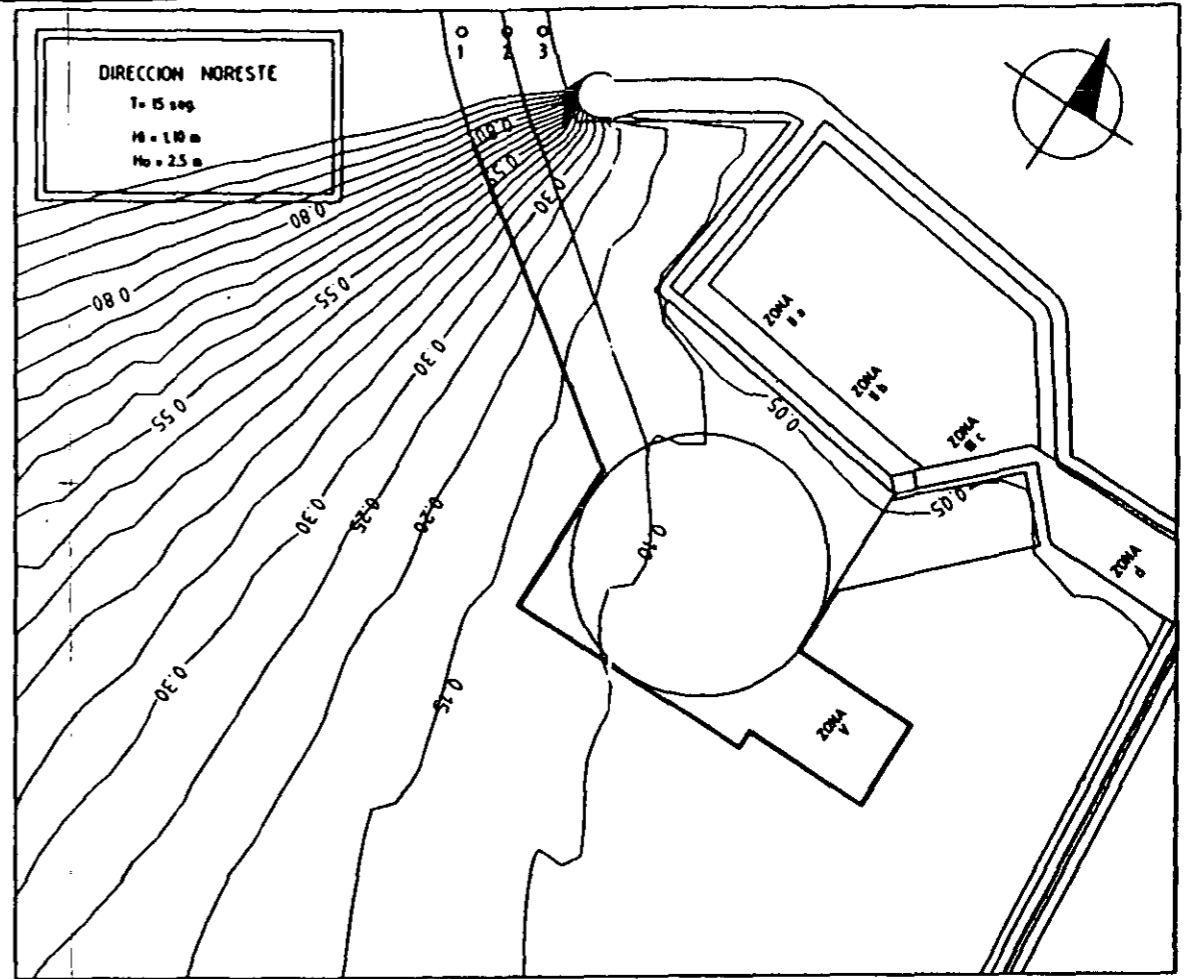
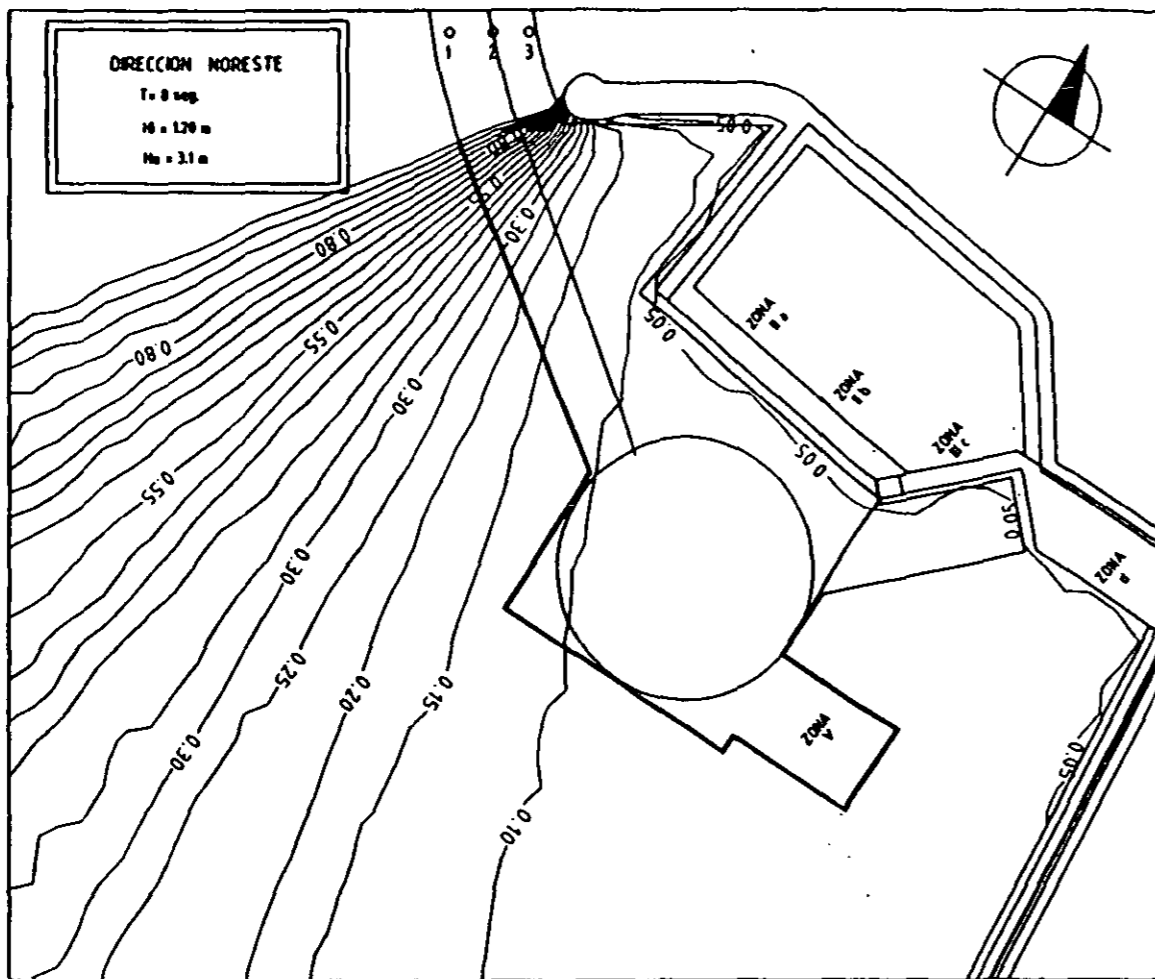
De acuerdo con los puntos anteriores se puede decir que el oleaje del Noroeste con período de 21 seg. provoca la mayor agitación del oleaje dentro del puerto, seguido por las direcciones Norte y Noreste.



NOTAS:

- LAS CURVAS REPRESENTAN VALORES DEL COEFICIENTE DE AGITACION, REFERIDOS AL OLAJE INCIDENTE PROMEDIO H_i, MEDIDO EN LOS PUNTOS 1, 2 Y 3 EN EL MODELO HIDRAULICO DE AGITACION, CONSIDERANDO LOS 3 TALUDES DE DRAGADO ANALIZADOS, 3I, 3II Y VERTICAL.
- EN TODOS LOS ENSAYOS DE AGITACION SE UTILIZO EL NIVEL DE BAJAMAR MEDIA (N.B.M.).

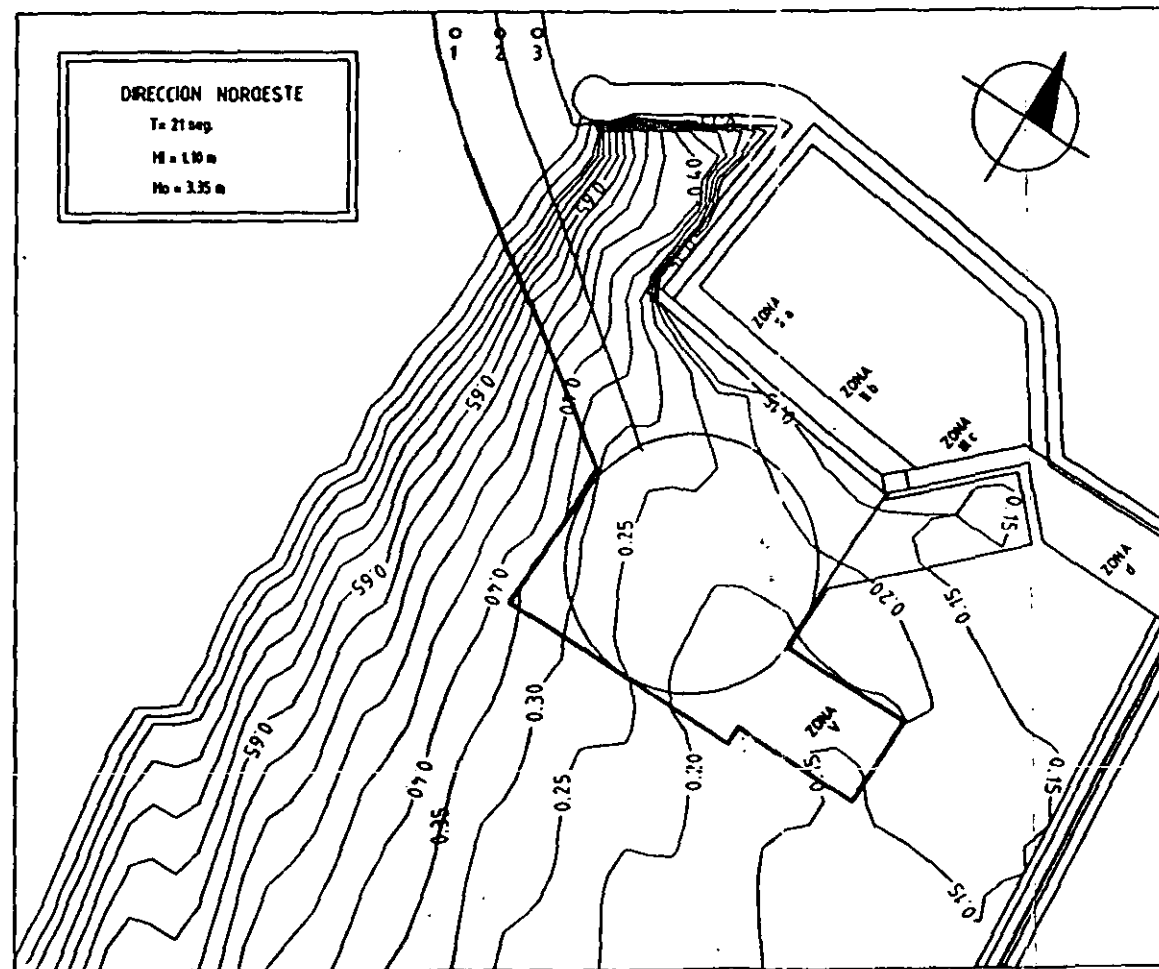
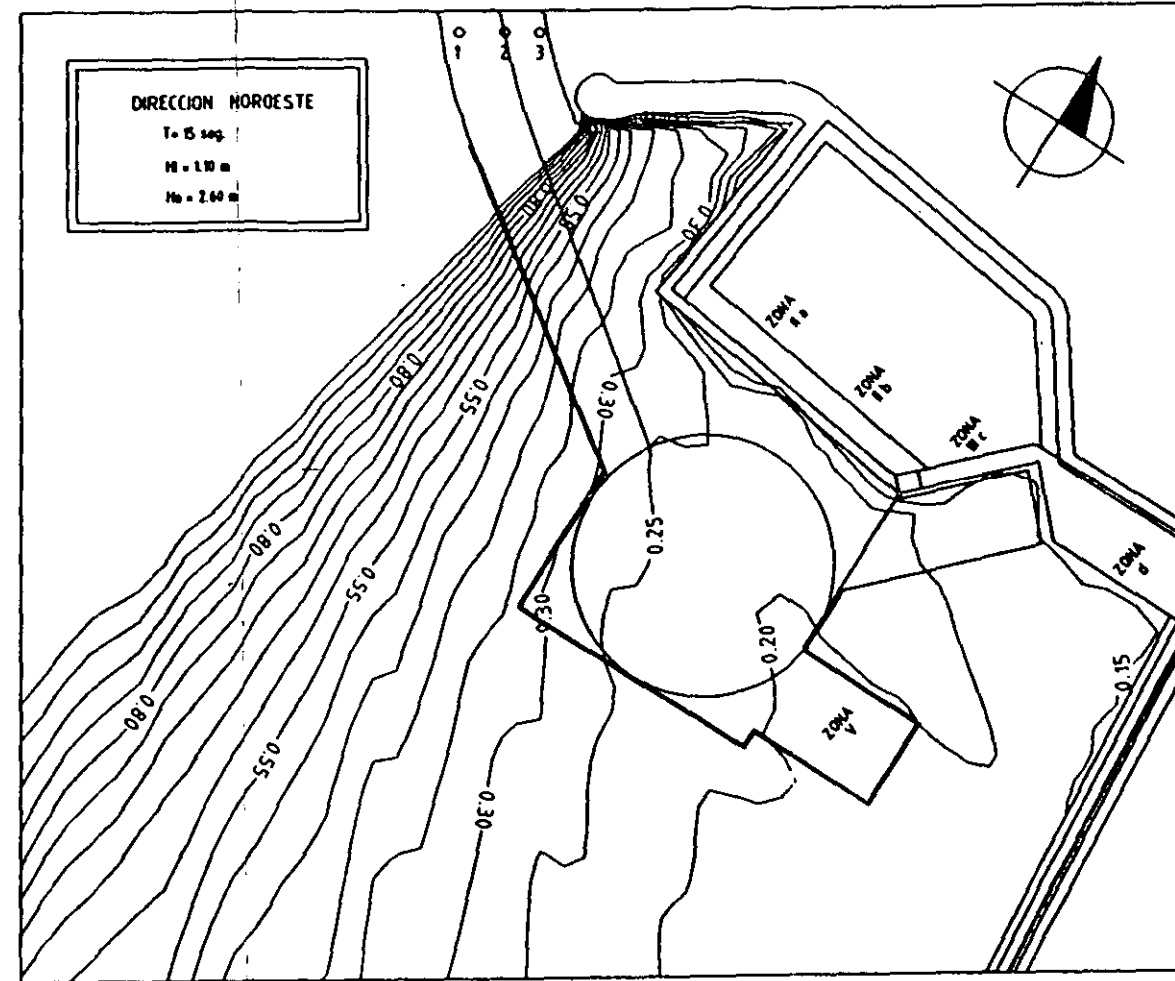
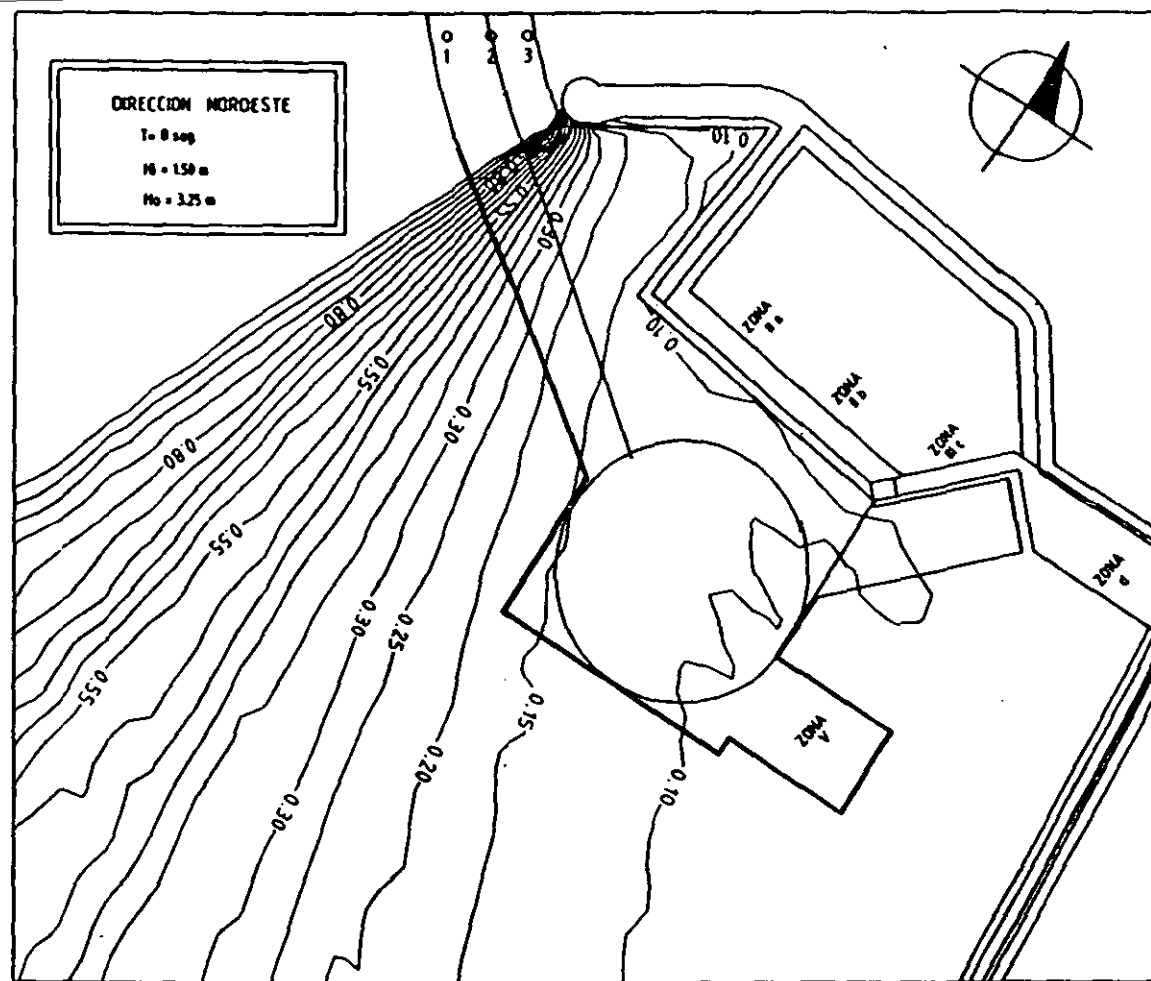
CURVAS DE AGITACION DE OLAJE
 MODELO MATEMATICO
 DIR: NORTE T= 8, 15 Y 21 SEGS.
 MARZO DE 1999 | FIG. No. 6.20



NOTAS:

- LAS CURVAS REPRESENTAN VALORES DEL COEFICIENTE DE AGITACION, REFERIDOS AL OLEAJE INCIDENTE PROMEDIO H_i , MEDIDO EN LOS PUNTOS 1, 2 Y 3 EN EL MODELO HIDRAULICO DE AGITACION, CONSIDERANDO LOS 3 TALUDES DE DRAGADO ANALIZADOS, 3I, 1I Y VERTICAL.
- EN TODOS LOS ENSAYOS DE AGITACION SE UTILIZO EL NIVEL DE BAJAMAR MEDIA (N.B.M.).

CURVAS DE AGITACION DE OLEAJE
 MODELO MATEMATICO
 DIR: NORESTE T= 8, 15 Y 21 SEGS.
 MARZO DE 1999 FIG. No. 6.21



NOTAS:

- LAS CURVAS REPRESENTAN VALORES DEL COEFICIENTE DE AGITACION, REFERIDOS AL OLEAJE INCIDENTE PROMEDIO H_i , MEDIDO EN LOS PUNTOS 1, 2 Y 3 EN EL MODELO HIDRAULICO DE AGITACION, CONSIDERANDO LOS 3 TALUDES DE DRAGADO ANALIZADOS, 3:1, 1:1 Y VERTICAL.
- EN TODOS LOS ENSAYOS DE AGITACION SE UTILIZO EL NIVEL DE BAJAMAR MEDIA (N.B.M.).

CURVAS DE AGITACION DE OLEAJE
 MODELO MATEMATICO
 DIR: NOROESTE T= 8, 15 Y 21 SEGS.
 MARZO DE 1999 | FIG. No. 6.22

PERIODO (seg.)	ZONA	NORTE	NORESTE	NOROESTE
		K_D	K_D	K_D
8.00	Cruceros (Zona II(a) en fig. 6.20)	0.10	0.05	0.10
	Contenedores(Zona II(b) en fig. 6.20)	0.05	0.05	0.10
	Cruceros (Zona III(c) en fig. 6.20)	0.05	0.05	0.10
	Graneleros (Zona (d) en fig. 6.20)	0.05	0.05	0.10
	Petroleros (Zona V en fig. 6.20)	0.15	0.07	0.10
15.00	Cruceros (Zona II(a) en fig. 6.20)	0.15	0.05	0.15
	Contenedores(Zona II(b) en fig. 6.20)	0.15	0.05	0.15
	Cruceros (Zona III(c) en fig. 6.20)	0.15	0.05	0.15
	Graneleros (Zona (d) en fig. 6.20)	0.15	0.05	0.15
	Petroleros (Zona V en fig. 6.20)	0.20	0.07	0.20
21.00	Cruceros (Zona II(a) en fig. 6.20)	0.10	0.10	0.15
	Contenedores(Zona II(b) en fig. 6.20)	0.10	0.10	0.15
	Cruceros (Zona III(c) en fig. 6.20)	0.10	0.10	0.15
	Graneleros (Zona (d) en fig. 6.20)	0.10	0.10	0.15
	Petroleros (Zona V en fig. 6.20)	0.20	0.12	0.17

Tabla 6.3 Coeficientes de agitación en las zonas de atraque del puerto, obtenidos mediante la aplicación del modelo numérico de agitación de oleaje.

7. ESTUDIOS EXPERIMENTALES

7.1. Modelo hidráulico de agitación de oleaje

Para llevar a cabo la verificación de los arreglos en planta desde el punto de vista de agitación de oleaje, con objeto de reunir los elementos necesarios para optimizar el diseño del proyecto de ampliación de la terminal de transbordadores, se proyectó y construyó un modelo hidráulico de fondo fijo, en el cual se reproducirían y observarían las condiciones de propagación de oleaje normal en el puerto.

7.1.1. Ley de semejanza empleada y escala del modelo hidráulico

Para llevar a cabo el estudio en modelo físico, se aseguró cumplir las condiciones de semejanza o similitud que rigen en los estudios

PERIODO (seg.)	ZONA	NORTE	NORESTE	NOROESTE
		K_D	K_D	K_D
8.00	Cruceros (Zona II(a) en fig. 6.20)	0.10	0.05	0.10
	Contenedores(Zona II(b) en fig. 6.20)	0.05	0.05	0.10
	Cruceros (Zona III(c) en fig. 6.20)	0.05	0.05	0.10
	Graneleros (Zona (d) en fig. 6.20)	0.05	0.05	0.10
	Petroleros (Zona V en fig. 6.20)	0.15	0.07	0.10
15.00	Cruceros (Zona II(a) en fig. 6.20)	0.15	0.05	0.15
	Contenedores(Zona II(b) en fig. 6.20)	0.15	0.05	0.15
	Cruceros (Zona III(c) en fig. 6.20)	0.15	0.05	0.15
	Graneleros (Zona (d) en fig. 6.20)	0.15	0.05	0.15
	Petroleros (Zona V en fig. 6.20)	0.20	0.07	0.20
21.00	Cruceros (Zona II(a) en fig. 6.20)	0.10	0.10	0.15
	Contenedores(Zona II(b) en fig. 6.20)	0.10	0.10	0.15
	Cruceros (Zona III(c) en fig. 6.20)	0.10	0.10	0.15
	Graneleros (Zona (d) en fig. 6.20)	0.10	0.10	0.15
	Petroleros (Zona V en fig. 6.20)	0.20	0.12	0.17

Tabla 6.3 Coeficientes de agitación en las zonas de atraque del puerto, obtenidos mediante la aplicación del modelo numérico de agitación de oleaje.

7. ESTUDIOS EXPERIMENTALES

7.1. Modelo hidráulico de agitación de oleaje

Para llevar a cabo la verificación de los arreglos en planta desde el punto de vista de agitación de oleaje, con objeto de reunir los elementos necesarios para optimizar el diseño del proyecto de ampliación de la terminal de transbordadores, se proyectó y construyó un modelo hidráulico de fondo fijo, en el cual se reproducirían y observarían las condiciones de propagación de oleaje normal en el puerto.

7.1.1. Ley de semejanza empleada y escala del modelo hidráulico

Para llevar a cabo el estudio en modelo físico, se aseguró cumplir las condiciones de semejanza o similitud que rigen en los estudios

experimentales, como son la semejanza geométrica, la cinemática y la dinámica.

La semejanza geométrica es la semejanza de forma y por lo tanto es necesario que las relaciones de todas las dimensiones lineales homólogas entre modelo y prototipo sean iguales. La semejanza cinemática es la semejanza de movimiento, por lo que hay que tomar en cuenta una magnitud vectorial y el factor tiempo, esto implica que las trayectorias y velocidades de las partículas móviles homólogas sean iguales. La semejanza dinámica se alcanza cuando existe semejanza de masas y fuerzas.

