



2ej 154

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**Facultad de Ingeniería**

**Mexápodos Tipo "T" Utilizados como Elementos  
de Coraza en Rompeolas**

**T E S I S**

Que para obtener el título de:

**I N G E N I E R O C I V I L**

**p r e s e n t a :**

**MARIA TERESA LIDIA SANCHEZ VEGA**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## CONTENIDO

CAPITULO 1.	GENERALIDADES.	1
	1.1 Finalidad de las escolleras.	
	1.2 Construcción de escolleras.	
	1.3 Descripción de los mexápodos.	
	1.4 Datos disponibles.	
CAPITULO 2.	MODELOS HIDRAULICOS.	11
	2.1 Teoría lineal.	
	2.2 Modelos hidráulicos marítimos.	
	2.3 Leyes de similitud.	
	2.4 Selección de escalas.	
	2.5 Dimensiones en el modelo.	
	2.6 Construcción de modelos.	
	2.7 Calibración del batidor.	
CAPITULO 3.	ESTABILIDAD DE LAS ESCOLLERAS.	48
CAPITULO 4.	SOBREELEVACION MAXIMA Y MINIMA DEL OLEAJE.	54
CAPITULO 5.	CRITERIO DE DISEÑO.	58
CAPITULO 6.	DESARROLLO EXPERIMENTAL.	60
CAPITULO 7.	RESULTADOS.	63
	7.1 Canal de olas.	
	7.2 Tanque de morros	
	7.3 Overtopping.	
CAPITULO 8.	CONCLUSIONES	83
REFERENCIAS.		86

## 1. GENERALIDADES.

En el Departamento de Estudios y Laboratorios de la Dirección General de Obras Marítimas, se llevó a cabo un estudio sobre el comportamiento de elementos artificiales prefabricados denominados "mexápodos", los cuales se pretende sean usados en la coraza de las escolleras.

### 1.1 Finalidad de las escolleras.

Las escolleras son estructuras construídas dentro del mar que estan unidas a tierra, por medio de las cuales se logra -- aislar o proteger una zona del oleaje y/o las corrientes. Esta protección es requerida para:

- a) Formar zonas con oleaje mínimo en donde se resguarden las embarcaciones y en donde sea posible efectuar maniobras de carga y descarga sin peligro.
- b) Conservar profundidades adecuadas en canales de navegación y zonas para maniobras. El oleaje llega a mover el material del fondo, generalmente arenoso, bajo ciertas condiciones de profundidad, tamaño de partículas etc. Este material al ser arrastrado tiende a depositarse en las partes más profundas que corresponden a los canales de navegación y dársenas que previamente han sido dragadas. Con las escolleras se evita la posibilidad de este azolvamiento al abatirse el citado oleaje.
- c) Mantener bocas abiertas. Las lagunas litorales en las costas de nuestro país se están utilizando para desarrollar importantes centros de producción de camarón, ostión y algunas especies de pesca. Para lograr lo anterior, entre las obras requeridas, se construyen canales de comunicación con el mar para mejorar las condiciones biológicas de dichos ecosistemas. Muchas de esas lagunas son de dimensiones reducidas y no alcanzan a tener una prisma de marea lo suficientemente grande como para estabilizar la boca y el canal que se construya y evitar que el arrastre litoral lo cierre. Para ayudar a su estabilización e impedir su azolvamiento y cierre, se construyen escolleras.

## 1.2 Construcción de escolleras.

Las escolleras se pueden construir con elementos naturales o artificiales. El elemento natural generalmente utilizado es la roca producto de la explotación de canteras. También se puede emplear cantos rodados, piedra de pepena, etc. La sección transversal de una escollera contempla generalmente un mínimo de tres zonas; núcleo, capa intermedia y coraza, formadas con elementos del tamaño que se especifique.

Aún cuando la roca es el material más usual y puede ser el más económico que se puede utilizar, su uso está restringido a que exista a una distancia tal que resulte económico su acarreo o bien que la explotación se puedan obtener rocas con el peso requerido para formar la coraza.

