

14. 151



Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ingeniería

Cálculo de las solicitaciones que actúan
sobre un muelle.



T E S I S
Que para obtener el Título de
INGENIERO CIVIL
P r e s e n t a
Antonio Peralta Ortíz

México, D. F.

1986



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 está 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.

I N D I C E

CAPITULO 1	INTRODUCCION	1
1.1	Antecedentes.....	1
1.2	Objetivo.....	3
CAPITULO 2	RECOPIACION DE INFORMACION.....	5
2.1	Información de viento.....	5
2.2	Información de oleaje.....	5
2.3	Información batimétrica.....	10
2.4	Estratigrafía.....	10
2.5	Mareas.....	12
CAPITULO 3	ANALISIS DE LA INFORMACION.....	28
3.1	Análisis de la información del viento.....	28
3.2	Análisis de la información de oleaje.....	30
3.2.1	Oleaje normal.....	30
3.2.2	Oleaje extraordinario.....	34
3.3	Refracción de oleaje.....	47
3.4	Análisis de la marea.....	55
3.5	Análisis del perfil estratigráfico.....	56
3.6	Análisis de agitación.....	57
CAPITULO 4	CALCULO DE LAS SOLICITACIONES.....	64
4.1	Cargas muertas.....	64
4.2	Carga viva vertical.....	64
4.3	Cargas vivas horizontales.....	64
4.3.1	Fuerza de atraque.....	65
4.3.2	Fuerza inducida por el viento.....	73
4.3.3	Fuerza tractiva.....	78

4.3.4	Fuerza inducida por la corriente.....	78
4.3.5	Fuerza debida al oleaje.....	82
4.3.6	Fuerza sísmica.....	85
CAPITULO 5 CONCLUSIONES.....		86
APENDICE A. TEORIA DEL OLEAJE DE PEQUEÑA AMPLITUD.....		88
A.1	Fórmulas generales.....	88
A.2	Presión que posee una ola progresiva.....	94
A.3	Energía de la onda.....	95
A.4	Clasificación del oleaje de acuerdo a su profundidad relativa.....	96
APENDICE B. REFRACCION DEL OLEAJE.....		97
B.1	Construcción gráfica del diagrama de refracción por el método de frentes de onda.....	101
B.2	Construcción gráfica del diagrama de refracción por el método de ortogonales o rayos de ola.....	103
REFERENCIAS.....		112

1. INTRODUCCION

1.1 Antecedentes

El incremento que en los últimos años ha registrado el tu rismo marítimo en nuestro país y que beneficia la economía re gional y estatal, ha determinado la necesidad de construir in fra estructura portuaria que propicie el desarrollo de esta ac tividad económica.

Datos estadísticos señalan que durante el período compre n dido entre 1982 y 1984 el movimiento de turistas por vía ma ri tima en nuestro país ha tenido un incremento del 83.59% con -- una derrama económica muy importante (ver tabla 1.1).

Puerto Vallarta, Jal. se encuentra ubicado en el litoral del Pacífico y es un punto de escala muy importante dentro de la ruta seguida por grandes embarcaciones turísticas.

El incremento en número (ver tabla 1.2) y tamaño de las em barcaciones aunado a que el puerto cuenta con un solo muelle sobre el que pueden arribar cruceros del tipo Princess, ha oca sionado que al presentarse algunos barcos en forma simultánea, tengan que fondear en las inmediaciones del puerto; por lo an terior, es obvio señalar la necesidad de adecuar y construir in stalaciones portuarias que permitan alojar dentro del recin to tres barcos al mismo tiempo, de forma que faciliten sus --

AÑO	No. DE PASAJEROS	INCREMENTO EN PORCIENTO (con respecto a 1982)
1982	174,305	- - - -
1983	203,107	16.52
1984	320,000	83.59

Tabla 1.1 Crecimiento del número de pasajeros que visitan por mar a México (Fuente de información, SCT).

AÑOS	1983	1984	1985	1986	1987	1988
No. DE BARCOS	110	200	220	242	266	293
BARCOS ATRACADOS	57	104	114	126	138	152
BARCOS FONDEADOS	53	96	106	116	128	141
No. DE PASAJEROS	88,000	160,000	176,000	193,600	212,800	234,400

Tabla 1.2 Pronóstico de movimiento de cruceros turísticos en Vallarta, Jal. (Fuente de información, SCT).

maniobras de atraque y amarre, reduzcan los riesgos de desembarco y den comodidad a los visitantes.

Con objeto de permitir el acceso a cruceros de 245 m de eslora, 10.50 m de calado, 30.50 m de manga y 18 m de puntal, se contemplan 2 etapas; una a corto plazo en la cual se profundizará la dársena hasta la cota -12 m (referida al nivel de bajamar media inferior, NBMÍ), se construirá un nuevo muelle localizado en la zona noreste de la bahía (ver fig 1.1) y se colocarán varios duques de alba de amarre en los lugares mostrados en la fig 1.1', donde también se señala el camino de acceso al nuevo muelle y el canal de navegación que, en la etapa a largo plazo, se dragará para dar acceso a las embarcaciones hacia el estero "El Salado", el cual permitirá una futura ampliación del puerto.

1.2 OBJETIVO.

En este trabajo se describe en detalle la forma en que deben calcularse las solicitaciones que son necesarias para realizar el análisis y el diseño de un muelle. Este cálculo se realizará con base al caso práctico citado y para ello se manejarán fundamentalmente conceptos de Ingeniería Marítima. El objetivo que se persigue con éste trabajo de tesis es conseguir que el estudiante de la carrera de Ingeniero Civil, el cual no le es muy común este cálculo, tenga muy claros los conceptos que aquí se manejan, para que pueda realizar en forma adecuada el análisis y el diseño de un muelle.

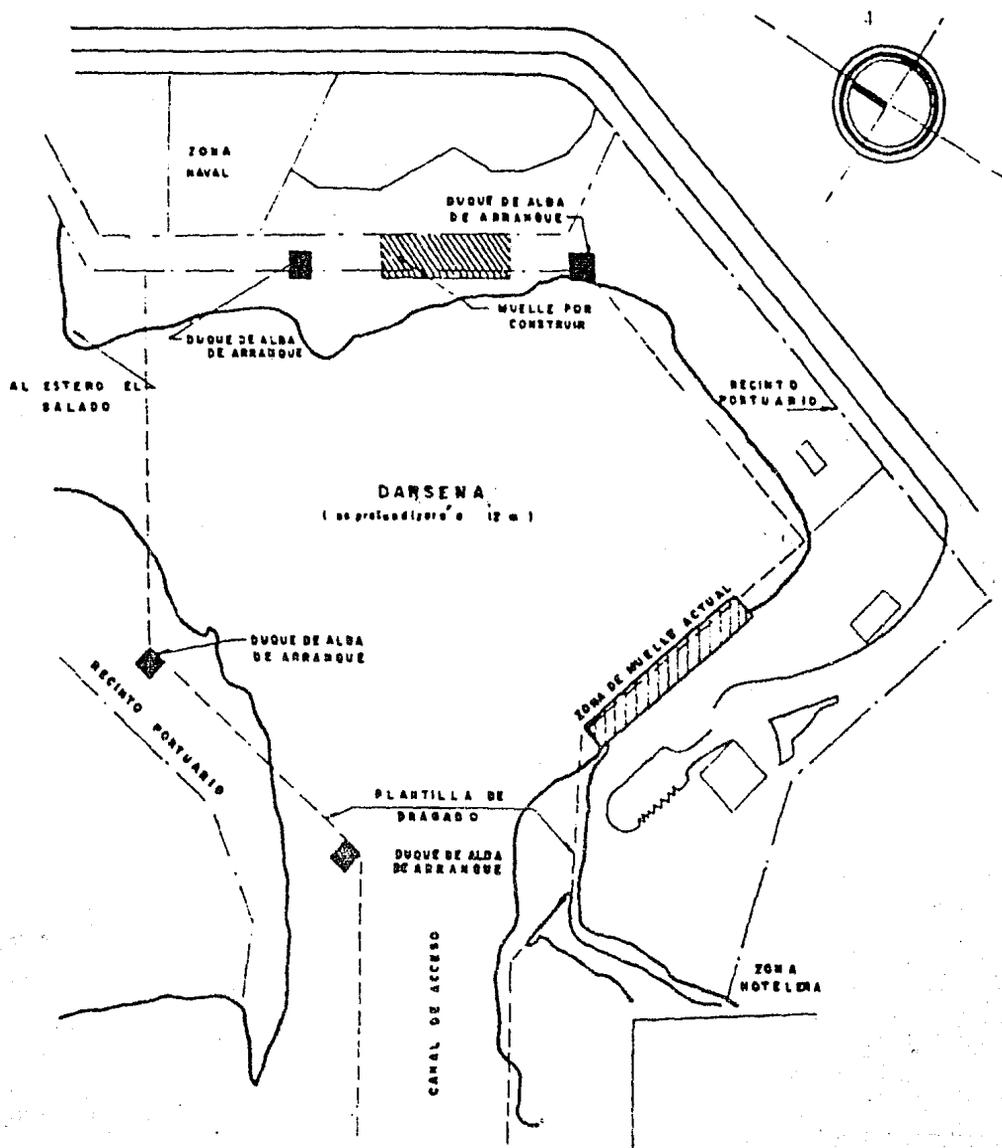


FIG. 1.1 Localización del muelle dentro del recinto portuario.

2. RECOPIACIÓN DE INFORMACION

La información recopilada para este estudio consistió en en datos de viento y de ciclones que tienen su radio de in- -- fluencia sobre la zona localizada en Puerto Vallarta, Jal., -- planos batimétricos de la bahía de Banderas y estratigrafía -- del suelo en la zona donde se ubicará el nuevo muelle.

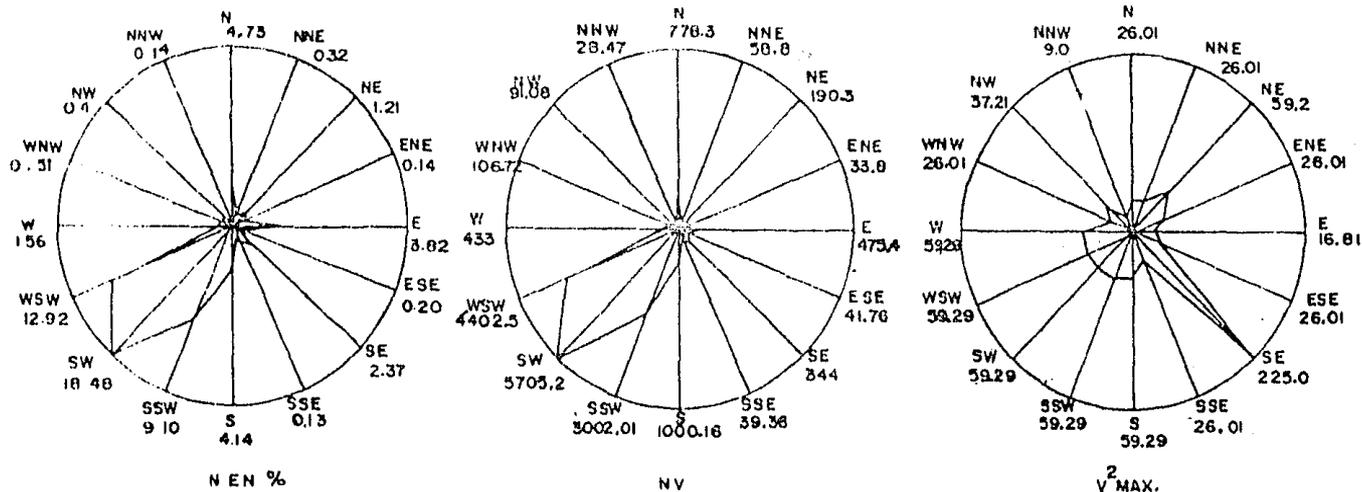
2.1. Información de viento.

La información de viento se puede resumir en datos mensuales proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional. - - (SMN), información estadística del año de 1975 proporcionada - por el SENEAM y diagramas de Lenz basados en la información esta dística de los años 66-67-74-75 proporcionados por la Dirección General de Obras Marítimas de la SCT.

En la fig 2.1 se ilustra el diagrama de Lenz citado y en él pueden observarse que el viento reinante (el que sopla con mayor frecuencia) y el viento dominante (el de mayor intensidad) se presentan para la dirección SW. Por otra parte, la velocidad máxima del viento es de 15 m/seg y se presenta para la dirección SE.

2.2 Información de oleaje.

Con objeto de deducir las características tales como alturas, períodos, direcciones y frecuencias de oleajes normales -



NOTAS:

- LA INFORMACION FUE PROPORCIONADA POR EL OBSERVATORIO METEOROLOGICO NAL. EN PTO, VALLARTA JAL.
- VELOCIDAD DADA EN M/S.

RESUMEN DE DATOS DE VIENTO EN LOS AÑOS 66-67-73-74-75

	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
N	430	29	110	13	347	18	215	12	376	827	1678	1174	142	46	36	13
NV	7783	58.8	190.3	33.8	473.4	41.76	344	39.38	1000.16	3002.01	5705.2	4402.5	433.1	106.7	91.08	28.47
VTC	5.10	5.10	7.70	5.10	4.1	5.10	15	5.1	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7	5.1	6.1	5.0
V ² MAX.	26.01	26.01	59.2	26.01	16.8	26.01	22.5	26.01	59.29	59.29	59.29	59.29	59.29	26.01	37.2	9.0

NUMERO TOTAL DE CALMAS: 3619

NUMERO TOTAL DE OBSERVACIONES: 9086

DIAGRAMA DE LENZ (ANUAL)

FIG.2.1. DATOS DE VIENTO EN PTO, VALLARTA JAL. (S.C.T)

(no generados por una perturbación meteorológica, ciclón o huracán) que pudiera incidir sobre el sitio de ubicación del puerto, se recurrió a la fuente de información estadística denominada "Ocean Wave" (ref 2). Esta fuente de información tiene su origen en la Gran Bretaña, y es editada por el Ministerio de Tecnología y el Laboratorio Nacional de Física, obedeciendo sus datos a observaciones visuales del estado del mar desde barcos. El período de registro que presenta es de ocho años (1953 a 1961).

En la fig 2.2 se muestran las zonas en que esta fuente ha agrupado los datos de las observaciones visuales del estado del mar, correspondiéndole a Puerto Vallarta, Jal. la zona número 22. Para cada una de estas zonas la fuente presenta la información observada en forma similar y a base de tablas. El contenido de estas tablas se describe a continuación para la zona número 22. En la tabla 2.1 se presentan las claves usadas para definir el valor del período de ola observado.

En la tabla 2.2 se presentan los códigos usados para definir el valor de la altura de ola observado.

En la tabla 2.3 se reportan las características del oleaje (altura y período) independientemente de su dirección. El número que corresponde a una altura y un período de ola determinados representa el número de observaciones efectuadas con

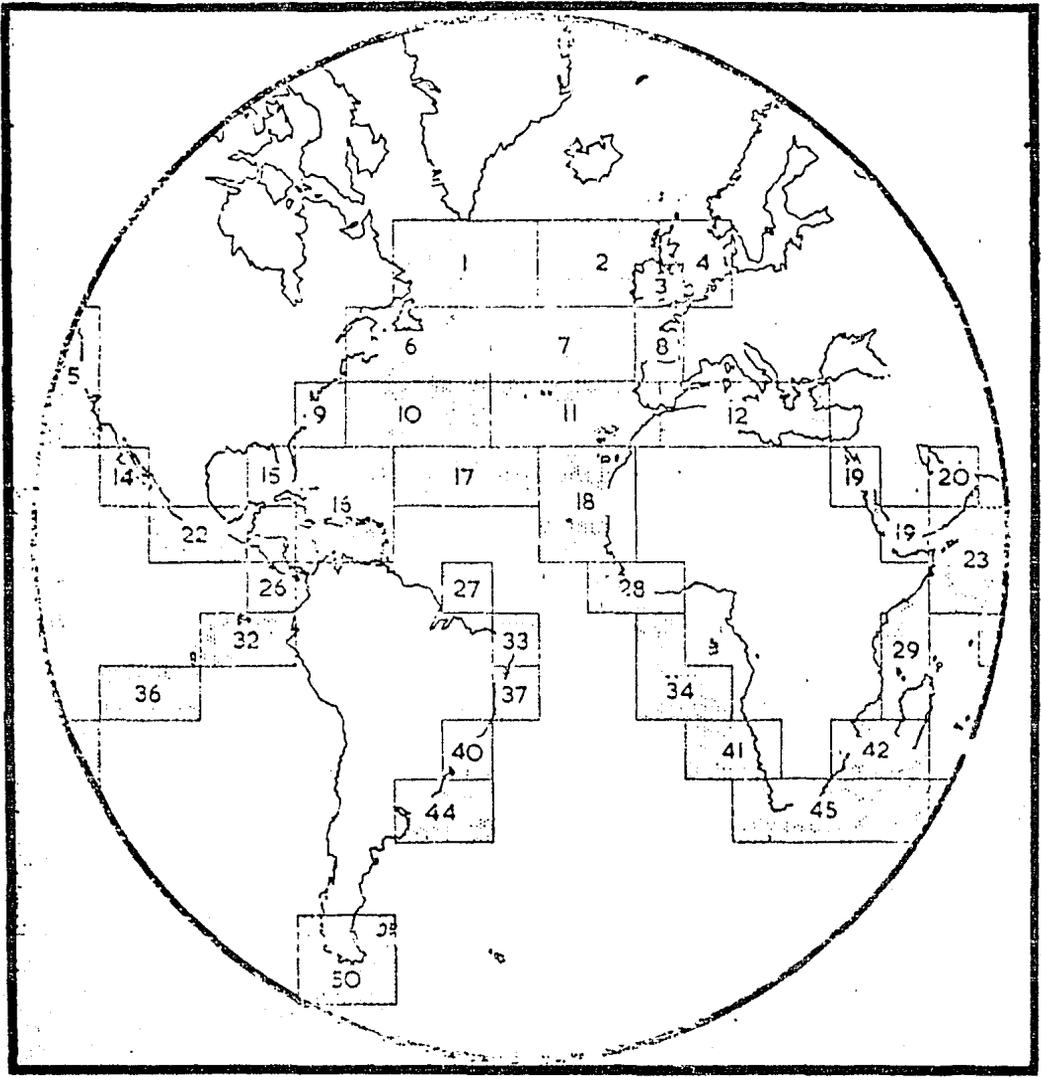


Fig. 2.2 Zonas en que se han agrupado los datos de las observaciones visuales del estado del mar.

esas características del oleaje.

En la tabla 2.4 se reportan las características del oleaje con dirección norte. El número que corresponde a una altura y un período de ola determinados representa el número de -- observaciones efectuados con esas características para un oleaje con dirección norte.

La sucesión de tablas desde la 2.5 hasta la 2.15 están estructuradas en forma similar a la tabla 2.4 y corresponden a -- oleajes con otras direcciones.