En el presente estudio se consideraron como fuerzas predominantes las fuerzas de gravedad (F_g) e inercia. (F_i) por lo que se tendrá:

$$F_i = F_g$$

Al tenerse que verificar la igualdad entre la razón de las fuerzas entre el modelo y el prototipo, se tendrá:

$$\frac{F_{im}}{F_{ip}} = \frac{F_{gm}}{F_{gp}}$$

Expresando las fuerzas anteriores en términos de sus equivalentes físicos, se tendrá:

$$F_i = \text{masa} \times \text{aceleración} = (\rho L^3) \left(\frac{V^2}{L} \right) = \rho L^2 V^2$$

$$F_g = \text{masa} \times \text{aceleración de la gravedad} = \rho L^3 g$$

Por lo que sustituyendo los valores anteriores en la segunda ecuación queda:

$$\frac{(\rho L^2 V^2)_m}{(\rho L^2 V^2)_p} = \frac{(\rho L^3 g)_m}{(\rho L^3 g)_p}$$

$$\left(\frac{\rho L^2 V^2}{L^3 g} \right)_p = \left(\frac{\rho L^2 V^2}{\rho L^3 g} \right)_m$$

$$\left(\frac{V^2}{g L} \right)_m = \left(\frac{V^2}{g L} \right)_p$$

Indicando los subíndices "m" y "p" en las ecuaciones anteriores modelo y prototipo respectivamente, y representando con el subíndice "r" la razón entre las magnitudes del modelo y prototipo, se tendrá:

$$\frac{V_r}{(g_r L_r)^{1/2}} = 1$$

La igualdad anterior indica que la cantidad adimensional $V/(gL)^{1/2}$, llamada número de Froude, debe ser igual en modelo y prototipo.

La selección de la escala del modelo se determinó en función de la magnitud de las olas a representar en el modelo, las características de los equipos de generación y mediación de oleaje y el espacio disponible en el laboratorio para la construcción del modelo. De acuerdo con lo anterior, se seleccionó una escala de líneas de 1/175.

De acuerdo con la escala seleccionada y tomando en cuenta la Ley de semejanza expresada mediante el número de Froude, se determinaron las distintas escalas a considerar en el modelo de la siguiente manera:

$$\frac{V_r}{(g_r L_r)^{1/2}} = 1$$

Considerando que $g_p = g_m$ se tiene que $g_1 = 1$, por lo tanto resulta la siguiente relación para la velocidad:

$$V_r = L_r^{1/2}$$

Siendo L_r la escala geométrica seleccionada.

De acuerdo con lo anterior, se tendrán las siguientes relaciones entre modelo y prototipo:

$$\text{Longitud: } L_m = L_p (1/175)$$

$$\text{Tiempo } T_m = T_p (1/\sqrt{175})$$

$$\text{Velocidad; } V_m = V_p (1/\sqrt{175})$$

Con objeto de revisar que no existiera una intervención exagerada de la tensión superficial para evitar el efecto de escala en el modelo por el valor de la escala seleccionada de 1/175, fue necesario calcular las celeridades de la ola con influencia y sin influencia de dicho fenómeno, utilizando las siguientes expresiones.

$$C_s = \sqrt{\frac{g L}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L}}$$

$$C_c = \sqrt{\left(\frac{g L}{2\pi} + \frac{2\pi \sigma}{\rho L} \right) \tanh \frac{2\pi d}{L}}$$

Siendo:

- C_s = Celeridad de la ola sin influencia de la tensión superficial, en m/seg.
- C_c = Celeridad de la ola con influencia de la tensión superficial, en m/seg.
- g = Aceleración de la gravedad = 9.81 m/seg²
- d = Profundidad de agua, en m
- l = Longitud de la ola en la profundidad "d", en m
- σ = Tensión superficial = 0.00739 kg/m a 20° C
- ρ = Densidad del agua = 101.94 Kg-seg²/m⁴

Aceptando que la influencia de la tensión superficial sería despreciable si la variación entre las celeridades de ola no excedía del uno por ciento, es decir $C_c/C_s \leq 1.01$, aplicando las expresiones anteriores para el cálculo de las celeridades se obtuvieron los siguientes resultados, considerando que la profundidad mínima a representar en el modelo sería de 8.00 m.

L(m)	C_s (m/s)	C_c (m/s)	C_c/C_s
0.05	0.279398	0.295251	1.056738
0.10	0.393868	0.399573	1.014482
0.15	0.473527	0.476587	1.006462
0.20	0.528009	0.529931	1.003640
0.25	0.564802	0.566118	1.002331

Como se puede observar de los cálculos anteriores, longitudes de onda menores de 15 cm tienen una influencia mayor del 1%, esto indica que en el modelo no deberán generarse olas con períodos menores de: $T = L/C = 0.1/0.39 = 0.25$ seg., que de acuerdo con la escala de tiempos, representa en prototipo un período de 3.3 seg.

De acuerdo con los datos de oleaje para el sitio que se indican en el inciso 4.1, se tiene que el período mínimo es de 5 seg., sin embargo para realizar el estudio de agitación se decidió utilizar un período mínimo de 8 seg., por lo tanto se concluyó que en las mediciones a realizar en el modelo no se tendría influencia de la tensión superficial.

7.1.2. Proyecto del modelo hidráulico

Habiéndose determinado las relaciones que ligan al prototipo con el modelo, se procedió como siguiente paso al proyecto del modelo, para lo cual se tomó en cuenta los límites del prototipo a representar en el modelo. En base a lo anterior el modelo se proyectó sobre un tanque de olas ya existente, con dimensiones de 23.85 m de ancho, 28.74 m de largo y 0.70 m de profundidad,

el cual únicamente se acondicionó de acuerdo con los límites y niveles indicados en el plano de proyecto respectivo.

7.1.3. Construcción del modelo hidráulico

La construcción del modelo hidráulico se realizó de acuerdo con el plano de proyecto mencionado en el inciso anterior, siguiendo con el orden siguiente:

- a) Demolición de la losa de configuración del fondo marino de un antiguo modelo existente en el tanque de olas y remoción del cascajo y relleno, retirando del tanque de olas el cascajo y reacomodando la arena en las zonas de relleno del nuevo modelo.
- b) Impermeabilización del fondo y paredes laterales interiores del tanque de olas, con objeto de evitar filtraciones del agua a utilizar en los ensayos.
- c) Compactación del relleno de arena y trazo de la configuración batimétrica a representar en el modelo, utilizando un sistema de coordenadas arbitrarias trazada previamente en el modelo.
- d) Nivelación de las curvas batimétricas con el nivel montado y estatal, para lo cual se colocaron a lo largo de cada curva batimétrica, tramos de varillas a cada 50 cm, los cuales se nivelaron con una precisión de ± 1.00 mm, fijándolos una vez nivelados, con mortero cemento arena para evitar fueran movidos.
- e) Unión de las varillas niveladas y fijadas con un cordón de mortero cemento-arena, para simular la curva batimétrica.
- f) Colado de losa de configuración, el cual se realizó colando entre cada curva batimétrica una losa de concreto simple de $f'c = 150$ Kg/cm² de aproximadamente 4 cm de espesor.
- g) Una vez terminada la construcción de la losa de configuración, se construyeron los taludes del canal de acceso y dársenas, así como el talud de transición entre la losa de configuración y el generador de olas.

h) Terminado el colado del talud de transición, se procedió a pintar las zonas de batimetría, canal de acceso y dársenas, así como a la construcción del rompeolas de protección y colocación de ortogonales para el inicio de los ensayos.

7.1.4. Operación del modelo hidráulico

7.1.4.1. Programa de ensayos

Para la operación del modelo hidráulico se planteó el programa de ensayos que se muestra en la tabla 7.1.

Tabla 7.1

PROGRAMA Y CONDICIONES DE LOS ENSAYOS

TALUD DE DRAGADO	ARREGLO DEL PUERTO	DIRECCIÓN DEL OLEAJE	PERIODO DEL OLEAJE	NIVEL DEL MAR
		N	8,15 Y 21 seg.	N.B.M.
3:1	FIG. 7.1 (a)	NE	8,15 Y 21 seg.	N.B.M.
		NW	8,15 Y 21 seg.	N.B.M.
		N	8,15 Y 21 seg.	N.B.M.
1:1	FIG.7.1 (b)	NE	8,15 Y 21 seg.	N.B.M.
		NW	8,15 Y 21 seg.	N.B.M.
		N	8,15 Y 21 seg.	N.B.M.
VERTICAL	FIG. 7.1 (c)	NE	8,15 Y 21 seg.	N.B.M.
		NW	8,15 Y 21 seg.	N.B.M.

7.1.4.2. Condiciones y procedimiento de los ensayos

Antes de iniciar los ensayos, fue necesario calibrar el equipo de medición y el modelo, con objeto de garantizar la adecuada medición y representación del oleaje durante el estudio.

La calibración del equipo de medición consistió básicamente en obtener para cada centímetro de desplazamiento dentro del agua del sensor utilizado en los

ensayos. una variación de voltaje correspondiente, la cual debería ser constante para cada desplazamiento hacia arriba y hacia abajo.

La calibración del modelo consistió en obtener el patrón de refracción del oleaje del prototipo en el modelo para los periodos de ola de 8, 15 y 21 seg. para cada dirección de oleaje a representar en el modelo, utilizando para tal fin los resultados de la refracción mencionados en el inciso 6.1.

Una vez calibrado el modelo, se procedió a realizar los ensayos de agitación de oleaje bajo las siguientes condiciones y procedimiento:

A) Condiciones de los ensayos

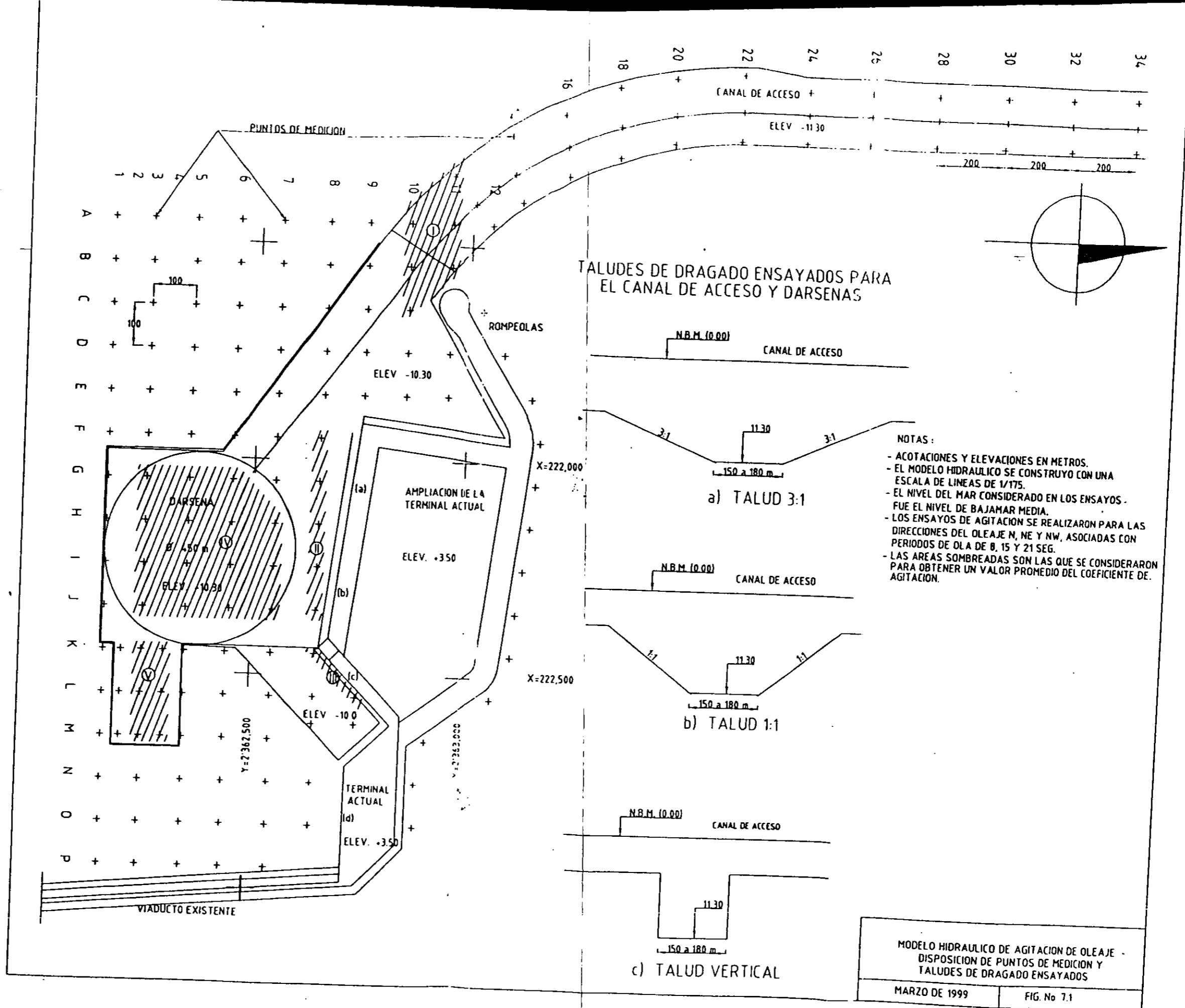
Todos los ensayos se realizaron bajo las siguientes condiciones:

- Se utilizó el espectro frecuencial de Bretschneider-Mitsuyasu para la generación del oleaje irregular a utilizar en cada ensayo.
- Se utilizó el Nivel de Bajamar Media para cada ensayo. con elevación 0.00 m.

B) Procedimiento

El procedimiento seguido en cada ensayo fue el siguiente:

- Al inicio de cada ensayo primeramente se medía la altura del oleaje a -9.00 m de profundidad.
- Enseguida se procedió a medir la altura del oleaje en 166 puntos situados convenientemente en el canal de acceso, zonas protegidas por el rompeolas de protección, y frente a los bordos y rompeolas de protección, los cuales se muestran en la Fig. 7.1.



7.1.4.3. Presentación de la información experimental

Para poder analizar la información proporcionada por el modelo hidráulico, en cuanto al comportamiento del oleaje en el canal de acceso y zonas protegidas por el rompeolas, se calcularon primeramente las alturas de ola puntuales del modelo, enseguida se relacionó la altura de ola media a -9.00 m con su correspondiente altura de ola en aguas profundas mediante el coeficiente de refracción obtenido con el análisis de refracción de oleaje mencionado en el inciso 6.1. Posteriormente se relacionó cada altura de ola medida en el modelo con la altura de aguas profundas, con objeto de obtener un coeficiente de disminución de altura de ola, denominado K_D y obtenido con la siguiente expresión:

$$K_D = H/H_0$$

Siendo:

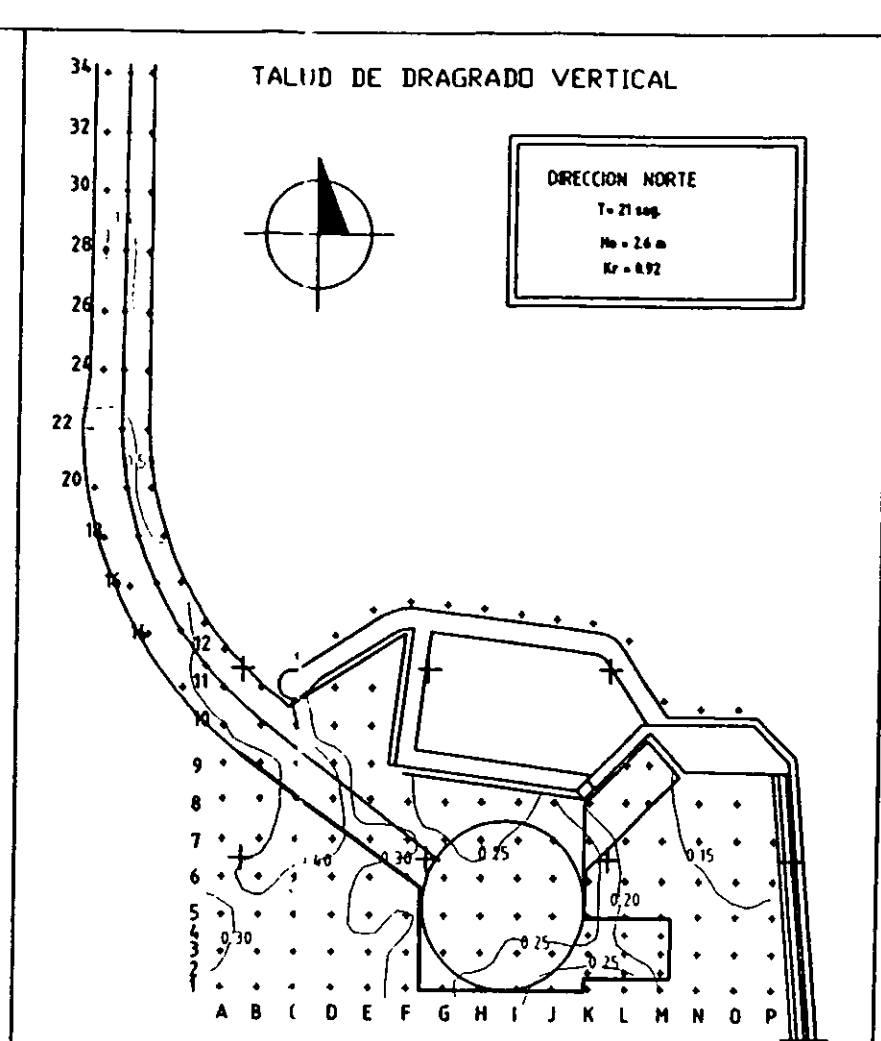
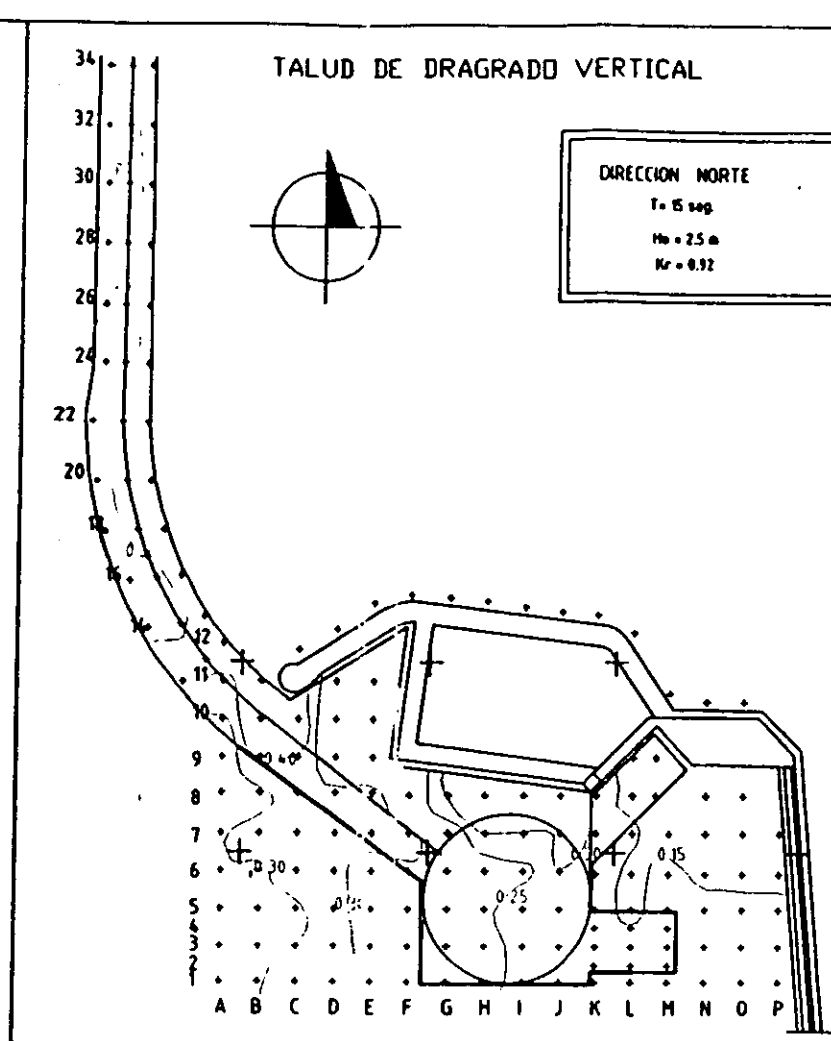
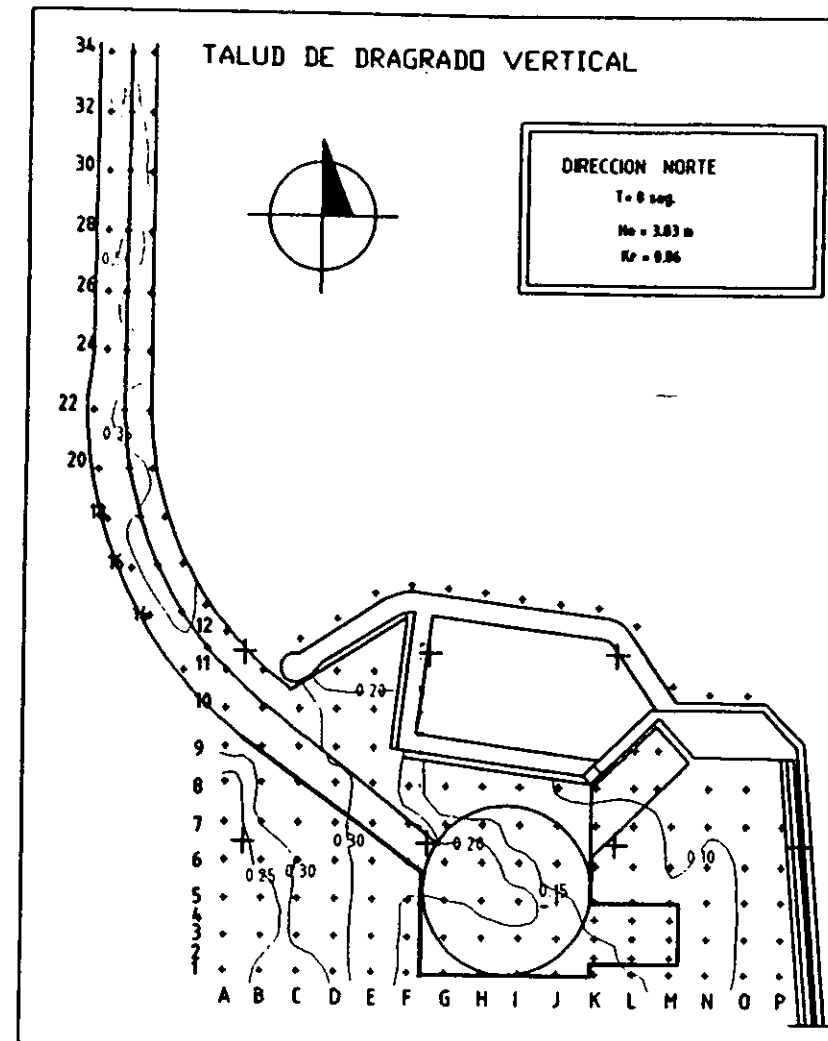
- K_D = Coeficiente adimensional de disminución de altura de ola
- H = Altura de ola en cada punto de medición en m.
- H_0 = Altura de ola en aguas profundas en m.

Con los valores del coeficiente adimensional K_D determinado en cada punto del modelo, se trazaron las curvas de agitación que se muestran en las Figs. 7.2 a 7.10.

7.1.4.4. Resultados de los ensayos

Con objeto de poder hacer un análisis general del comportamiento del diseño original del puerto con respecto a la penetración del oleaje, considerando las 3 alternativas de dragado para el canal de acceso y dársenas del puerto, se eligieron las áreas indicadas en la Fig. 7.1 como representativas del área protegida del puerto, calculándose en cada una de las áreas anteriores el coeficiente de agitación promedio, dando los resultados que se muestran en la tabla 7.2.