Cuando existen bancos de roca cercanos a la obra, pero están tan fracturados que el tamaño máximo de las rocas obtenidas sólo puede ser utilizado en el núcleo y capas intermedias, la práctica usual es formar la coraza con elementos artificiales prefabricados como: tetrápodo, tribars, dolos, etc.

Los elementos artificiales son generalmente construídos de concreto sin refuerzo, utilizando moldes metálicos o de madera. El diseño de esos elementos persigue fundamentalmente el que exista una trabazón eficiente entre ellos, de tal forma que con pesos menores que los necesarios tratándose de material pétreo, resistan la acción del oleaje sin ser movidos o fracturados.

Entre los elementos artificiales que se utilizan más frecuentemente se encuentran algunos de los ya mencionados y son: tribars, dolos, tetrápodos y cubos. Según lo ha demostrado la práctica, de todas las formas probadas, la mejor es el de dolos ya que requiere el menor peso para resistir un oleaje dado; además se ha comprobado que cuando el oleaje llega a moverlos se acomodan mejor entre ellos y su efectividad aumenta.

En este estudio se experimenta una nueva forma denominada mexápodo que podrá ofrecer una solución interesante en una sola capa.

Para determinar el peso de los elementos naturales o artificiales se utiliza la fórmula de Hudson que está basada en el trabajo original de Irribarren.

$$W = \frac{\gamma_s H^3}{K_D \left( \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right)^3 \cot \alpha}$$

en donde:

$W$  = Peso de cada uno de los elementos de la coraza, en kilogramos.

$H$  = Altura de la ola, en metros.

$\gamma_s$  = Peso volumétrico del material de los elementos, en Kg/m<sup>3</sup>

$\gamma$  = Peso volumétrico del agua, en Kg/m<sup>3</sup>.

$\alpha$  = Angulo del talud, en grados.

$K_D$  = Coeficiente (sin unidades) que se obtiene con ayuda de la Tabla 1.1 y que es función de:

- . lugar en donde son colocados los elementos ya sea en morro o en el cuerpo de la estructura.
- . si la ola rompe, o no sobre la obra.
- . tipo del elemento que es usado para formar la coraza ya sea natural o artificial.
- . forma del material artificial que es utilizado en la coraza.
- . forma en que se colocan los elementos de la coraza ya sea acomodados o al azar.
- . número de capas de que está formada la coraza.
- . ángulo del talud.

En la fórmula anterior, la altura del oleaje y el peso volumétrico de la roca intervienen en una forma preponderante ya que están elevados a la tercera potencia.  $K_D$  influye decisivamente, por la gran variación que tiene su valor; por ejemplo entre la roca y los dolos, de 3 a 20. Los menores cambios se obtienen con la variación del ángulo del talud. El ángulo del talud conviene que no sea muy tendido, por ejemplo 3: 1 ya que aumentan mucho los volúmenes de material que tienen que utilizar y no se reduce sustancialmente el peso de los elementos.

El tamaño de los elementos que deben emplearse para for--



mar las capas intermedias y el núcleo están dados en función - del peso  $W$  de los elementos de la coraza. Un ejemplo de ello se muestra en la Fig. 1.1 en donde también se han señalado los límites de tolerancia para el peso de los elementos en cada -- capa de acuerdo a lo indicado por el "Coastal Engineering Re-- search Center".

### 1.3 Descripción de los mexápodos.

A la fecha se han desarrollado dos tipos de mexápodos, -- los denominados tipo "Y" y tipo "T". En este trabajo se des-- cribe tan solo el último tipo citado, que fue utilizado en el estudio.