Para determinar los oleajes y niveles de marea que se producen en condiciones extraordinarias, se efectuó una recopilación de información meteorológica que permitiera establecerlas, considerando la información isobárica de los ciclones que afectaron la zona de estudio en los últimos 50 años.

Las fuentes analizadas para obtener las características -- de los ciclones que atacaron la zona de estudio fueron:

- a. Trayectorias ciclónicas durante el período de tiempo -- comprendido entre los años 1960 - 1980.
- b. Cartas de previsión del tiempo de los siguientes huracanes:

IRAH	24, 25	de septiembre de 1973
DOREEN	14, 15	de agosto de 1977
EIZA	28, 29, 30	de septiembre y 1° de octubre de 1976
MARIE	6, 7	de septiembre de 1984
PAUL	23, 26	de septiembre de 1978
ORLENE	21, 24	de septiembre de 1974
JENNIFER	4, 12	de octubre de 1969

Estos datos fueron proporcionados por la Dirección General del Servicio Meteorológico Nacional.

2.3 Información Batimétrica

La información batimétrica utilizada consistió en un plano batimétrico s/n de la Residencia de Obras de Puerto Vallarta, - Jal. con fecha 31 de agosto de 1972, carta de navegación SM 425 esc. 1:15,000 y carta batimétrica de las Islas Revillagigedo, - escala 1:1'000,000 sobre el paralelo 28 L.N.

2.4 Estratigrafía

Los análisis geotécnicos que se realizaron para este estudio tuvieron como base los resultados estratigráficos que proporcionó la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

Con la finalidad de que el lector conozca en forma general

el tipo de suelo para el que se realizaron los análisis geotécnicos, a continuación se describen brevemente las propiedades del suelo.

2.4.1 Zona del nuevo muelle

A partir de la elevación 0.0 m (NBMI) y con un espesor de 2.8 a 7.0 m se detecta una arena suelta, poco compacta, con un ángulo de fricción interna de 30° y un peso volumétrico sumergido de 0.8 ton/m³.

El segundo estrato, con un espesor de 2.0 a 5.0 m está -- constituido por una arcilla muy blanda con un cohesión de -- 0.8 ton/m², un peso volumétrico sumergido de 0.4 ton/m³ y un -- módulo de deformación volumétrica de 0.15 m²/ton.

A este segundo estrato le subyace con un espesor entre -- 6.0 y 15.0 m una arena con arcilla o limo, y en algunas zonas -- con conchas y gravas; el ángulo de fricción interna es de 34° -- y el peso volumétrico sumergido de 1 ton/m³.

Con un espesor del orden de 19.0 m subyace una arcilla -- firme, con una cohesión de 4.5 ton/m², un peso volumétrico su-
mergido de 0.7 ton/m³ y un módulo de deformación volumétrica -
de 0.007 m²/ton.

Finalmente, se detectó con un espesor mayor de 2.0 m una -- grava con arena. El nivel freático se reporta en la elevación

+ 0.5 m.

2.5 Mareas

La recopilación de datos sobre mareas se basó en las publicaciones del Instituto de Geofísica de la U.N.A.M., a través de sus tablas de predicción de mareas (ref 3), cuyos registros se han efectuado de enero de 1954 a diciembre de 1973 por medio de mareógrafo instalado en Puerto Vallarta, Jal.

CLAVE DE PERIODO DE OLA	PERIODO DE OLA (EN SEGUNDOS)
X	PERIODO DE CALMAS INDETERMINADO
2	MENOR DE 5
3	6 A 7
4	8 A 9
5	10 A 11
6	12 A 13
7	14 A 15
8	16 A 17
9	18 A 19
0	20 A 21
1	MAYOR A 21

TABLA 2.1 Claves utilizadas para definir el período de ola observado.

<u>CODIGO</u>	<u>ALTURA DE OLA (METROS)</u>
00	0.25
01	0.50
02	1.00
03	1.50
04	2.00
05	2.50
06	3.00
07	3.50
08	4.00
09	4.50
10	5.00
11	5.50
12	6.00
13	6.50
14	7.00
15	7.50
16	8.00
17	8.50
18	9.00
19	9.50

TABLA 2.2. Códigos utilizados para definir el valor de la altura de ola observado.

	X	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	TOTAL
00	729	671	12		2		2	1		8	13	1438
01	40	1015	104	36	11	2	1	2			50	1259
02	54	1068	479	129	32	14	6	2		4	11	1799
03	17	352	479	160	69	17	8	1		2		1105
04	8	55	164	89	44	21	2					383
05	1	13	46	62	22	4	1	2	1			152
06	2	2	29	35	19	13	1					101
07		1	16	13	6	4	3	1				44
08			4	8	8	2						22
09	1		3	9	6	4	2	1				26
10		1	1	1	2							5
11	1	1	1									3
12	1	1	1	2	1							6
13			1	2		1						4
14			1									1
15				2	1							3
16				1								1
TOTALES	854	3178	1341	549	223	82	26	10	1	14	74	6352

TABLA 2.3 Características del oleaje en todas las direcciones.

	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	TOTAL
00	57	1								1	59
01	92	6	1							3	102
02	79	24	6	2	2				2		115
03	18	24	11	4							57
04	11	15	8	1							35
05	1	8	7	3							19
06		7	5	5							17
07	1	2	3								6
08			1	4							5
09		2	1		1		1				5
10			1	1							2
12			2								2
13			1								1
15				1							1
TOTALES	259	89	47	21	3		1		2	4	426

TABLA 2.4 Características del oleaje con dirección NORTE.

	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	TOTAL
00	34	1							2		37
01	54	7								5	66
02	68	35	2							1	106
03	18	28	3	4		1					54
04	3	12	3	1	1						20
05	2	3	1	2	1						9
06		1			1						2
07			2		1						3
09		1		3	1						5
13		1									1
14		1									1
15			2								2
TOTALES	179	90	13	10	5	1			2	6	306

TABLA 2.5 Características del oleaje con dirección N 30° E.

	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	TOTAL
00	38									3	41
01	83	7	4	1						1	96
02	104	56	8	2	2		1			2	175
03	33	46	7	2	2						90
04	7	4	12	1	1						25
05	2	3	6	2							13
06			4								4
07			1	1							2
08		1		1							2
09			1	1	1						3
TOTALES	267	117	43	11	6		1			6	451

TABLA 2.6 Características del oleaje con dirección N 60° E

	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	TOTAL
00	35									1	36
01	69	3	4	1						2	79
02	73	34	5	2							114
03	38	35	13	2							88
04	6	10	8	4							28
05	1	3	3								7
06	1	1	2	1							5
07		1	3		1						5
08		1	2								3
11	1	1									2
13					1						1
TOTALES	224	89	40	10	2					3	368

TABLA 2.7 Características del oleaje con dirección ESTE

	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	TOTAL
00	16	1		2							19
01	34	12	3	6		1	1			4	61
02	56	46	24	3	4						133
03	24	34	18	6	2	1	1				86
04	1	11	6	6	1						25
05	1	2	2		2						7
06		2	2								4
07		1	1								2
08			1								1
TOTALES	132	109	57	23	9	2	2			4	338

TABLA 2.8 Características del oleaje con dirección S 60° E

	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	TOTAL
00	12	1				2			1		16
01	24	7	2	1						2	36
02	40	50	21	10	3						124
03	13	40	17	22	4	4					100
04	1	17	11	8	7						44
05	1	1	4	2		1					9
06			3	1							4
08		1		1							2
09			1								1
TOTALES	91	117	59	45	14	7			1	2	336

TABLA 2.9 Características del oelaje con dirección S 30° E

	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	TOTAL
00	24	1									25
01	36	7	5				1			3	62
02	38	28	14	3	1	1				1	86
03	12	67	37	8	3	1					128
04	1	10	15	7	3	1					37
05	1	4	14	4							23
06		3	3	1							7
07		4	2	2							8
08		1	1	1							3
09			4								4
TOTALES	112	125	95	26	7	3	1			4	373

TABLA 2.10 Características del oleaje con dirección SUR

	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	TOTAL
00	39										39
01	37	5	9		1					1	53
02	37	28	11	1						1	78
03	17	33	10	6	1						67
04	4	11	2	7	1						25
05		3	6	4				1			14
06			4	4	3						11
07					1						1
08					1						1
09					1						1
TOTALES	134	80	42	22	9			1		2	290

TABLA 2.11 Características del oleaje con dirección S 30° W

	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	TOTAL
00	100	1							4	6	111
01	154	10	3							5	172
02	125	40	13	3		4			1	2	188
03	29	35	10	6					1		81
04	3	17	7	5							32
05		1	1	2							4
06		3	1	4	6						14
07		2		1	1	3					7
08			1	1							2
09				1							1
10	1										1
TOTALES	412	109	36	23	7	7			6	13	613

TABLA 2.12 Características del oleaje con dirección S 60° W

	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	TOTAL
00	135	4									139
01	217	13	2	1						14	247
02	246	70	14	5		1				1	337
03	84	60	17	4	1				1		167
04	4	15	4		3						26
05	1	2	6	1							10
06		3	2	1	1						7
07				1							1
09							2				2
12	1	1		1							3
TOTALES	688	168	45	14	5	3			1	15	939

TABLA 2.13 Características del oleaje con dirección OESTE

	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	TOTAL
00	103	1								1	105
01	138	18	3	1	1					6	167
02	115	40	8	1	1		1		1	2	169
03	32	37	7	4	3	1					84
04	7	29	9	3	3	1					52
05	3	5	3	1			2				14
06	1	1	2	2	2	1					9
07		2		1			1				4
08			1		1						2
TOTALES	399	133	33	13	11	3	4		1	9	606

TABLA 2.14 Características del oleaje con dirección N 60° W

	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	TOTAL
00	78	1					1		1	1	82
01	75	9								4	88
02	87	28	3		1					1	120
03	34	40	10	1	1						86
04	7	13	4	1	1						26
05		11	9	1	1						22
06		8	7								15
07		4	1								5
08			1								1
09			2	1							3
10		1		1							2
13			1								1
16			1								1
TOTALES	281	115	39	5	4		1		1	6	452

TABLA 2.15 Características del oleaje con dirección N 30° W

5. ANALISIS DE LA INFORMACION

Aquí se analiza la información descrita en el Cap 2 con objeto de obtener las sollicitaciones que actúan sobre el muelle a diseñar.

3.1 Análisis de la información del viento.

Los datos mensuales de viento registrados por el SMN y los registrados por el SENEAM se clasificaron de acuerdo con la escala de vientos de Beaufort (ref 4). En la tabla 3.1 se indica para cada dirección las velocidades de viento mínima, media y máxima y su variación se clasifica de acuerdo con la escala citada. En esta tabla se puede observar que la velocidad máxima es de 33 nudos o sea 17.1 m/seg y sopla en la dirección sur. Por otra parte, también se puede observar que las velocidades recorren la escala de Beaufort del 0 al 7, o sea que la mayor parte de los vientos se clasifican como "Brisas".

Las brisas son vientos locales causados por la diferencia en la absorción de energía calorífica entre el océano y la región costera. Este fenómeno ocasiona que las masas de aire situadas sobre la tierra se calienten más que las colocadas sobre el océano, disminuyan su densidad y den paso al aire más denso provocando una circulación de mar a tierra -- que recibe el nombre de "Brisa Marina". El proceso inverso

DIRECCION DEL VIENTO	NUMERO DE ESCALA (BEAUFORT)	VELOCIDAD (NUDOS)
SW	1-2	minima = 1.0 media = 3.5 maxima = 6.0
SW	3-4	7.0 11.5 16.0
SW	5-6	17.0 22.0 27.0
S	1-2	1.0 3.5 6.0
S	7	28.0 30.5 33.0
E	1-2	1.0 3.5 6.0
E	3-4	7.0 11.5 16.0
W	1-2	1.0 3.5 6.0
NW	1-2	1.0 3.5 6.0
CALMA	0	<1

TABLA 3.: Clasificación de los datos mensuales de viento registrados por el S.M.N. y el SENEAM.

se realiza de noche, causado por el mayor enfriamiento del aire en la tierra y lleva el nombre de "Brisa Terrestre". -- Las brisas son vientos que rara vez alcanzan un espesor mayor de 1,500 pies, actuando sobre una longitud de 4 millas tierra adentro en el caso de las brisas marinas y unas cuantas millas sobre el océano si son brisas terrestres.

3.2 Análisis de la información de oleaje

3.2.1 Oleaje normal

La información estadística presentada en la ref 2 se analizó para definir las características del oleaje siguientes:

- a. Distribución frecuencial de períodos y alturas del oleaje.
- b. Tiempo de acción
- c. Alturas de ola por dirección
- d. Período de ola por dirección

El número de observaciones que corresponden a cada característica del oleaje (altura y período) de la tabla 2.3 se puede expresar como porcentaje de frecuencia de ocurrencia con solo dividir este número entre el número total de observaciones y multiplicarlo por 100. En la tabla 3.2 se ha realizado esta transformación y las frecuencias de ocurrencia en porcentaje se han sumado por renglones y columnas. También

los valores de estas sumas se han ido acumulando por renglones y columnas. El manejo de la tabla 2.3 hasta presentarla en la forma de la tabla 3.2 permite conocer las frecuencias de ocurrencia de alturas y períodos del oleaje, agrupadas por rangos, considerando el régimen anual para todas las direcciones.

De cada una de las tablas 2.4 a la 2.15 se toma una pareja de datos formada por la dirección del oleaje y el correspondiente número total de observaciones. Estas parejas de datos permiten formar una nueva tabla al consignar en una columna - el dato de la dirección del oleaje y en otra su correspondiente número total de observaciones. Los valores de la segunda columna pueden sumarse y expresarse en por ciento con respecto a esta suma formándose una nueva columna. La suma de los valores así obtenidos en esta nueva columna es de 100%. Esta columna se transforma para dar origen a otra en la que cada valor se transforma sobre la base que el 100% es equivalente al número de horas que tiene un año (8760 hrs).

En la tabla 3.3 aparecen los resultados de la información - estadística así manejada y que permiten obtener los tiempos - que actúan los oleajes para cada dirección de incidencia tomando en cuenta el régimen anual.

En la última columna de las tablas 2.4 a la 2.15 se consiguan unos valores que se obtienen como la suma por renglones del número de observaciones. Cada uno de estos valores representa el número de observaciones asociado a un rango de

alturas de ola y a una dirección de incidencia del oleaje. Estas columnas se colocan por renglones formándose una nueva tabla. Adicionalmente cada uno de los valores de esta tabla se puede expresar como frecuencia de ocurrencia en por ciento y procederse a efectuar su suma por renglones.

La información estadística así manejada se presenta en la tabla 3.4 y proporciona las frecuencias de ocurrencia de las alturas de oleaje agrupadas por rangos, para cada dirección de incidencia y tomando en cuenta el régimen anual.

La tabla 3.5 se fabrica manejando en forma semejante a lo arriba indicado los últimos renglones de las tablas 2.4 a la 2.15 obteniéndose la información de las frecuencias de ocurrencia de los períodos del oleaje agrupados por rangos, para cada dirección de incidencia y tomando en cuenta el régimen anual.

3.2.1.1 Conclusiones del análisis de la información estadística del oleaje normal de la ref 2

En la tabla 3.2 se observa que los períodos de mayor frecuencia son:

1. 5 seg con 50.03% de ocurrencia
2. 6 - 7 seg con 21.11% de ocurrencia
3. 8 - 9 seg con 8.64% de ocurrencia
4. 10 - 11 seg con 3.5% de ocurrencia

5. 12 - 13 seg con 1.29% de ocurrencia
6. 14 - 21 seg con 0.81% de ocurrencia
7. Encontrándose un 13.44% de las denominadas por la -
fuente como calmas o indeterminadas.

Con relación a las alturas éstas se distribuyen en:

1. 0.51 - 1.00 m con 28.32% de ocurrencia
2. \leq 0.25 m con 22.64% de ocurrencia
3. 0.26 - 0.50 m con 19.82% de ocurrencia
4. 1.01 - 1.50 m con 17.40% de ocurrencia
5. 1.51 - 2.00 m con 6.03% de ocurrencia
6. 2.01 - 2.50 m con 2.39% de ocurrencia

Los períodos con mayor frecuencia de ocurrencia (\leq 5 y 6-7 seg) se encuentran asociados a alturas de ola no mayores de 1.50 m.

De la tabla 3.3 se observa que la dirección más persistente es la --
W (1294.97 hr/año), seguida por la S 60° W (845.38 hr/año), la N 60° W
(835.74 hr/año) y la N 30° W (623.35 hr/año).

De la tabla 3.4 se deduce que los porcentajes de acción -
más altos están asociados a alturas de ola entre 0.51 y 1.0 m
y a las direcciones siguientes:

1. W con 5.31% de ocurrencia y altura de ola entre 0.51 -
y 1.0 m.

2. S 60° W con 2.96% de ocurrencia y altura de ola entre 0.51 y 1.0 m
3. N 60° W con 2.66% de ocurrencia y altura de ola entre 0.51 y 1.0 m
4. N 30° W con 1.89% de ocurrencia y altura de ola entre 0.51 y 1.0 m

De la tabla 3.5 se deduce que los porcentajes de acción -- más altos están por lo general asociados a períodos de ola ≤ 5 - seg y a las direcciones:

1. W con 10.83% de ocurrencia y período de ola ≤ 5 seg
2. S 60° W con 6.49% de ocurrencia y período de ola - - ≤ 5 seg
3. N 60° W con 6.28% de ocurrencia y período de ola - - ≤ 5 seg
4. N 30° W con 4.42% de ocurrencia y período de ola - - ≤ 5 seg
5. Encontrándose 13.44% de ocurrencia para las denominadas calmas.

3.2.2 Oleaje extraordinario

El análisis de la información meteorológica condujo a que la trayectoria más cercana a la zona de estudio la ocupó el - - ciclón Jennifer que se presentó en octubre de 1969.

Para efectuar los cálculos del oleaje se escogieron las cartas de previsión del tiempo que corresponden a las 9 y 11 hrs del día 11 de octubre, figs 3.1 y 3.2, ya que en esta parte de su trayectoria el oleaje penetra libremente a la bahía. Para las cartas de previsión del tiempo correspondientes a - - otras horas se observa que debido a condiciones geográficas de la zona, el oleaje provocado por el ciclón se difracta, y llega al puerto con muy poca energía. Para las cartas de previsión del tiempo de las figs 3.1 y 3.2 se supuso una presión en el ojo del ciclón de 979 mb la cual fue obtenida de mediciones efectuadas en la zona por medio de cazahuracanes. Las isobarras de estas cartas fueron interpoladas a cada 3 mb con objeto de realizar la predicción del oleaje en la zona de generación utilizando el "Método de Sverdrup-Munk-Bretschneider" (SMB) -- descrito en la ref 5.