De acuerdo con el análisis de la tabla anterior, se tienen los siguientes resultados:



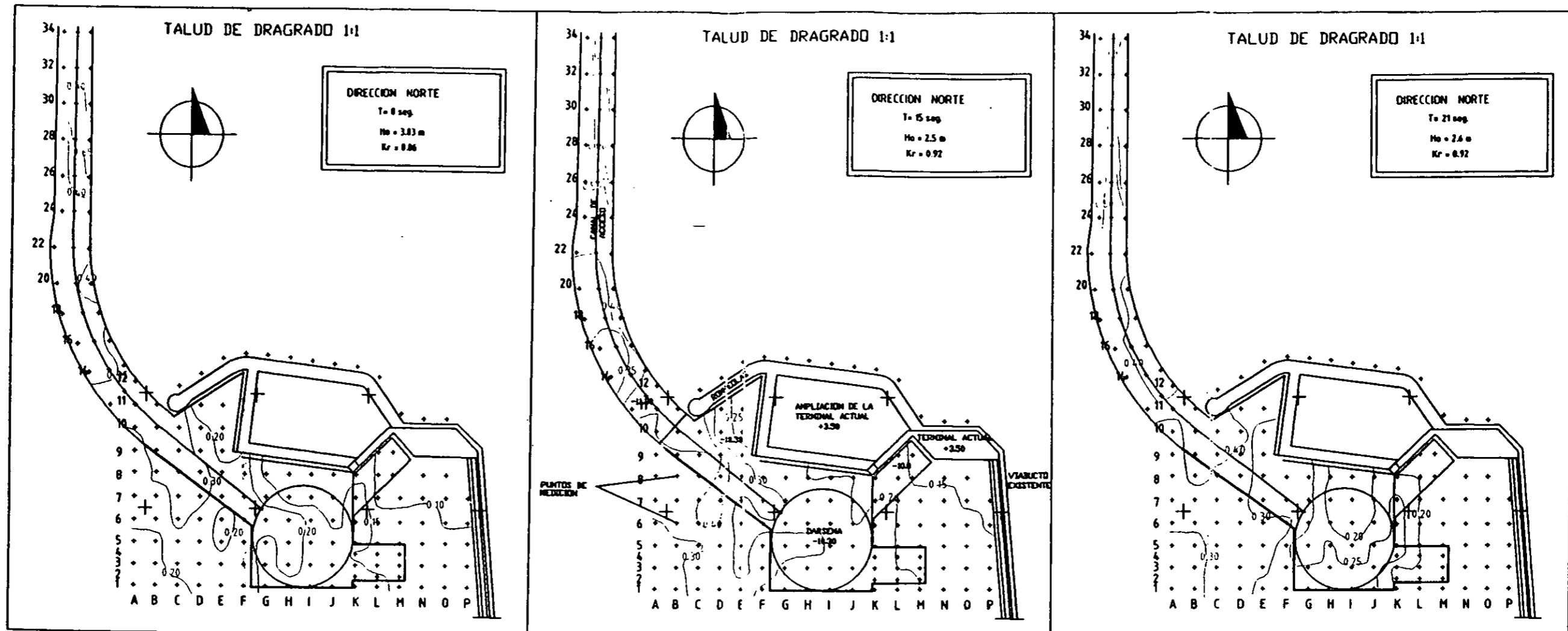
ESCALA GRAFICA



NOTAS:

- LAS CURVAS REPRESENTAN VALORES DEL COEFICIENTE DE AGITACION, REFERIDOS AL OLEAJE DE AGUAS PROFUNDAS.
- EN TODOS LOS ENSAYOS DE AGITACION SE UTILIZO EL NIVEL DE BAJA MAR MEDIA (N.B.M.).
- LAS ELEVACIONES ESTAN EN METROS REFERIDAS AL N.B.M.
- LA ESCALA DE LINEAS DEL MODELO FUE 1/175

CURVAS DE AGITACION DE OLEAJE
 PARA LA DIRECCION NORTE Y TALUD
 DE DRAGRADO VERTICAL
 MARZO DE 1999 FIG. No. 7.2



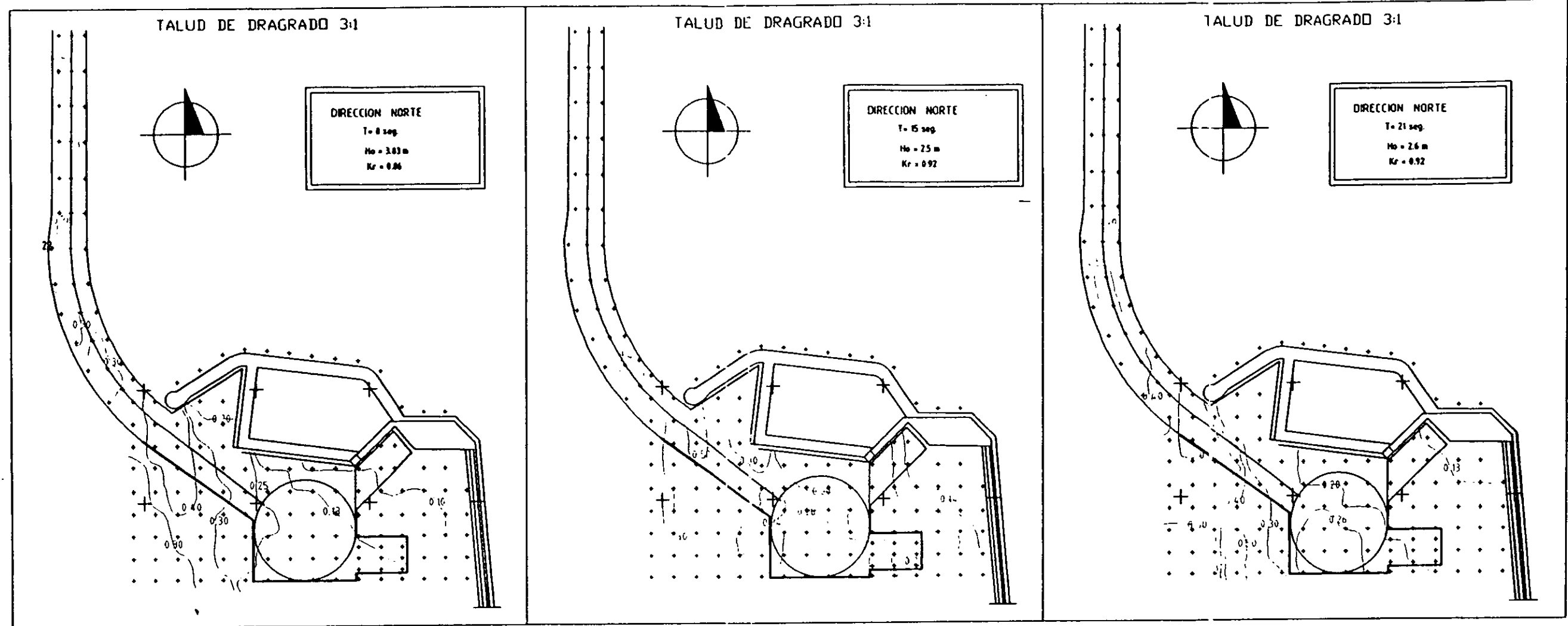
ESCALA GRAFICA



NOTAS:

- LAS CURVAS REPRESENTAN VALORES DEL COEFICIENTE DE AGITACION, REFERIDOS AL OLEAJE DE AGUAS PROFUNDAS.
- EN TODOS LOS ENSAYOS DE AGITACION SE UTILIZO EL NIVEL DE BAJAMAR MEDIA (N.B.M.).
- LAS ELEVACIONES ESTAN EN METROS REFERIDAS AL N.B.M.
- LA ESCALA DE LINEAS DEL MODELO FUE 1/175

CURVAS DE AGITACION DE OLEAJE
 PARA LA DIRECCION NORTE Y TALUD
 DE DRAGRADO 1 : 1
 MARZO DE 1999 FIG. No. 7.3



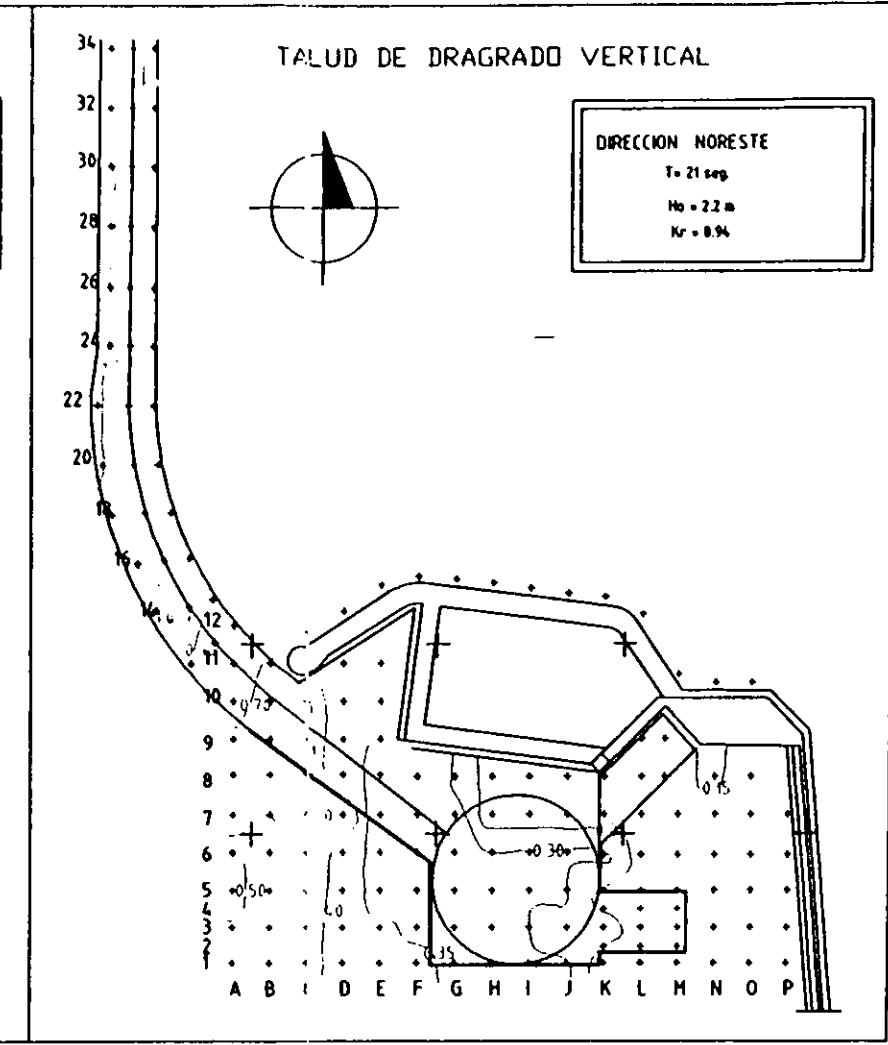
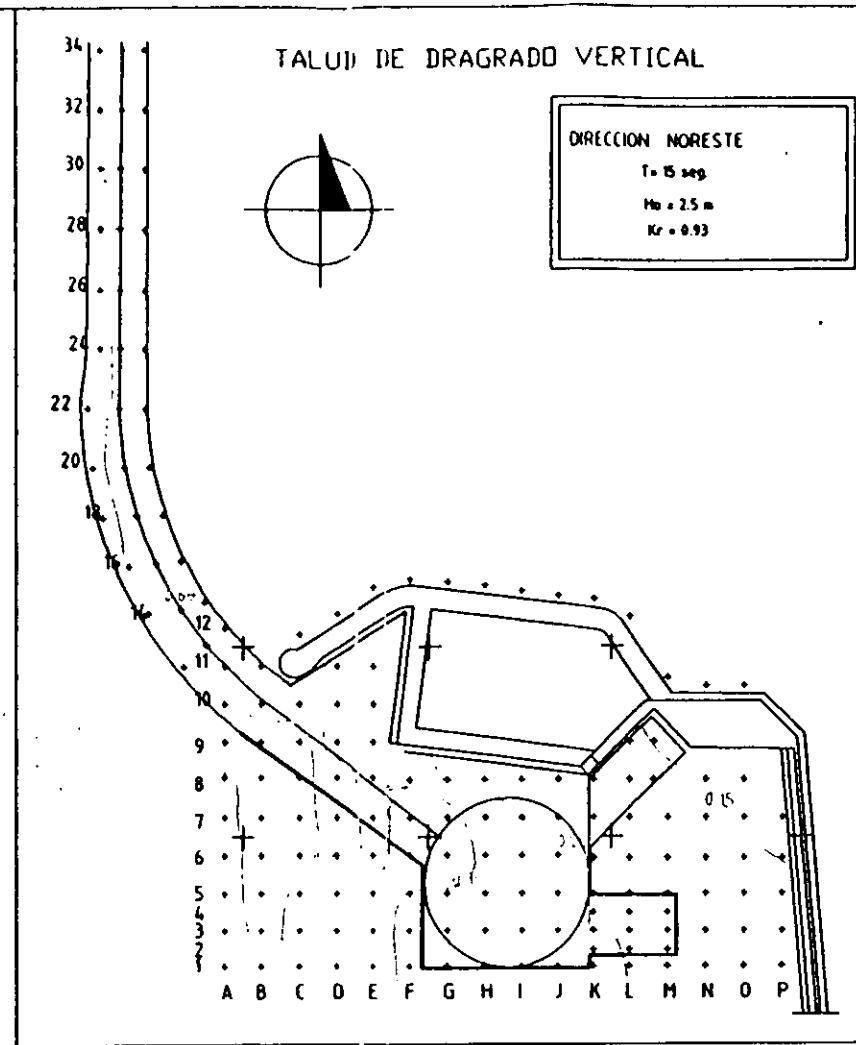
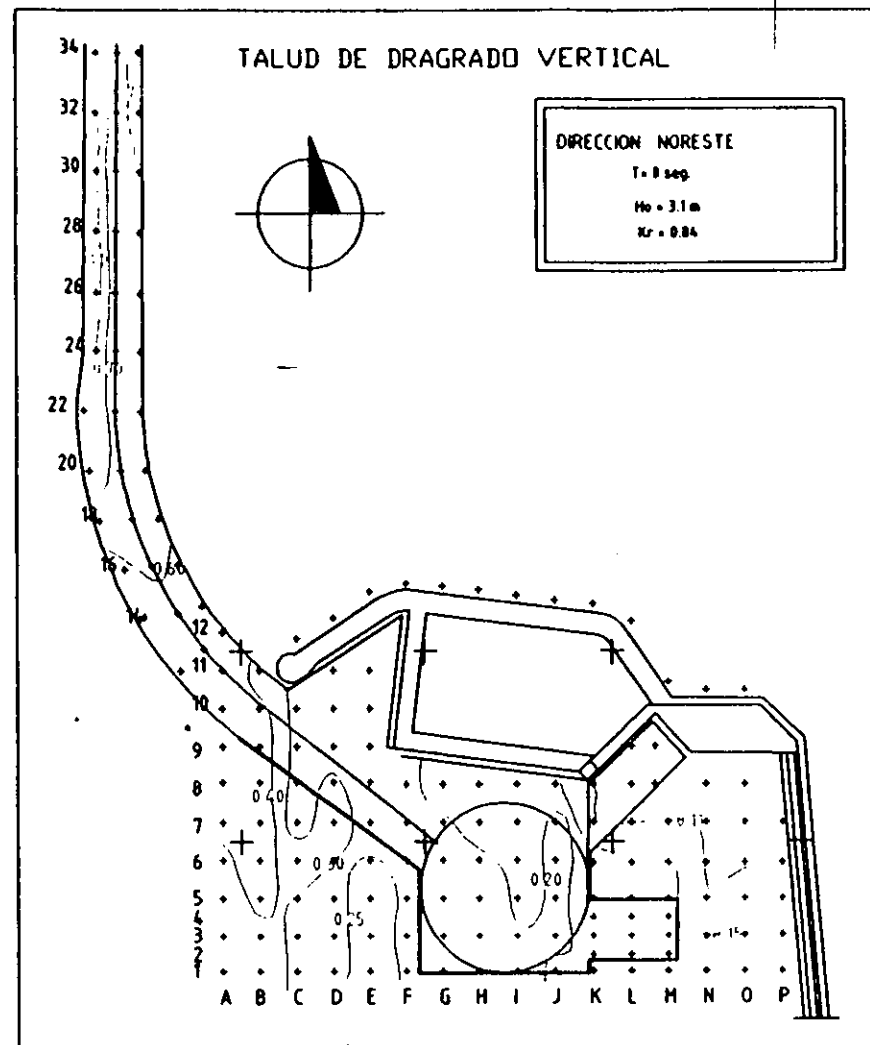
ESCALA GRAFICA



NOTAS:

- LAS CURVAS REPRESENTAN VALORES DEL COEFICIENTE DE AGITACION, REFERIDOS AL OLEAJE DE AGUAS PROFUNDAS.
- EN TODOS LOS ENSAYOS DE AGITACION SE UTILIZO EL NIVEL DE BAJMAR MEDIA (N.B.M.).
- LAS ELEVACIONES ESTAN EN METROS REFERIDAS AL N.B.M.
- LA ESCALA DE LINEAS DEL MODELO FUE 1/175

CURVAS DE AGITACION DE OLEAJE
 PARA LA DIRECCION NORTE Y TALUD
 DE DRAGADO 3 : 1
 MARZO DE 1999 FIG. No. 7.4



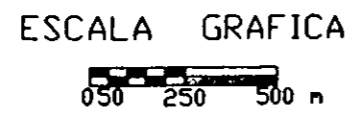
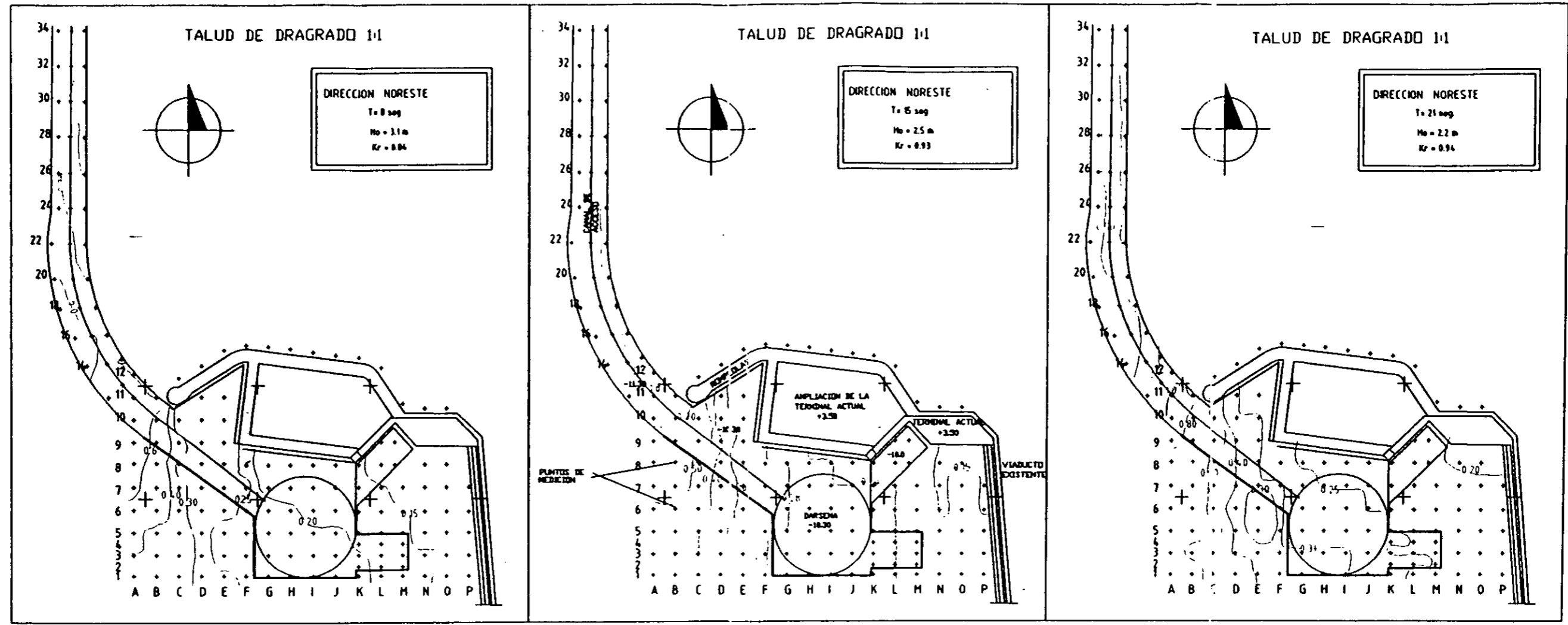
ESCALA GRAFICA



NOTAS:

- LAS CURVAS REPRESENTAN VALORES DEL COEFICIENTE DE AGITACION, REFERIDOS AL OLEAJE DE AGUAS PROFUNDAS.
- EN TODOS LOS ENSAYOS DE AGITACION SE UTILIZO EL NIVEL DE BAJA MAR MEDIA (N.B.M.).
- LAS ELEVACIONES ESTAN EN METROS REFERIDAS AL N.B.M.
- LA ESCALA DE LINEAS DEL MODELO FUE 1/175

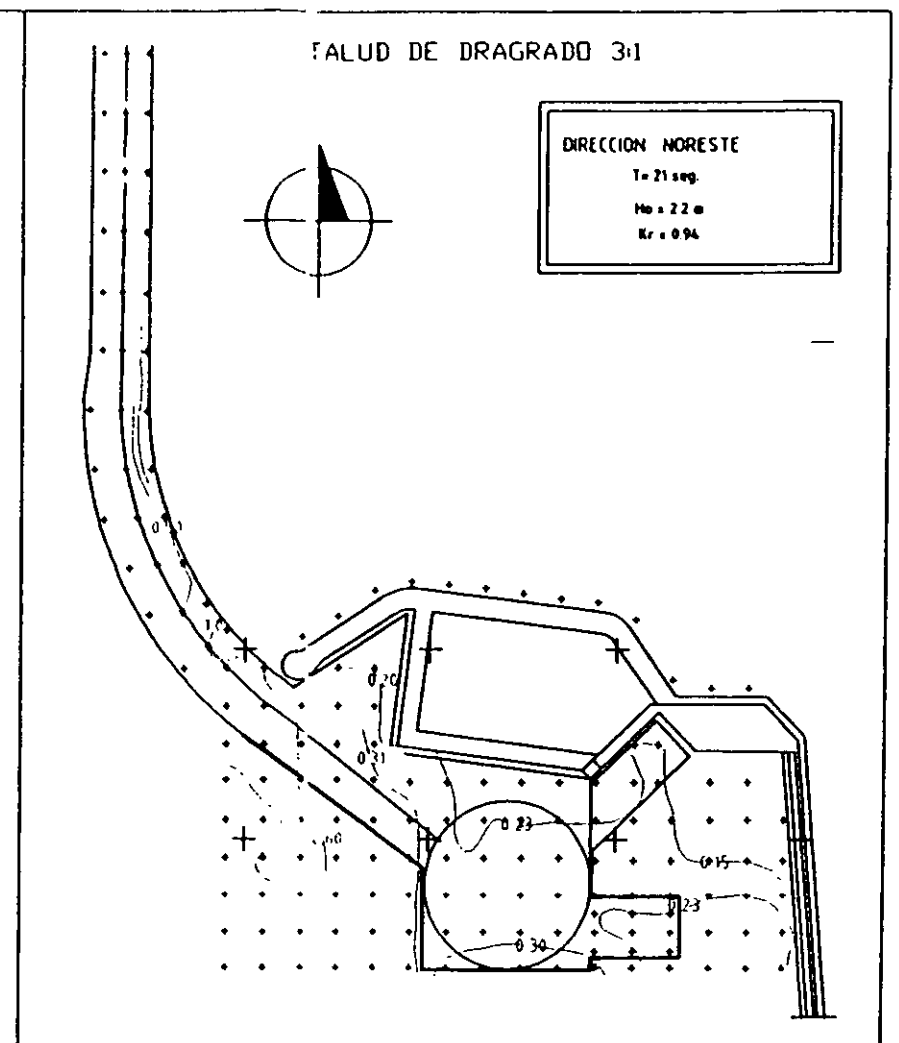
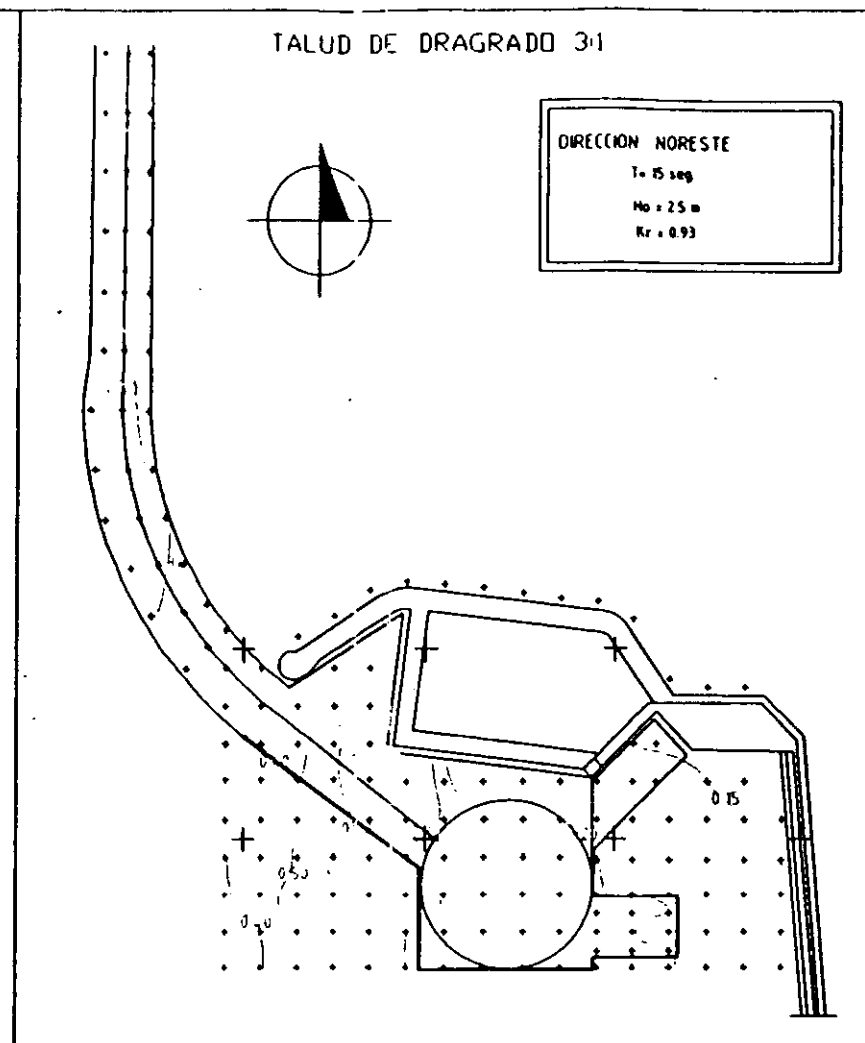
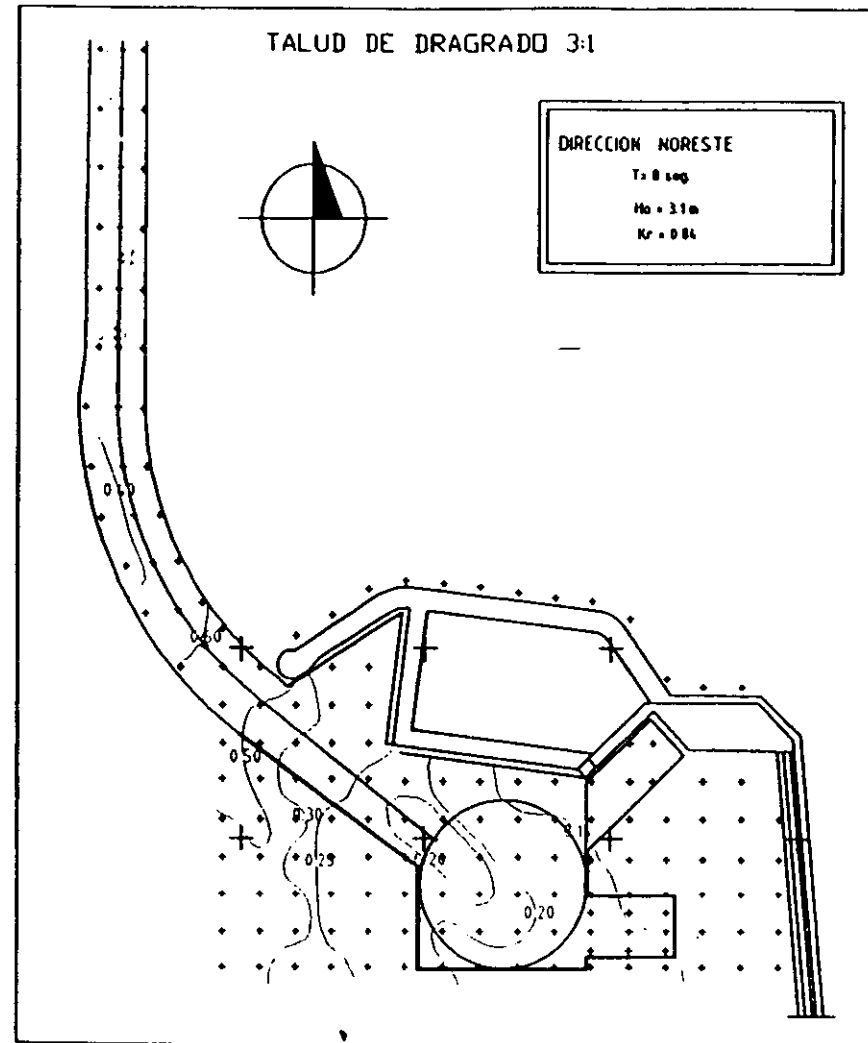
CURVAS DE AGITACION DE OLEAJE
 PARA LA DIRECCION NE Y TALUD
 DE DRAGADO VERTICAL
 MARZO DE 1999 FIG. No. 7.5