A fin de proporcionar una idea general sobre este tipo de elemento se indicará que básicamente consiste en 6 patas uni-- das o conectadas por un muñon. Al observarle de frente coinci-- diendo con la dirección del eje longitudinal, se observa una - figura en forma de "T". A la vez, en esa misma posición, sí - se observa por la parte posterior se tiene una "T" invertida. Se estima que por sus características geométricas podría ser posible se coloquen en una sola capa mediante un procedimien-- to sencillo de ejecutar, obteniéndose una estructura protecto-- ra uniforme y segura. Este procedimiento de colocación acomoda-- da en una sola capa se puede ejecutar empezando de abajo y procediendo hacia arriba, o al revés, a manera similar a un - proceso de tejido. Los elementos así colocados quedan perfec-- tamente trabados unos con otros. Por otra parte, se considera -

que aún colocados al azar, se obtendrán buenos resultados.

Para conocer las condiciones de estabilidad de una escollera construida con estos nuevos elementos, los máximos oleajes que puede soportar y la sobreelevación máxima que alcanza el agua (runup) sobre sus taludes; se procedió a desarrollar una serie de ensayos experimentales utilizando modelos hidráulicos. Los resultados experimentales son el tema de este trabajo.

#### 1.4 Datos disponibles.

• Para efectuar el estudio se utilizó el mexápodo tipo "T" con un volumen de 2.5 m<sup>3</sup>, peso específico del concreto de 2.2 Ton/m<sup>3</sup>, y cuyas dimensiones se ilustran en la Fig. 1.2. El peso de cada uno de estos elementos es de 5.5 Ton.

UNIDADES EN LA CORAZA	n(1)	COLOCACION	CUERPO DE LA ESCOLLERA		MORRO DE LA ESCOLLERA		TALUD Col ↕
			OLA ROMPIENTE	$K_D$ (4) OLA NO ROMPIENTE	OLA ROMPIENTE	$K_D$ OLA NO ROMPIENTE	
Roca de cantera lisa y redondeada	2	Volteo	2.1	2.4	1.7	1.9	1.8 a 3.0
Roca de cantera lisa y redondeada	>3	Volteo	2.8	3.2	2.1	2.3	(5)
Roca de cantera rugosa y angular	1	Volteo(2)	(2)	2.9	(2)	2.3	(5)
					2.9	3.2	1.5
Roca de cantera rugosa y angular	2	Volteo	3.5	4.0	2.5	2.8	2.0
					2.0	2.3	3.0
Roca de cantera rugosa y angular	>3	Volteo	3.9	4.5	3.7	4.2	(5)
Roca de cantera rugosa y angular	2	Especial (3)	4.8	5.5	3.5	4.5	(5)
Tetrapodo y					5.9	6.8	1.5
Tetrapodo y	2	Volteo	7.2	8.3	5.5	6.1	2.0
Cuadrípodo					3.7	4.1	3.0
					8.3	9.0	1.5
Tribar	2	Volteo	9.0	10.4	7.8	8.5	2.0
					7.0	7.7	3.0
Doble	2	Volteo	22.0(6)	25.0(6)	15.0		2.0(7)
					13.5		3.0
Cubo modificado	2	Volteo	6.8	7.8	---	5.0	(5)
Exopodo	2	Volteo	8.2	9.5	5.0	7.0	(5)
Tribarra	1	Uniforme	12.0	15.0	7.8	9.5	(5)
Roca de cantera ( $K_{RR}$ ) Moderadamente angular		Volteo	2.2	2.5			

(1) n es el número de elementos de la capa de coraza.

(2) El uso de una capa de coraza de rocas sujeta a alas rompientes no es recomendada y sólo bajo condiciones especiales de alas no rompientes. Cuando se use, las rocas se deben de colocar cuidadosamente.

(3) Colocación especial con el eje longitudinal de la roca, en dirección perpendicular al paramento de la escollera.