La obtención de la longitud de la zona de generación - - (Fetch) y la longitud de la zona de decaimiento se hizo en forma gráfica siguiendo el procedimiento indicado en la ref 4 -- (págs 2.7 a 2.9). Este procedimiento se explica a continuación apoyándose en la fig 3.1 y consiste en lo siguiente:

- a). Se identifica el punto 0, en donde se desea hacer la predicción. Se escoge por ejemplo la isobara de 997 mb y se determina el punto A_1 , de tal modo, que la recta $\overline{A_1O}$ sea tangente a esta isobara en ese punto.

Recorriendo la isobara en cuestión (la de 997 mb en este caso) en el sentido del reloj se trazan nuevas tangentes y, por el punto de tangencia se dibujan rectas que formen un ángulo de 45° (en sentido contrario al del reloj) con las tangentes trazadas. Esta operación se continúa hasta identificar un punto B_1 , sobre la isobara, de tal manera que la recta a 45° pase por el punto O, en donde se desea hacer la predicción.

- b). Se repiten los mismos trazos sobre las isobaras de 1000 y 1003 mb, marcando los puntos A_2 y B_2 , A_3 y B_3 . Uniendo mediante una curva a todos los puntos A_j se obtiene la curva C_A , y haciendo lo mismo con los B_j se obtiene la curva C_B .
- c). Se procede a trazar rectas \overline{QP} , que pasando por el punto en estudio O, corten a las curvas C_B , en Q, y C_A en P; la recta con máxima longitud de segmento \overline{QP} corresponde a la longitud de generación (F) que es, precisamente igual a la distancia Q a P.

La dirección del Fetch así obtenida concuerda satisfactoriamente con los datos estadísticos del oleaje que indican que para las direcciones W y SW se presentan las alturas de ola más grandes.

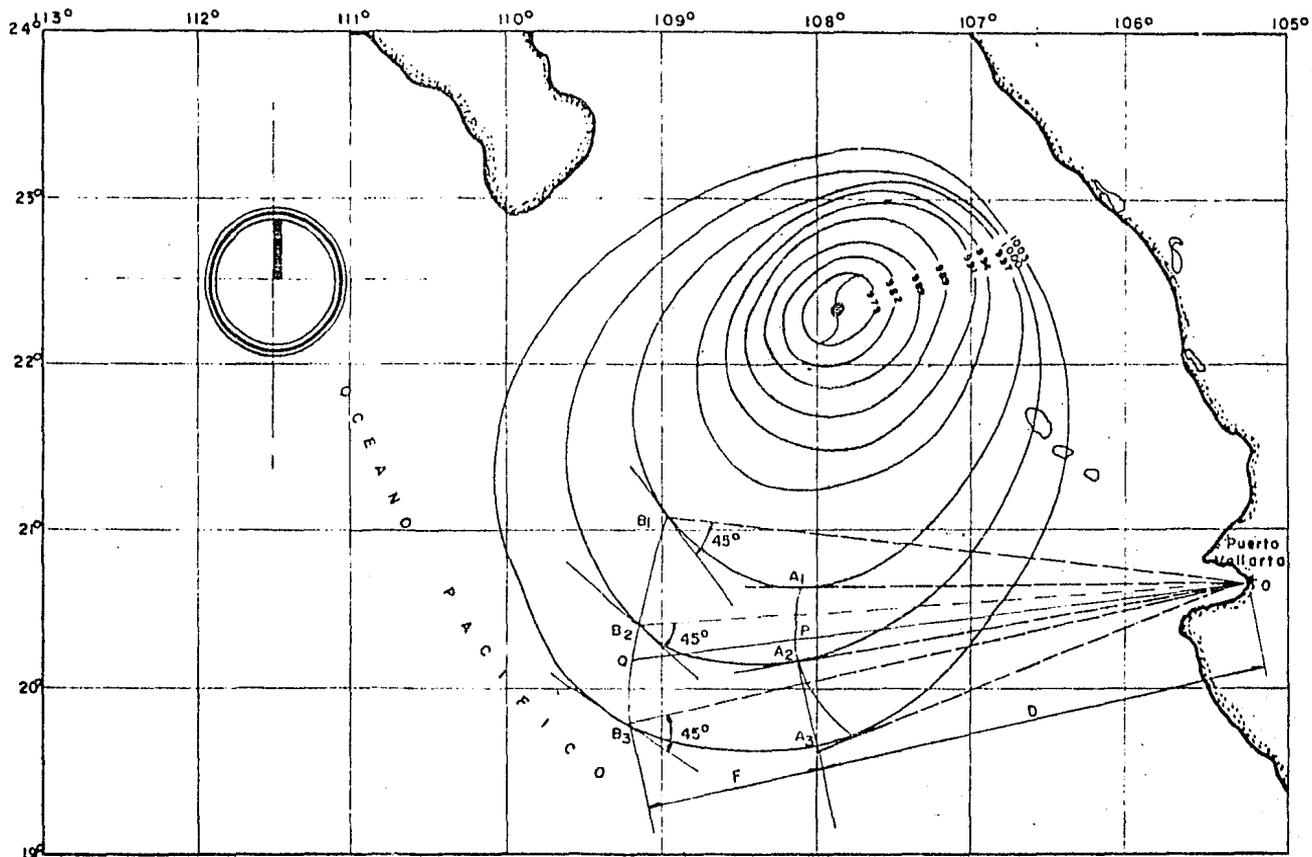


FIG 3.1 Carta sinóptica del estado del tiempo ciclón JENNIFER a las 11 horas de el día 11 de Octubre de 1969.

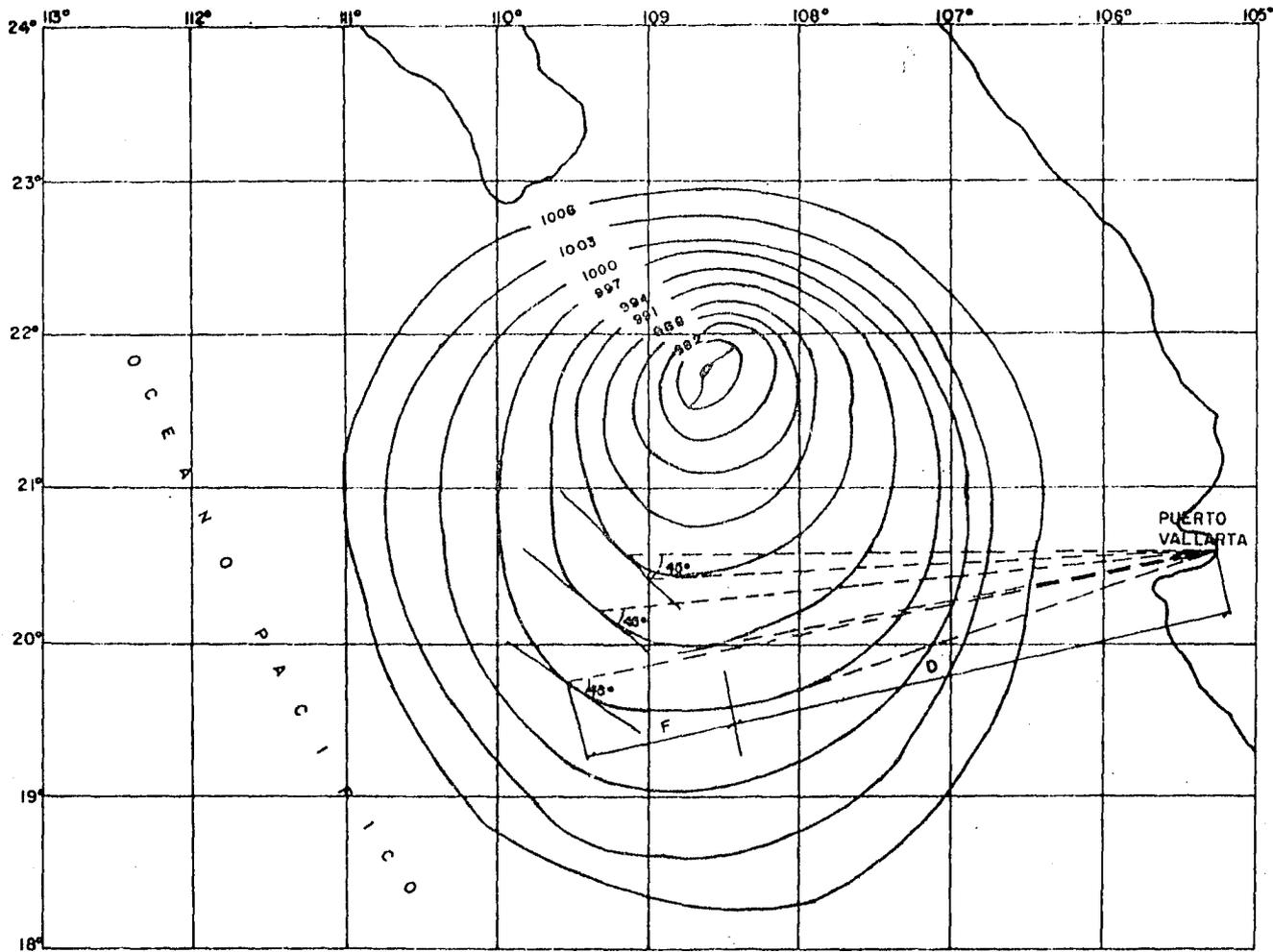


FIG 3.2 Carta sinóptica del estado del tiempo del ciclón JENNIFER a las 9 hrs. del día 11 de octubre de 1969.

El mismo procedimiento se repite para la carta de previsión del tiempo de la fig 3.2.

Los Fetch calculados a partir de las figs 3.1 y 3.2 son sensiblemente iguales en dirección (prácticamente dirección - oeste) y en longitud ($F_1 = 120.74$ Km y $F_2 = 106.06$ respectivamente). La longitud promedio de los valores obtenidos se usó como valor del Fetch ($F = 113.40$ km) en los cálculos subsecuentes.

El tiempo t_D (horas) de "duración" del huracán se obtuvo como la suma de las cartas meteorológicas utilizadas, menos uno, multiplicada por el intervalo de tiempo entre ellas y resultó ser igual a 3 hr.

La velocidad de los vientos cerca del ojo del ciclón (U) se reporta con un valor de 120 km/hr. Con los valores de esta velocidad, del tiempo de duración del huracán y del Fetch se obtuvieron el período y la altura de ola significantes en la zona de generación, aplicando la fig 3.15 de la ref 6 (pág 3-36). Esta figura se reproduce en este trabajo en la fig 3.3 y está construída en la forma siguiente:

- a. En el eje de las abscisas se encuentra tabulada la longitud del Fetch en millas náuticas.
- b. En el eje de las ordenadas está tabulada la velocidad

de los vientos cerca del ojo del ciclón en nudos (escala izquierda) o bien en millas por hora (escala derecha).

- c. Los ejes coordenados definen una cuadrícula que se encuentra cruzada por unas líneas rectas inclinadas que corresponden a distintos tiempos de duración del huracán en horas. Además, esta cuadrícula también se encuentra cruzada por una serie de curvas que corresponden a distintos valores de la altura (H) y el período (seg) de ola significantes.

La forma de utilizar la fig 3.3 consiste en lo siguiente:

- a. El valor de U define una línea horizontal que se seguirá en la gráfica de izquierda a derecha hasta interceptar primeramente ya sea la línea vertical definida por el valor del Fetch ó la línea recta inclinada definida por el valor del tiempo de dirección del huracán.
- b. La intercepción definirá un punto asociado por medio de las curvas de la gráfica a los valores de altura y período significantes.

La aplicación de la fig 3.3 al caso de interés conduce a los valores de período y altura de olas significantes en la zona de generación siguientes:

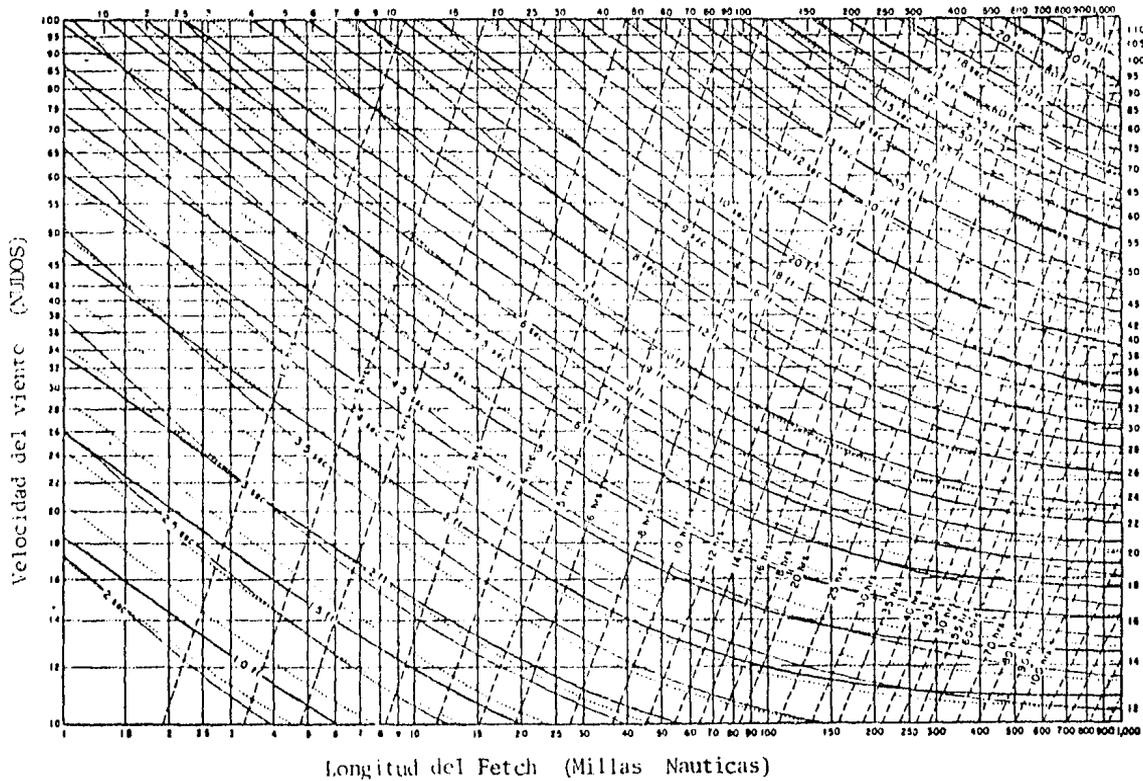


FIGURA 3.3. Período y altura de la ola significantes en la zona de generación en función de la velocidad del viento, de la longitud de Fetch y de la duración.

$$(T_{1/3})_G = 9 \text{ seg}$$

$$(H_{1/3})_G = 5.49 \text{ m}$$

La longitud de la zona de decaimiento (d) se obtiene siguiendo la línea del Fetch y está limitada por el final de la zona de generación y la frontera entre aguas profundas e intermedias, frente al sitio en estudio. Esta frontera se caracteriza por tener una profundidad relativa (relación entre la profundidad y la longitud de la onda) igual a 0.5 o sea:

$$\frac{d}{L_0} = 0.5$$

Por otra parte $L_0 = gT^2/2\pi$, donde g es la aceleración de la gravedad y T el período de la ola. Para $T = 9$ seg resulta que $L_0 = 126.47$ m y $d = 63.23$ m. En la carta de navegación SM 425 se marcaron las líneas del Fetch obtenidas en las figs 3.1 y 3.2. En éstas se fijó el punto que tiene una profundidad de 63.23 m, el cual define la frontera entre aguas profundas e intermedias. En forma similar sobre las líneas del Fetch se ubicaron los puntos que definen el final de la zona de generación, los cuales fueron determinados en las figs 3.1 y 3.2. Conocidos en esta forma los límites de la zona de decaimiento, su longitud resultó ser igual a $D_1 = 303.18$ km y $D_2 = 345.60$ km respectivamente. El promedio de estos valores se usó para fines de cálculo como longitud de la zona de decaimiento y resultó ser igual a $D = 324.39$ km.

Para determinar la altura y el período de la ola significativa al final de la zona de decaimiento se usó el "Método de Bretschneider" descrito en la ref 6. El método consiste en aplicar las figs I.49 e I.50 de esta referencia. Estas figuras se reproducen en esta trabajo en las figs 3.4 y 3.5 respectivamente.

La fig 3.4 está construída con base en un sistema de ejes rectangulares donde en el eje de las abscisas están tabulados los valores del parámetro $D/1.85 (T_{1/3})_G^2$ y en el eje de las ordenadas están tabulados los valores de la relación D/F . Los ejes coordenados definen una cuadrícula que se encuentra cruzada por una serie de curvas, que si se siguen de abajo hacia arriba en la gráfica hasta interceptar un eje horizontal tabulado, definen en éste sus correspondientes valores del parámetro $D/1.85 (T_{1/3})_D^2$. La utilización de esta figura consiste en ubicar el punto de coordenadas $(D/1.85 (T_{1/3})_G^2, D/F)$, que estará asociado por medio de una de las líneas curvas a un valor determinado del parámetro $D/1.85 (T_{1/3})_D^2$, del cual se despejará el valor de $(T_{1/3})$ que corresponde al período de la ola significativa al final de la zona de decaimiento.

La fig 3.5 está estructurada en forma similar a la fig. 3.4, y las diferencias que existen con respecto a ésta son que en el eje de las abscisas se tabula el parámetro $D/6.07 (H_{1/3})_G$ y las líneas curvas que cruzan la cuadrícula que forman los --

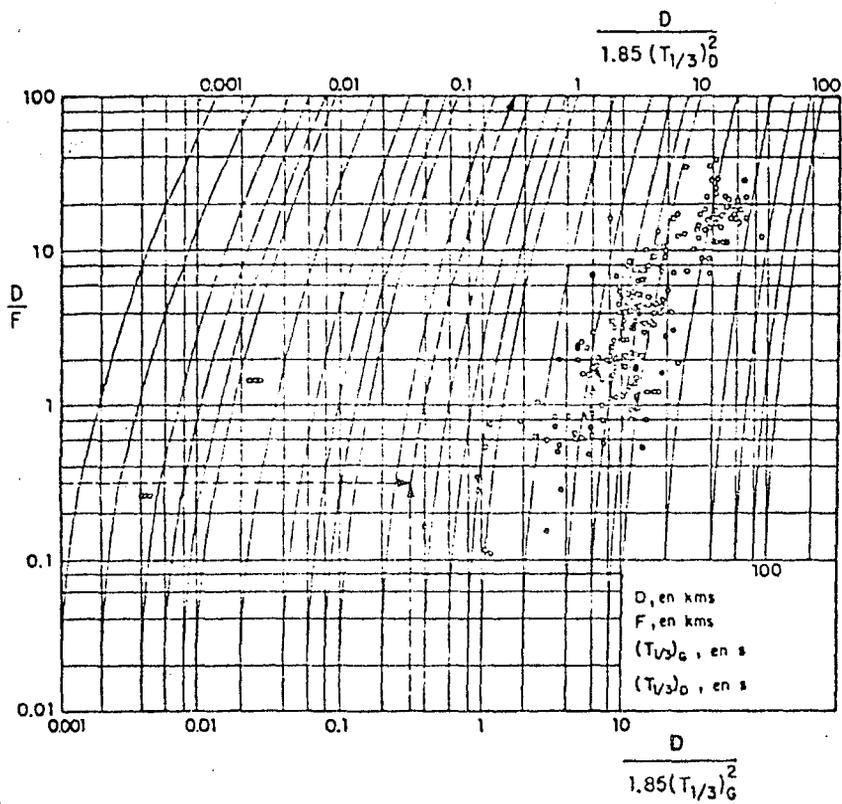


FIGURA 3.4. Obtención del periodo de la ola al final de la zona de decaimiento.