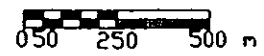
NOTAS:

- LAS CURVAS REPRESENTAN VALORES DEL COEFICIENTE DE AGITACION, REFERIDOS AL OLEAJE DE AGUAS PROFUNDAS.
- EN TODOS LOS ENSAYOS DE AGITACION SE UTILIZO EL NIVEL DE BAJA MAR MEDIA (N.B.M.).
- LAS ELEVACIONES ESTAN EN METROS REFERIDAS AL N.B.M.
- LA ESCALA DE LINEAS DEL MODELO FUE 1/175

CURVAS DE AGITACION DE OLEAJE PARA LA DIRECCION NE Y TALUD DE DRAGRADO 1 : 1
 MARZO DE 1999 FIG. No. 7.6



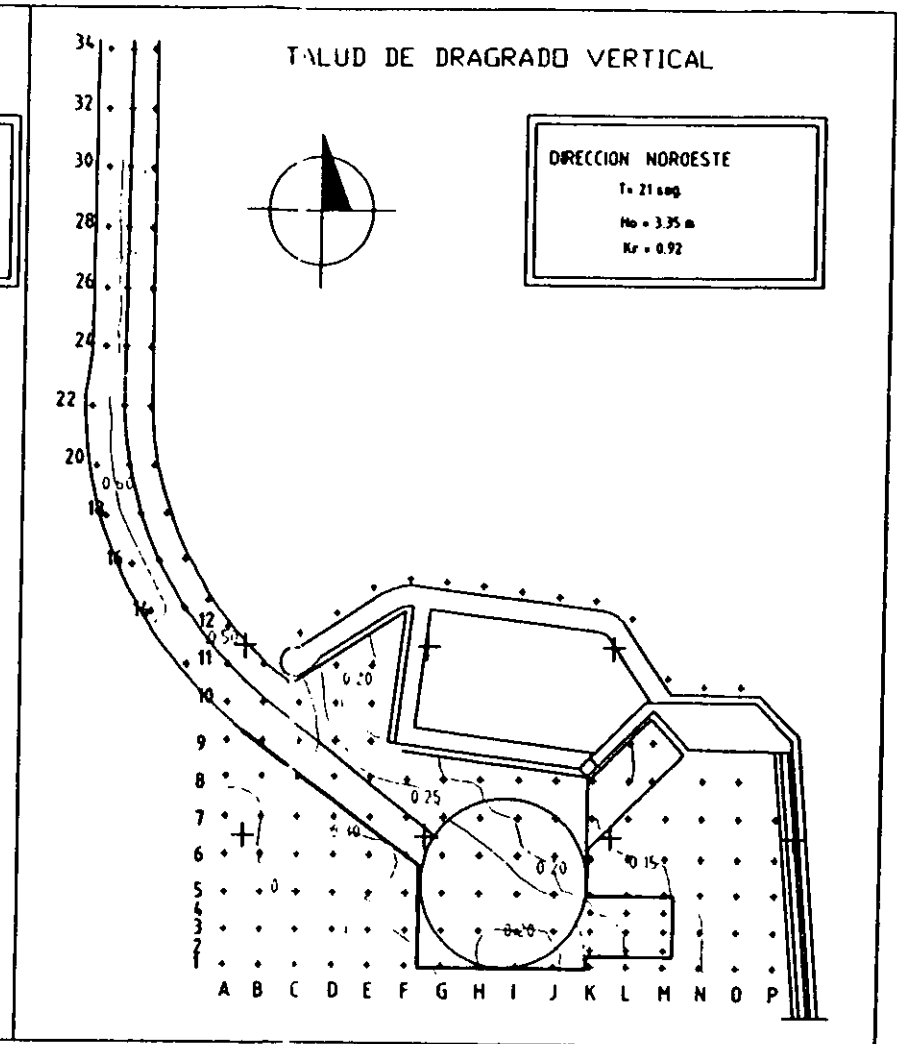
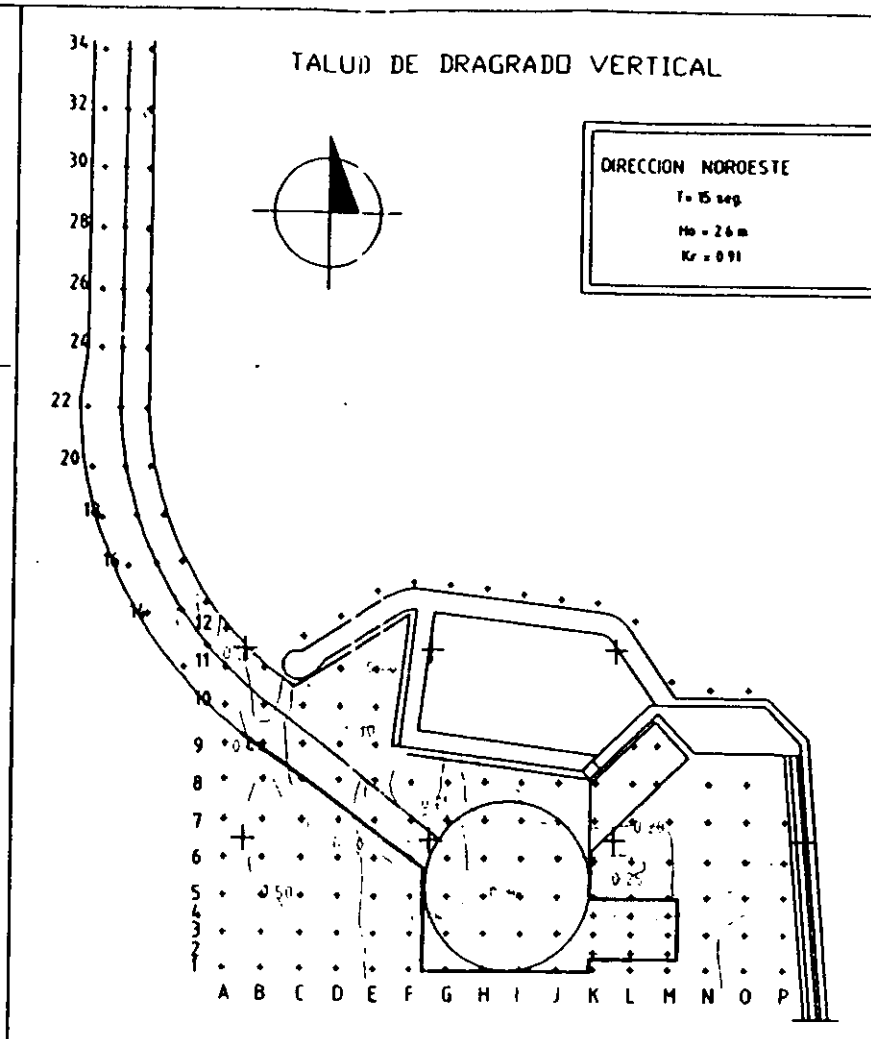
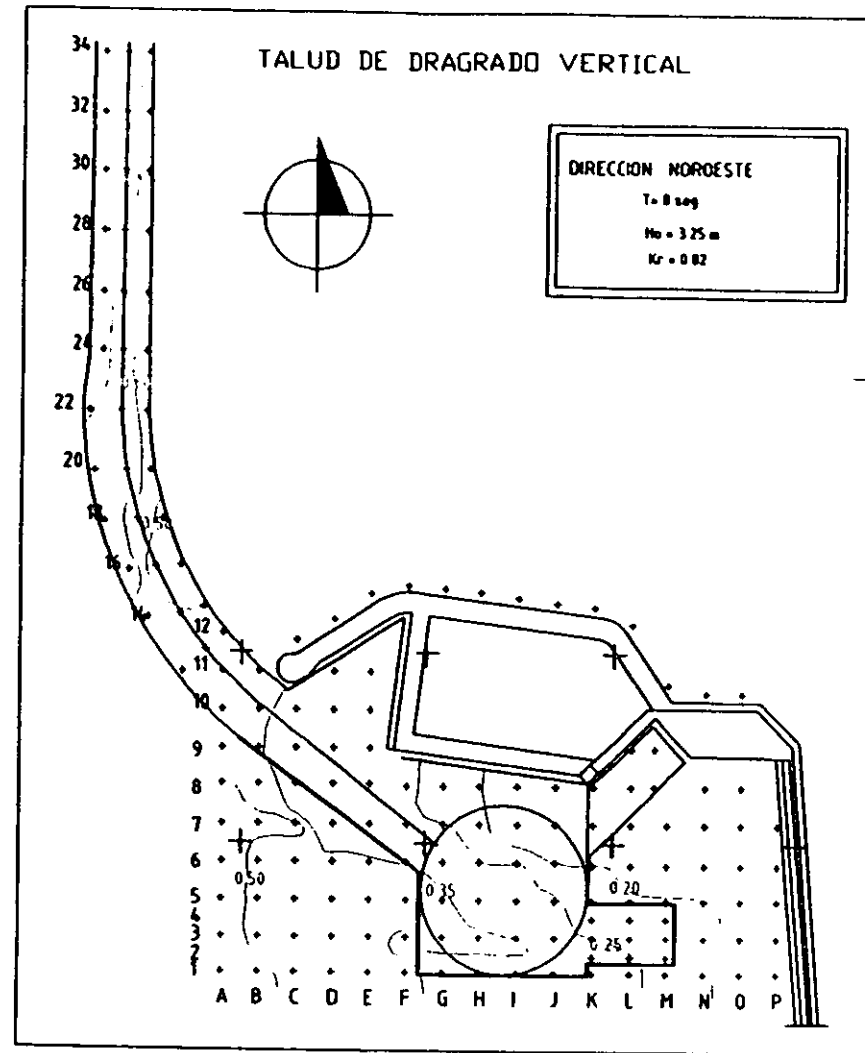
ESCALA GRAFICA



NOTAS:

- LAS CURVAS REPRESENTAN VALORES DEL COEFICIENTE DE AGITACION, REFERIDOS AL DLEAJE DE AGUAS PROFUNDAS.
- EN TODOS LOS ENSAYOS DE AGITACION SE UTILIZO EL NIVEL DE BAJAR MEDIA (N.B.M.).
- LAS ELEVACIONES ESTAN EN METROS REFERIDAS AL N.B.M.
- LA ESCALA DE LINEAS DEL MODELO FUE 1/175

CURVAS DE AGITACION DE DLEAJE
 PARA LA DIRECCION NE Y TALUD
 DE DRAGRADO 3 : 1
 MARZO DE 1999 FIG. No. 7.7



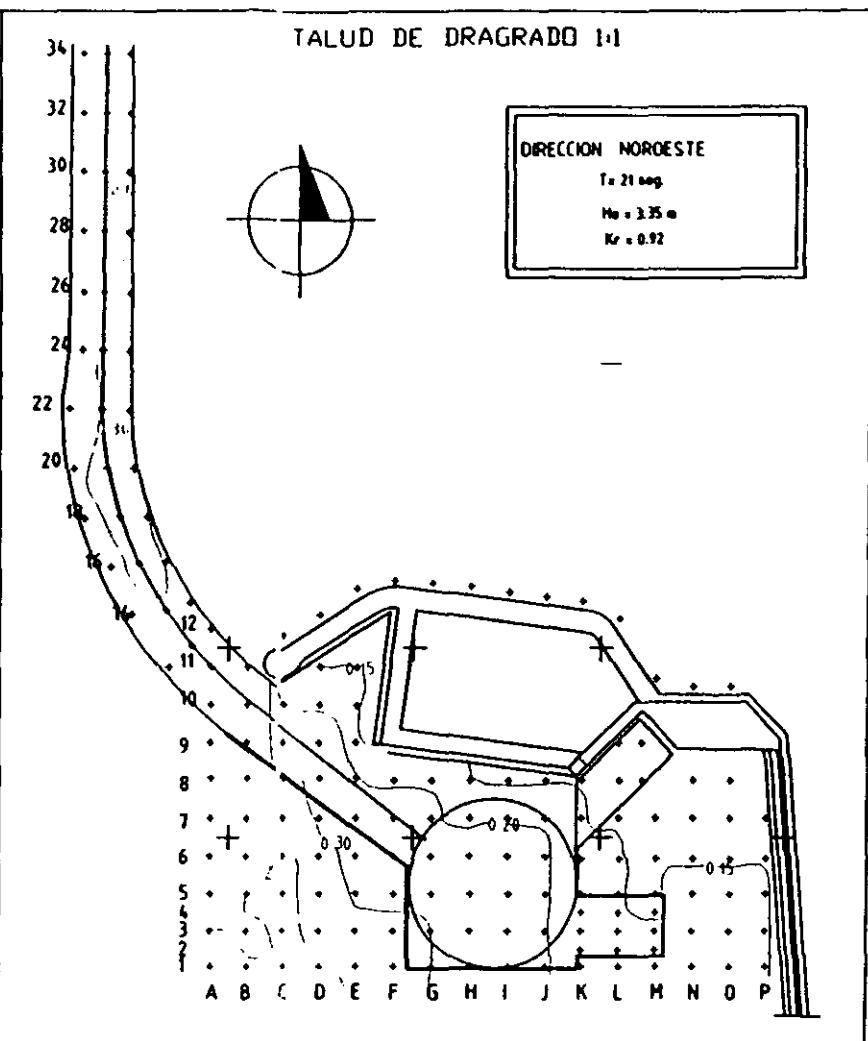
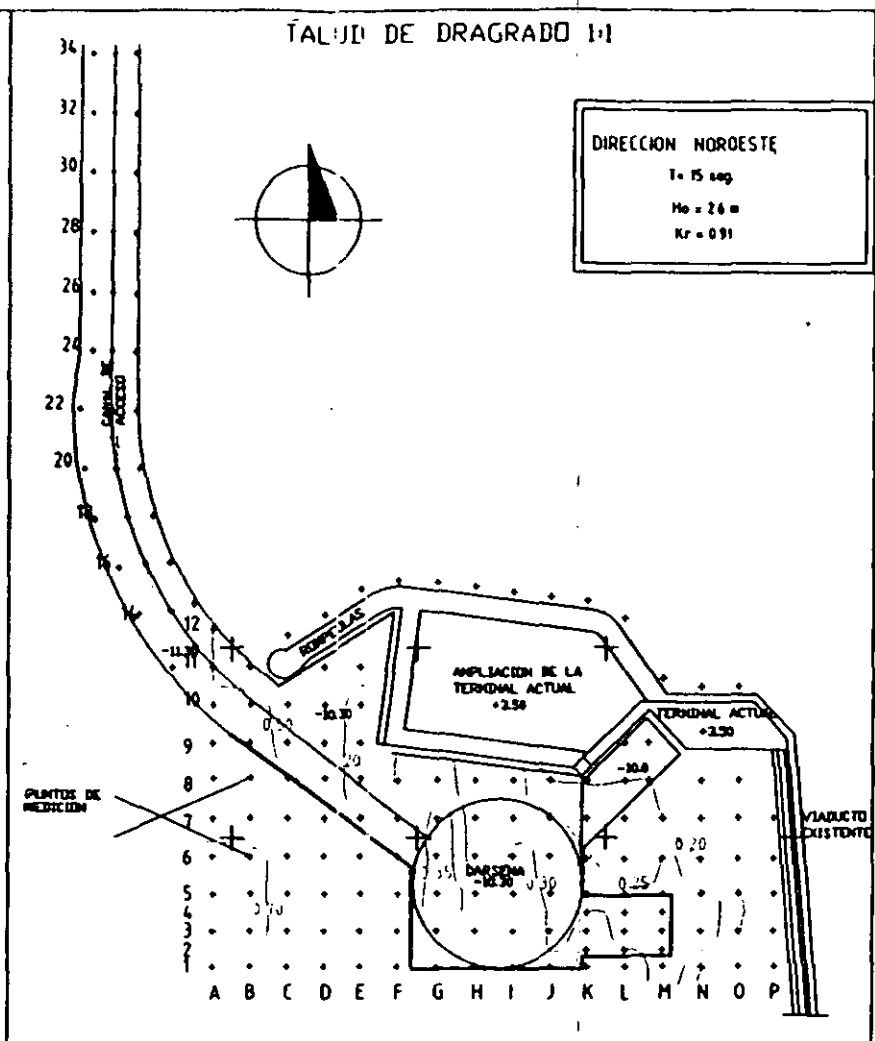
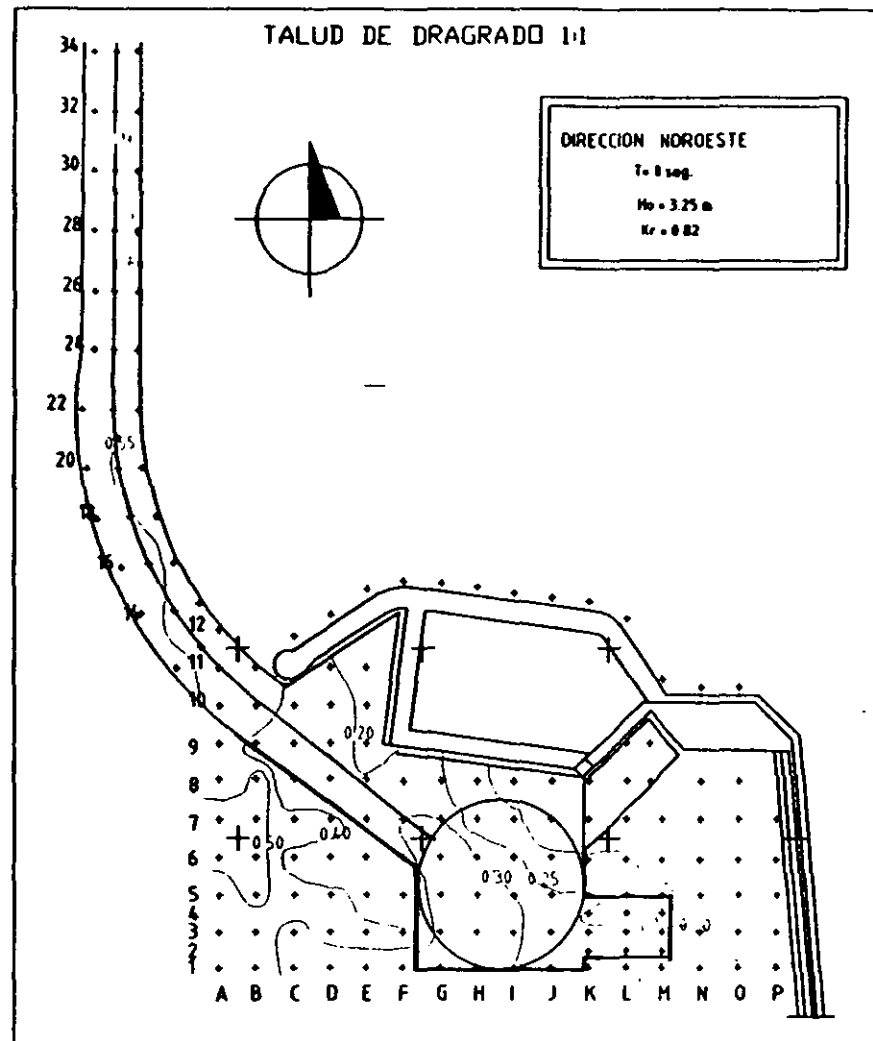
ESCALA GRAFICA



NOTAS:

- LAS CURVAS REPRESENTAN VALORES DEL COEFICIENTE DE AGITACION, REFERIDOS AL OLEAJE DE AGUAS PROFUNDAS.
- EN TODOS LOS ENSAYOS DE AGITACION SE UTILIZO EL NIVEL DE BAJAMAR MEDIA (N.B.M.).
- LAS ELEVACIONES ESTAN EN METROS REFERIDAS AL N.B.M.
- LA ESCALA DE LINEAS DEL MODELO FUE 1/175

CURVAS DE AGITACION DE OLEAJE
 PARA LA DIRECCION NW Y TALUD
 DE DRAGADO VERTICAL
 MARZO DE 1999 FIG. No. 7.8



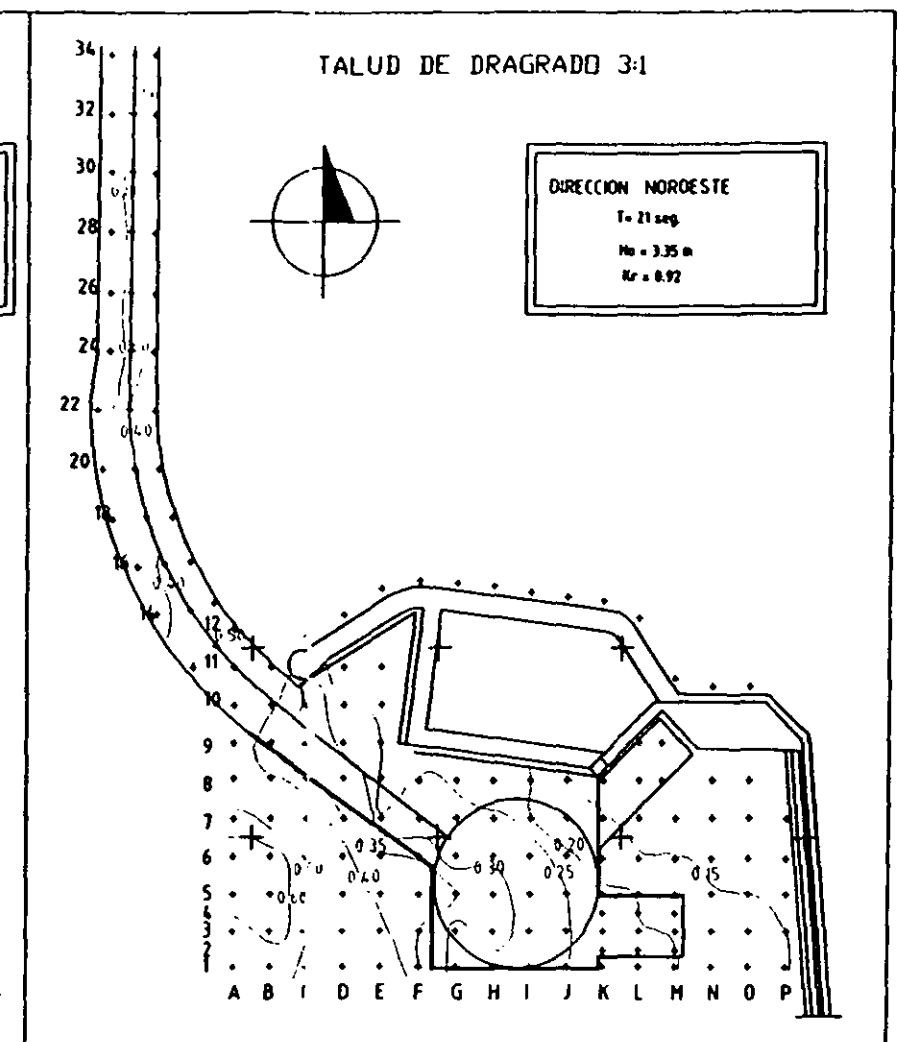
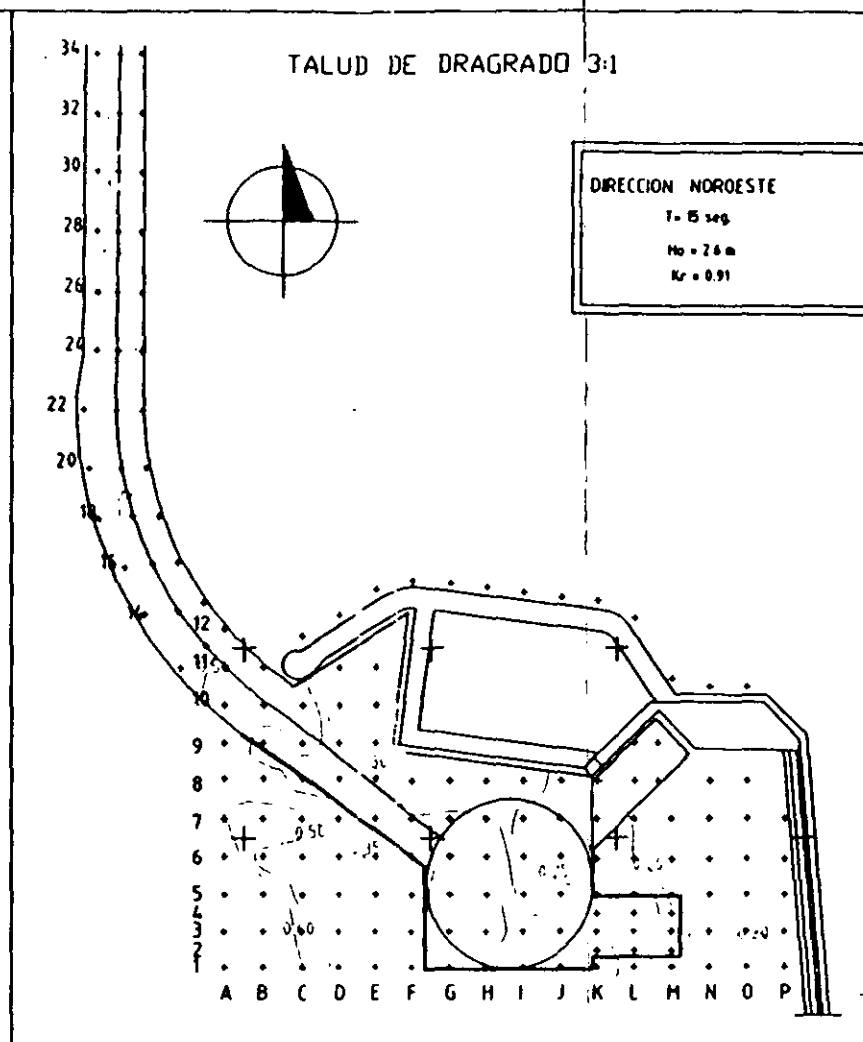
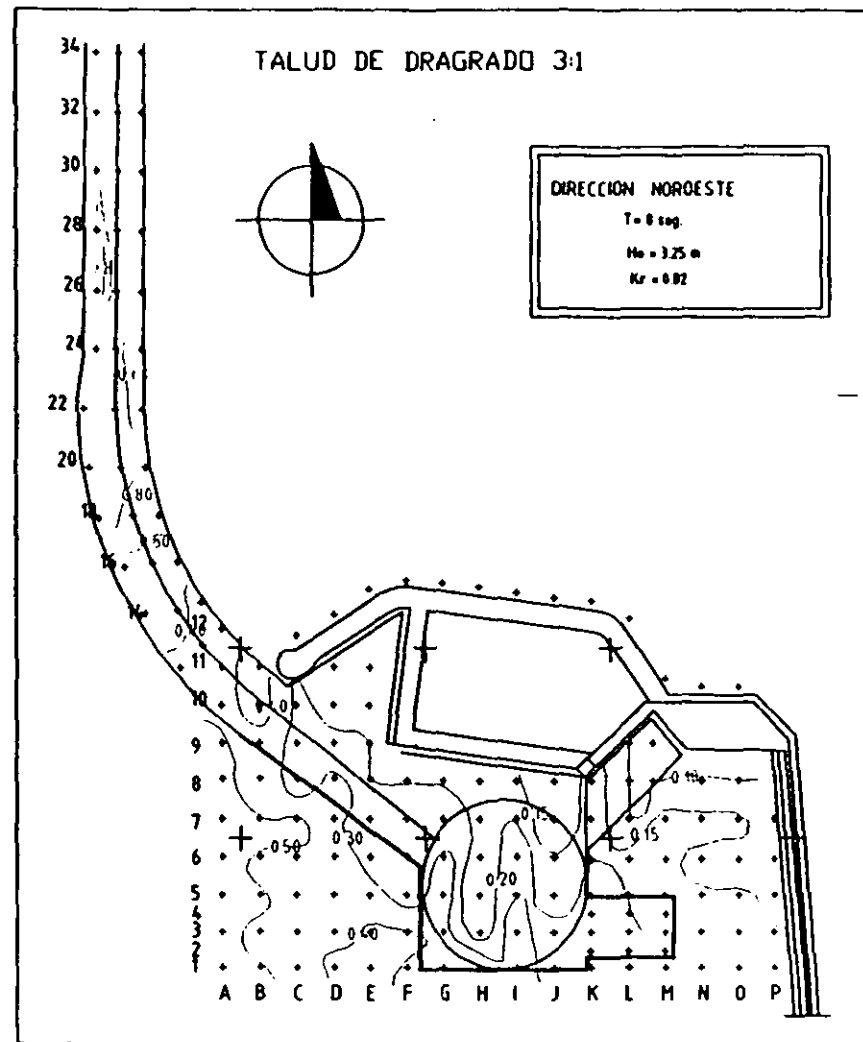
ESCALA GRAFICA