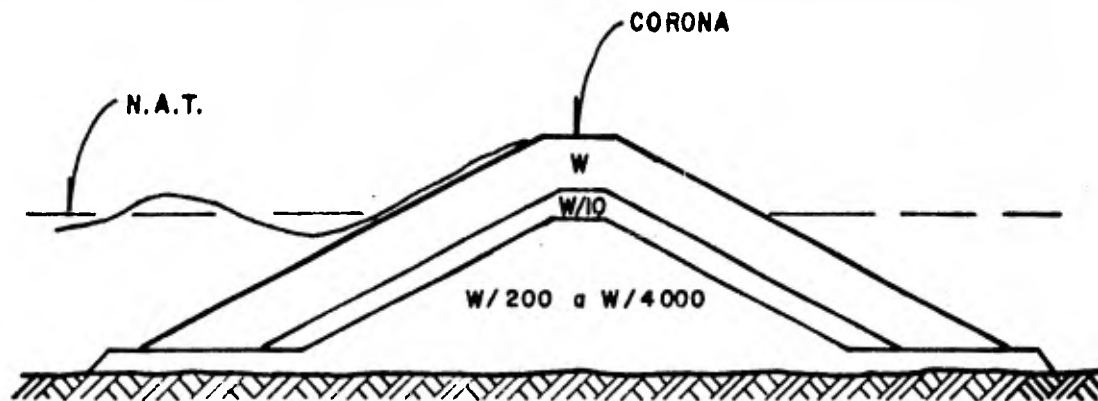
(4) Aplicable para taludes comprendidos entre 1:1.5 a 1:5

(5) Hasta tener más información disponible acerca de la variación de  $K_D$  con respecto al talud, el uso de  $K_D$  deberá limitarse a taludes comprendidos entre 1:1.5 a 1:3. Esto se debe a los resultados de algunas pruebas que indican dependencia de  $K_D$  con el talud.

(6) Datos disponibles sólo para taludes 1:2

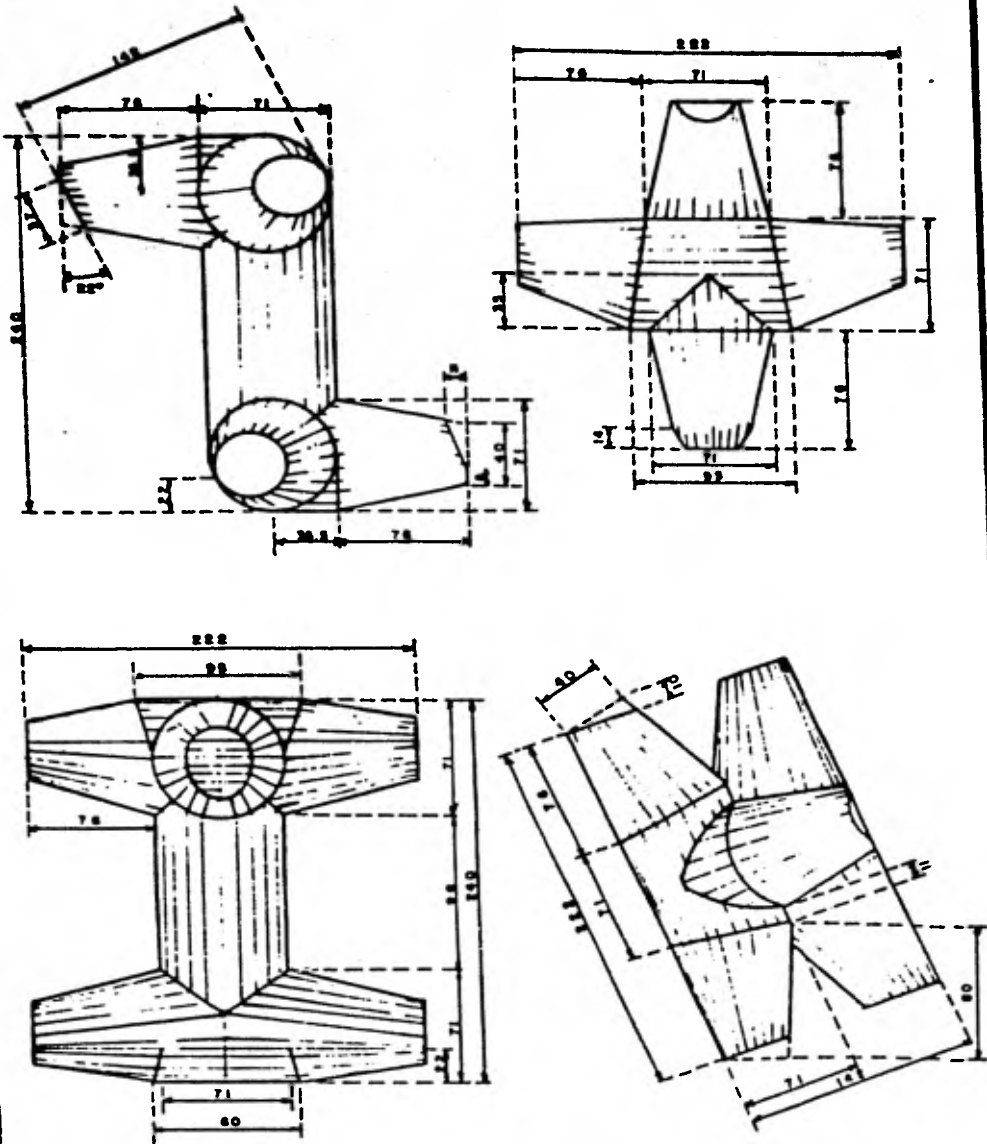
(7) Pendientes mayores de 1:2 no son recomendados en la actualidad.