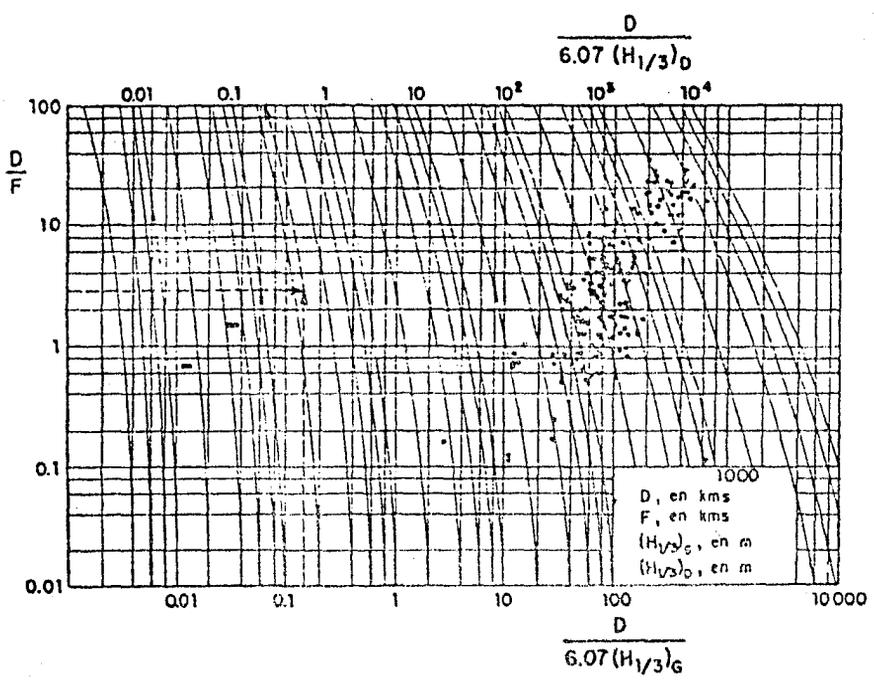


FIGURA 3.5 Obtención de la altura de la ola al final de la zona de decaimiento.

cjes coordenados están asociados al parámetro $D/6.07(H_{1/3})_D$. La utilización de esta figura también se realiza en forma similar a la fig 3.4 y del parámetro $D/6.07(G_{1/3})_D$ se despeja $(H_{1/3})_D$ que corresponde a la altura de la ola significativa al final de la zona de decaimiento.

La utilización de las figs 3.4 y 3.5 para los datos de interés conduce a los resultados siguientes:

$$(T_{1/3})_D = 12.09 \text{ seg}$$

$$(H_{1/3})_D = 1.77 \text{ m}$$

3.3 REFRACCION DE OLEAJE

La propagación de una ola progresiva se ve afectada conforme la profundidad disminuye. El fondo del mar empieza a afectar el movimiento de las partículas de agua, induciendoles un efecto de fricción que provoca una reducción en la velocidad de propagación y en la longitud de ola. Estos cambios provocan en un tren de olas, con un periodo determinado, que entra en aguas intermedias y bajas, que las distintas partes de la cresta se desplacen con diferentes velocidades de acuerdo con la profundidad, provocando que la cresta se doble, de forma que trata de seguir la configuración de la batimetría sobre la que se está propagando. Este fenómeno es lo que se conoce como "Refracción de oleaje". En el apéndice A se presenta la teoría del oleaje lineal sobre la cual se apoya un análisis de refracción de oleaje y en el apéndice B se ilustran los procedimientos más usuales para realizar éste análisis.

Para conocer los cambios que sufren las características del oleaje normal y/o extraordinario de aguas profundas, al propagarse sobre aguas someras hasta la entrada del puerto, se realizó un análisis de refracción de oleaje.

Las características del oleaje normal en aguas profundas en la zona de estudio son tales que los períodos con mayor frecuencia de ocurrencia son ≤ 5 seg y de 6 a 7 seg. La altura de ola que se presenta con mayor frecuencia se encuentra -

contenida entre 1.5 y 2.0 m. Las direcciones que inciden con mayor frecuencia sobre el puerto son oeste, noroeste y suroeste.

El oleaje extraordinario en aguas profundas tiene las características siguientes: altura de ola de 1.77m, período de 12.09 seg y dirección contenida en el sector oeste-suroeste.

Los oleajes con dirección noroeste se encuentran a su paso Punta de Mita, el Bajo de la Corveteña y las Islas Marietas. Debido a estas condiciones de tipo geográfico estos oleajes se difractan llegando a la entrada del puerto con su energía disminuida. Algo similar sucede con los oleajes con dirección suroeste al difractarse por la presencia de Cabo Corrientes. El oleaje con dirección oeste prácticamente no se ve obstruido en su propagación hacia el puerto con excepción de la zona donde se localiza la Isla María Cleofas que lo interrumpe parcialmente. Sin embargo, su energía no se ve disminuida tan notablemente como para los oleajes con dirección noroeste y suroeste.

Las curvas batimétricas de los planos s/n de la Residencia de Obras de Puerto Vallarta, Jal. y de la carta de navegación SM 425 se hicieron compatibles. Para ello se tomaron del primer plano las batimétricas con profundidades de -50 m a -5m y del segundo las batimétricas con profundidades -100, -150 y -200. Este nuevo plano batimétrico así formado se ma-

nejó a escala 1:10,000 para los análisis de refracción general (en aguas profundas) y a escala 1:750 para los análisis de refracción de detalle (en aguas someras).

En este trabajo se presentan en las figs 3.6 a 3.9 los -- planos de refracción de detalle para un oleaje con dirección - oeste y períodos de 6, 8, 10 y 12 seg. Esta variación en el - período permite observar el efecto de este parámetro para los oleajes normal y extraordinario.

Del análisis de los planos de refracción de detalle se -- puede concluir lo siguiente:

- a. Para el período de 6 seg (fig 3.6), las ortogonales -- que llegan a la entrada del puerto tienden a ser paralelas. Esto indica que la energía del oleaje por unidad de área permanece constante desde aguas profundas_ hasta la entrada del puerto.
- b. Para los períodos de 8, 10 y 12 seg (figs 3.7, 3.8 y - 3.9) las ortogonales que llegan a la entrada del puerto tienden a divergir aumentando esta divergencia conforme aumenta el período. Esto indica que el oleaje - de aguas profundas al propagarse hacia la entrada del_ puerto sufre una disminución de su energía por unidad - de área que se traduce en una reducción de su altura - de ola.

De acuerdo con estos resultados se tomó el frente de olas

para un período de 6 seg como dato básico para determinar la_ agitación dentro del vaso portuario.

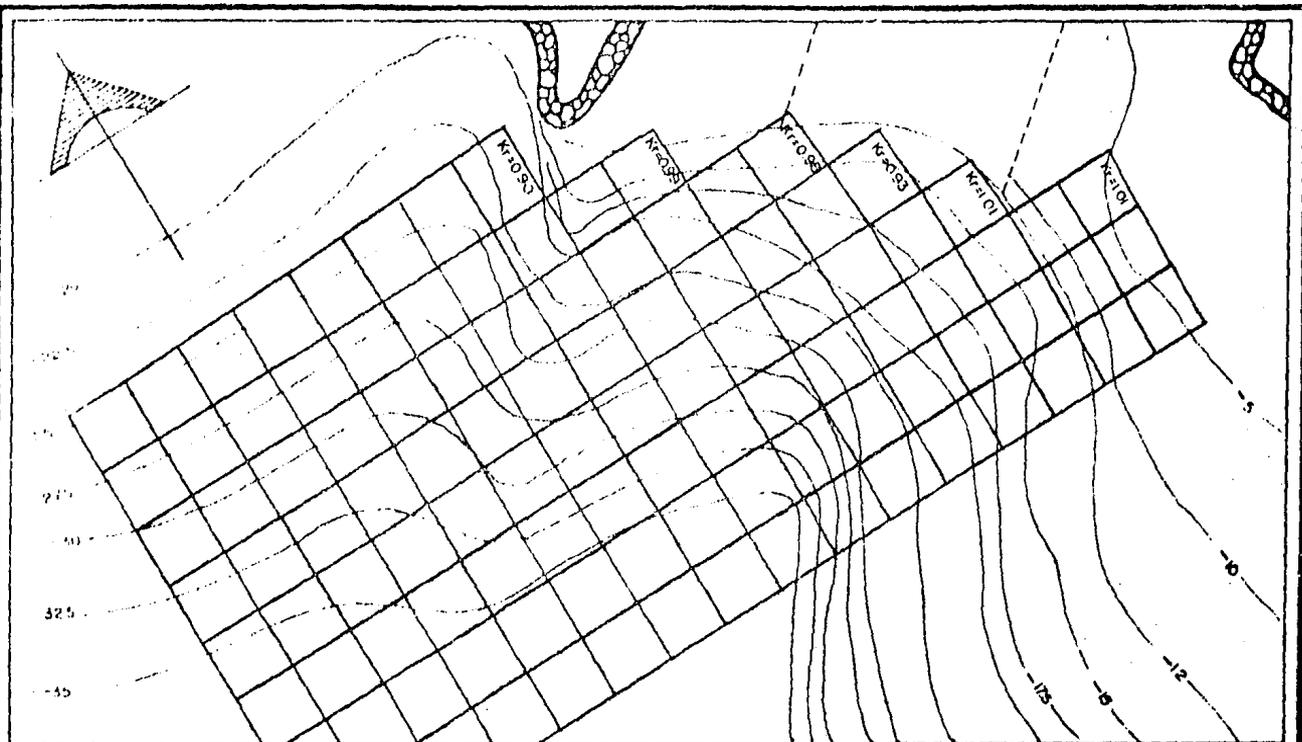


FIG. 3 6 DIAGRAMA DE REFRACCION PARA UN OLAJE CON DIRECCION OESTE
 Y UN PERIODO DE 6 SEG.

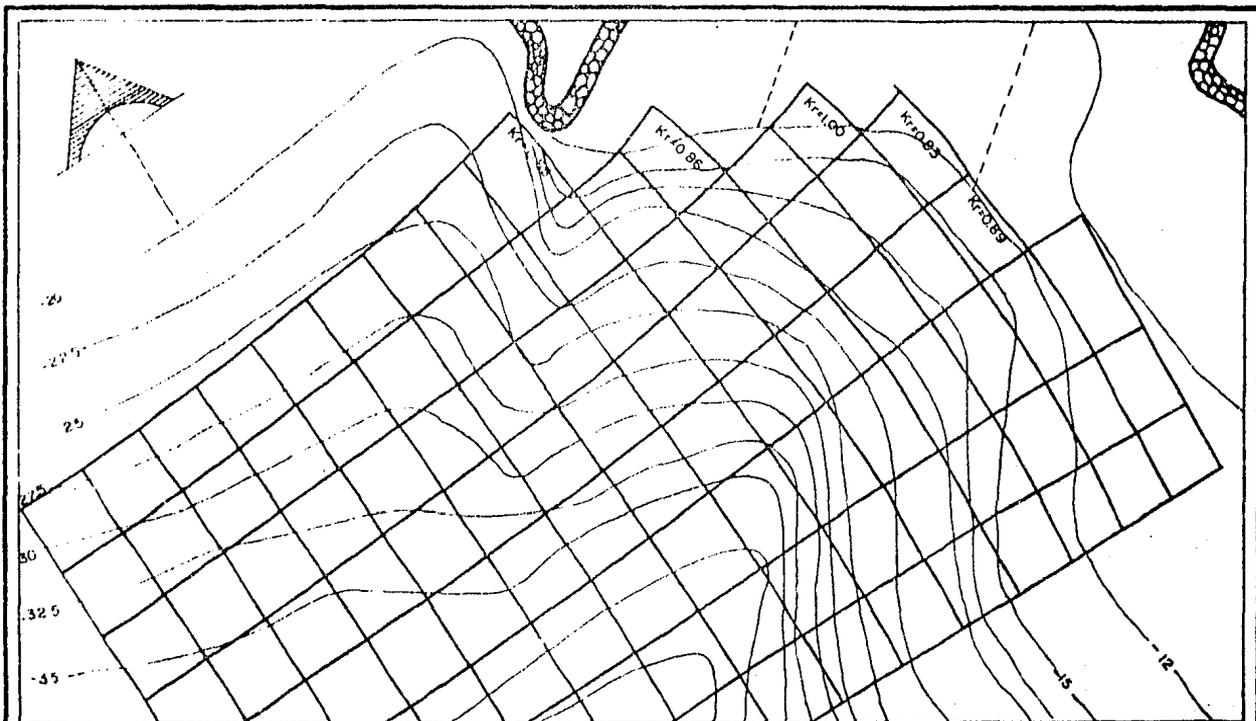


FIG. 3.7 DIAGRAMA DE REFRACCION PARA UN OLEAJE CON DIRECCION OESTE
Y UN PERIODO DE 6 SEG.

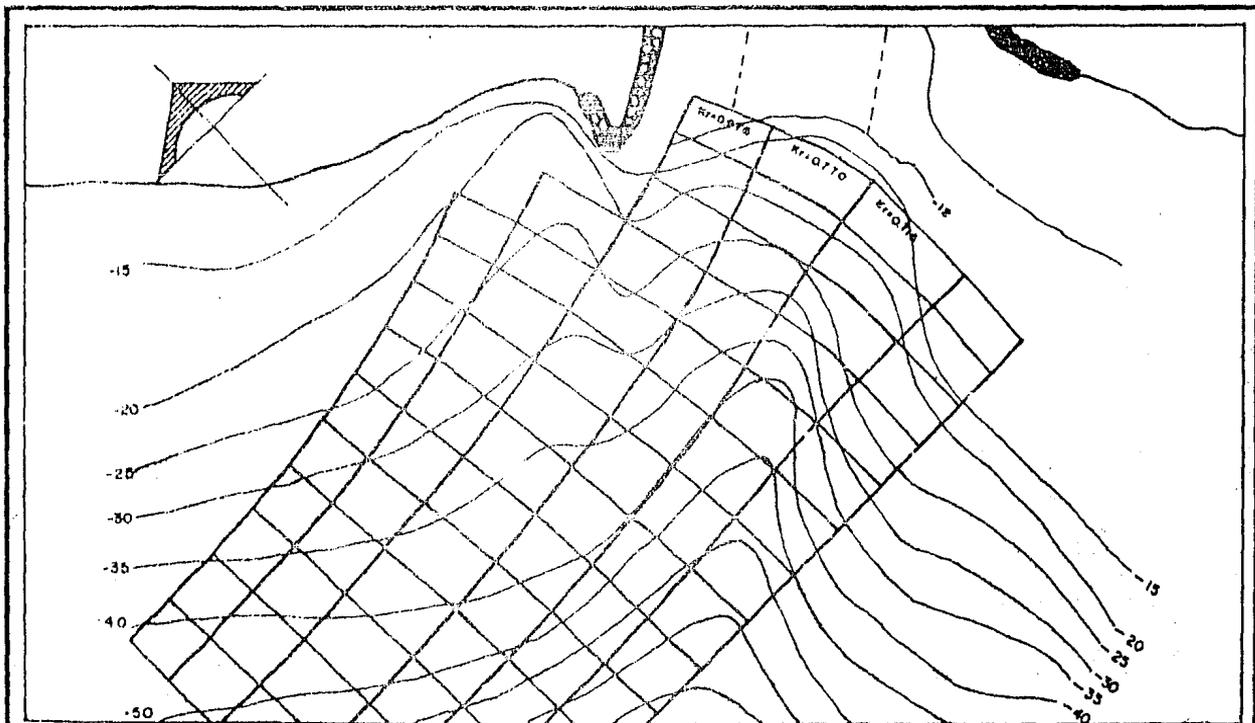


FIG. 38

DIAGRAMA DE REFRACCION PARA UN OLEAJE CON DIRECCION OESTE
Y UN PERIODO DE 10 SEG.

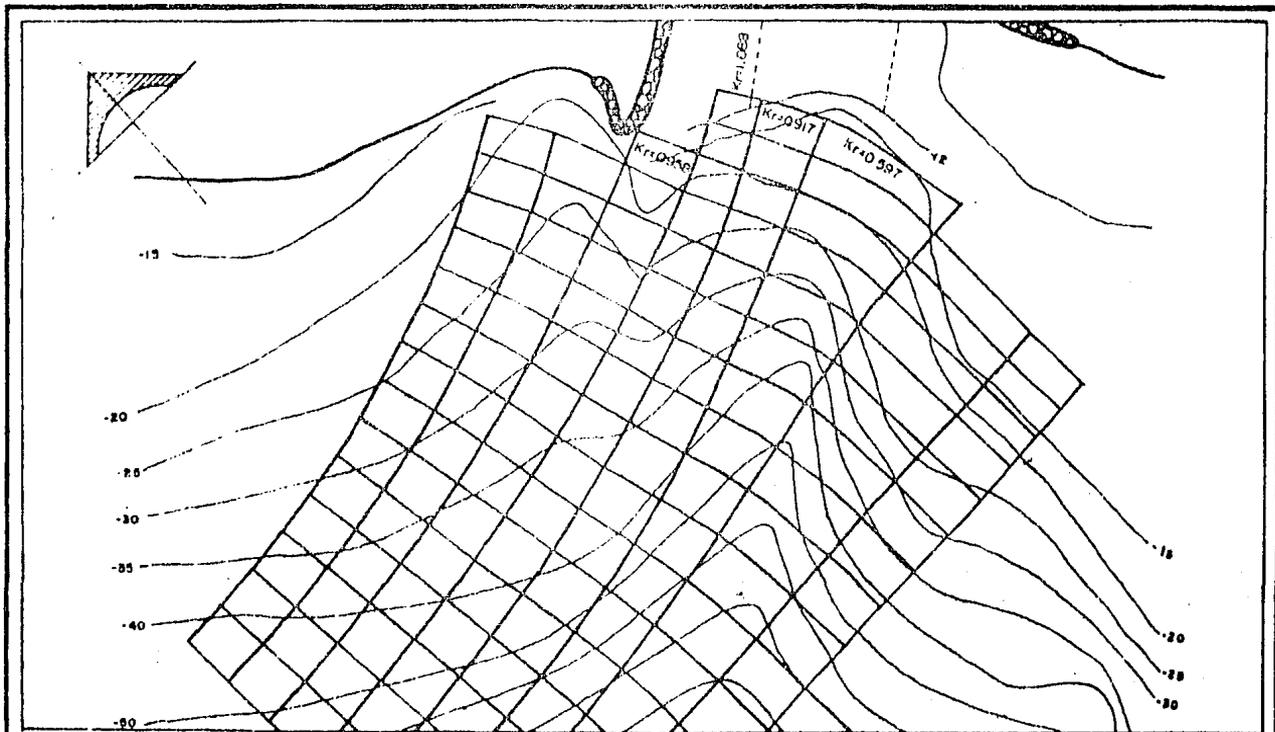


FIG. 3.9 DIAGRAMA DE REFRACCION PARA UN OLAJE CON DIRECCION OESTE
 Y UN PERIODO DE 12 SEG.