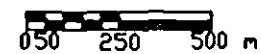
NOTAS:

- LAS CURVAS REPRESENTAN VALORES DEL COEFICIENTE DE AGITACION, REFERIDOS AL OLEAJE DE AGUAS PROFUNDAS.
- EN TODOS LOS ENSAYOS DE AGITACION SE UTILIZO EL NIVEL DE BAJA MAR MEDIA (N.B.M.).
- LAS ELEVACIONES ESTAN EN METROS REFERIDAS AL N.B.M.
- LA ESCALA DE LINEAS DEL MODELO FUE 1/175

CURVAS DE AGITACION DE OLEAJE
 PARA LA DIRECCION NW Y TALUD
 DE DRAGADO 1:1
 MARZO DE 1999 FIG. No. 7.9



ESCALA GRAFICA



NOTAS:

- LAS CURVAS REPRESENTAN VALORES DEL COEFICIENTE DE AGITACION, REFERIDOS AL OLEAJE DE AGUAS PROFUNDAS.
- EN TODOS LOS ENSAYOS DE AGITACION SE UTILIZO EL NIVEL DE BAJA MAR MEDIA (N.B.M.).
- LAS ELEVACIONES ESTAN EN METROS REFERIDAS AL N.B.M.
- LA ESCALA DE LINEAS DEL MODELO FUE 1/175

CURVAS DE AGITACION DE OLEAJE
 PARA LA DIRECCION NW Y TALUD
 DE DRAGRADO 3 : 1
 MARZO DE 1999 FIG. No. 7.10

PERIODO (Seg.)	ZONA	NORTE				NORESTE				NOROESTE			
		3:1	1:1	VERT.	K_D	3:1	1:1	VERT.	K_D	3:1	1:1	VERT.	K_D
8.00		Ho = 3.83 m				Ho = 3.10 m				Ho = 3.25 m			
	Morro (Zona I en Fig. 7.1)	0.45	0.48	0.47	0.46	0.65	0.73	0.52	0.63	0.37	0.45	0.38	0.40
	Cruceros (Zona II(a) en Fig.7.1)	0.17	0.16	0.13	0.15	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.22	0.22	0.20
	Contenedores (zona II(b) en Fig.7.1)	0.09	0.13	0.11	0.11	0.11	0.16	0.13	0.13	0.13	0.16	0.16	0.15
	Cruceros (Zona III(c) en Fig.7.1)	0.09	0.11	0.09	0.096	0.11	0.13	0.11	0.12	0.13	0.16	0.13	0.14
	Graneleros (zona (d) en Fig.7.1)	0.09	0.09	0.09	0.09	0.11	0.11	0.11	0.11	0.10	0.16	0.16	0.14
	Petroleros (Zona V en Fig.7.1)	0.20	0.19	0.18	0.19	0.20	0.20	0.23	0.21	0.24	0.28	0.27	0.26
15.00		Ho = 2.50 m				Ho = 2.50 m				Ho = 2.60 m			
	Morro (Zona I en Fig. 7.1)	0.51	0.59	0.51	0.53	0.79	0.82	0.59	0.73	0.46	0.51	0.46	0.47
	Cruceros (Zona II(a) en Fig.7.1)	0.22	0.25	0.22	0.23	0.22	0.25	0.22	0.23	0.24	0.28	0.22	0.24
	Contenedores (zona II(b) en Fig.7.1)	0.17	0.20	0.16	0.17	0.14	0.20	0.20	0.18	0.23	0.23	0.20	0.22
	Cruceros (Zona III(c) en Fig.7.1)	0.20	0.20	0.16	0.18	0.17	0.20	0.20	0.19	0.20	0.20	0.20	0.20
	Graneleros (zona (d) en Fig.7.1)	0.14	0.14	0.12	0.13	0.14	0.14	0.17	0.15	0.20	0.20	0.20	0.20
	Petroleros (Zona V en Fig.7.1)	0.26	0.27	0.24	0.26	0.25	0.26	0.27	0.26	0.31	0.31	0.29	0.30
21.00		Ho = 2.60 m				Ho = 2.20 m				Ho = 3.35 m			
	Morro (Zona I en Fig. 7.1)	0.51	0.50	0.53	0.51	0.70	0.94	0.38	0.67	0.45	0.36	0.44	0.42
	Cruceros (Zona II(a) en Fig.7.1)	0.22	0.22	0.22	0.22	0.25	0.25	0.31	0.27	0.20	0.18	0.21	0.19
	Contenedores (zona II(b) en Fig.7.1)	0.20	0.20	0.23	0.21	0.23	0.23	0.23	0.23	0.17	0.15	0.15	0.16
	Cruceros (Zona III(c) en Fig.7.1)	0.20	0.20	0.20	0.20	0.19	0.23	0.23	0.21	0.15	0.15	0.17	0.16
	Graneleros (zona (d) en Fig.7.1)	0.13	0.20	0.13	0.15	0.19	0.15	0.18	0.17	0.15	0.15	0.15	0.15
	Petroleros (Zona V en Fig.7.1)	0.24	0.23	0.25	0.24	0.27	0.29	0.24	0.28	0.28	0.23	0.24	0.25
		0.20	0.23	0.23	0.22	0.28	0.25	0.25	0.26	0.20	0.18	0.20	0.19

Tabla 7.2 Coeficientes de agitación promedio en las zonas de atraque del puerto, obtenidos mediante mediciones en el modelo hidráulico de agitación de oleaje.

- a) Los coeficientes de agitación máximos frente al morro del rompeolas (Zona No. 1 en la Fig. 7.1) teniendo los siguientes valores: .94 para la dirección de oleaje del NE con periodo de 21 seg. y altura de ola en aguas profundas de 2.20 m, .59 para la dirección N con periodo de 15 seg. y altura de ola de aguas profundas de 2.5 m, y .51 para la dirección NW con periodo de 15 seg. y altura de ola de aguas profundas de 2.6 m.
- b) En las zonas protegidas por el rompeolas, la dársena de ciaboga presenta la mayor agitación, alcanzando valores promedio de 0.26 para la dirección Noroeste (NW) con $T = 8$ seg., y $H_o = 3.25$ m de 0.31 para la dirección Noroeste (NW) con $T = 15$ seg., y $H_o = 2.60$ m y de 0.28 para la dirección Noreste (NE) con $T = 21$ seg., y $H_o = 2.20$.
- c) Para las zonas de atraque consideradas, en la zona de cruceros (zona II (a)) se presentan los mayores coeficientes de agitación provocados por el oleaje del NW, siendo de 0.20 para una ola de $T = 8$ seg., y $H_o = 3.25$ m, de 0.24 para una ola de $T = 15$ seg., y $H_o = 2.60$ y de 0.27 para una ola de $T = 21$ seg., y $H_o = 2.20$ m.
- d) Analizando los coeficientes de agitación de la dársena de ciaboga y zona de atraque para petroleros (zona IV y V en la Fig. 7.1) donde se tiene la presencia de los taludes de dragado, se puede observar que existe un ligero incremento en el valor de los coeficientes de agitación al cambiarse de un talud 3:1 a vertical.
- e) Con respecto a las alturas de ola medidas frente al rompeolas y bordo de protección, se obtuvieron los siguientes valores máximos: 3.30 m frente a rompeolas y 2.90 m frente al bordo de protección para la dirección N para periodo de ola de 8 seg., y altura de ola de aguas profundas de 3.83 m, 3.30 frente a rompeolas y 3.10 m frente al bordo de protección para la dirección NE con periodo de ola de 8 seg., y altura de ola de aguas profundas de 3.10 m y 2.90 frente al rompeolas y 2.60 frente al bordo de protección para la dirección NW con periodo de ola de 8 seg., y altura de ola de aguas profundas de 3.25 m.

De acuerdo con los puntos anteriores se puede concluir que:

- El oleaje de NW provoca la mayor penetración del oleaje en el puerto con periodos de 8 y 15 seg., excepto para el periodo de 21 seg., donde el oleaje del NE presenta los mayores coeficientes de agitación.
- Con respecto a la influencia de los taludes de dragado, se puede decir que estos tienen una ligera influencia en el comportamiento de la agitación, por lo tanto, con objeto de reducir los volúmenes de dragado, se recomienda la utilización de un talud 1:1 para las zonas a dragar.

7.1.4.5. Comparación de resultados de agitación de oleaje entre el modelo numérico y el modelo hidráulico

En la tabla No. 7.2.1. se muestran los resultados comparativos entre los coeficientes de agitación obtenidos con el modelo numérico de agitación de oleaje y los coeficientes de agitación promedio obtenidos a través de mediciones realizadas en el modelo hidráulico.

Del análisis de dicha tabla se tiene lo siguiente:

- a) Los coeficientes obtenidos para la dirección NW del oleaje con el modelo numérico y con el modelo hidráulico, muestran una buena concordancia con un periodo de ola de 21 seg. y con periodos de ola de 8 y 15 seg., los coeficientes obtenidos con el modelo hidráulico llegan a ser en algunas zonas de atraque del doble del coeficiente obtenido con el modelo numérico.
- b) Los coeficientes obtenidos con el modelo hidráulico para la dirección NE con los 3 periodos de ola considerados, resultaron ser en promedio del orden de 3 veces el valor del coeficiente de agitación obtenido con el modelo numérico.
- c) Los coeficientes de agitación obtenidos con el modelo hidráulico para la dirección N y los 3 periodos de ola considerados, resultaron ser en promedio del doble de los obtenidos con el modelo numérico de agitación.

PERIODO [Seg]	TERMINAL	NORTE		NORESTE		NOROESTE	
		K_1 MODELO NUMERICO	K_2 MODELO HIDRAULICO	K_3 MODELO NUMERICO	K_4 MODELO HIDRAULICO	K_5 MODELO NUMERICO	K_6 MODELO HIDRAULICO
8.00	Cruceros (Zona III(a) en Fig. 6.20)	0.10	0.15	0.05	0.18	0.10	0.20
	Contenedores (Zona II(b) en Fig. 6.20)	0.05	0.11	0.05	0.13	0.10	0.15
	Cruceros (Zona III(c) en Fig. 6.20)	0.05	0.09	0.05	0.12	0.10	0.14
	Graneleros (Zona (d) en Fig. 6.20)	0.05	0.09	0.05	0.11	0.10	0.14
	Petroleros (Zona V en Fig. 6.20)	0.15	0.14	0.07	0.17	0.10	0.22
15.00	Cruceros (Zona III(a) en Fig. 6.20)	0.15	0.23	0.05	0.23	0.15	0.24
	Contenedores (Zona II(b) en Fig. 6.20)	0.15	0.17	0.05	0.18	0.15	0.22
	Cruceros (Zona III(c) en Fig. 6.20)	0.15	0.18	0.05	0.19	0.15	0.20
	Graneleros (Zona (d) en Fig. 6.20)	0.15	0.13	0.05	0.15	0.15	0.20
	Petroleros (Zona V en Fig. 6.20)	0.20	0.21	0.07	0.22	0.20	0.28
21.00	Cruceros (Zona III(a) en Fig. 6.20)	0.10	0.22	0.10	0.27	0.15	0.19
	Contenedores (Zona II(b) en Fig. 6.20)	0.10	0.21	0.10	0.23	0.15	0.16
	Cruceros (Zona III(c) en Fig. 6.20)	0.10	0.20	0.10	0.21	0.15	0.16
	Graneleros (Zona (d) en Fig. 6.20)	0.10	0.15	0.10	0.17	0.15	0.15
	Petroleros (Zona V en Fig. 6.20)	0.20	0.22	0.12	0.26	0.17	0.19

Tabla 7.2.1 Comparación de coeficientes de agitación entre el modelo numérico y el modelo hidráulico.

- d) El oleaje del NW provoca la mayor agitación en el puerto, de acuerdo con los valores del coeficiente de agitación obtenidos tanto con el modelo numérico como con el modelo hidráulico, con periodos de ola de 8 y 15 seg., excepto para el periodo de ola de 20 seg. donde los coeficientes obtenidos con el modelo hidráulico resultaron mayores para la dirección N.
- e) De acuerdo con el punto anterior se determinó utilizar los coeficientes de agitación obtenidos en el modelo hidráulico para calcular la operatividad del puerto.

7.2. Modelo tridimensional de estabilidad

El estudio de la estabilidad del cuerpo y morro del rompeolas de protección del proyecto de ampliación de la terminal de transbordadores se realizó en el canal de olas ancho existente.

Para realizar dicho estudio se representaron las secciones transversales del proyecto para el cuerpo y morro del rompeolas en los últimos 100 m. Durante los ensayos se observó su comportamiento al ser sometidas a diversas condiciones de oleaje de tormenta.

7.2.1. Selección de la escala del modelo hidráulico

Utilizando el mismo criterio descrito en el inciso 7.1.1. y tomando en cuenta las dimensiones y el peso de los elementos del cuerpo y morro del rompeolas a ensayar, se eligió una escala de líneas de 1/40.

De acuerdo con la escala de líneas elegida y la ley de similitud de Froude, se tendrán las siguientes relaciones entre modelo y prototipo:

$$\text{Longitud } L_m = L_p (1/40)$$

$$\text{Tiempo } T_m = T_p (1/\sqrt{40})$$

$$\text{Velocidad } V_m = V_p (1/\sqrt{40})$$

Por otro lado, la relación entre la densidad del agua del modelo (agua dulce) y la relación entre el agua de mar es la misma que la de sus pesos unitarios, es decir:

$$\frac{\gamma_m}{\gamma_p} = \frac{1}{1.028}$$

Por lo que se tendrá la siguiente relación de pesos entre modelo y prototipo:

$$\text{Pesos: } P_m = P_p (1/1.028) (1/40)^3$$

7.2.2. Proyecto del modelo hidráulico

En base a la escala de líneas seleccionada de 1/40 y tomando en cuenta la pendiente del fondo marino a representar el modelo y las dimensiones del canal de olas disponible en el Laboratorio de Hidráulica Marítima para la construcción del modelo, así como la pendiente de la losa de configuración existente en el interior de dicho canal.

7.2.3. Construcción del modelo hidráulico

La construcción del modelo hidráulico se realizó con el orden siguiente:

(1) Construcción del fondo marino

Definida la pendiente a reproducir en el canal de olas, se procedió a demoler la losa de configuración existente en el interior del canal y a retirar los rellenos de arena excedentes existentes, para posteriormente impermeabilizar el fondo y paredes de dicho canal, a base de 1 capa de hidroprimer y 2 capas de vaportite con una membrana de festerflex intermedia.

Posteriormente se realizó el relleno con arena para colocar los firmes correspondientes, a base de una losa de concreto simple, de aproximadamente 4 cm de espesor. Dichos trabajos se realizaron para reproducir en el interior

del canal, la pendiente media del perfil del fondo marino de 0.0006 frente a la sección del rompeolas, en una longitud de 16.01 m. y un tramo de transición con pendiente de 0.057 en una longitud de 9.45 m. para poder ligar el fondo del canal con la pendiente del fondo marino.

(2) Construcción de los elementos de coraza

Para la construcción de las secciones transversales del rompeolas se consideraron las dimensiones y peso de los elementos de la coraza en prototipo indicados, los cuales se transformaron en base a las escalas de líneas y pesos correspondientes, para obtener las dimensiones y pesos de dichos elementos a representar en el modelo hidráulico.

Para la construcción de los elementos de coraza de la estructura, se utilizó una mezcla de cemento-arena-grava y ferfofest, elaborada de acuerdo a una proporción especial para lograr el peso requerido en el modelo hidráulico. Cada componente de dicha mezcla, se seleccionó y se pesó cuidadosamente para dar la proporción requerida.

Una vez elaborada la mezcla, se procedió a colar los cubos ranurados, los cuales después de fraguar la mezcla, se verificó el peso de los cubos ranurados pieza por pieza.

(3) Selección de los elementos de la capa secundaria y núcleo

Para la selección de los elementos de la capa secundaria compuesta por rocas de 1.49 a 2.77 Ton. en prototipo, se utilizó grava en el modelo hidráulico, seleccionando los pesos de los elementos (pieza por pieza) que estaban en el rango de los pesos requeridos.

La selección de los elementos del núcleo compuesto por rocas de 7.5 a 240 Kg. de peso, resultaba demasiado laborioso pesar pieza por pieza por el rango de pesos requeridos en el modelo, por lo que se determinó representar como equivalencia de dicho rango de pesos, el diámetro calculado con base al volumen de una esfera equivalente, considerando un peso específico del material (piedra) a utilizar en el modelo de 2.6 ton/m^3 , obteniéndose lo siguiente:

Peso medio: $P = 2.6 (0.5236 D^3)$
 Diámetro medio: $D = (P/1.36)^{1/3}$

De acuerdo con las relaciones anteriores y el rango de pesos del prototipo, se obtuvo para el modelo hidráulico un rango de diámetros comprendido entre 4.4 y 14 mm.

(4) Construcción del rompeolas en el canal de olas

El tramo de los últimos 100 m del rompeolas a ensayar, se construyó de acuerdo con las secciones transversales indicadas en el plano de proyecto mencionado en el punto (2), las cuales se dibujaron y cortaron sobre madera de triplay, las que una vez cortadas, se colocaron sobre el fondo del canal, sirviendo como guías para colocar el material del núcleo, capa secundaria y coraza hasta los niveles de proyecto.

Las secciones se construyeron considerando una coraza compuesta por cubos ranurados de concreto de 10.40 Ton. en prototipo, roca de 1.49 a 2.77 Ton. para la capa secundaria y roca de 7.5 a 240 Kg. para el núcleo, los cuales con base en las escalas de líneas y pesos se transformaron para obtener los pesos de los elementos en el modelo que se indican a continuación.

SECCION CUERPO	PROTOTIPO (Ton)		MODELO (gr.)	
	CUBOS RANURADOS	ROCAS	CUBOS RANURADOS	ROCAS
CORAZA	10.40	*	158.07	*
CAPA SECUNDARIA	*	1.49 a 2.77	*	22.64 a 42.10
NUCLEO	*	0.0075 a 0.24	*	0.11 a 3.64

7.2.4. Operación del modelo hidráulico

7.2.4.1. Programa de ensayos

Para realizar el estudio de estabilidad de los elementos de coraza del morro y cuerpo del rompeolas de protección se planteó el programa de ensayos que se muestran en la tabla 7.3, considerando una posición del rompeolas oblicua con

respecto a la incidencia del oleaje, con objeto de simular la dirección Norte del oleaje, y otra posición paralela a la incidencia del oleaje para simular un ataque de la dirección Noroeste del oleaje. La posición en planta del rompeolas ensayado se muestra en la Fig. 7.11.

ENSAYO No.	NIVEL DEL MAR	PERIODO (SEG)	ALTURAS DE OLA (m)
1	0.00	11.00	3.68, 4.00 y 4.84
2	+ 1.70	8.00	2.36, 3.48, 3.56 y 3.72
3	+ 1.70	9.00	2.84, 63.76, 3.88 y 4.80
4	+ 1.70	11.00	2.52, 3.68, 4.00, y 4.84

Tabla 7.3 Ensayos de estabilidad realizados en el canal de olas ancho para la sección del cuerpo y morro del rompeolas

El nivel del mar de + 2.50 m no se consideró en esta serie de ensayos, ya que en los ensayos preliminares realizados en el canal de olas angosto, se observó rebasamiento de la corona de la estructura, situación por la cual se decidió omitir este nivel del mar en el canal de olas ancho, ya que al presentarse tal rebasamiento no se podría observar claramente el movimiento de los cubos de la corona al quedar prácticamente sumergida la estructura, debido a que las paredes de dicho canal no cuentan con ventanas transparentes de observación como en el canal angosto.

7.2.4.2. Condiciones y procedimiento de los ensayos

El estudio de la estabilidad del cuerpo y morro del rompeolas del proyecto de ampliación, se realizó en un canal de oleaje con dimensiones de 35.00 m de longitud, 1.40 m de altura y 4.70 m de ancho. Dicho canal cuenta con un generador de oleaje tipo pistón, capaz de generar oleaje regular e irregular, accionado mediante un motor de 30 KVA, cuyo control se efectúa mediante procedimientos electrónicos controlados con equipo de cómputo.

Los extremos del canal cuentan con playas amortiguadoras para absorber la energía del oleaje, las cuales limitan la ocurrencia de reflexiones en las secciones transversales del rompeolas.

Para la medición del oleaje el canal se instrumentó con un sensor de oleaje colocado frente a las estructuradas ensayadas.

POSICIONES EN PLANTA DE LOS ULTIMOS 100 M. (2.5 M. EN MODELO) DEL ROMPEOLAS DEL PROYECTO DE AMPLIACION DE LA TERMINAL DE TRANSBORDADORES. ENSAYADAS EN EL CANAL DE OLAS ANCHO.

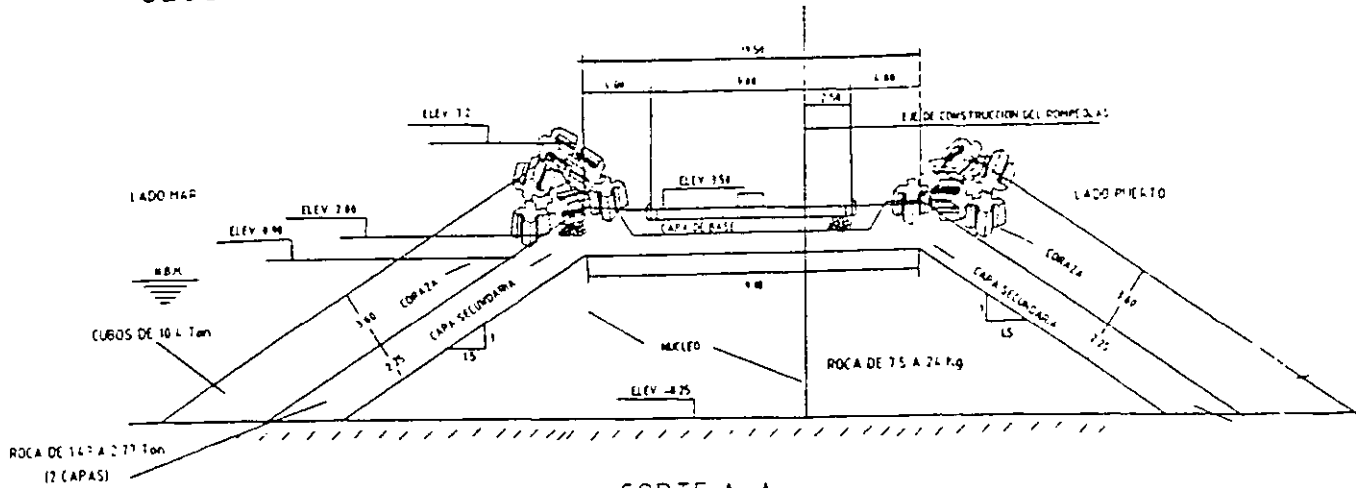
NOTAS:

- ACOTACIONES Y ELEVACIONES EN METROS.
- EL MODELO HIDRAULICO SE CONSTRUYO CON UNA ESCALA DE LINEAS DE 1/40.
- LAS AREAS MARCADAS CON I, II, III, IV, V Y VI EN LA VISTA EN PLANTA DEL DEL EXTREMO DEL ROMPEOLAS, CORRESPONDEN A LAS ZONAS DE OBSERVACION DE LA ESTABILIDAD DE LOS CUBOS BAJO LA ACCION DEL OLEAJE.
- LAS ELEVACIONES DEL MAR CONSIDERADAS DURANTE LOS ENSAYOS FUERON EL NIVEL DE BAJAMAR MEDIA (N.B.M.) +1.70 SOBRE EL N.B.M.