TABLA 1.1 VALORES RECOMENDADOS DE  $K_D$  PARA LA DETERMINACION DEL PESO EN LAS UNIDADES DE CORAZA (CRITERIO SIN DAÑO Y MINIMA ROCION) .



Pesos relativos	Capa	Variación permitida del peso, en %
W	CORAZA	± 25
W/10	CAPA SECUNDARIA	± 30
W/200 a W/4000	NUCLEO	± 70

FIG. I.1 SECCION IDEALIZADA DE ESCOLLERAS DE ENROCAMIENTO



Anotaciones en centímetros.

FIG. 1.2 DIMENSIONES DEL MEXAPODO TIPO "T" ENSAYADO.

## 2.- MODELOS HIDRAULICOS

En mecánica de fluidos el riguroso tratamiento matemático de los problemas, con base exclusivamente en los métodos analíticos, no siempre permite llegar a la solución completa a menos que se planteen hipótesis simplificadoras que, además de restar generalidad a la solución, pueden llegar a falsear los resultados a tal grado que no tengan relación alguna con el comportamiento real del fenómeno. Por otra parte, debido a la variedad de problemas, muchas veces resulta difícil establecer -- las condiciones de frontera previas a cualquier solución matemática. En otros casos, las soluciones analíticas se deben -- plantear de tal manera que no se ignoren los aspectos físicos del fenómeno y que determinados puntos de la respuesta queden supeditados a la experimentación.

Los modelos hidráulicos han encontrado creciente aplicación para controlar y modificar diseños analíticos de estructuras hidráulicas. Mediante el uso de modelos físicos es posible experimentar a costos relativamente bajos y con economías substanciales de tiempo, hasta obtener condiciones óptimas.

Lo anterior no significa en ningún caso que una técnica sustituya a la otra. Sería un error suponer que una serie de resultados, y de reglas sencillas obtenidas de la investigación experimental supla un tratamiento racional del mismo, pudiendo ocurrir que dichos resultados tuvieran validez sólo en el intervalo de valores para el cual se efectuaron las mediciones. Además, aun cuando fuera posible hacer un estudio exhaustivo del fenómeno resulta necesario tomar en consideración una serie de factores de índole apreciativa que limitan la extrapolación y generalización de las respuestas.

La adecuada combinación del análisis matemático y la verificación experimental permite superar esos obstáculos, restringiendo las hipótesis a aquellas cuya experiencia y razonamiento físico han mostrado no tener serios efectos sobre las características esenciales del fenómeno.