3.4. ANALISIS DE LA MAREA

En el período de tiempo en que se ha registrado la marea, se han establecido los niveles significativos de la misma, que referidos al nivel de bajamar media inferior, son los siguientes:

Nivel de pleamar máxima registrada	1.577m
Nivel de pleamar media superior	0.992m
Nivel de pleamar media	0.902m
Nivel medio del mar	0.512m
Nivel de media marea	0.512m
Nivel de bajamar media	0.122m
Nivel de bajamar media inferior	0.000m
Nivel de bajamar mínima registrada	-0.495m

Los mareogramas mensuales de la zona indican que la marea significativa es del tipo mixta semidiurna (dos pleamares y dos bajamares aproximadamente iguales por ciclos).

Conocidos los niveles significativos de la marea, es posible definir el nivel de corona del muelle, el cual puede fijarse con el criterio indicado en la ref 1 (Tabla 1). Este criterio expresa que si la profundidad del agua al pie del muelle es de 4.5 m o más y la altura de marea es menor de 3m, el nivel de corona del muelle se obtendrá de agregar una cantidad que varía entre 1.0 y 2.0 m al nivel del pleamar máxi-

ma registrada. Para el nuevo muelle en Puerto Vallarta, se eligió un nivel de corona de +3.00m, referido al nivel de bajamar media inferior, con objeto de no incrementar excesivamente el costo de la estructura por su altura.

3.5 ANALISIS DE PERFIL ESTRATIGRAFICO

De acuerdo con las propiedades índice y mecánica de los estratos del suelo que conforman el perfil encontrado en la zona de ubicación del nuevo muelle y tomando en cuenta que se tiene en proyecto dragar hasta la elevación -12m, se sugiere que la subestructura del muelle sea a base de pilotes de concreto precolado trabajando por fricción. Considerando el nivel del terreno natural a +0.70m (referidos al nivel de bajamar media inferior), se deduce que se tendrán rellenos del orden de 2.30m para alcanzar el nivel de la corona del muelle (nivel +3.00m referido al nivel de bajamar media inferior). El relleno podrá detenerse mediante una pared vertical en la parte posterior del muelle, y en forma inicial se podrá considerar que el talud en reposo del terreno natural, expuesto al agua de mar, es en torno a 2:1. Se deberá calcular la estabilidad de estos taludes y sus rellenos utilizando los parámetros correspondientes.

3.6 ANALISIS DE AGITACION

Para determinar la agitación en la dársena dragada a - -12m del puerto se utilizó el programa de computadora denominado "Divine", que se encuentra implementado en la computadora CYBER 72 de la Dirección de Ingeniería de Sistemas de la - S.C.T. El programa "Divine" permite obtener la agitación dentro de un vaso portuario con cualquier configuración utilizando el método de ecuaciones integrales de frontera (boundary - integral methods). Para esto considera la combinación de los fenómenos de refracción, difracción y reflexión del oleaje. (ver ref. 8).

La información necesaria para realizar un análisis de -- agitación mediante el programa "Divine" consiste en lo siguiente:

- a. El frente de olas a la entrada del vaso portuario (obtenido de un análisis de refracción del oleaje) para el que se desea realizar el análisis de agitación.
- b. La barimetría del vaso portuario.
- c. La configuración de las fronteras del vaso portuario (taludes, paramentos verticales, - etc).

Para el caso de interés se tomaron los siguientes datos:

- a. El frente de olas con dirección oeste y periodo de 6 seg.

- b. La batimetría se tomó constante en todo el vaso portuario e igual a -12 m.
- c. Las playas que configuran el vaso portuario se tomaron con un talud de 10:1.
- d. Las zonas del muelle actual y del nuevo muelle se consideraron con talud 5:1. Se considera -- que un talud de roca de recargue con estas características sobre la tablestaca es adecuado -- para mejorar la estabilidad de ésta.
- e. Las salidas del vaso portuario hacia el estero "el salado" y la darsena de la marina, se tomaron como fronteras absorbentes (el oleaje que -- incide sobre estas fronteras no genera ningún -- efecto posterior sobre el vaso portuario).

En la figura 3.10 se muestran los resultados del análisis de agitación consistentes en una serie de curvas de igual coeficiente de agitación. Este coeficiente está referido a -- una ola con altura unitaria en aguas profundas. Es decir, si la altura de la ola es de 1 m en aguas profundas, en la zona del nuevo muelle se tiene alturas de ola que varían entre -- 0.20 y 0.45 m. Esta información es básica para determinar -- las fuerzas que el oleaje genera sobre un muelle.

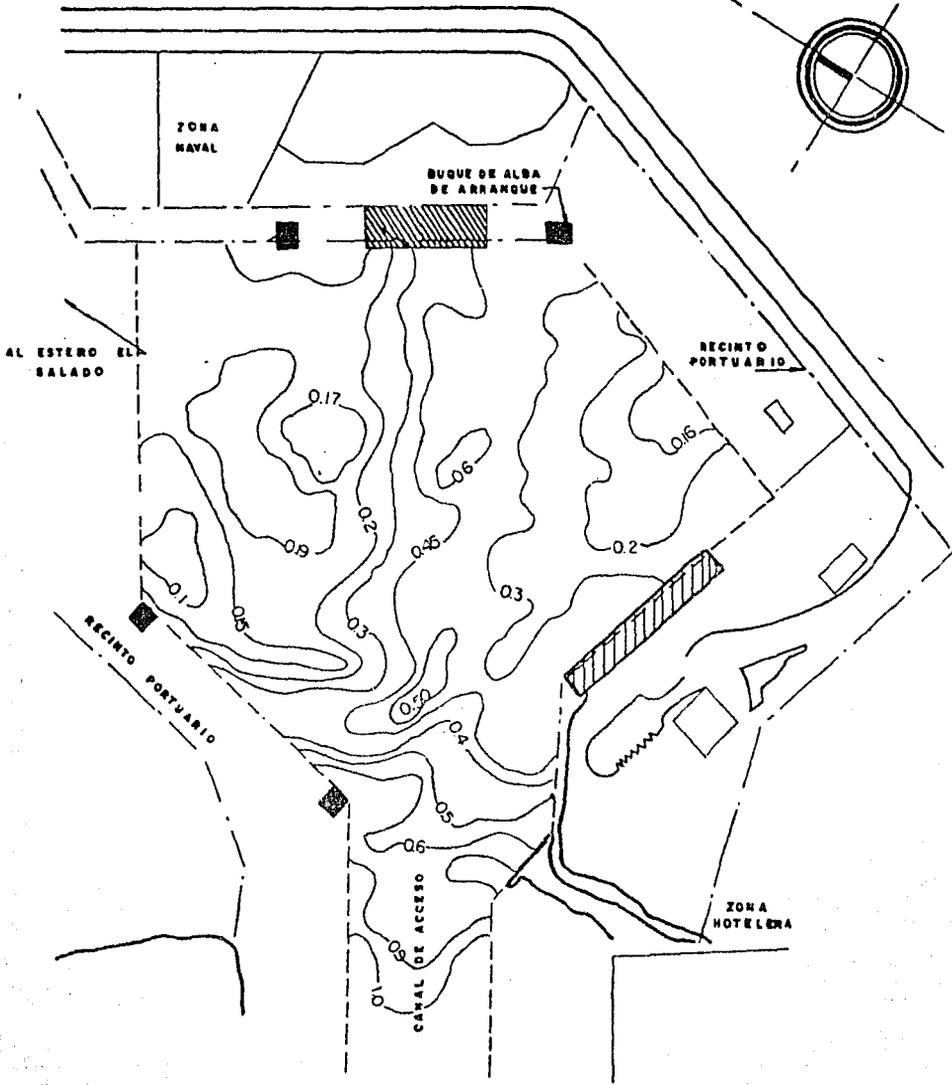


FIG 3.10 Coeficientes de agitación referidos a una altura de ola unitaria en aguas profundas.

H (m) T (seg)	0,25	0,26	0,51	1,01	1,51	1,01	2,51	3,01	3,51	4,01	4,51	5,01	5,51	6,01	6,51	7,01	7,51	TOTAL
	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00	5,50	6,00	6,50	7,00	7,50	8,00		
C A L M A	11,48	0,65	0,85	0,27	0,13	0,02	0,03			0,02		0,02	0,02					15,11
≤5	10,56	15,95	16,81	5,54	0,87	0,20	0,03	0,02			0,02	0,02	0,02					50,05
6-7	0,19	1,64	7,54	7,54	2,58	0,72	0,16	0,23	0,06	0,05	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02			21,11
8-9		0,57	2,03	2,52	0,27	0,98	0,55	0,20	0,15	0,11	0,02		0,03	0,03		0,03	0,02	8,61
10-11	0,03	0,17	0,50	1,00	0,09	0,35	0,50	0,09	0,15	0,09	0,03		0,02			0,02		3,51
12-13		0,03	0,22	0,27	0,35	0,06	0,20	0,06	0,03	0,06				0,02				1,20
14-15	0,05	0,02	0,09	0,13	0,03	0,02	0,02	0,05		0,05								0,41
16-17	0,02	0,03	0,03	0,02		0,05		0,02		0,02								0,16
18-19						0,02												0,02
20-21	0,13		0,06	0,03														0,22
≥21	0,50	0,79	0,17															1,16
TOTALS	22,64	19,82	28,32	17,40	6,03	2,59	1,59	0,69	0,35	0,41	0,08	0,05	0,09	0,06	0,02	0,05	0,02	100,00

TABLA 3.2 Porcentajes de ocurrencia de alturas y periodos de ola agrupados por rangos.
 Resumen anual para todas las direcciones. (Ocean Wave Statistics, Zona 22).

DIRECCION	TIEMPO DE ACCION (HORAS)	PORCENTAJE
N	587.49	6.71
N 30° E	422.00	4.82
N 60° E	621.97	7.10
E	507.50	5.79
S 60° E	466.14	5.32
S 30° E	463.37	5.29
S	514.40	5.87
S 30° W	399.94	4.57
S 60° W	845.38	9.65
W	1294.97	14.78
N 60° W	835.74	9.54
N 30° W	623.35	7.12
CALMAS	1177.75	13.44
T O T A L	8760.00	100.00

TABLA 3.3. Tiempo de acción del oleaje para cada dirección de incidencia. Regimen anual. (Ocean-Wave Statistics, Zona 22).

DIRECCION	RANGOS DE ALTURA DE OLA (EN METROS)																TOTAL	
	0.25	0.26	0.51	1.01	1.51	2.01	2.51	3.01	3.51	4.01	4.51	5.01	5.51	6.01	6.51	7.01		7.51
N	0.93	1.61	1.81	0.90	0.55	0.30	0.22	0.09	0.08	0.08	0.05	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	6.72
N 30° E	0.58	1.04	1.67	0.85	0.51	0.11	0.03	0.05		0.08				0.02	0.02	0.03		1.82
N 60° E	0.65	1.51	2.76	1.42	0.39	0.30	0.06	0.03	0.03	0.05								7.10
E	0.57	1.24	1.79	1.39	0.41	0.11	0.08	0.08	0.05			0.05		0.02				5.79
S 60° E	0.30	0.96	2.09	1.35	0.39	0.11	0.06	0.03	0.02									5.31
S 50° E	0.25	0.57	1.95	1.57	0.69	0.14	0.06		0.03	0.02								5.28
S	0.39	0.82	1.35	2.02	0.58	0.36	0.11	0.13	0.05	0.06								5.87
S 30° W	0.61	0.83	1.23	1.05	0.39	0.22	0.17	0.02	0.02	0.02								4.37
S 60° W	1.75	2.71	2.96	1.28	0.50	0.06	0.22	0.11	0.03	0.02	0.02							9.66
W	2.19	3.89	5.31	2.63	0.41	0.16	0.11	0.02		0.03			0.05					14.78
N 60° W	1.65	2.63	2.66	1.32	0.82	0.22	0.14	0.06	0.03									9.53
N 30° W	1.29	1.39	1.89	1.35	0.41	0.35	0.24	0.09	0.02	0.05	0.03			0.02				7.15
CUMMS																		13.44
TOTAL																		100.00

TABLE 3.4. Porcentaje de acción anual de alturas de oleaje agrupadas para rangos para cada dirección de incidencia (Ocean Wave Statistics, Zona 22).

DIRECCION	RANGOS DE PERIODO DE OLA (SEG)									TOTAL	
	5-7	8-9	10-11	12-13	14-15	16-17	18-19	20-21	21		
N	4.08	1.40	0.74	0.53	0.95		0.02		0.03	0.06	6.71
N 30 E	2.82	1.42	0.20	0.16	0.08	0.02			0.03	0.09	4.82
N 60 E	4.20	1.84	0.68	0.17	0.09		0.02			0.09	7.10
E	3.53	1.40	0.63	0.16	0.03					0.05	5.79
S 60 E	2.08	1.72	0.90	0.36	0.14	0.05	0.03			0.06	5.32
S 30 E	1.45	1.81	0.93	0.71	0.22	0.11			0.02	0.03	5.29
S	1.76	1.97	1.50	0.41	0.11	0.05	0.02			0.06	5.87
S 30 W	2.11	1.26	0.66	0.35	0.14			0.02		0.03	4.57
S 60 W	6.49	1.72	0.57	0.36	0.11	0.11			0.09	0.20	9.65
W	10.83	2.64	0.71	0.22	0.08	0.05			0.02	0.24	14.78
N 60 W	6.28	2.09	0.52	0.20	0.17	0.05	0.06		0.02	0.14	9.54
N 30 W	4.42	1.81	0.61	0.08	0.06		0.02		0.02	0.09	7.12
CAJMAS											13.44
TOTAL											100.00

TABLA 3.5. Porcentajes de acción anual de períodos de oleaje agrupados por rangos para cada dirección de incidencia. (Ocean Wave Statistics, Zona 22).

4. CALCULO DE LAS SOLICITACIONES

En éste capítulo se obtienen las solicitaciones que actúan sobre el muelle a diseñar.

4.1 Cargas muertas.

Una vez que se tengan calculadas todas las solicitaciones que actúan sobre el muelle, se podrán suponer las dimensiones de los elementos estructurales que lo forman, y podrán obtenerse las magnitudes de la carga muerta.

4.2 Carga viva vertical.

La carga viva vertical que actúa sobre el muelle a diseñar es debida al tráfico normal de pasajeros y peatones y puede tomarse igual a 0.5 ton/m². (ver ref. 1).

4.3 Cargas vivas horizontales.

Las fuerzas horizontales más importantes a considerar, sobre la estructura del muelle, son las debidas al impacto de la embarcación, el viento, a las corrientes, al oleaje y al sismo.

4.5.1 Fuerza de atraque.

Cuando un barco se acerca al muelle se genera una energía la cual deberá ser absorbida por la defensa al deformarse. Esta energía se denomina de atraque y de acuerdo con la ref. 1 - está dada por:

$$E = \frac{1}{4} \frac{W}{g} V^2$$

donde:

E = energía de atraque en ton-m

$g = 9.81 \text{ m/seg}^2$ = aceleración de la gravedad.

W = peso estimado de la embarcación en ton.

V = velocidad de atraque de la embarcación en m/seg.

Esta ecuación ha sido obtenida considerando que:

a. El peso estimado de la embarcación se obtiene como la suma de peso de la embarcación propiamente dicha (W_1) más un peso adicional (W_2) dado por el agua que se mueve con la embarcación durante la maniobra de atraque.

b. El peso adicional está dado por:

$$W_2 = \frac{\pi}{4} \delta L C_M^2$$

donde:

$\delta = 1.025 \text{ ton/m}^3$ = peso específico del agua de mar.

L = eslora de la embarcación en m.

C_M = Calado máximo de la embarcación en m.

- c. Que las pérdidas que sufre la energía cinética de la embarcación, al hacer contacto con el paramento de atraque y girar alrededor del punto de contacto hasta adosarse al muelle, están dadas por el siguiente factor que multiplica a la energía cinética:

$$F = \frac{(l/r)^2}{1 + (l/r)^2}$$

donde:

l = distancia medida del punto de contacto al centroide de la embarcación en dirección paralela al paramento de atraque en m (ver fig. 4.1).

r = radio de giro de la embarcación alrededor de su centro de gravedad con referencia al plano del nivel del agua en m.

- d. Que el factor F se ha calculado considerando que el atraque de la embarcación es en el "punto 4". Esta situación se caracteriza porque la distancia entre el punto de contacto y la proa o la popa de la embarcación es un cuarto de su eslora.

En la tabla 4.1 tomada de la ref. 1 se indican las características de las embarcaciones de pasajeros y sus correspondientes energías de atraque calculadas con las consideraciones arriba indicadas y para tres diferentes velocidades de atraque de la embarcación.

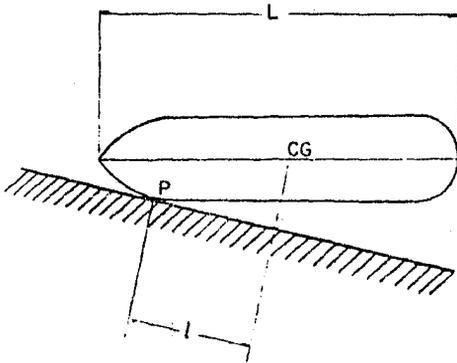


Fig. 4.1 Punto de contacto de una embarcación con el muelle durante el atraque.