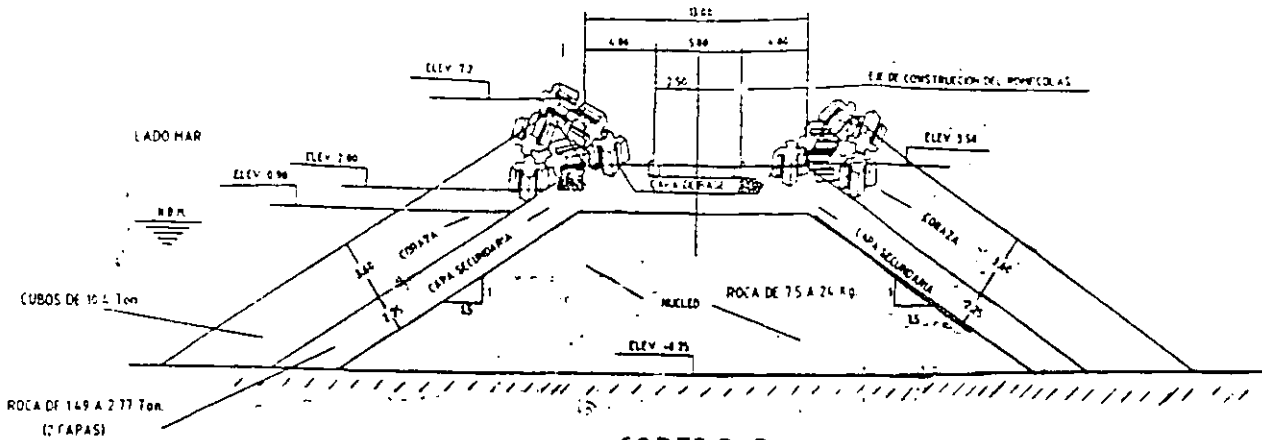
AMPLIACION DE LA TERMINAL DE TRANSBORDADORES ESTUDIO DE ESTABILIDAD DEL CUERPO Y MORRO DEL ROMPEOLAS DE PROTECCION.

FIG. No. 7.11

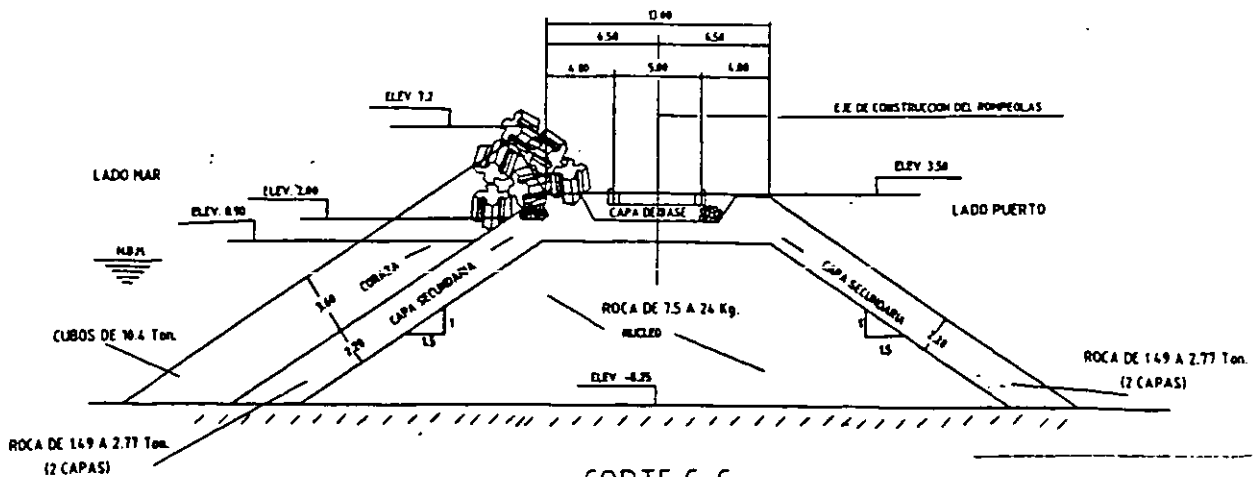
SECCIONES TRANSVERSALES DEL POMPEOLAS



CORTE A-A
SECCION DE MORRO
EST 1+161.33

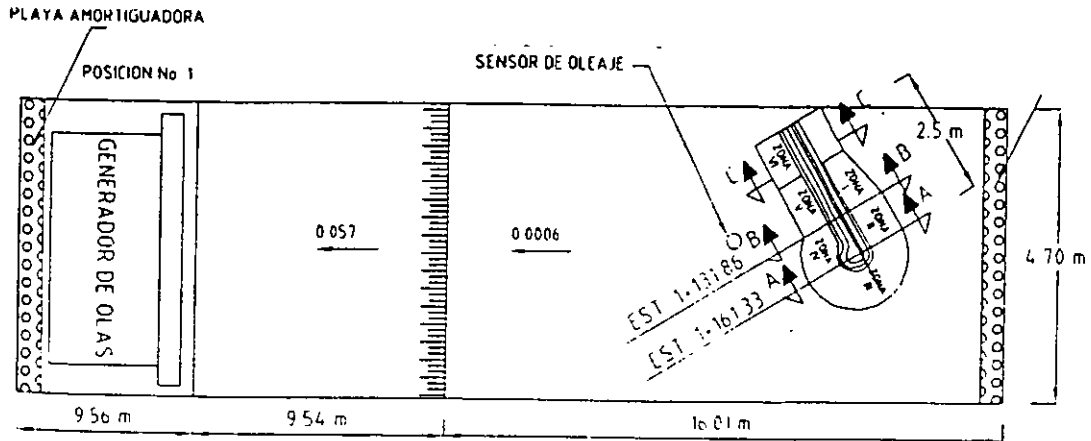


CORTE B-B
SECCION DE MORRO
EST 1+131.86

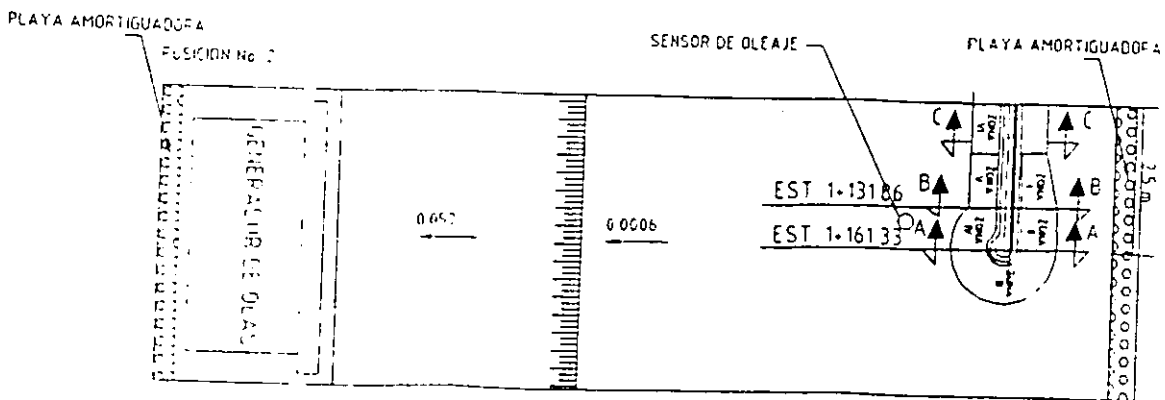


CORTE C-C
CUERPO

VISTAS EN PLANTA DEL CANAL



(a) INCIDENCIA OBLICUA DEL OLAJE (DIR. NORTE).



(b) INCIDENCIA NORMAL DEL OLAJE (DIR. NW).

Las dimensiones del canal de oleaje, posición del sensor y de las secciones ensayadas se indican en la Fig. 7.11.

Condiciones de los ensayos.

- a) Los ensayos se realizaron tomando en cuenta el nivel de bajamar media (N.B.M.) y el nivel de + 1.70 m sobre el N.B.M.
- b) En Todos los ensayos se utilizó el espectro frecuencial de Bretschneider-Mitzuyasu para calcular y generar las señales de oleaje utilizadas.
- c) La altura de ola incidente se midió frente a la estructura, a una profundidad de 20.62 cm. (8.25 m en prototipo).
- d) Las secciones ensayadas se sometieron a diversas alturas de ola, incluyendo alturas de ola superiores a la de diseño, asociadas éstas a un periodo de oleaje determinado, como se muestra en la tabla No. 7.3.
- e) Después de terminados cada uno de los ensayos realizados en el modelo hidráulico, se cuantificaron los cubos que fueron movidos por el oleaje de su posición original.

7.2.4.3. Presentación de la información experimental

Los resultados de estabilidad obtenidos para la posición oblicua del rompeolas con respecto a la dirección del oleaje se muestran en la tabla No. 7.4, y los resultados para la posición del rompeolas paralela al oleaje se muestran en la tabla No. 7.5.

7.2.4.4. Resultados de los ensayos

De acuerdo con los ensayos realizados se obtuvieron los siguientes resultados:

(1) Posición del rompeolas oblicua al oleaje (Dirección N)

- Los cubos del morro y cuerpo del rompeolas se comportaron estables para todas las condiciones de oleaje ensayadas.

NIVEL DEL MAR (m)	T (seg)	H (m)	OBSERVACIONES
0 00 (N B M)	11 00	3 68	Se presentó sobre elevación. No se observó movimiento de cubos.
		4 00	Se presentó sobre elevación. No se observó movimiento de cubos.
		4 84	Se presentó sobre elevación. No se observó movimiento de cubos.
1 70	8 00	2 36	Se presentó sobre elevación. No se observó movimiento de cubos.
		3 48	Se presentó sobre elevación. No se observó movimiento de cubos.
		3 56	Se presentó sobre elevación. No se observó movimiento de cubos.
		3 72	Se presentó sobre elevación. No se observó movimiento de cubos.
	9 00	2 84	Se presentó sobre elevación. No se observó movimiento de cubos.
		3 76	Se presentó sobre elevación. No se observó movimiento de cubos.
		3 88	Se presentó sobre elevación. No se observó movimiento de cubos.
		4 80	Se presentó sobre elevación. No se observó movimiento de cubos.
	11 00	2 52	Se presentó sobre elevación. No se observó movimiento de cubos.
		3 68	Se presentó sobre elevación. No se observó movimiento de cubos.
		4 00	Se presentó sobre elevación. No se observó movimiento de cubos.
		4 84	Se presentó sobre elevación. Se observó el movimiento de 1 cubo.

Tabla 7.4 Observaciones de los ensayos de estabilidad del rompeolas con incidencia oblicua del oleaje.
(Dirección Norte)

NIVEL DEL MAR (m)	T (seg)	H (m)	OBSERVACIONES
1 70	8 00	3 56	Se presentó sobre elevación. No se observó movimiento de cubos.
		3 72	Se presentó sobre elevación. No se observó movimiento de cubos.
	9 00	2 84	Se presentó sobre elevación. Se observó el movimiento de 3 cubos.
		3 88	Se presentó sobre elevación. Se observó el movimiento de 1 cubo.
		4 80	Se presentó sobre elevación. No se observó movimiento de cubos.
	11 00	4 00	Se presentó sobre elevación. Se observó el movimiento de 4 cubos.
		4 84	Se presentó sobre elevación. Se observó movimiento de 5 cubos.

Tabla 7.5 Observaciones de los ensayos de estabilidad del rompeolas con incidencia normal del oleaje. (Dirección Noroeste)

- Para los ensayos realizados con el N.B.M. se presentó rebase del oleaje sobre el coronamiento del rompeolas con olas mayores a 3.60 m.
- Para los ensayos realizados con un nivel del mar de + 1.70 m. periodo de ola de 8 seg. y alturas de ola de 2.36 m a 3.72 m, se presentó rebase del oleaje. sin alcanzar a mover la piedra del coronamiento ni los cubos.
- Para los ensayos realizados con un nivel de + 1.70 m, periodo de ola de 9 seg. y alturas de ola de 2.84 m a 4.80 m, se presentó rebase del oleaje, alcanzando a mover algunas piedras del coronamiento. pero no hubo movimiento de cubos.
- Para los ensayos realizados con un nivel del mar de + 1.70 m. periodo de ola de 11 seg. Y alturas de ola de 2.52 m a 4.84 m, se presentó rebase del oleaje. alcanzando a mover algunas piedras del coronamiento y algunos cubos de la última fila de la coraza.

(2) Posición del rompeolas paralela al oleaje (Dirección NW)

- Los cubos del morro y cuerpo del rompeolas se comportaron estables para todas las condiciones de oleaje ensayadas.
- Para los ensayos realizados con un nivel del mar de + 1.70 m. periodo de ola de 8 seg. y alturas de ola de 3.56 m a 3.72 m, se presentó rebase del oleaje, sin alcanzar a mover la piedra del coronamiento ni los cubos del cuerpo y morro del rompeolas.
- Para los ensayos realizados con un nivel del mar de + 1.70 m, periodo de ola de 9 seg., y alturas de ola de 2.84 m a 4.80 m, se presentó rebase del oleaje, alcanzando a mover algunas piedras del coronamiento pero no hubo movimiento de cubos en el cuerpo y morro del rompeolas.
- Para los ensayos realizados con un nivel del mar de + 1.70 m, periodo de ola de 11 seg. y alturas de ola de 4.00 m a 4.84 m, se presentó rebase del oleaje, alcanzando a mover algunas piedras y cubos del coronamiento del rompeolas.

Conclusión parcial

De acuerdo con los resultados indicados en los puntos anteriores, se concluye que los cubos ranurados de concreto de 10.4 Ton. considerados en el proyecto para la coraza del morro y cuerpo del rompeolas son estables, aún para una ola de 4.80 m superior a la de diseño, (4.25 m).

7.3. Modelo bidimensional de estabilidad

El estudio de la estabilidad del cuerpo del rompeolas de protección del proyecto de ampliación de la terminal portuaria, se realizó en el canal de olas angosto.

7.3.1. Selección de la escala del modelo hidráulico

Utilizando los mismos criterios descritos en los incisos 7.1.1 y 7.2.1, se eligió una escala de líneas de 1/40.

De acuerdo con la escala elegida y la ley de similitud de Froude, se obtuvieron las restantes escalas que se indican enseguida:

ESCALA	EXPRESION	VALOR
Velocidades	$E_v = E_L^{1/2}$	6.32
Período	$E_t = E_L^{1/2}$	6.32
Areas	$E_a = E_L^2$	1,600
Volúmenes	$E_v = E_L^3$	64,000
Pesos	$E_p = E_L^3 (1.028)$	65.792

7.3.2. Proyecto del modelo hidráulico

En base a la escala seleccionada de 1/40 y tomando en cuenta la pendiente del fondo marino a representar en el modelo y las dimensiones del canal de olas disponible para la construcción del modelo, así como la pendiente de la losa de configuración existente en el interior de dicho canal, se realizó el proyecto del modelo hidráulico.

7.3.3. Construcción del modelo hidráulico

La construcción del modelo hidráulico se realizó con el orden siguiente:

(1) Construcción del fondo marino

Definida la pendiente a reproducir en el canal de olas, se procedió a demoler la losa de configuración existente en el interior del canal y a retirar los rellenos de arena excedentes existentes, para posteriormente impermeabilizar el fondo y paredes de dicho canal, a base de 1 capa de hidroprimer y 2 capas de vaporitete con membrana de festerflex intermedia.

Posteriormente se realizaron rellenos con arena para colocar los firmes correspondientes, a base de una losa de concreto simple, de aproximadamente 4 cm de espesor. Dichos trabajos se realizaron para reproducir en el interior del canal, la pendiente media del perfil del fondo marino frente a la sección del rompeolas, en una longitud de 32.00 m, con una pendiente de 0.0006 y un tramo de 9.29 m de transición con pendiente 0.057, para poder ligar el fondo del canal con la pendiente del fondo marino.

(2) Construcción de los elementos de coraza

Para la construcción de los elementos de coraza de la estructura, se utilizó el mismo procedimiento descrito en el inciso 7.2.3 (2)

(3) Selección de los elementos de la capa secundaria y núcleo

Para la selección de los elementos de la capa secundaria, se utilizó el procedimiento descrito en el inciso 7.2.3 (3).

(4) Construcción de la sección transversal del rompeolas

Para la construcción de la sección transversal del rompeolas de protección en el canal de olas se utilizó el procedimiento descrito en el inciso 7.2.3. (2).

Dicha sección se construyó cuidadosamente, respetando los rangos de pesos, espesores de las diferentes capas y elevaciones indicadas en el proyecto, utilizando para tal efecto las escalas de líneas y de pesos correspondientes.

La sección se desplantó sobre la losa de configuración del fondo marino colada previamente, colocando el núcleo de la obra a base de roca con diámetro medio de 4.4 a 14 mm, dichos diámetros se calcularon de acuerdo a la expresión dada en el inciso 7.2.3 (3) y representan los rangos en peso del enrocamiento propuesto para la sección respectiva. Sobre el núcleo se colocó la capa secundaria a base de roca de 1.49 a 2.77 Ton. (22.64 a 42.10 gr. en el modelo) colocando finalmente sobre la capa secundaria dos capas de cubos ranurados de 158.07 gr. (10.40 Ton en prototipo) colocados al azar soltándolos manualmente uno a uno desde una altura aproximada de 5 cm. simulando con ello el trabajo de colocación de una grúa.

7.3.4. Operación del modelo hidráulico

7.3.4.1. Programa de ensayos

Para realizar los ensayos de estabilidad de los elementos constitutivos de la coraza del rompeolas de protección, se planteó la serie de ensayos que se muestran en la tabla 7.6.

ENSAYO No.	NIVEL DEL MAR	PERIODO (seg)	ALTURAS DE OLA (m)
1	0.00	8.00	3.56, 3.64 y 3.80
2	0.00	9.00	3.88 y 4.16
3	0.00	11.00	3.08, 3.32, 3.68 y 4.08
4	+ 1.70	8.00	4.20, 4.44 y 4.48
5	+ 1.70	9.00	4.48, 4.52, 4.80 y 4.84
6	+ 1.70	11.00	2.88, 3.56, 3.72 y 3.88
7	+ 2.50	8.00	4.56 y 5.48
8	+ 2.50	9.00	4.96, 5.36, 5.40 y 5.52
9	+ 2.50	11.00	3.80, 4.20 y 4.68

Tabla 7.6

Ensayos de estabilidad realizados en el canal de olas para la sección del cuerpo de rompeolas. Los datos de oleaje y niveles del mar considerados para los ensayos fueron representativos.

7.3.4.2. Condiciones y procedimiento de los ensayos

El estudio de la estabilidad del cuerpo del rompeolas del proyecto de ampliación, se realizó en un canal de oleaje con dimensiones de 50.00 m de longitud, 1.20 m de altura y 0.60 m de ancho, el canal cuenta con un generador de oleaje tipo pistón, capaz de generar oleaje regular e irregular, accionado mediante un motor de 30 KVA, cuyo control se efectúa mediante procedimientos electrónicos controlados con equipo de cómputo.

Los extremos del canal cuentan con playas amortiguadoras para absorber la energía del oleaje, las cuales limitan la ocurrencia de reflexiones en las secciones transversales del rompeolas.

Para la medición del oleaje el canal se instrumentó con un sensor de oleaje colocado frente a la estructura ensayada.

Condiciones de los ensayos:

- a) Los ensayos se realizaron tomando en cuenta el nivel de bajamar media (N.B.M.) y los niveles de tormenta de + 1.70 y + 2.50 m.
- b) En todos los ensayos se utilizó el espectro frecuencial de Bretschneider-Mitzuyasu para calcular y generar las señales de oleaje utilizadas.
- c) La altura de ola incidente se midió frente a la estructura, a una profundidad de 20.62 cm. (8.25 m en prototipo).
- d) Las secciones ensayadas se sometieron a diversas alturas de ola, incluyendo alturas de ola superiores a la de diseño, asociadas éstas aun período de oleaje determinado, como se indicó en la tabla No.7.6.
- e) Después de terminados cada uno de los ensayos realizados en el modelo hidráulico, se cuantificaron los cubos que fueron movidos por el oleaje de su posición inicial.

7.3.4.3. Alternativas ensayadas

Para la optimización de la sección transversal del rompeolas de protección, se consideraron las alternativas que se muestran en la Fig. 7.12, las cuales se describen a continuación:

ALTERNATIVA No. 1

Sección original de proyecto, compuesta por una estructura a base de un núcleo de roca de 7.5 a 240 Kg. De peso, colocada con un talud de 1.5:1; una capa secundaria compuesta por rocas de 1.49 a 2.77 Ton. de peso y una coraza a base de 2 capas de cubos ranurados de concreto de 10.4 Ton. de peso (Fig. No. 7.12 a).

ALTERNATIVA No. 2

Sección original de proyecto, modificando únicamente el desplante de las dos capas de cubos de la coraza por medio de una berma, compuestas por cubos ranurados de concreto de 7.8 Ton. y ensayada a las profundidades de 3.37 m, 4.99 m y 6.62m respectivamente (Fig. No. 7.12 b).

ALTERNATIVA No. 3

Sección original de proyecto, sustituyendo únicamente la primera capa de la coraza de cubos ranurados de concreto de 10.4 Ton. por cubos ranurados de concreto de 7.8 Ton. de peso (Fig. 7.12 c).

ALTERNATIVA No. 4

Sección original de proyecto, modificado únicamente el desplante de las dos capas de cubo de la coraza por medio de una berma, compuesta por rocas del mismo peso de la capa secundaria (1.49 a 2.77 Ton.) y considerada a las profundidades de -2.00 m, -3.00 m y -4.00 m respectivamente (Fig. No. 7.12 d).

ALTERNATIVA No. 5

Sección original de proyecto, sustituyendo únicamente las dos capas de la coraza de cubos ranurados de concreto de 10.4 Ton., por cubos ranurados de concreto de 7.8 Ton. de peso. (Fig. No. 7.12 e).

Secciones transversales del cuerpo del rompeolas del proyecto de ampliación de la terminal de transbordadores.

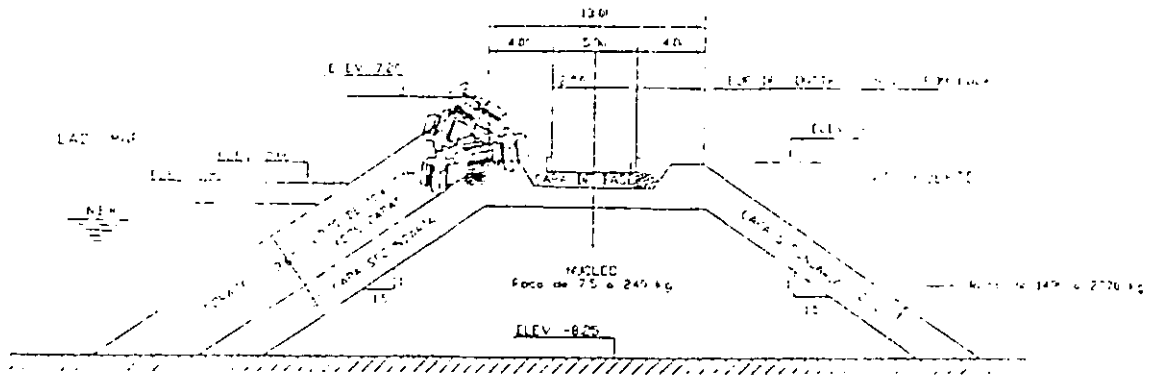
Ensayadas en el canal de olas angosto.

Notas:

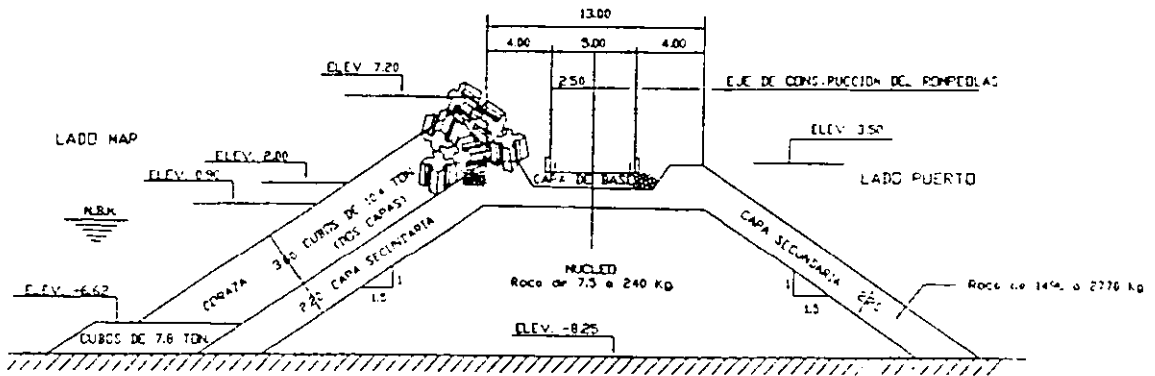
- Acotaciones y elevaciones en metros.
- El modelo hidráulico se construyó con una escala de líneas de 1/40.
- Las elevaciones del mar consideradas durante los ensayos, fueron el nivel de Bajamar Medio (N.B.M.) + 1.70 y + 2.50 sobre el N.B.M.