En base a lo anterior puede expresarse que la investigación es una combinación de trabajos analíticos y experimentales encaminados los primeros a encontrar modelos matemáticos en base a principios físicos fundamentales que expresen el comportamiento de los fenómenos y los segundos a reproducir

dichos fenómenos y verificar la validez, o en su caso a encontrar las relaciones de las variables que intervengan en ellos - sin que en la primera parte de la investigación haya sido posible ligarlas en forma explícita.

En el campo de la hidráulica como en otras ciencias, la combinación analítica y experimental caminan siempre paralelas a causa de la complejidad del establecimiento teórico de las leyes de comportamiento del agua, por lo que la experimentación - se hace indispensable ya sea sobre el sistema natural llamado prototipo o sobre un sistema construido en semejanza a aquel llamado modelo físico, a través del cual se puede extrapolar al prototipo con un alto grado de certidumbre y predecir cualquier funcionamiento inadecuado que pueda afectar a elementos del sistema originando en algunos casos cuantiosas pérdidas económicas y humanas en otros.

Finalmente, la investigación experimental suministra las constantes numéricas y la verificación esencial sobre la exactitud del análisis, también trae consigo el estudio de las características del flujo aunadas a las propiedades del fluido y a las condiciones de frontera o geométricas.

## 2.1 Teoría lineal.

Dentro de la dinámica del mar, el oleaje juega un papel -- relevante por los efectos que produce sobre las estructuras, - las playas, los recintos portuarios y como generador de corrientes. A continuación se presentarán varios aspectos de él, aun-



que para poder tratarlo teóricamente se simplifique su forma, restringiéndose en general a un conjunto de ondas sinusoidales, ondas progresivas, armónicas simples o incluso a una sola onda.

Esquemáticamente la representación de una onda en forma simplificada se muestra a continuación (Fig. 2.1.1)

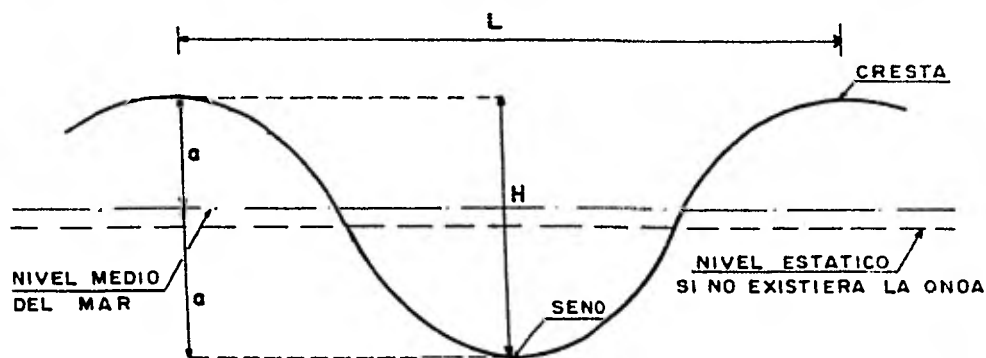


FIGURA 2.1.1

donde:

**L** = longitud de ola, distancia entre dos crestas sucesivas en la dirección de propagación.

**H** = altura de ola, distancia entre una cresta y un seno.

**a** = amplitud de ola, distancia entre una cresta y el nivel del mar o un seno y el nivel del mar.

**C** = celeridad, velocidad de propagación =  $L/T$

$T$  = período, tiempo en que tardan en pasar dos crestas -  
o dos senos consecutivos por un plano.

$f$  = frecuencia =  $1/T$

$H/L$  = esbeltez.

Los parámetros que deben conocerse de mediciones directas en el campo o mediante técnicas de post o predicción son  $H$  y  $T$ ; las otras características como la longitud, la celeridad, las velocidades que genera, etc., dependen de ellas.