PE.SO BRUTO (ton)	DESPLAZA- MIENTO (ton)	ESLORA (m)	MANGA (m)	PUNTAL (m)	CALADO (m)	PE.SO ADICIONAL (ton)	PE.SO TOTAL (ton)	ENERGIA DE ATRAQUE (ton·m)		
								VELOCIDAD (m/s)		
								0.1	0.2	0.3
5.000	5.000	113.0	15.8	8.8	6.0	4.204	9.204	2.35	9.40	21.13
6.000	6.000	121.0	16.7	9.5	7.2	5.050	11.050	2.62	11.26	25.37
7.000	7.000	127.0	17.5	10.2	7.6	5.902	12.902	3.29	13.17	29.62
8.000	8.000	135.0	18.2	10.8	8.0	6.952	14.952	3.61	15.26	34.33
10.000	10.000	145.0	19.2	12.0	8.5	8.429	18.429	4.70	16.81	42.31
15.000	15.000	165.	21.5	13.0	8.8	10.281	25.281	6.45	25.60	56.04
20.000	20.000	180.0	23.0	13.8	9.0	11.731	31.731	8.10	32.38	72.65
30.000	30.000	210.	26.5	15.5	9.5	12.249	42.249	11.55	46.17	103.89
50.000	50.000	245.0	30.5	18.0	10.5	21.733	71.733	18.30	73.20	164.70
80.000	80.000	290.0	36.0	21.0	11.7	31.941	111.941	28.56	114.23	257.01

Tabla 4.1 Dimensiones de barcos de pasajeros. (Ref.1)

Para el caso de interés donde las características de la embarcación son:

$$\begin{aligned} L &= 245 \text{ m} \\ C_M &= 10.50 \text{ m} \\ W_1 &= 50,000 \text{ ton} \end{aligned}$$

y considerando una velocidad de aproximación de 10 cm/seg de la tabla 4.1 se obtiene que:

$$\begin{aligned} W_2 &= 21,733 \text{ ton} \\ W &= 71,733 \text{ ton} \\ E &= 18.30 \text{ ton-m} \end{aligned}$$

Para obtener la fuerza de ataque será necesario primeramente hacer la selección del tipo de defensa más conveniente a usar. Para ello se hará uso del manual de la ref. 9 referente a defensas de fabricación nacional.

Tentativamente se seleccionará una defensa de tipo V. Del nomograma mostrado en la fig. 4.2 tomado de la ref. 9 y aceptando que:

$$\begin{aligned} W &= 71,733 \text{ ton} \\ V &= 10 \text{ cm/seg} \end{aligned}$$

se obtiene una energía de ataque de $E=18.30$ ton-m que es congruente con lo obtenido mediante la tabla 4.1.

Proponiendo una longitud de 4.50m para la defensa se obtiene a través de nomograma citado una altura de ésta de 40cms y una fuerza reactiva de 140 ton. Si se escoge una defensa --

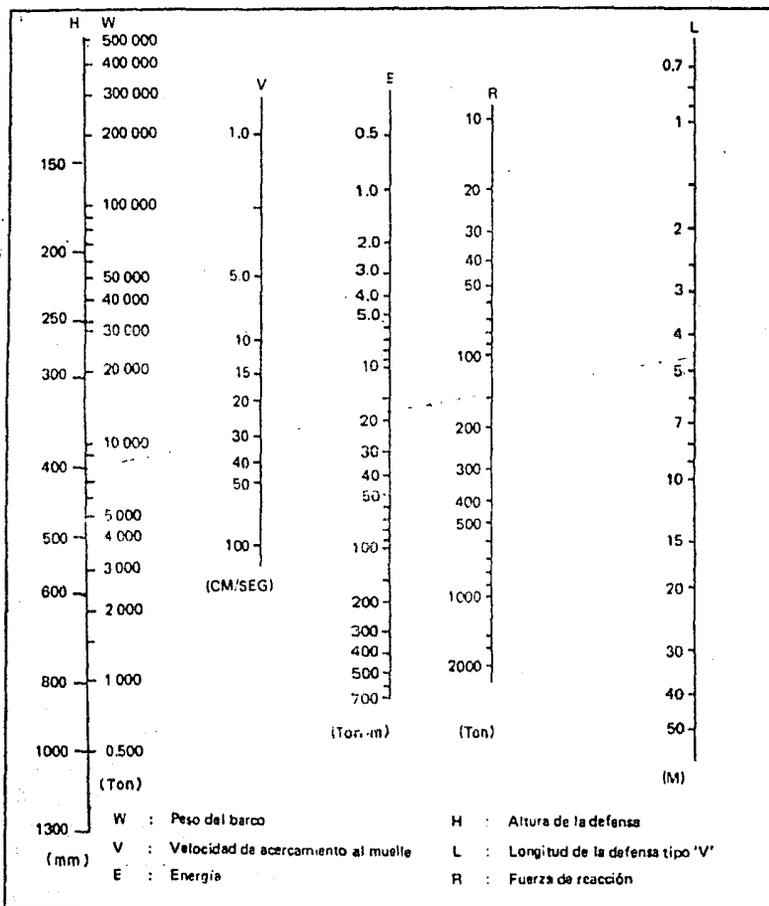


Fig. 1.2 Nemograma para selección de la defensa tipo V para muelle.

del tipo V600 H x 100L con una gráfica carga-deflexión-energía dada en la fig 43 se puede observar que la deflexión es de un 54% de su altura y que excede ligeramente a la deflexión máxima permisible dada por 50% de su altura. Por lo tanto este tipo de defensa se considera adecuado y se caracteriza por tener una altura de 60 cm y una longitud de 4.50 m.

Como la deflexión de la defensa es mayor de 37.5% de su altura se puede considerar que esta es uniforme y que la fuerza reactiva de la defensa no debe afectarse por un factor de corrección por efectos angulares (ref. 1). Por lo tanto la fuerza de atraque estará dada por

$$F = 140 \text{ ton}$$

Al diseñar la losa de piso del muelle, deberá preverse un faldón integrado a ésta con las dimensiones adecuadas para que la defensa cuente con el área mínima necesaria para que su comportamiento sea el adecuado.

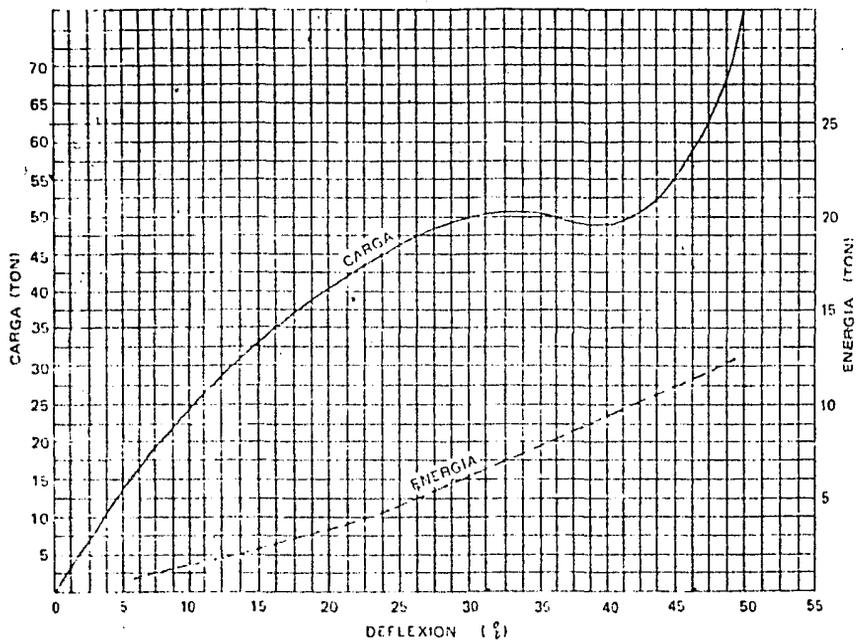


Fig. 4.3 Gráfica CARGA-DEFLEXION-ENERGIA de una defensa - tipo V600 H x 1000L.

4.3.2 FUERZA INDUCIDA POR EL VIENTO

La fuerza debida a la presión del viento sobre la superficie expuesta de una embarcación atracada, se transmite a la estructura del muelle como una tensión o jalón a través de la bita de amarre cuando el viento trata de separar el barco de la estructura y de compresión a través de las defensas, cuando el viento recarga el barco contra el paramento de atraque. Esta fuerza se calculará con la expresión siguiente (ver ref. 1).

$$F_v = \frac{1}{2} \rho_A C_v A_v V_v^2$$

donde:

F_v = fuerza resultante de la presión del viento en Kg.

ρ_A = 0.123 kg seg²/m⁴ (densidad del aire).

A_v = área expuesta de la embarcación en m².

V_v = Velocidad del viento en m/seg.

C_v = coeficiente de empuje.

El área expuesta de la embarcación para un viento con una dirección tal que forme un ángulo ψ con la dirección longitudinal de la embarcación (ver fig 4.4) se puede obtener como:

$$A_v = A \cos^2 \psi + B \sin^2 \psi$$

donde:

A = área expuesta de la embarcación proyectada sobre un plano vertical perpendicular al eje longitudinal de la embarcación en m² (ver fig. 4.4).

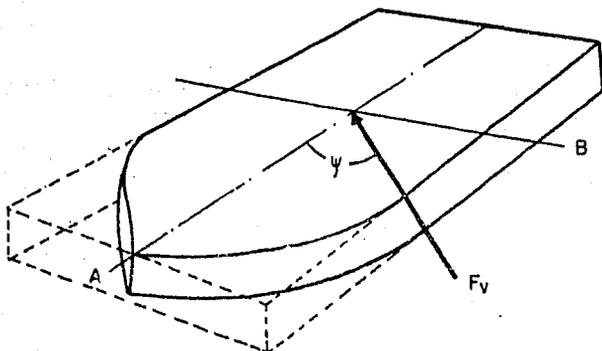


FIGURA 4.4 Fuerza que ejerce el viento sobre una embarcación.

$B =$ área expuesta de la embarcación proyectada sobre en plano vertical perpendicular al eje transversal de la embarcación en m^2 (ver fig 4.4)

$\psi =$ ángulo que forma la dirección del viento con el eje longitudinal de la embarcación en grados (ver fig 4.4).

El valor del coeficiente de empuje C_v en función del ángulo ψ se puede obtener de la fig. 4.5 tomada de la ref. 1.

Para el caso de interés, donde la embarcación tiene las siguientes características:

manga = 30.5 m

calado = 10.5 m

puntal = 18.0 m

los valores de A y B están dados por:

$$A = 30.5 (18.0 - 10.5) = 228.75 \text{ m}^2.$$

$$B = 245 (18.0 - 10.5) = 1,837 \text{ m}^2.$$

En la tabla 4.2 se indican los valores de ψ , C_v , V_v y F_v calculados de acuerdo a lo indicado y con base en los resultados del análisis de la información del viento indicada en la tabla 3.1.

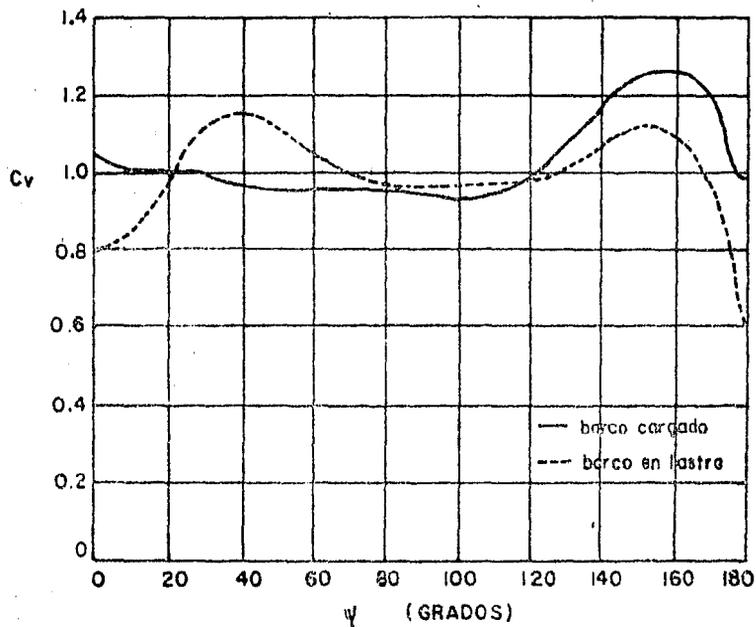


FIG.4.5 Valor del coeficiente de empuje en función del ángulo ψ

DIRECCION DEL VIENTO	ψ (°)	C_v	VELOCIDAD DEL VIENTO		fuerza R (kgf)
			(nudos)	(m/seg)	
SW	3.75	0.81	1.0	0.515	5.1132
			3.5	1.8025	38.1368
			6.0	3.090	112.0755
SW	3.75	0.81	7.0	3.605	152.5471
			11.5	5.9225	411.7216
			16.0	8.240	796.9810
SW	3.75	0.81	17.0	8.755	899.7169
			22.0	11.330	1,506.7922
			27.0	13.9005	2,268.0593
S	41.25	1.15	28.0	14.420	13,649.4040
			30.5	15.7075	16,195.6098
			33.0	16.995	18,959.440
S	41.25	1.15	1.0	0.515	17.4100
			3.5	1.8025	213.2719
			6.0	3.090	626.7583
E	48.75	1.13	1.0	0.515	20.9776
			3.5	1.8025	256.9751
			6.0	3.090	755.1921
E	48.75	1.13	7.0	3.605	1,027.9003
			11.5	5.9225	2,774.2820
			16.0	8.24	5,370.2548
W	48.75	1.13	1.0	0.515	20.9776
			3.5	1.8025	256.9751
			6.0	3.090	755.1921
NE	86.25	0.96	1.0	0.515	28.6654
			3.5	1.8025	351.1517
			6.0	3.090	1,031.9559

Tabla 4.2 Fuerza inducida por el viento para un barco en lastre.

4.3.3 FUERZA TRACTIVA

Una embarcación amarrada a un muelle ejerce una fuerza tractiva sobre los postes de amarre. Esta fuerza guarda una estrecha relación con el tonelaje bruto de la embarcación y puede determinarse de acuerdo con las especificaciones japonesas (ref. 10).

La fuerza tractiva sobre un bolardo se puede determinar con la tabla 4.3 (tabla 2.2 de la ref. 10). Para calcular la componenete horizontal de esta fuerza debe usarse el tonelaje bruto de la embarcación, y para valuar la componente vertical debe usarse la mitad de ese valor. Ambas componentes actúan en forma simultánea.

Para la embarcación de diseño, (tonelaje bruto = 50,000 ton) resulta una fuerza tractiva con una componente horizontal de 200 ton y una componente vertical de 100 ton.

4.3.4 FUERZA INDUCIDA POR LA CORRIENTE

Las corrientes de marea inducen una fuerza sobre las embarcaciones atracadas a un muelle. Esta fuerza se transmite a la estructura del muelle, ya sea proque la embarcación se apoya contra el sistema de defensas o a través de los cables de amarre y se puede sumar a la fuerza producida por el viento sobre la embarcación.

El muelle y las facilidades de amarre se diseñan en forma tal que la embarcación no se vea afectada por las corrien-

TONELAJE BRUTO	FUERZA TACTIVA SOBRE BITAS DE DOBLE BOLARDO (TON)	FUERZA TRACTIVA SOBRE UNA BITA (TON)
200 - 500	15	10
501 - 1,000	25	15
1,001 - 2,000	35	15
2,001 - 3,000	35	25
3,001 - 5,000	50	25
5,001 - 10,000	70	35 (25)
10,001 - 15,000	100	50 (25)
15,001 - 20,000	100	50 (35)
20,001 - 50,000	150	70 (35)
50,001 - 100,000	200	100 (50)

Los valores entre paréntesis corresponden a la fuerza tractiva sobre postes de amarre que no tienen más de dos springs.

Tabla 4.3 Fuerza tractiva que una embarcación ejerce sobre los postes de amarre.

tes de marea. Aún cuando esto no se cumpla, es común que esta fuerza no sea de importancia en el diseño.

Para demostrar esta aseveración en el caso práctico que se está resolviendo, se calculará esta fuerza con el criterio de la ref. 1 dado por la ecuación.

$$F_c = K A_c V_c^2$$

donde:

F_c = fuerza máxima provocada por el corriente de marea en kg.

K = 1.0 = coeficiente de empuje en $\text{Kg seg}^2/\text{m}^4$.

A_c = área de la embarcación que se encuentra bajo la línea de flotación en $\text{m}^2 = 0.9$ (calado) (eslora o la manga del barco).

V_c = Velocidad de la corriente de la marea en m/seg.

Dado que no se cuenta con información referente a la velocidad y a la dirección de la corriente y en función de lo que se pretende demostrar, la ecuación anterior se calculará utilizando los valores máximos observados de los parámetros que en ella intervienen. Con base en estas ideas se tomaron los valores siguientes:

$$V_c = 1.2 \text{ m/seg.}$$

$$A_c = 0.9 \times 10.50 \times 245 = 2,315.25 \text{ m}^2.$$

resultando que la fuerza inducida por la corriente tiene un valor dado por:

$$F_c = 1.0(2,315.25)(1.2)^2(10^{-3}) = 3.33 \text{ ton.}$$

que comparada con la magnitud de la fuerza de ataque (140 - ton) nos confirma que ésta fuerza no es significativa en el diseño.

4.3.5 FUERZA DEBIDA AL OLEAJE

La fuerza inducida por el oleaje sobre uno de los pilotes verticales del muelle a diseñar, se obtendrá de acuerdo con las indicaciones de la ref 1. Para ello debe aplicarse la ecuación siguiente:

$$F = F_D = F_I$$

donde:

$$F_D = \frac{\rho C_D D}{32 K} (\sigma H)^2 \left[\frac{\sinh 2Kz}{\sinh^2 Kd} + \frac{2 Kz}{\sinh^2 Kd} \right] |\cos \sigma t| \cos \sigma t$$

$$F_I = \frac{\rho C_I}{2K} \frac{\pi D^2}{4} \sigma^2 H \frac{\sinh Kz}{\sinh Kd} (\sin \sigma t)$$

En estas últimas expresiones

F_D = fuerza de arrastre en kg.

F_I = fuerza de inercia en kg.

H = altura de ola en m.

C_D = coeficiente de arrastre.

C_I = coeficiente de inercia.

ρ = 104.485 kg seg²/m³ = densidad del agua de mar.

K = $2\pi/L$

σ = $2\pi/T$

L = longitud de la ola en m.

T = periodo de la ola en seg.

D = diámetro del pilote (m).

Es usual que esta fuerza no sea de importancia para el diseño del muelle. Con esta idea en mente, se calcularán los

valores máximos de F_D y F_I .

El periodo del oleaje es el único parámetro que no cambia durante la propagación del oleaje desde aguas profundas y hasta la zona de ubicación del muelle. Por otra parte, el oleaje con mayor altura de ola que incide sobre el muelle es el correspondiente al régimen extraordinario. Para este oleaje se encontró que la altura de la ola significativa y el periodo al final de la zona de decaimiento son:

$$T_0 = 12.09 \text{ seg.}$$

$$H_0 = 1.77 \text{ m.}$$

En la zona del muelle se tiene un coeficiente de agitación máximo de 0.45, lo que indica que la altura de ola en esta zona es $H = 0.45 \times 1.77 = 0.796 \text{ m.}$ La profundidad (d) en la zona del muelle es de 12 m. y si se acepta que el oleaje en esta zona se encuentra en aguas intermedias, se tiene de aplicar por tanteos la ec

$$L = \frac{gt^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)$$

$$\text{que } L = 123.924 \text{ m.}$$

Dado que $\frac{1}{20} < \frac{d}{L} \leq \frac{1}{2}$, se comprueba la suposición realizada y el valor de L obtenido es correcto.

De acuerdo a la ref1 los valores máximos de C_D y C_I son:

$$C_D = 1.0$$

$$C_I = 2.0$$

Las componentes de la fuerza F (F_D y F_I) están defasadas 90° . Esto implica que mientras una es máxima, la otra es mínima. De acuerdo a los fines fijados se calcularán los valores máximos de estas componentes.