Ampliación de la terminal de trasbordadores.

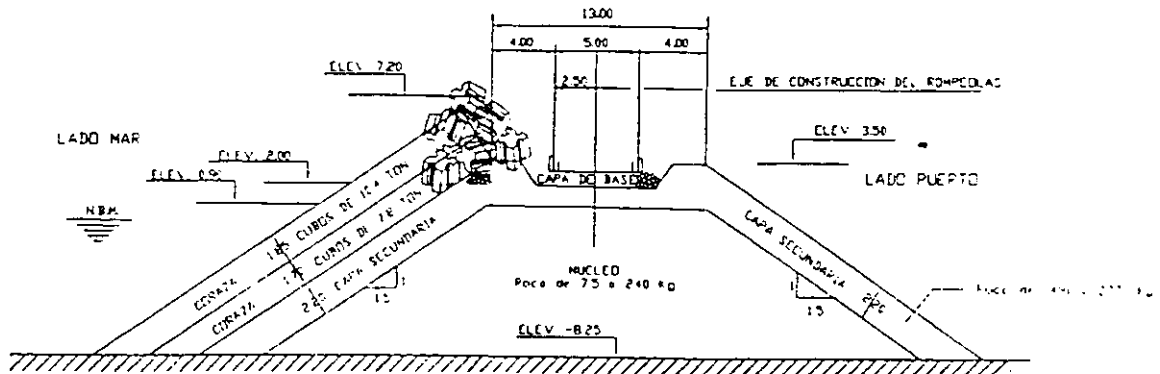
Estudio de Estabilidad del Cuerpo del Rompeolas Fig. 7.12



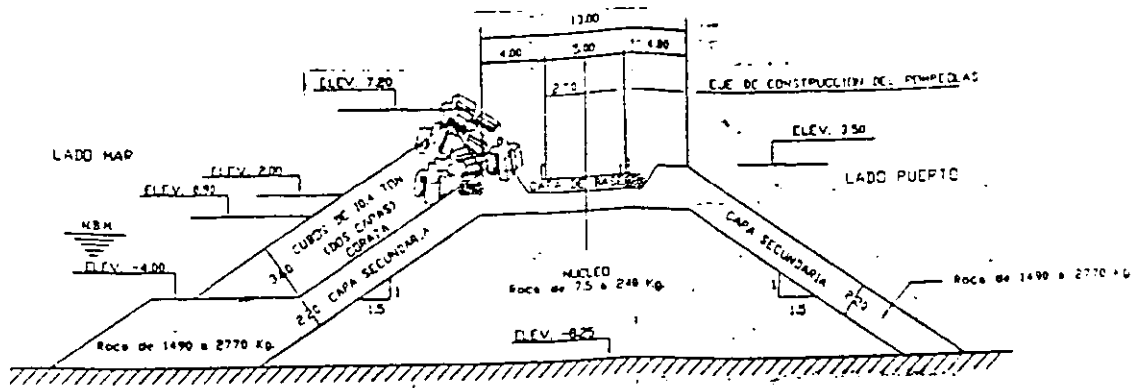
g) ALTERNATIVA 1.



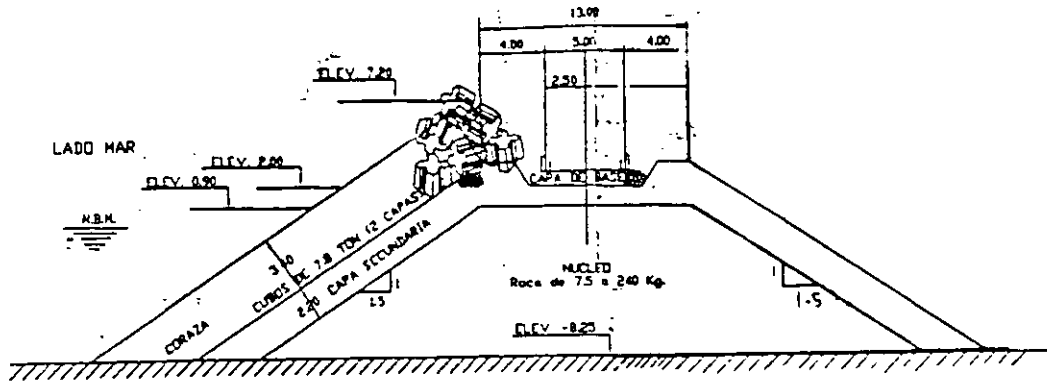
h) ALTERNATIVA 2.



i) ALTERNATIVA 3.



d) ALTERNATIVA 4.



e) ALTERNATIVA 5.

7.3.4.4. Presentación de la información experimental

Los resultados de los ensayos de estabilidad de los cubos ranurados de concreto de la coraza de la sección transversal del rompeolas de protección se muestra, para la alternativa No. 1, en la tabla 7.7; para la alternativa No. 2 en la tabla 7.8; para la alternativa No. 3 en la tabla 7.9; para la alternativa No. 4 en la tabla 7.10 y para la alternativa No. 5 en la tabla 7.11. En dichas tablas se indica lo observado en cuanto al rebase del oleaje sobre la corona de la sección estudiada y las condiciones de estabilidad de los elementos que conforman dicha sección.

NIVEL DEL MAR (m)	T (seg.)	H (m)	OBSERVACIONES
0.00 (N.B.M.)	8.00	3.56	No se presentó sobre-elevación. No se observó movimiento de cubos
		3.64	No se presentó sobre-elevación. No se observó movimiento de cubos
		3.80	No se presentó sobre-elevación. No se observó movimiento de cubos
	9.00	3.88	Se presentó sobre-elevación. No se observó movimiento de cubos
		4.16	Se presentó sobre-elevación. No se observó movimiento de cubos
	11.00	3.08	No se presentó sobre-elevación. No se observó movimiento de cubos
		3.32	No se presentó sobre-elevación. No se observó movimiento de cubos
		3.68	No se presentó sobre-elevación. No se observó movimiento de cubos
		4.08	Se presentó sobre-elevación. No se observó movimiento de cubos
	+ 1.70	8.00	4.20
4.44			Se presentó sobre-elevación. No se observó movimiento de cubos
4.48			Se presentó sobre-elevación. No se observó movimiento de cubos
9.00		4.48	Se presentó sobre-elevación. No se observó movimiento de cubos
		4.52	Se presentó sobre-elevación. No se observó movimiento de cubos
		4.80	Se presentó sobre-elevación. No se observó movimiento de cubos
		4.84	Se presentó sobre-elevación. No se observó movimiento de cubos
11.00		2.88	No se presentó sobre-elevación. No se observó movimiento de cubos
		3.56	Se presentó sobre-elevación. No se observó movimiento de cubos
		3.72	Se presentó sobre-elevación. No se observó movimiento de cubos
	3.88	Se presentó sobre-elevación. No se observó movimiento de cubos	
+ 2.50	9.00	4.96	Se presentó sobre-elevación. No se observó movimiento de cubos
		5.36	Se presentó sobre-elevación. No se observó movimiento de cubos
		5.40	Se presentó sobre-elevación. No se observó movimiento de cubos
		5.52	Se presentó sobre-elevación. No se observó movimiento de cubos

Tabla No. 7.7 Observaciones de los ensayos de estabilidad con la alternativa No. 1.

PROFUNDIDAD DE LA BERMA (m)	NIVELES DEL MAR (m)	T=8.00 seg.		T=9.00 seg.		T=11.00 seg.		OBSERVACIONES
		ALTURA DE OLA (m)	NUMERO DE REBASES	ALTURA DE OLA (m)	NUMERO DE REBASES	ALTURA DE OLA (m)	NUMERO DE REBASES	
-6.62	0.00	3.80		4.16	19	4.08	12	Para H=3.80 y T=8.00 no se presentó sobre elevación. No hubo movimiento de cubos. Para H=4.16 y T=9.00, se presentó ligera sobre elevación. No hubo movimiento de cubos. Para H=4.08 y T=11.00, se presentó ligera sobre elevación. No hubo movimiento de cubos.
	+1.70	4.48	86	4.80	132	3.88	66	Para H=4.48 y T=8.00, se presentó sobre elevación provocando movimiento de piedra en la corona. No hubo movimiento de cubos. Para H=4.80 y T=9.00, se presentó sobre elevación provocando movimiento de piedra en la corona. No hubo movimiento de cubos. Para H=3.88 y T=11.00, se presentó sobre elevación provocando movimiento de piedra en la corona. No hubo movimiento de cubos.
	+2.50	5.48	250	5.40	230	4.20	177	Para H=5.48 y T=8.00, se presentó sobre elevación provocando movimiento de piedra en la corona. No hubo movimiento de cubos. Para H=5.40 y T=9.00, se presentó sobre elevación provocando movimiento de piedra en la corona. No hubo movimiento de cubos. Para H=4.20 y T=11.00 se presentó sobre elevación provocando movimiento de piedra en la corona. No hubo movimiento de cubos.
-4.99	0.00	3.80		4.16	22	4.08	13	Para H=3.80 y T=8.00 no se presentó sobre elevación. No hubo movimiento de cubos. Para H=4.16 y T=9.00, se presentó ligera sobre elevación. No hubo movimiento de cubos. Para H=4.08 y T=11.00 se presentó ligera sobre elevación. No hubo movimiento de cubos.
	+1.70	4.48	121	4.80	135	3.88	114	Para H=4.48 y T=8.00, se presentó sobre elevación provocando movimiento de piedra en la corona. No hubo movimiento de cubos. Para H=4.80 y T=9.00, se presentó sobre elevación provocando movimiento de piedra en la corona. No hubo movimiento de cubos. Para H=3.88 y T=11.00, se presentó sobre elevación provocando movimiento de piedra en la corona. No hubo movimiento de cubos.
	+2.50	5.48	295	5.40	288	4.20	201	Para H=5.48 y T=8.00, se presentó sobre elevación provocando movimiento de piedra en la corona. No hubo movimiento de cubos. Para H=5.40 y T=9.00, se presentó sobre elevación provocando movimiento de piedra en la corona. Se observó el movimiento de un cubo. Para H=4.20 y T=11.00, se presentó sobre elevación provocando movimiento de piedra en la corona. Se observó el movimiento de dos cubos.

Tabla 7.8 Observaciones de los ensayos de estabilidad con la Alternativa No. 2.

PROFUNDIDAD DE LA BERMA (m)	NIVELES DEL MAR (m)	T=8.00 seg.		T=9.00 seg.		T=11.00 seg.		OBSERVACIONES
		ALTURA DE OLA (m)	NUMERO DE REBASES	ALTURA DE OLA (m)	NUMERO DE REBASES	ALTURA DE OLA (m)	NUMERO DE REBASES	
-3.37	0.00	3.80		4.16	11	4.08	6	Para H-3.80 y T-8.0, no se presentó sobre elevación. Se observó el movimiento de dos cubos en la tercera capa de la Berma. Para H-4.16 y T-9.0, se presentó ligera sobre elevación. No hubo movimiento de cubos. Para H-4.08 y T-11.0, se presentó ligera sobre elevación. Se observó el movimiento de dos cubos en la tercera capa de la Berma.
	-1.70	4.48	106	4.80	122	3.88	91	Para H-4.48 y T-8.0, se presentó sobre elevación provocando movimiento de piedra en la corona. No hubo movimiento de cubos. Para H-4.80 y T-9.0, se presentó sobre elevación provocando movimiento de piedra en la corona. No hubo movimiento de cubos. Para H-3.88 y T-11.0, se presentó sobre elevación provocando movimiento de piedra en la corona. No hubo movimiento de cubos.
	-2.50	5.48	302	5.40	260	4.20	224	Para H-5.48 y T-8.0, se presentó sobre elevación provocando movimiento de piedra en la corona. No hubo movimiento de cubos. Para H-5.40 y T-9.0, se presentó sobre elevación provocando movimiento de piedra en la corona. No hubo movimiento de cubos. Para H-4.20 y T-11.0, se presentó sobre elevación provocando movimiento de piedra en la corona. Se observó el movimiento de tres cubos. Uno en la corona y uno en la tercera capa de la Berma.

bla 7.8 (Continuación) Observaciones de los ensayos de estabilidad con la Alternativa No. 2.

NIVEL DEL MAR (m)	T (seg)	H (m)	OBSERVACIONES
0.00 (N.B.M.)	8.00	3.64	No se presentó sobre-elevación. No se observó movimiento de cubos.
		3.80	No se presentó sobre-elevación. No se observó movimiento de cubos.
	9.00	3.88	Se presentó sobre elevación. No se observó movimiento de cubos.
		4.16	Se presentó sobre-elevación. No se observó movimiento de cubos.
+ 1.70	8.00	4.20	Se presentó sobre-elevación. No se observó movimiento de cubos.
		4.48	Se presentó sobre-elevación. No se observó movimiento de cubos.
	9.00	4.52	Se presentó sobre elevación provocando movimiento de piedra en la corona. No se observó movimiento de cubos.
		4.80	Se presentó sobre-elevación provocando movimiento de piedra en la corona. No se observó movimiento de cubos.
	11.00	3.56	Se presentó sobre-elevación. Se observó el movimiento de un cubo.
		3.88	Se presentó sobre-elevación. No se observó movimiento de cubos.
+ 2.50	8.00	4.56	Se presentó sobre elevación. No se observó movimiento de cubos.
		5.48	Se presentó sobre elevación provocando movimiento de piedra en la corona. No se observó movimiento de cubos.
	9.00	4.96	Se presentó sobre-elevación. No se observó movimiento de cubos.
		5.40	Se presentó sobre elevación provocando movimiento de piedra en la corona. No se observó movimiento de cubos.
		5.52	Se presentó sobre-elevación provocando movimiento de piedra en la corona. No se observó movimiento de cubos.
	11.00	3.80	Se presentó sobre-elevación. No se observó movimiento de cubos.
		4.20	Se presentó sobre elevación provocando movimiento de piedra en la corona. No se observó movimiento de cubos.
		4.68	Se presentó sobre elevación provocando movimiento de piedra en la corona. No se observó movimiento de cubos.

Tabla 7.9 Observaciones de los ensayos de estabilidad con la Alternativa No. 3.

PROFUNDIDAD DE LA BERMA (m)	NIVELES DEL MAR (m)	T=8.00 seg.		T=9.00 seg.		T=11.00 seg.		OBSERVACIONES
		ALTURA DE OLA (m)	NUMERO DE REBASES	ALTURA DE OLA (m)	NUMERO DE REBASES	ALTURA DE OLA (m)	NUMERO DE REBASES	
-4.00	0.00	3.80		4.16	17	4.08	15	Para H=3.80 y T=8.0 no se presento sobre elevacion. No hubo movimiento de cubos. Para H=4.16 y T=9.0 se presento ligera sobre elevacion. No hubo movimiento de cubos. Para H=4.08 y T=11.0, se presento ligera sobre elevacion. No hubo movimiento de cubos.
	+ 1.70	4.48	98	4.80	115	3.88	76	Para H=4.48 y T=8.0, se presento sobre elevacion provocando movimiento de piedras en la corona. No hubo movimiento de cubos. Para H=4.80 y T=9.0 se presento sobre elevacion provocando movimiento de piedras en la corona. No hubo movimiento de cubos. Para H=3.88 y T=11.0, se presento sobre elevacion provocando movimiento de piedras en la corona. No hubo movimiento de cubos.
	+ 2.50	5.48	251	5.40	213	4.20	157	Para H=5.48 y T=8.0 se presento sobre elevacion provocando movimiento de piedras en la corona. No hubo movimiento de cubos. Para H=5.40 y T=9.0 se presento sobre elevacion provocando movimiento de piedras en la corona. No hubo movimiento de cubos. Para H=4.20 y T=11.0 se presento sobre elevacion provocando movimiento de piedras en la corona. No hubo movimiento de cubos.
-3.00	0.00	3.80		4.16	21	4.08	14	Para H=3.80 y T=8.0, no se presento sobre elevacion. Se observo el movimiento de un cubo. Para H=4.16 y T=9.0, se presento ligera sobre elevacion. No hubo movimiento de cubos. Para H=4.08 y T=11.0, se presento ligera sobre elevacion. No hubo movimiento de cubos.
	+ 1.70	4.48	101	4.80	117	3.88	82	Para H=4.48 y T=8.0, se presento sobre elevacion provocando movimiento de piedras en la corona. No hubo movimiento de cubos. Para H=4.80 y T=9.0, se presento sobre elevacion provocando movimiento de piedras en la corona. No hubo movimiento de cubos. Para H=3.88 y T=11.0, se presento sobre elevacion provocando movimiento de piedras en la corona. Se observo el movimiento de cinco cubos.
	+ 2.50	5.48	282	5.40	268	4.20	195	Para H=5.48 y T=8.0, se presento sobre elevacion provocando movimiento de piedras en la corona. No hubo movimiento de cubos. Para H=5.40 y T=9.0, se presento sobre elevacion provocando movimiento de piedras en la corona. Se observo el movimiento de un cubo. Para H=4.20 y T=11.0 se presento sobre elevacion provocando movimiento de piedras en la corona. Se observo el movimiento de dos cubos.

Tabla 7.10 Observaciones de los ensayos de estabilidad con la Alternativa No. 4.

PROFUNDIDAD DE LA BERMA (m)	NIVELES DEL MAR (m)	T=8.00 seg.		T=9.00 seg.		T=11.00 seg.		OBSERVACIONES
		ALTURA DE OLA (m)	NUMERO DE REBASES	ALTURA DE OLA (m)	NUMERO DE REBASES	ALTURA DE OLA (m)	NUMERO DE REBASES	
-2.00	0.00	3.80	12	4.16	18	4.08	16	Para H=3.80 y T=8.0, se presentó ligera sobre elevación. No hubo movimiento de cubos. Para H=4.16 y T=9.0, se presentó ligera sobre elevación. No hubo movimiento de cubos. Para H=4.08 y T=11.0, se presentó ligera sobre elevación. No hubo movimiento de cubos.
	-1.70	4.48	122	4.80	134	3.88	114	Para H=4.48 y T=8.0, se presentó sobre elevación provocando movimiento de piedra en la corona. No hubo movimiento de cubos. Para H=4.80 y T=9.0 se presentó sobre elevación provocando movimiento de piedra en la corona. Se observó el movimiento de dos cubos. Para H=3.88 y T=11.0, se presentó sobre elevación provocando movimiento de piedra en la corona. Se observó el movimiento de dos cubos.
	-2.50	5.48	315	5.40	280	4.20	231	Para H=5.48 y T=8.0, se presentó sobre elevación provocando movimiento de piedra en la corona. No hubo movimiento de cubos. Para H=5.40 y T=9.0, se presentó sobre elevación provocando movimiento de piedra en la corona. Se observó el movimiento de dos cubos. Para H=4.20 y T=11.0, se presentó sobre elevación provocando movimiento de piedra en la corona. Se observó el movimiento de tres cubos.

Tabla 7.10 (Continuación)

Observaciones de los ensayos de estabilidad con la Alternativa No. 4.

NIVEL DEL MAR (m)	T (seg)	H (m)	NUMERO DE REBASES	OBSERVACIONES
0.00 (N.B.M.)	8.00	3.80	5	Se presentó ligera sobre-elevación. No se observó movimiento de cubos.
	9.00	4.16	21	Se presentó ligera sobre-elevación. No se observó movimiento de cubos.
	11.00	4.08	12	Se presentó ligera sobre-elevación. No se observó movimiento de cubos.
+ 1.70	8.00	4.48	137	Se presentó sobre-elevación provocando movimiento de piedra en la corona. No se observó movimiento de cubos.
	9.00	4.80	151	Se presentó sobre-elevación provocando movimiento de piedra en la corona. No se observó movimiento de cubos.
	11.00	3.88	107	Se presentó sobre-elevación provocando movimiento de piedra en la corona. No se observó movimiento de cubos.
+ 2.50	8.00	5.48	347	Se presentó sobre-elevación provocando movimiento de piedra en la corona. No se observó movimiento de cubos.
	9.00	5.40	276	Se presentó sobre-elevación provocando movimiento de piedra en la corona. Se observó el movimiento de dos cubos.
	11.00	4.20	203	Se presentó sobre-elevación provocando movimiento de piedra en la corona. No se observó movimiento de cubos.

Tabla 7.11 Observaciones de los ensayos de estabilidad con la Alternativa No. 5.

7.3.4.5. Resultados de los ensayos

De conformidad con los resultados obtenidos para cada una de las alternativas estudiadas, se obtuvieron los siguientes resultados:

ALTERNATIVA No. 1

La sección ensayada no presentó daño, aún para una ola de 5.36 m de altura, superior a la altura de la ola de diseño de 4.25 m de altura y 9.2 seg. de período.

Olas superiores a 5.36 m de altura, 9.00 seg. de período y nivel del mar de + 2.50 m, provocaron movimiento de algunos cubos sin llegar a causar daño al cuerpo del rompeolas.

Con el N.B.M. olas superiores a 4 m de altura y 11 seg. de período, lograron rebasar el coronamiento del rompeolas.

Con un nivel del mar de + 1.70 m y + 2.50 m, olas superiores a 2.88 m de altura asociadas con períodos de 8, 9 y 11 seg. logran rebasar el coronamiento del rompeolas.

ALTERNATIVA No. 2

La sección ensayada con una berma de cubos de 7.8 Ton. colocada al pie del rompeolas con una elevación de 6.62 m, no presentó daño aún para olas mayores de 5.36 m de altura asociadas con períodos de 8, 9 y 11 seg.

La sección ensayada con una berma de cubos de 7.8 Ton. colocada al pie del rompeolas con una elevación de 4.99 m, no presento daño aún para olas mayores a 3.88 m de altura, asociadas con períodos de 8, 9 y 11 seg. olas de 4.20 m de altura y 11 seg. de período provocan el movimiento de los cubos de la berma, sin llegar a causar daño.

La sección ensayada con una berma de cubos de 7.8 Ton. colocada al pie del rompeolas con una elevación de 3.37 m, no presento daño, aún para olas mayores a 3.88 m de altura asociadas con períodos de 8, 9 y 11 seg. olas de

3.8 m de altura y 8 seg. de período provocan el movimiento de los cubos de la berma, sin llegar a causar daño.

Con el N.B.M., olas de 8 seg. de período y 3.80 m de altura, no rebasaron el coronamiento del rompeolas.

Con el nivel del mar de + 1.70 m y + 2.50 m, olas con período de 9 y 11 seg. rebasan el coronamiento del rompeolas, siendo mayor dicho rebase cuando la berma se encuentra a la elevación de -3.37 m.

ALTERNATIVA No. 3

La sección del rompeolas ensayada con una capa inferior de cubos ranurados de concreto de 7.8 Ton. de peso y una capa superior de cubos ranurados de concreto de 10.4 Ton. de peso en la coraza, no presentó daño, aún para ola de 4.80 m de altura y nivel del mar de + 1.70 m.

Con un nivel del mar de + 2.50 m, olas superiores a 5.40 m de altura y 9 seg. de período provocan movimiento de algunos cubos de la parte superior de la corona del rompeolas, sin llegar a causar daño al cuerpo de la estructura.

En todos los ensayos realizados hubo rebase del oleaje sobre el coronamiento del rompeolas, siendo mayor con el nivel del mar de + de 2.50 m.

ALTERNATIVA No. 4

La sección ensayada con una berma de piedra de 1.49 a 2.77 Ton. de peso colocada al pie del rompeolas con una elevación de -4.00 m, no presentó daño, aún para olas mayores a 5.48 m de altura, asociadas con períodos 8, 9 y 11 seg.

La misma sección ensayada con el N.B.M., y con una elevación de la berma de -3.00 m, no presentó daño, aún para olas de 4.16 m de altura, asociada con períodos 8, 9 y 11 seg. con un nivel del mar de + 1.70 m, olas mayores de 3.88 m de altura asociadas con períodos de 9 y 11 seg. de período provocan el movimiento de los cubos de la parte superior de la coraza de la estructura, sin llegar a causar daño en el cuerpo del rompeolas.

La sección ensayada con una berma de piedra, colocada a la elevación de -2.00 m, no presentó daño, aún para olas mayores a 3.80 m de altura, asociadas con periodos 8 , 9 y 11 seg. olas mayores de 3.88 m de altura asociadas con periodos de 8 , 9 y 11 seg. provocan el movimiento de los cubos de la parte superior de la coraza, sin llegar a causar daño en el cuerpo del rompeolas.

Con el N.B.M. y elevaciones de la berma de piedra de -4.00 m y -3.00 , olas de 8 seg. de periodo y 3.80 m de altura, no rebasaron el coronamiento del rompeolas, excepto para el caso de la berma colocada a la elevación de -2.00 m.

Con el nivel del mar de $+1.70$ m y $+2.50$ m, olas con periodos de 9 y 11 seg., rebasan el coronamiento del rompeolas, siendo mayor dicho rebase cuando la berma se encuentra a la elevación de -2.00 m.

ALTERNATIVA No. 5

La sección del rompeolas ensayada con dos capas de cubos ranurados de concreto de 7.8 Ton. de peso en la coraza no presento daño, aún para una ola de 5.48 m de altura y 8 seg. de periodo y para niveles del mar de N.B.M. $+1.70$ m y $+2.50$ m.

En todos los ensayos realizados hubo rebase del oleaje sobre el coronamiento del rompeolas, siendo mayor con el nivel del mar de $+2.50$ m.

Conclusión parcial de las 5 alternativas planteadas.

De acuerdo con los ensayos realizados se puede concluir que:

- a) Los elementos de la coraza de la alternativa No. 1 compuestas por cubos ranurados de concreto de 10.4 Ton. son estables para las condiciones de oleaje de diseño.
- b) Los cubos ranurados de concreto de 7.8 Ton. considerados para la berma al pie del rompeolas en los ensayos de la alternativa No. 2 son estables para el oleaje de diseño del

rompeolas para todas las alternativas de berma ensayadas, siendo la altura de berma más apropiada la de 1.63 m con elevación de -6.62 m, ya que no provocó demasiado rebase sobre el coronamiento del rompeolas, ni se observa el movimiento de cubos de la berma.