Cuando un tren de ondas, ( una consecución de ondas de período constante) viaja desde profundidades teóricamente infinitas hasta llegar a la playa sufre dos modificaciones, la primera a profundidades relativamente bajas, cuando el fondo deja -- sentir su influencia y la otra en profundidades bajas cuando el fondo influye demasiado. De esta forma quedan constituidas --- tres zonas:

- a) Aguas profundas, en donde el fondo no tiene influencia sobre las ondas, (sobre la longitud y por lo tanto sobre la celeridad).
- b) Aguas intermedias, en donde el fondo ejerce influencia.
- c) Aguas bajas, en donde el fondo influye completamente - sobre la celeridad de las ondas de tal forma que ésta se vuelve independiente del período.

Los límites entre zonas están en función de la profundidad relativa ( $d/L$ ).

Para aguas profundas la relación es 0.84 aunque para fines

prácticos de la ingeniería se acepta 0.5 por razones de mnemotécnica y facilidad de cálculo. La validez de esta aceptación estriba en que los cambios que sufre la onda entre esos dos límites son muy pequeños.

Otra manera más usual, por facilidad en los estudios, de expresar el límite de Aguas Profundas en función de la profundidad es:

$$d_{LAP} = \frac{L}{2}$$

$d_{LAP}$  = profundidad que determina el límite de aguas profundas de tal modo que cualquier profundidad mayor de  $d_{LAP}$  cae dentro de la zona de aguas profundas.

### 2.1.1 Deducción de las ecuaciones del oleaje según la Teoría Lineal.

#### 2.1.1.1 Esquema del campo de estudio.

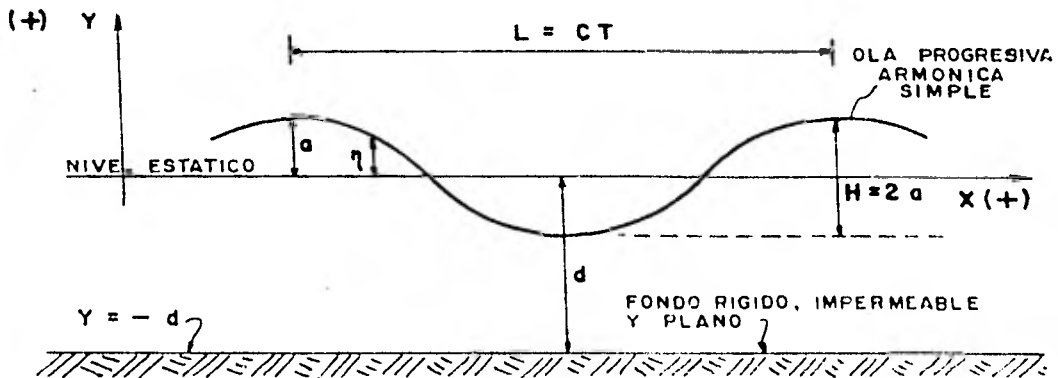


FIGURA 2.1.2

donde:

$\eta$  = desplazamiento vertical instantáneo de la superficie -  
del agua, respecto del nivel estático;  $\eta = \eta(x,t)$

$d$  = profundidad.

Rango del campo:  $-\infty < x < +\infty$  ;  $-d \leq y \leq \eta$

### 2.1.1.2 Hipótesis de partida.

- ° Se tratará con un fluido prácticamente incompresible, como es el agua, en donde  $\rho$  = constante ( $\rho$  = densidad) y la ecuación de continuidad resulta:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

- ° El agua esta considerada como un fluido delgado (poco viscoso) y puesto que además en las olas la fuerza viscosa o de fricción es despreciable podemos, sin cometer error, - considerar que el fluido en cuestión es ideal. Ya que su ponemos que no existen fuerzas de fricción, entonces el - flujo es irrotacional, esto es:

$$\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} = 0$$

Además, por ser irrotacional acepta un potencial de velocidad  $\phi = \phi(x,y,t)$

$$u = - \frac{\partial \phi}{\partial x} ; \quad v = - \frac{\partial \phi}{\partial y}$$

y por lo tanto, la ecuación a satisfacer en la región de estudio es:

$$\nabla^2 \phi = 0$$

- ° Se tratará solamente con presiones relativas, por lo tanto la presión en la superficie de la onda vale "cero". -- Por otro lado no hay variación de la presión según el -- eje X, esto es:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = 0$$