Si se acepta que $\cos \sigma t = 0$, se tiene en consecuencia -- que $\sin \sigma t = 1$ y F_D resulta ser igual a:

$$F_D = 72.666 \text{ kg.}$$

Por otra parte, si se considera que $\sin \sigma t = 1$ se tiene que $\cos \sigma t = 0$ y se obtiene el valor máximo de F_I que resulta ser igual a:

$$F_I = -347.98 \text{ kg.}$$

La fuerza F máxima resulta ser igual a F_I máxima y si se compara con la magnitud de la fuerza de atraque puede apreciarse que su valor es despreciable y que en consecuencia no es de importancia para el diseño del muelle.

4.3.6 FUERZA SISMICA

La acción sísmica sobre estructura cuyos miembros soportantes son aproximadamente de igual rigidez, como sucede en este caso, que se trata de un muelle sobre pilotes, se puede simular mediante la aplicación de una fuerza estática horizontal equivalente, que depende del tipo de estructura y de un coeficiente sísmico de diseño.

Esta fuerza sísmica está dada por cualquiera de las dos expresiones siguientes (ref 1), la que sea más desfavorable y debe actuar en el centro de gravedad de la estructura.

$$F = c W.$$

$$\delta \quad F = c [W + \text{sobrecarga}]$$

donde:

F = fuerza estática horizontal equivalente.

W = peso muerto total de la estructura.

c = coeficiente sísmico de diseño.

Para el cálculo del peso muerto de la estructura, es necesario contar con las dimensiones de ésta.

El valor del coeficiente "c" está en función del tipo de suelo y del lugar según la regionalización sísmica de la República Mexicana.

5. CONCLUSIONES

Las fuerzas que por lo general son importantes y que deben tomarse en cuenta para el diseño de un muelle son: la fuerza debida al impacto de la embarcación al atracar, la fuerza tractiva, la fuerza debida al viento y la fuerza sísmica (aunque para ésta última sólo se ha indicado forma de obtenerla). Las tres primeras son de magnitud considerable debido principalmente al tamaño de la embarcación que tendrá acceso al puerto y que hará uso del muelle.

Se ha hecho un análisis muy detallado del oleaje tanto normal como extraordinario ya que es de gran importancia conocer el comportamiento real del oleaje en el sitio de estudio. Aunque en éste caso, debido a la situación geográfica del puerto, a la ubicación del muelle dentro de un recinto portuario y a todas las obras de protección existentes, el oleaje que incide sobre el muelle tiene muy poca energía. Es por eso que la fuerza debida al oleaje es poco significativa para su diseño.

Por otra parte, estos resultados parecen conducir a pensar que no debía realizarse ninguno de los análisis para el oleaje aquí manejados, para diseñar un muelle. Esto no es así ya que mediante estos análisis se puede juzgar la bondad del proyecto en planta de un puerto y la adecuada ubicación dentro de él de los muelles (en la zona de muelles debe existir la mínima agitación para que las embarcaciones hagan uso de -

los muelles prácticamente durante todo el tiempo). El que las fuerzas generadas por el oleaje sobre un muelle sean de poca importancia para su diseño, indica la adecuada selección de la zona de muelles.

La información estadística obtenida de la referencia - - "Ocean wave Statistics" consistente en tablas de datos que se basaron en observaciones visuales y que en los últimos años ha tenido gran aplicación, ha sido de gran utilidad para el análisis del oleaje en Puerto Vallarta, y se puede afirmar que se han obtenido resultados confiables de los parámetros de las olas en el sitio, como son altura y periodo significantes así como su longitud.

Es importante señalar la necesidad de contar con éste tipo de fuentes estadísticas (como la utilizada en este trabajo) y de registros de oleaje en el sitio de estudio que permitan realizar en forma más adecuada los proyectos de obras marítimas.

APENDICE A. TEORIA DEL OLAJE DE PEQUEÑA AMPLITUD

La teoría del oleaje de pequeña amplitud es una primera aproximación a la descripción teórica completa de comportamiento del oleaje. En problemas de Ingeniería la teoría lineal es la más utilizada. Esta teoría que describe las ondas senoidales en una primera aproximación fué desarrollada inicialmente por Airy en 1845, por lo que se denomina teoría de Airy; también se conoce como teoría lineal del oleaje o teoría de las ondas de pequeña amplitud. Esta teoría supone que el potencial de velocidades cumple con la ecuación de Laplace y tiene aplicación en aguas profundas e intermedias e inclusive en aguas someras para calcular la longitud y celeridad de la onda.

A.1 FORMULAS GENERALES

En la figura A.1 se muestra una ola progresiva armónica simple moviéndose en la dirección X. Se usará la siguiente terminología:

d = distancia entre el nivel medio y el fondo del agua.

$\eta(x,t)$ = altura de la superficie libre del agua.

a = amplitud de la ola

H = altura de la ola

L = longitud de la ola

T = periodo de la ola

C = velocidad de propagación del tren de olas o celeridad de la ola; $C=L/T$.

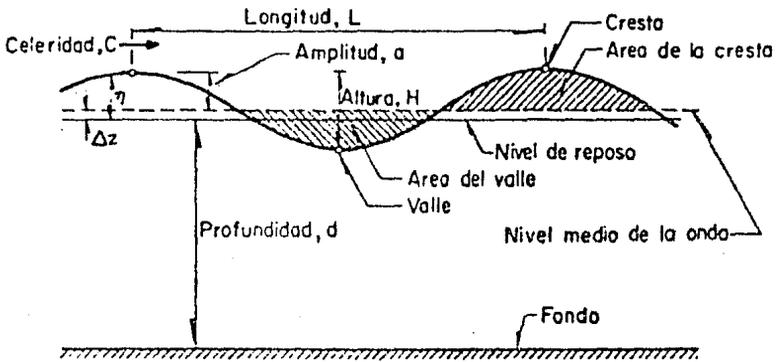


FIGURA A.1 Características de una ola progresiva armónica.

La deducción de las ecuaciones de oleaje según la teoría lineal se hará sobre la base de que el fluido es perfecto, por lo que las ecuaciones que rigen el fenómeno son:

- a) Ecuación de continuidad
- b) Ecuación de movimiento (Navier-Stokes)
- c) Ecuación de Laplace

El problema completo de valores de frontera para el oleaje está dado la ecuación diferencial.

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0$$

donde ϕ es la función potencial de velocidad y para olas progresivas, se puede escribir:

$$\phi = \frac{ga}{\sigma} \frac{\cos k(z+d)}{\cos h kd} \sin(kx - \sigma t)$$

donde:

$$a = H/2 \quad (\text{semi-amplitud de la onda}).$$

$$k = 2\pi/L \quad (\text{número de oleaje}).$$

$$\sigma = 2\pi/T \quad (\text{frecuencia angular de la onda}).$$

derivando con respecto a "t" y aplicando las condiciones de frontera, se llega a:

$$\tanh kd = \frac{\sigma^2}{gk}$$

Encontrado que la celeridad ($C=L/T$) está dada por la expresión:

$$C = \left[\frac{gL}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L} \right]^{1/2}$$

Y la forma como varía la longitud de ola con la profundidad por:

$$L = \left[\frac{gT^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L} \right]$$

La superficie libre del agua se expresa como:

$$\eta = a \cos(Kx - \omega t)$$

que es el valor del desplazamiento vertical, que sufre la superficie libre, medida sobre el nivel del agua en reposo.

De la expresión anterior se concluye que la superficie libre es cosenoidal, con semiamplitud igual a "a", es decir, que el movimiento del fluido en estudio es una onda de amplitud $H=2a$.

En la figura A.2 se han dibujado las formas que va tomando la superficie libre de la ola al transcurrir el tiempo t . Los dibujos abarcan el lapso de 0 a T y se han hecho en una extensión de L . De este modo el lector puede imaginarse que, en un canal donde se está produciendo el oleaje, él puede ver la evolución del mismo, durante un intervalo de tiempo T , a través de una ventana de ancho L . Para seguir el movimiento, el observador puede escoger un punto de referencia, como el Q que aparece en el valle, en el extremo izquierdo de la ventana, en el instante $t=0$. Sucesivamente se verá que dicho punto va avanzando hacia la derecha, hasta que, en el instante $t=T$, este punto de referencia toca al extremo derecho de -

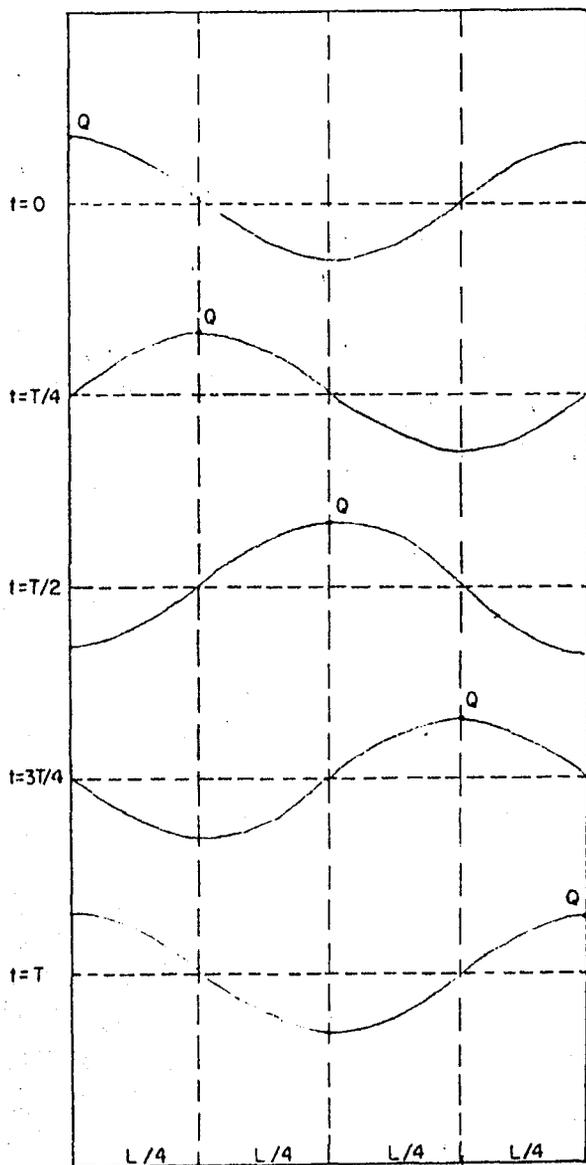


FIG A.2 Evolución del oleaje durante el intervalo de tiempo $t=T$ a través de una ventana de ancho L .

la ventana. Por éste motivo el observador dirá que la ola se desplazó hacia la derecha, y como tardó un tiempo T , en recorrer la distancia L , dirá también que lo hizo con una velocidad $C=L/T$.

Las partículas del líquido con este movimiento, no avanzan hacia la derecha, sino que en realidad describen trayectorias cerradas en torno a sus posiciones de equilibrio originales. El movimiento conjunto de ellas crea la impresión de que la ola progresa (es decir, se mueve) hacia la derecha; pero - un sencillo experimento, tirando trazadores en un canal de oleaje, permite comprender lo que verdaderamente sucede.

Por lo demás, puede verse que la constante L corresponde a la longitud de la ola (distancia entre dos valles sucesivos) en tanto que T es el periodo (tiempo transcurrido para que en una misma sección se presente un valle). La línea con trazo discontinuo marca el nivel de aguas tranquilas (si no hubiera movimiento) a partir de la cual se aprecia el nivel de las fluctuaciones.

Resulta interesante comprobar que el modelo matemático - elaborado a partir de la función potencial (ϕ) describe razonablemente bien a una ola progresiva, por lo menos, dentro de la concepción que de ella se tiene en la superficie.

La forma que tendrá la trayectoria de las partículas al producirse el movimiento ondulatorio, será de una elipse, la

cual estará dada por:

$$\frac{(\xi - \xi_0)^2}{\left[\frac{kga}{\sigma^2} \frac{\cosh k(z+d)}{\cosh kd} \right]^2} + \frac{(\zeta - \zeta_0)^2}{\left[\frac{kga}{\sigma^2} \frac{\sinh k(z+d)}{\cosh kd} \right]^2} = 1$$

Cada partícula en el seno del líquido queda fija por las coordenadas (X_1, Z_1) que tiene cuando no existe la onda. Al pasar esa perturbación, las partículas se desplazan de esa posición inicial unas distancias ξ y ζ medidas, respectivamente en la dirección de los ejes X, Z (tomando como origen la posición (X_1, Z_1) original de la partícula); ξ y ζ están dadas por:

$$\xi = (x - x_1) = -\frac{H}{2} \frac{\cosh [k(d+Z_1)]}{\sinh (kd)} \sin(kx_1 - \sigma t)$$

$$\zeta = (z - z_1) = \frac{H}{2} \frac{\sinh [k(d+z_1)]}{\sinh (kd)} \cos(kx_1 - \sigma t)$$

donde las coordenadas (X, Z) son las que corresponden a la posición variable de la partícula.

A2 PRESION QUE POSEE UNA OLA PROGRESIVA

A partir de la ecuación de movimiento linealizada e integrada para un movimiento irrotacional de un fluido incompresible, se puede deducir que:

$$p = \gamma \left[\eta \frac{\cosh k(z+d)}{\cosh kd} - z \right]$$

donde γ es el peso específico del agua, en Kg/m³. El término γz se denomina presión estática o hidrostática y el otro término es la presión dinámica. Este último es máximo en la superficie y disminuye al aumentar la profundidad.

A.3 ENERGIA DE LA ONDA

La energía total de una onda es igual a la suma de las energías potencial y cinética, y se puede obtener para un ancho unitario y toda la longitud de la onda; cuando así se hace se expresa en Kg-m/m.

La energía potencial de una onda se debe a las diferentes posiciones de las partículas cercanas a la superficie con respecto al nivel medio del mar y no depende para nada del movimiento del líquido. Se puede considerar como el trabajo necesario para deformar una superficie horizontal en una senoidal. Su valor, para un ancho unitario y longitud de onda, se expresa como:

$$E_p = \frac{\gamma H^2 L}{16}$$

La energía cinética se debe a la velocidad que tienen las diferentes partículas del líquido. Para un ancho unitario y en toda la longitud de la onda, la energía cinética vale:

$$E_c = \frac{\gamma H^2 L}{16}$$

La energía total es: $E_p + E_c$

$$E = \frac{\rho g H^2 L}{8}$$

Esta ecuación se obtiene de acuerdo con la teoría de Airy, suponiendo que E_p se calcula con respecto al nivel medio de la onda y que todas las ondas se propagan en la misma dirección.

A.4 CLASIFICACION DEL OLAJE DE ACUERDO A SU PROFUNDIDAD RELATIVA.

Es conveniente y útil clasificar a las olas de acuerdo a la relación entre d y L . Esta relación d/L se denomina "profundidad relativa". Las expresiones que definen los parámetros del oleaje para la teoría de pequeña amplitud se pueden simplificar enormemente si d/L está contenida dentro de ciertos rangos. Si $d/L < 1/20$, la profundidad es pequeña en comparación con L y los oleajes se clasifican como "oleajes en aguas bajas", mientras que si $d/L > 1/2$, los oleajes se clasifican como "oleajes en aguas profundas". Para d/L mayor de $1/20$ y menor de $1/2$ los oleajes se clasifican como "oleajes en aguas intermedias".

APENDICE B. REFRACCION DEL OLAJE

Conforme el oleaje se traslada a aguas someras, el cambio de profundidad causa una disminución en la celeridad y como consecuencia su longitud disminuye y su altura aumenta y el frente de ese oleaje se reorienta conforme a los contornos del fondo, también llamados líneas batimétricas. Ese efecto se llama refracción del oleaje, el cual depende de la relación entre la profundidad y la longitud de onda (d/L), ver fig B.1.

En el estudio de la refracción se supone que cuando una onda avanza hacia la playa, no existe dispersión lateral de energía a lo largo de su frente, es decir la energía transmitida permanece constante entre dos líneas ortogonales (trazadas perpendicularmente al frente de las ondas). La potencia o flujo de energía del oleaje transmitido hacia adelante entre dos ortogonales adyacentes, en aguas profundas, se expresa por:

$$P_o = \frac{1}{2} b_o E_o C_o = C_{g_o} b_o E_o \quad (B.1)$$

donde b es la separación entre dos ortogonales adyacentes, E la energía del oleaje y C_g la celeridad de grupo (el subíndice o se refiere a la condición de aguas profundas). Este mismo flujo de energía transmitido hacia adelante entre las mismas dos ortogonales adyacentes, pero en aguas someras está expresado por

$$P = n b E c = C_g b E \quad (B.2)$$

Aceptando que la energía se conserva entre ortogonales, al igualarse las ecuaciones B.1 y B.2 y sustituyendo el valor de $E = (\delta H^2)/8$ y $C = L/T$, se obtiene que:

$$\frac{H}{H_0} = \left[\frac{L_0}{2nL} \left(-\frac{b_0}{b} \right) \right]^{\frac{1}{2}} = K_s K_r \quad (\text{B.3})$$

donde:

K_s = coeficiente de propagación (coeficiente de propagación en aguas someras).

K_r = coeficiente de refracción.

Ambos coeficientes están definidos por las siguientes ecuaciones:

$$K_s = \left(\frac{L_0}{2nL} \right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{C_{g0}}{C_g} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{B.4a})$$

$$K_r = \left(-\frac{b_0}{b} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{B.4b})$$

La ecuación B.3 permite valuar la altura del oleaje, -- tanto en aguas intermedias como en las someras a partir de -- las características del oleaje en aguas profundas, siempre y cuando se puedan determinar las separaciones entre ortogonales adyacentes. El valor de n está definido por:

$$n = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{(4\pi d)/L}{\text{Senh} (4\pi d/L)} \right] \quad (\text{B.4c})$$

Como puede observarse en la ecuación B.1 son dos los -- efectos que produce el cambio de profundidad en el oleaje. --

Si los frentes del oleaje son paralelos a las líneas batimétricas se cumple que $(b_0/b)=1$, y por tanto solo se produce el primer efecto cuantificado por K_s ; el coeficiente K_s toma en cuenta la disminución de la longitud de onda producida por la disminución en profundidad y el cambio en su altura, ya que debe conservarse el flujo de energía a lo largo de áreas de ancho unitario y altura igual a la profundidad. El segundo efecto se produce cuando los frentes de onda forman un ángulo con las líneas batimétricas, debido a lo cual las ortogonales dejan de ser paralelas; ésto es cuantificado por K_r . Este segundo efecto, generalmente, se produce acompañado del primero.

Con ayuda de la figura B.2 es posible estimar el valor del coeficiente de propagación en aguas someras, K_s , en función de d/L ó d/L_0 . Como puede observarse en aguas profundas $K_s = 1.00$.