- c) La capa de cubos ranurados de concreto de 10.4 Ton. de peso y la capa de cubos ranurados de 7.8 Ton. de peso colocados en la coraza de la estructura para los ensayos de la alternativa No. 3 son estables para las condiciones de oleaje de diseño.
- d) La berma de enrocamiento de 1.49 a 2.77 Ton. y alturas de 4.25, 5.25 y 6.25 m ensayadas en la alternativa No. 4 permanece estable para el oleaje de diseño, siendo la berma de 4.25 m de altura con elevación de -4.00 m la más apropiada para el cuerpo del rompeolas, ya que no se presenta el movimiento de las piedras del coronamiento de la berma ni provoca excesivo rebase del oleaje sobre el coronamiento del rompeolas.
- e) Los cubos ranurados de concreto de 7.8 Ton. de peso ensayados en la alternativa No. 5 para la coraza del cuerpo del rompeolas son estables para el oleaje de diseño.

7.4. Sección propuesta para el cuerpo del rompeolas

De acuerdo con los resultados de los ensayos de estabilidad de los elementos constitutivos de la coraza del rompeolas de protección, se propone considerar la sección transversal para el cuerpo del rompeolas que se muestra en la Fig. 7.13, que corresponde a la optimización de la sección de proyecto, en la cual se consideró la coraza compuesta por una capa de cubos ranurados de concreto de 7.8 Ton. y una capa de cubos ranurados de concreto de 10.4 Ton., colocando una berma al pie del rompeolas de 3.25 m de altura, a base de rocas del mismo peso de la capa secundaria del rompeolas, es decir, de 1.49 a 2.77 Ton. cuyo peso se revisó teóricamente por medio de la siguiente expresión:

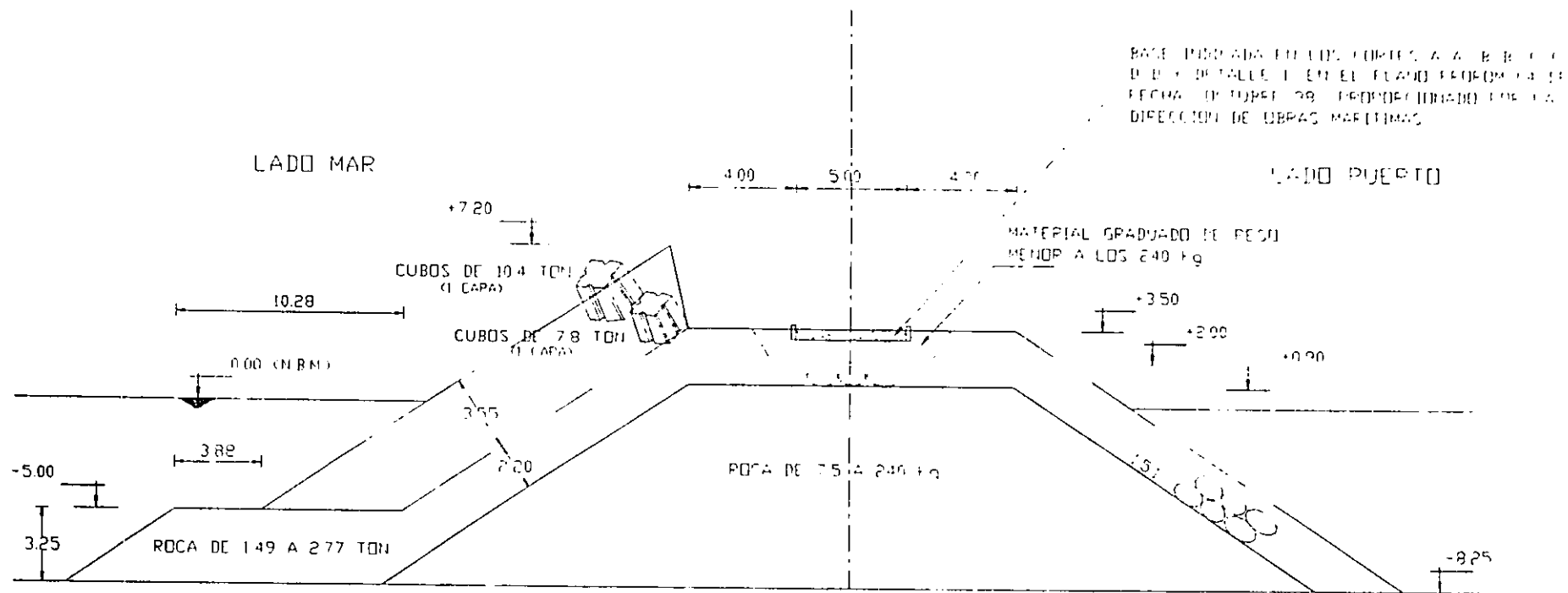


Fig. 7.13 Sección transversal propuesta para el cuerpo del rompeolas

$$W = \frac{\gamma_r H^{1/3}}{N_s^3 (S_r - 1)^3}$$

Donde:

- γ_r Peso específico de la roca igual a 2.6 Ton/ m³
- $H_{1/3}$ Altura de la ola de diseño igual a 4.25 m.
- S_r Densidad relativa del material
- N_s Igual a número de estabilidad determinado como:

$$N_s = \text{máx} \left[1.8 \left(1.3 \frac{1-k}{K^{1/3}} \frac{h'}{H_{1/3}} + 1.8 \exp \left[-1.5 \frac{(1-k)^2}{k^{1/3}} \frac{h'}{H_{1/3}} \right] \right) \right]$$

Donde K es un parámetro que se calcula con la siguiente ecuación:

$$k = \frac{4\pi h'/L}{\text{Sen } h(4\pi h'/L)} \text{ Sen}^2 \left(\frac{2\pi Bm}{L'} \right)$$

Donde h' es el tirante de agua sobre la berma, L' la longitud de la ola sobre la berma. Bm la longitud de la berma.

De acuerdo con las ecuaciones anteriores, se encontró que el peso de los elementos de la berma es de:

$$W = \frac{2.6 (4.25)^3}{(4.15)^3 (2.52-1)^3} = 0.79 \text{ Ton.}$$

El peso calculado con la ecuación anterior resulta inferior al mínimo de 1.49 Ton. que se propone para los elementos de la berma, con lo cual se concluye que la berma será estable.

8. OPERATIVIDAD

8.1. Condiciones de oleaje

De acuerdo con los datos de oleaje normal presentados en las tablas 4.1 a 4.5, se tiene que su porcentaje y tiempo de acción durante el año es como sigue:

DIRECCION	% DE ACCION	TIEMPO DE ACCION
N	18.48	67.45
NE	34.84	127.17
NW	9.53	34.78
W	6.34	23.14
E	30.81	112.46

Para el cálculo de la operatividad del puerto, se tomaron en cuenta las direcciones del oleaje de N, NE y NW, omitiendo las direcciones E y W por las razones expuestas en el inciso 4.1.

8.2. Zonas consideradas para el análisis

Para el cálculo de la operatividad por oleaje en el puerto, se tomaron en cuenta los paramentos de atraque siguientes:

- a) Ampliación de la terminación actual, considerada para el atraque de cruceros y contenedores (Zona II (a) y (b) en Fig. 7.1 respectivamente).
- b) Terminal actual, considerada para el atraque de cruceros (Zona III (c) en Fig. 7.1) y graneleros (Zona (d) en Fig. 7.1).
- c) Terminal petrolera, considerada para petroleros (Zona V en Fig. 7.1).

8.3. Oleaje permisible

Para el cálculo de la operatividad del puerto, se consideraron los oleajes permisibles obtenidos siendo los siguientes:

TERMINAL	ALTURA DE LA OLA PERMISIBLE (m)
Contenedores de 20,000 D.W.T.	0.50
Graneleros de 25,000 D.W.T.	1.00
Cruceros de 70,000 T.R.B.	0.75
Petroleros de 30,000 D.W.T.	1.20

8.4. Cálculo de la operatividad

Tomando como base el porcentaje de presentación del oleaje en aguas profundas de las tablas 4.1 a 4.5, los oleajes permisibles del inciso 8.3 y los coeficientes de agitación K_D obtenidos de los ensayos de agitación en modelos hidráulicos con taludes de dragado 1:1 que se presentan en las Fig. 7.3, 7.6 y 7.9, se obtuvieron los resultados que se dan en la tabla No. 8.1.

8.5. Resultados

De acuerdo con los cálculos realizados para la operatividad de agitación de oleaje en el puerto, los cálculos se resumen en la tabla No. 8.1, se tiene lo siguiente:

- a) Los resultados de los cálculos realizados considerando un talud de dragado de 1:1 para el canal de acceso y dársenas, arrojaron una operatividad anual del puerto de 18.42 % para la dirección N, 34.43 % para la dirección NE y 9.45 % para la dirección NW, dando un total de 93.11 % considerando la actuación de la dirección E. La no operatividad del puerto resultó de 0.06 % para la dirección N, 0.41 % para la dirección NE y 0.08 % para la dirección NW, dando un total de 0.55 % para las direcciones analizadas más 6.34 % para la dirección W para la cual el puerto no cuenta con protección, con la cual se tendrá un % de no operatividad en el puerto de 6.89 %, equivalente a 25.15 días al año.

PERIODO	ZONA DE ATRAQUE	Hp(m)	DIRECCION DEL OLAJE											
			N				NE				NW			
			Ho(m)	K _o	OPERACION (%)	NO OPERACION (%)	Ho(m)	K _o	OPERACION (%)	NO OPERACION (%)	Ho(m)	K _o	OPERACION (%)	NO OPERACION (%)
8.00	Cruceros (Zona II a, Fig.7.1)	0.75	4.68	0.16	17.95	0	4.16	0.18	34.19	0	3.40	0.22	9.13	0.04
	Contenedores (Zona II b, Fig.7.1)	0.50	3.84	0.13	17.95	0	3.12	0.16	33.96	0.23	3.12	0.16	9.13	0.04
	Cruceros (Zona III c, Fig.7.1)	0.75	6.81	0.11	17.95	0	5.76	0.13	34.19	0	4.68	0.16	9.17	0
	Graneleros (Zona d, Fig.7.1)	1.00	11.11	0.09	17.95	0	9.09	0.11	34.18	0	6.25	0.16	9.17	0
	Petroleros (Zona V, Fig.7.1)	1.20	8.00	0.15	17.95	0	6.66	0.18	34.19	0	4.80	0.25	9.17	0
15.00	Cruceros (Zona II a, Fig.7.1)	0.75	3.00	0.25	0.07	0	3.00	0.25	0.12	0.07	2.67	0.28	0.04	0
	Contenedores (Zona II b, Fig.7.1)	0.50	2.50	0.20	0.01	0.06	2.50	0.20	0.08	0.11	2.17	0.23	0.04	0
	Cruceros (Zona III c, Fig.7.1)	0.75	3.75	0.20	0.07	0	3.75	0.20	0.19	0	3.75	0.20	0.04	0
	Graneleros (Zona d, Fig.7.1)	1.00	7.14	0.14	0.07	0	7.14	0.14	0.19	0	5.00	0.20	0.04	0
	Petroleros (Zona V, Fig.7.1)	1.20	6.00	0.20	0.07	0	5.00	0.24	0.19	0	4.00	0.30	0.04	0
21.00	Cruceros (Zona II a, Fig.7.1)	0.75	3.40	0.22	0.43	0	3.00	0.25	0.44	0	4.16	0.18	0.30	0
	Contenedores (Zona II b, Fig.7.1)	0.50	2.50	0.20	0.43	0	2.17	0.23	0.44	0	3.33	0.15	0.30	0
	Cruceros (Zona III c, Fig.7.1)	0.75	3.75	0.20	0.43	0	3.26	0.23	0.44	0	5.00	0.15	0.30	0
	Graneleros (Zona d, Fig.7.1)	1.00	5.00	0.20	0.43	0	6.66	0.15	0.44	0	6.66	0.15	0.30	0
	Petroleros (Zona V, Fig.7.1)	1.20	5.21	0.25	0.43	0	4.80	0.25	0.44	0	6.67	0.18	0.30	0

Tabla 8.1 Porcentajes de operación y no operación en las áreas de atraque del puerto, considerando taludes de dragado de 1:1

De acuerdo con los resultados anteriores se puede decir que las zonas de ataque consideradas en el proyecto quedan prácticamente protegidas para los diferentes oleajes del N, NE y NW estudiados ya que la operatividad del puerto determinado fue de 93.11 % equivalente a 340 días al año.

8.6. Revisión

Revisión del dimensionamiento y peso del enrocamiento propuesto para la berma en el cuerpo del rompeolas del proyecto de ampliación de una terminal de transbordadores.

Para el dimensionamiento de la berma y peso de los elementos de enrocamiento propuestos, se utilizó el procedimiento que se describe a continuación:

1. Altura de la berma

Para la altura de la berma se consideró inicialmente formada por dos capas horizontales de rocas del mismo peso del indicado en el proyecto para la capa secundaria del cuerpo del rompeolas, de 2.77 a 1.49 Ton. con peso medio de 2.13 Ton.

De acuerdo con lo anterior y tomando en cuenta las recomendaciones del Shore Protection Manual se calculó el espesor de las dos capas iniciales y capas subsecuentes de roca consideradas, con la siguiente ecuación:

$$e = n k_{\Delta} \left(\frac{W}{W_r} \right)^{1/3}$$

Siendo:

- n = Número de capas consideradas
- k_{Δ} = Coeficiente de capa
- W = Peso medio del elemento considerado
- W_r = Densidad relativa del material

Aplicando la ecuación anterior, se obtuvieron los siguientes resultados:

ESPESOR	ALTURA DE LA BERMA
2 capas	2.20 m
3 capas	3.25 m
4 capas	4.30 m
5 capas	5.38 m

2. Ancho de la berma

Para el ancho de la berma se utilizó el mismo criterio mencionado en el punto 1, proponiendo el número de capas sobre el talud del rompeolas y calculando la distancia horizontal al pie del rompeolas del espesor de cada capa, obteniéndose los resultados que se indican a continuación:

ESPESOR	ANCHO DE LA BERMA
1 capa	2.20 M
2 capas	3.25 M
3 capas	4.30 M

3. Peso de los elementos de la berma

El peso mínimo requerido para los elementos individuales de enrocamiento para la berma se cálculo con el método propuesto por Tanimoto, el cual se basa en una fórmula similar a la de Hudson, la cual se expresa como:

$$W = \frac{\gamma_r H^{1/3}}{N_s^3 (S_r - 1)^3}$$

Donde:

- γ_r Peso específico de la roca
- $H_{1/3}$ Altura de la ola de diseño
- S_r Densidad relativa del material
- N_s Número de estabilidad, determinado como:

$$N_s = \text{máx} \left[1.8 \left(\frac{1.3}{K^{1/3}} \frac{1-k}{H_{1/3}} \frac{h'}{H_{1/3}} + 1.8 \exp \left[-1.5 \frac{(1-k)^2}{k^{1/3}} \frac{h'}{H_{1/3}} \right] \right) \right]$$

Donde k es un parámetro que se calcula con la siguiente ecuación:

$$k = \frac{4\pi h'/L}{\text{Sen } h(4\pi h'/L)} \text{Sen}^2 \left(\frac{2\pi B_m}{L'} \right)$$

Donde h' es el tirante de agua sobre la berma, L' la longitud de la ola sobre la berma, y B_m la anchura de la berma.

Considerando la ola de diseño de 4.25 m y 9.2 seg. de periodo, así como el nivel de tormenta + 1.70 m sobre el N.B.M. y aplicando la ecuación tipo Hudson anterior, se encontraron los pesos mínimos requeridos para el enrocamiento en cada una de las bermas analizadas que se muestran en la tabla No. 1.

ANCHO DE LA BERMA EN METROS	ALTURA DE LA BERMA EN METROS			
	2.20	3.25	4.30	5.38
1.94	0.090	0.166	0.340	0.764
3.88	0.420	0.790	1.610	3.350
5.81	1.173	2.159	3.984	6.564

Tabla No 1. Peso en toneladas del enrocamiento en las bermas analizadas.

De la tabla anterior se puede observar que la altura y ancho de la berma tiene influencia en el peso de los elementos constitutivos de la misma, esto es, mientras más ancha y más alta es la berma los pesos requeridos de enrocamiento son mayores.

Tomando en cuenta el peso mínimo de 1.49 Ton. para el enrocamiento propuesto para la berma, se tienen las siguientes alternativas para el dimensionamiento de la misma:

ESTE TRABAJO NO DEBE
 SER REPRODUCIDO
 SIN EL CONSENTIMIENTO
 DEL AUTOR

ALTERNATIVA	ANCHO DE LA BERMA	ALTURA MAXIMA DE LA BERMA	PESO MINIMO
1	1.94 m	5.38 m	0.764 Ton.
2	3.88 m	3.25 m	0.790 Ton.
3	5.81 m	2.20 m	1.170 Ton.

Por otro lado, de conformidad con los ensayos de estabilidad de los elementos de coraza realizados para el cuerpo del rompeolas, se observó que al incrementar la altura de la berma a más de 4.00 m, el rebasamiento del oleaje sobre el coronamiento del rompeolas aumentaba, por lo que de acuerdo con lo anterior y con objeto de evitar el rebasamiento excesivo del oleaje, se optó por seleccionar una berma de 3.25 m de alto y 3.88 m de ancho para el cuerpo del rompeolas, cuya forma y dimensiones se indican en la Fig. 7.13.

9. CONCLUSIONES

De acuerdo con los estudios de agitación de oleaje y estabilidad de los elementos de coraza del rompeolas de protección, así como de los resultados de los cálculos de operatividad del proyecto de ampliación del puerto se tienen las siguientes conclusiones.

1) Conclusiones del estudio de agitación de oleaje

- Los taludes de dragado de 3:1, 1:1 y verticales considerados para el canal de acceso y dársenas, probaron tener poca influencia en la penetración de oleaje en el puerto.
- Para las tres direcciones de oleaje ensayadas, N, NE y NW, el período de ola de 8 seg. provocó los menores coeficientes de agitación en el interior del puerto.
- El oleaje del NE provoca los mayores coeficientes de agitación en el canal de acceso frente al morro del rompeolas, debido al choque del oleaje sobre el rompeolas de protección, el cual por su posición perpendicular al canal, conduce el oleaje hacia el centro del mismo.

ALTERNATIVA	ANCHO DE LA BERMA	ALTURA MAXIMA DE LA BERMA	PESO MINIMO
1	1.94 m	5.38 m	0.764 Ton.
2	3.88 m	3.25 m	0.790 Ton.
3	5.81 m	2.20 m	1.170 Ton.

Por otro lado, de conformidad con los ensayos de estabilidad de los elementos de coraza realizados para el cuerpo del rompeolas, se observó que al incrementar la altura de la berma a más de 4.00 m, el rebasamiento del oleaje sobre el coronamiento del rompeolas aumentaba, por lo que de acuerdo con lo anterior y con objeto de evitar el rebasamiento excesivo del oleaje, se optó por seleccionar una berma de 3.25 m de alto y 3.88 m de ancho para el cuerpo del rompeolas, cuya forma y dimensiones se indican en la Fig. 7.13.

9. CONCLUSIONES

De acuerdo con los estudios de agitación de oleaje y estabilidad de los elementos de coraza del rompeolas de protección, así como de los resultados de los cálculos de operatividad del proyecto de ampliación del puerto se tienen las siguientes conclusiones.

1) Conclusiones del estudio de agitación de oleaje

- Los taludes de dragado de 3:1, 1:1 y verticales considerados para el canal de acceso y dársenas, probaron tener poca influencia en la penetración de oleaje en el puerto.
- Para las tres direcciones de oleaje ensayadas, N, NE y NW, el período de ola de 8 seg. provocó los menores coeficientes de agitación en el interior del puerto.
- El oleaje del NE provoca los mayores coeficientes de agitación en el canal de acceso frente al morro del rompeolas, debido al choque del oleaje sobre el rompeolas de protección, el cual por su posición perpendicular al canal, conduce el oleaje hacia el centro del mismo.

- Los periodos de ola de 15 y 21 seg. para las tres direcciones de oleaje ensayadas provocaron los mayores coeficientes de agitación en el interior del puerto, sin embargo, se tiene una disminución de más del 50 % de las alturas de ola de la zona exterior en las zonas protegidas del puerto.
- De acuerdo con lo señalado en el punto anterior, las zonas de muelle quedan protegidas para las direcciones de oleaje estudiadas y se puede concluir que la ampliación de la terminal actual al provocar la disminución del oleaje en el porcentaje arriba señalado, no ocasionará ningún tipo de problema a la línea de costa actual, ya que el efecto de la obra está limitado a las áreas circundantes cercanas al proyecto de ampliación.
- Con fundamento en los puntos anteriores, se puede concluir que el arreglo del rompeolas del proyecto de ampliación de la terminal portuaria cumple con las condiciones de proteger contra el oleaje al puerto.

De acuerdo con las conclusiones señaladas en el primer punto, se recomienda considerar para el dragado del canal de acceso y dársenas un talud de 1:1 en lugar de 3:1 o vertical, ya que el primero implicaría mayor volumen del dragado y el segundo es más desfavorable desde el punto de vista de la reflexión del oleaje.

2) Conclusiones del estudio de estabilidad

De acuerdo con los ensayos de estabilidad realizados en modelos hidráulicos para el cuerpo y morro del rompeolas de protección, se tienen las siguientes conclusiones:

- Bajo las condiciones de oleaje con incidencia oblicua (dirección N) en el rompeolas y con incidencia perpendicular (dirección NE) a dicha estructura, en los ensayos de estabilidad tridimensional, los cubos ranurados de concreto de 10.4 Ton. colocados al azar en el morro y cuerpo del rompeolas, permanecieron estables aún para una ola de 4.84 m de altura y 11 seg. de período, con nivel del mar de + 1.70 m.

- Respecto al Run-up del oleaje (alcance máximo de ascenso del oleaje sobre el talud del rompeolas), éste alcanzó a rebasar el coronamiento de la estructura ubicada a + 7.20 m sobre el N.B.M. para condiciones del nivel del mar de + 1.70 m y alturas de ola superiores a 2.30 m.
- Bajo el régimen de oleaje perpendicular (dirección NE) al que fue sometido el cuerpo de la estructura durante los ensayos de estabilidad bidimensional, los cubos ranurados de concreto de 10.4 Ton. permanecieron estables tanto para la alternativa No. 1 (sección de proyecto), como para las alternativas 2, 3 y 4 (secciones de proyecto modificadas con bermas al pie del rompeolas y una capa de cubos de 7.8 Ton. como primera capa de coraza) las alternativas anteriores se ensayaron bajo condiciones máximas de oleaje de 5.52 m de altura y nivel de tormenta de + 2.50 m, las cuales serían las más desfavorables que probablemente se podrían presentar en el sitio.
- Con respecto a la alternativa No. 5 ensayada con dos capas de cubos ranurados de concreto de 7.8 Ton. colocados al azar sobre la coraza del rompeolas, estos permanecieron estables bajo condiciones máximas de oleaje de 5.48 m de altura y nivel del mar de + 2.50 m.
- Para el caso de los ensayos con berma al pie del rompeolas a base de cubos ranurados de concreto de 7.8 Ton. se pudo observar que el Run-Down del oleaje (nivel más bajo del oleaje al descender sobre el talud de la estructura) provoca el movimiento de algunos cubos con la berma a las elevaciones de -4.99 m y -3.37 m respectivamente.
- Para el caso de los ensayos con berma al pie del rompeolas, a base de enrocamiento de 1.49 a 2.77 Ton. se pudo observar que el Run-Down del oleaje no provocó el movimiento del enrocamiento de la berma, sin embargo, en el caso de rebases del oleaje, estos fueron máximos con una elevación de berma de -2.00 m, y mínimos con una elevación de berma de -4.00 m.

De acuerdo con los puntos anteriores se desprenden los comentarios siguientes:

- a) Utilizar para el cuerpo de rompeolas, el diseño de la sección transversal compuesta por una capa de cubos ranurados de concreto de 7.8 Ton. y una capa de cubos ranurados de concreto de 10.4 Ton. en la coraza y berma de piedra de 1.49 a 2.77 Ton. al pie del rompeolas, con elevación máxima de la berma de -5.00 m. como se muestra en la Fig. 7.13.
- b) Para el morro del rompeolas se recomienda la sección transversal del proyecto (ver alternativa 1 en Fig. 7.12).

3) Conclusiones del cálculo de operatividad por oleaje

En base a los cálculos de operatividad del puerto se tienen las siguientes conclusiones:

- a) Bajo condiciones de oleaje normal, y considerando un talud de dragado de 1:1, la operatividad anual del puerto se estimó en 93.11 % por lo que el porcentaje de no operatividad será del 6.89 % correspondiendo el 6.34 a la acción del oleaje a la dirección W para la cual el puerto no se encuentra protegido y 0.55 % para las direcciones N, NE y NW analizada.
- b) De acuerdo con el punto anterior, se puede concluir que el arreglo del proyecto ampliación de la terminal cumple con las condiciones para permitir la operatividad de las embarcaciones en los muelles proyectados.

BIBLIOGRAFIA

1. INGENIERIA DE COSTAS. Frias Armando y Gonzalo Moreno, Editorial Limusa. 1988.
2. MANUAL DE OBRAS MARITIMAS. Editado por Comisión Federal de Electricidad.
3. PRACTICAL COMPUTATION METHOD OF DIRECTIONAL RANDOM WAVE TRANSFORMATION. Takayama. Vol. 30 No. 1 Report of Port and Harbour Research Institute. Ministry of Transport, Japan. 1991.
4. DIFRACCION DEL OLEAJE Y CALCULO DE LA DIFRACCION POR COMPUTADORA. Toshihiko Nagai. Valente Torres. Curso internacional de capacitación en ingeniería hidráulica portuaria. Editado por Agencia de Cooperación Internacional del Japón y Puertos Mexicanos. 1988.
5. SHORE PROTECTION MANUAL. U.A. Army Coastal Engineering Research Center. Vol. II 1984.
6. RANDOM SEAS AND DESIGN OF MARITIME STRUCTURES. Yoshimi Goda. University of Tokyo Pres. 1985.