De acuerdo con la teoría lineal K_r depende solo del período de la ola, de la profundidad y de la dirección inicial del oleaje. Generalmente, para calcular los valores de b_0 y b se construye un plano o diagrama de refracción (los que se describen más adelante). Además las ortogonales pueden tender a converger o diverger; para el primer caso se tiene un incremento de la energía por unidad de área y como consecuencia de ello un aumento de altura de la ola, por el contrario para el segundo caso se tiene una disminución de energía por unidad de área y por tanto una reducción en la altura

La altura, período y dirección del oleaje en aguas profundas podrá ser determinado ya sea en cartas sinópticas o por mediciones directas.

Para el diseño y construcción de estructuras y obras marítimas generalmente se necesitan conocer las alturas, períodos y direcciones del oleaje en la región costera. Para determinar dichos parámetros se requiere tomar en cuenta los efectos de refracción. Los cambios del oleaje debido a la refracción son comúnmente estimados mediante la construcción de diagramas de refracción en forma gráfica, aunque también existen métodos aerofotográficos, pero no son de uso común. Los diagramas de refracción pueden construirse siguiendo dos procedimientos. El primero conocido como el método del frente de ola, consiste en obtener las posiciones sucesivas de las crestas conforme el oleaje se desplaza hacia la costa. Una vez determinadas las posiciones sucesivas de la cresta de una ola, son trazadas líneas perpendiculares que unen a una cresta con otra. Estas líneas se conocen como ortogonales. A la figura resultante en que se muestran las ortogonales y los frentes de onda se le denomina diagrama de refracción. En el oleaje, las ortogonales son dibujadas directamente en el plano. En éste método cada ortogonal se traza independientemente de las restantes. Se recomienda trazar cuatro o cinco rayos que abarcan la zona en estudio.

Por cada dirección del oleaje y período de interés se construye un diagrama de refracción, o sus rayos correspondien

tes y como mínimo deben pasar por el punto en estudio dos ortogonales, una de cada lado del punto.

B. 1 CONSTRUCCION GRAFICA DEL DIAGRAMA DE REFRACCION POR METODO DE FRENTE DE ONDA.

En aguas profundas, el oleaje se mueve uniformemente hacia la costa con sus crestas paralelas, mientras que en aguas intermedias y someras, la reducción en la celeridad provoca que la cresta se reoriente y tienda a ser paralela a las líneas batimétricas.

El método o construcción gráfica de los diagramas de refracción o plano de oleaje requiere:

- a) Suavizar las líneas batimétricas, ya que las pequeñas irregularidades no son de importancia en el fenómeno y sí dificultan el trazo.
- b) Dibujar en aguas profundas un frente de ola, con la dirección del oleaje que se desea estudiar.
- c) Preparar una plantilla en material transparente para la obtención de los diagramas de refracción (fig B.3). con ayuda de la ecuación:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)$$

La plantilla de la figura B.3 permite obtener, para una relación d_1/L_0 , el valor de L_1 si previamente se marca, a la escala del plano, el valor de L_0 asociado a $d/L_0=0.5$ (límite -

aproximado entre aguas profundas e intermedias).

Hecho lo anterior se realiza lo siguiente:

- a) Para cada período se determina la longitud del oleaje en aguas profundas, L_0 . Cada diagrama de refracción se hace para un período dado y una dirección de oleaje, en aguas profundas.
- b) En el frente de la ola se eligè una serie de puntos de interés a partir de los cuales se marcan las ortogonales, puntos a, b, c de la figura B.4. La separación entre estos puntos se recomienda tomarla como un múltiplo de L_0 .
- c) Definidos los puntos de interés y con el auxilio de la plantilla mostrada en la figura B.3 para una relación d_i/L_0 se obtienen las nuevas longitudes del oleaje, L_i . Para ello conviene anotar la relación d_i/L_0 en cada batimétrica, para cada período por analizar, lo cual se muestra en la figura B.1.
- d) Con las nuevas longitudes del oleaje asociadas a los puntos de interés, se trazan arcos de círculo cuyos radios serán L_i . Figura B.4.

- f) El procedimiento mencionado se repite hasta llegar a la línea de playa. Si al avanzar con las longitudes L_i obtenidas se cortan varias batimétricas, -- conviene reducir la separación entre los puntos a, b y c, con ello la malla queda más cerrada.

B.2 CONSTRUCCION GRAFICA DEL DIAGRAMA DE REFRACCION POR EL METODO DE ORTOGONALES O RAYOS DE OLA.

Este método es gráfico, fué propuesto por Arthur, Munk e Isaacs y requiere:

- a) Suavizar las líneas batimétricas ya que las pequeñas irregularidades no son de importancia en el fenómeno y en cambio sí dificultan el trazo.
- b) Dibujar en aguas profundas un frente de ola, con la dirección que se desea estudiar y se escogen sobre él, los orígenes de todas las ortogonales por trazar; por ejemplo tres o cuatro si solo hay un punto de interés, o varios si se desea estudiar una amplia zona.
- c) Construir la tabla B.1 que facilitará el manejo de los datos.

- d) Preparar una plantilla, para obtener los diagramas de refracción, como se indica en la figura B.5a .

Hay dos formas o procedimientos que pueden emplearse para la construcción de los rayos de ola, dependiendo si el ángulo de incidencia es menor de 80° o igual o mayor de 80° .

i) PROCEDIMIENTO PARA $\beta < 80^\circ$

Sea β_i la dirección del rayo frente a la batimétrica d_i ; se desea conocer la reorientación del rayo de la ola para la batimétrica d_{i+1} (fig B.6).

- a) Se dibuja la profundidad media entre líneas batimétricas.
- b) Se extiende la ortogonal de la onda incidente, más allá del contorno de la profundidad media. El cruce con esa línea es el punto P^1 .
- c) En el punto de cruce del contorno o profundidad media con la ortogonal de la onda incidente, P^1 se dibuja la tangente S-T.
- d) La plantilla (fig B.5a) para obtener el diagrama de refracción se coloca coincidiendo la ortogonal inci-

dente con la línea MM^1 de la plantilla, y el punto -
 ortogonal incidente, P de la misma sobre P^1 .

- e) Se gira la plantilla haciendo centro en R hasta que la tangente ST intersecte a la recta PR en el valor de C_i/C_{i+1} (por ejemplo, 1.114 en la fig B.6), correspondientes a las líneas batimétricas d_i y d_{i+1} .
- f) La línea ortogonal marcada en la plantilla, MM^1 , muestra la nueva dirección de la ortogonal pero su localización necesita de una ligera corrección, desplazándola paralelamente a PB de tal manera que $AP=PB$.
- g) El procedimiento mencionado se repite hasta llegar a la línea de costa; la línea quebrada que se obtiene posteriormente se suaviza.

ii) PROCEDIMIENTO PARA $\beta \geq 80^\circ$

Sea β_i la dirección del rayo frente a la batimétrica d_i ; se desea conocer la reorientación del rayo de la ola para la batimétrica d_{i+1} .

- a) Como se ilustra en la fig B.7, el espacio comprendido entre líneas batimétricas adyacentes se discretiza formando una malla. El intervalo "R" se define arbitrariamente.

riamente y se recomienda que si es posible sea un múltiplo de "J" (donde éste es un valor medido al centro de la malla correspondiente).

- b) Con la relación C_i/C_{i+1} , previamente calculada como en el procedimiento anterior, y la relación R/J , el ángulo de deflexión de la ortogonal incidente ($\Delta\beta$) se obtiene en la figura B.5B (por ejemplo, para $C_i/C_{i+1}=0.89$ y $R/J=1$, se lee $\Delta\beta = 6^\circ$; para $R/J=2$, se lee $\Delta\beta = 11.5^\circ$).
- c) La ortogonal incidente se prolonga al centro del elemento discretizado y la nueva ortogonal se dibuja tomando una deflexión $\Delta\beta$ (ver fig B.7).
- d) El proceso se continúa: si $\beta < 80^\circ$, se prosigue como se indica en el primer caso, si $\beta \geq 80^\circ$, se utiliza este procedimiento. De esta manera se obtiene una línea quebrada que posteriormente es suavizada.

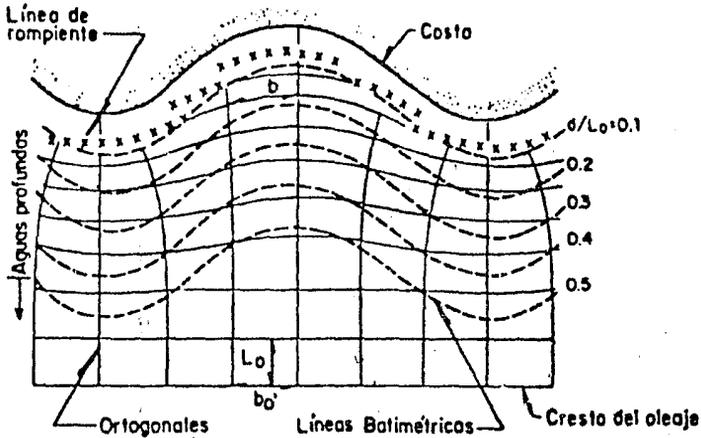


FIG. B.1 Refracción del oleaje

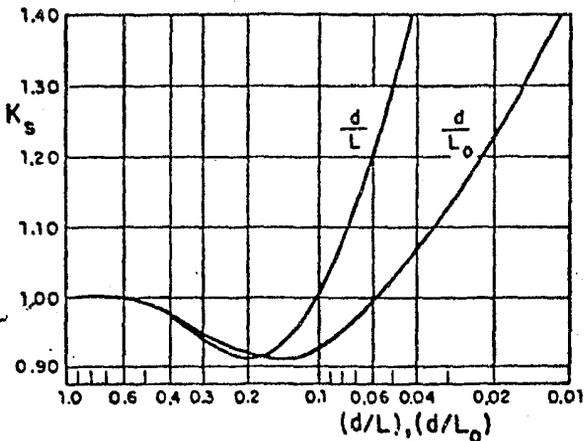


FIG. B.2 Coeficiente de propagación K_s

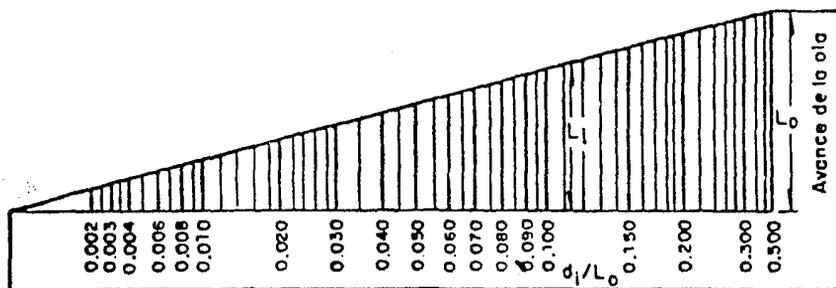


FIG. B.3 Plantilla para la obtención de los diagramas de refracción, según Johnson, O'Brien y Isaacs (1948)

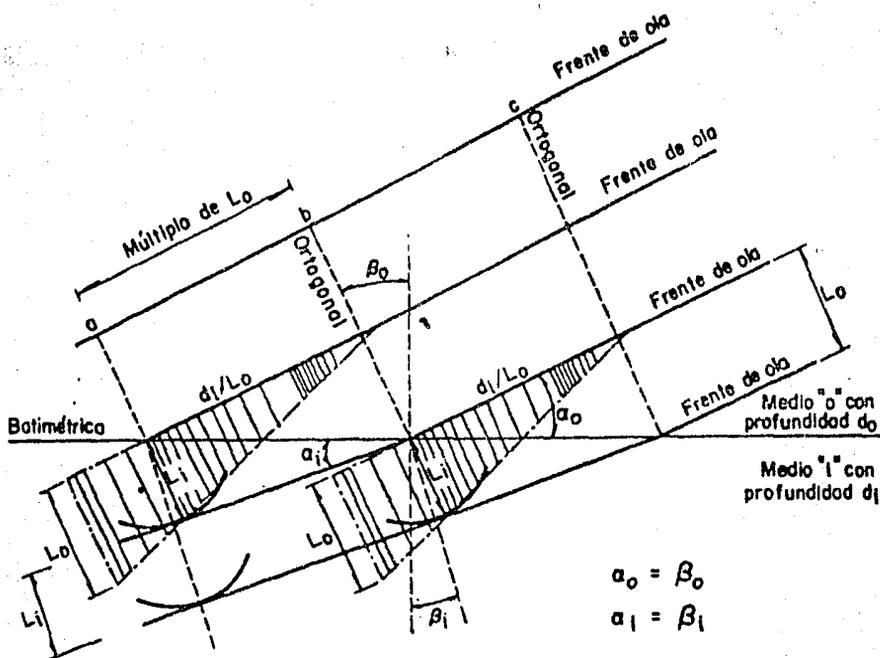


FIG. B.4 Construcción gráfica del diagrama de refracción por el método de frentes de ola

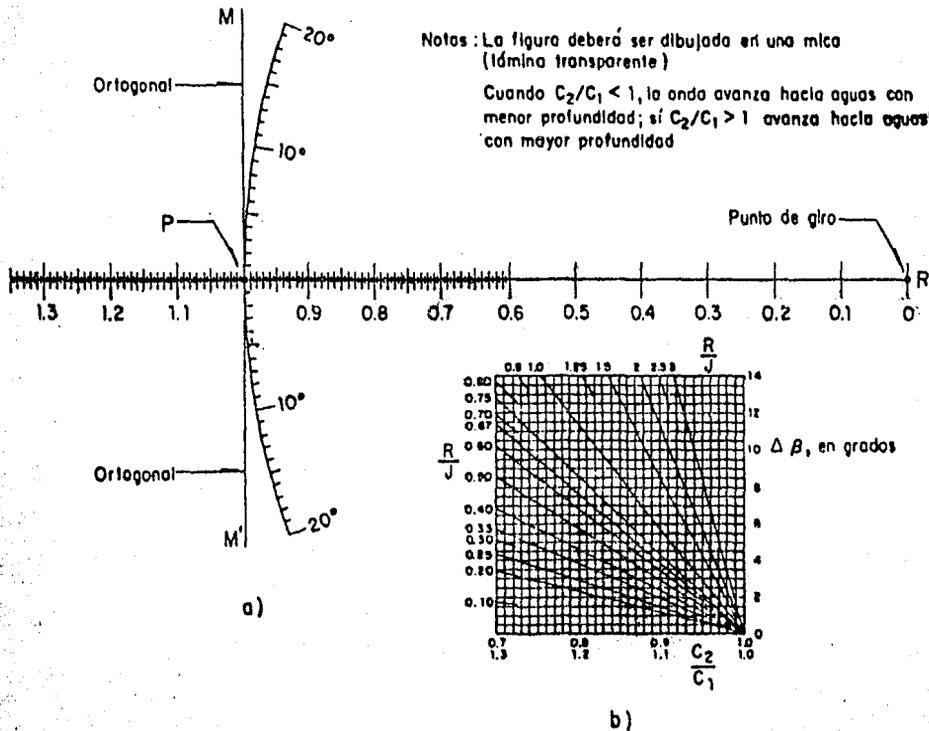


FIG. B.5 Plantilla para dibujar los diagramas de refracción

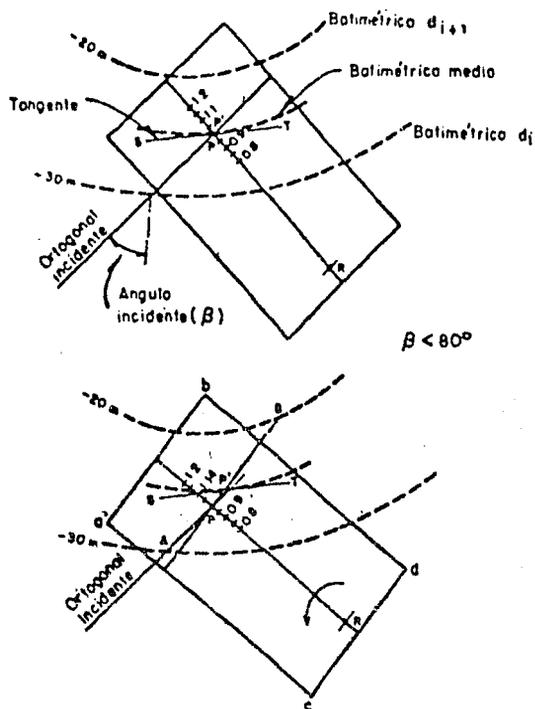


FIG. B.6 Uso de la plantilla (fig B.5) para dibujar los diagramas de refracción

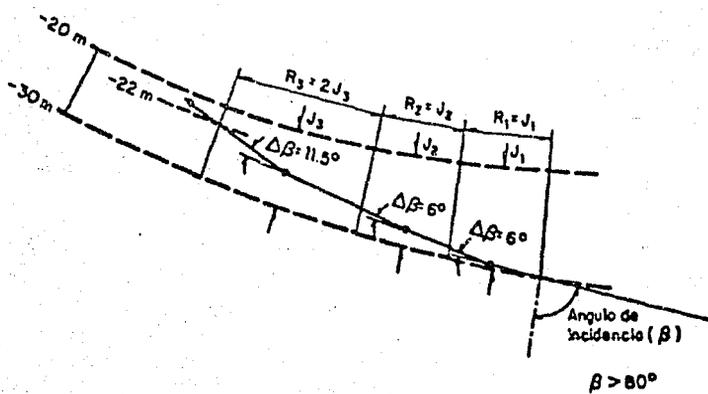


FIG. B.7 Diagrama de refracción empleando el método de rayos

TABLA B.1 Características del oleaje

Características del oleaje en aguas profundas	
Profundidad, d_i	C_i/C_{i+1}
d_1	C_1/C_2
d_2	C_2/C_3
d_3	C_3/C_4

REFERENCIAS

- 1.- F. Téllez, "Diseño de Muelles sobre pilotes", Informe del Instituto de Ingeniería, UNAM, Proyecto 4727, Agosto de 1985.
- 2.- "Ocean Wave Statistics", Ministry of Technology, National Physical Laboratory, London 1967.
- 3.- "Tablas de predicción de mareas 1986", Puertos del Océano Pacífico, UNAM, Servicio Mareográfico Nacional.
- 4.- R. Bustamante Ahumada, "Ingeniería Marítima", Ediciones Temas marítimos, S. de R.L., México, 1976.
- 5.- Sánchez Bribiesca J.L., "Manual de Hidráulica marítima elemental (texto), Patrocinado por Petróleos Mexicanos, México, D. F. 1982.
- 6.- "Shore protection manual, Volume I" U.S. Army Coastal Engineering Research Center, 1977.
- 7.- "Manual de diseño de obras civiles. Hidrotecnica A.2.1.3 Hidráulica Marítima", C.F.E.
- 8.- "Numerical calculation of wave diffraction in harbours with basin of unequal depths", Sogreah Ingéieurs Conseils, Grenoble, France, 1980.
- 9.- "Manual de defensas Marinas", Hule Industrial, S.A.
- 10.- Technical Standars for port and harbour facilities in Japan", The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan, Tokio, Japan, 1980.