- ° La amplitud se considera pequeña ( de allí el nombre de la teoría) y por lo tanto:

$$a \ll L$$

- ° La velocidad V que aparece en la ecuación de Bernoulli -- es pequeña, por lo tanto el término donde aparece, se -- considera de 2° orden y puede despreciarse, quedando entonces la mencionada ecuación como sigue:

$$-\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{p}{\rho} + gy = C_2(t)$$

Como  $\phi = f(x,y,t)$  podemos incluir dentro de él al término  $C_2(t)$  quedando finalmente la ecuación de Bernoulli

$$-\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{p}{\rho} + gy = 0$$

### 2.1.1.3 Condiciones de frontera.

Las condiciones de frontera son:

Para el fondo la velocidad que existe es exclusivamente en X, por lo tanto:

$$v = - \frac{\partial \phi}{\partial y} = 0 \quad \text{en el plano} \quad y = -d$$

y para la superficie, puesto que la presión allí vale cero, la ecuación de Bernoulli queda:

$$- \frac{\partial \phi}{\partial t} + gy = 0$$

de donde:

$$y = \frac{1}{g} \left[ \frac{\partial \phi}{\partial t} \right]$$

y de aquí que:

$$\eta = \frac{1}{g} \left[ \frac{\partial \phi}{\partial t} \right] \quad \text{para} \quad Y = \eta$$

y puesto que "a" es muy pequeña, entonces .

$$\eta = \frac{1}{g} \left[ \frac{\partial \phi}{\partial t} \right] \quad \text{para} \quad Y = 0$$

La solución de  $\nabla^2 \phi$  puede hacerse por varios caminos, sin embargo, un método adecuado es el de separación de variables, - en el cual se supone que  $\phi = f(x,y,t)$  es el producto de tres - variables independientes entre sí, o sea que

$$\phi = \bar{X}(x) \cdot \bar{Y}(y) \cdot \bar{T}(t) \quad (A)$$

en donde:

$\bar{X}$  es una función (para ser determinada) de X solamente.

$\bar{Y}$  es una función (para ser determinada) en Y solamente.

$\bar{T}$  es una función (para ser determinada) en t solamente.

entonces  $\nabla^2 \phi = 0$  resulta:

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{\partial \bar{X}}{\partial x} \bar{Y} \cdot \bar{T} \quad ; \quad \frac{\partial \phi}{\partial y} = \frac{\partial \bar{Y}}{\partial y} \bar{X} \cdot \bar{T}$$

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \bar{X}}{\partial x^2} \bar{Y} \cdot \bar{T} \quad ; \quad \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 \bar{Y}}{\partial y^2} \bar{X} \cdot \bar{T}$$

de donde:

$$\frac{\partial^2 \bar{X}}{\partial x^2} \bar{Y} \cdot \bar{T} + \frac{\partial^2 \bar{Y}}{\partial y^2} \bar{X} \cdot \bar{T} = 0$$

de aquí se puede escribir

$$\frac{1}{\bar{X}} \frac{\partial^2 \bar{X}}{\partial x^2} = - \frac{1}{\bar{Y}} \frac{\partial^2 \bar{Y}}{\partial y^2}$$

y puesto que el primer miembro sólo depende de "X" y el segundo sólo de "Y".  $\bar{Y}(x)$  por ejemplo puede variar libremente sin que "Y" varíe y viceversa, entonces:

$$\frac{1}{\bar{X}} \frac{\partial^2 \bar{X}}{\partial x^2} \quad \text{y} \quad \frac{1}{\bar{Y}} \frac{\partial^2 \bar{Y}}{\partial y^2} \quad \text{no varía}$$

esto es, deberán ser igual a una constante. Llamando, por conveniencia posterior, a esa constante ( $-k^2$ ) entonces:

$$\frac{1}{\bar{X}} \frac{\partial^2 \bar{X}}{\partial x^2} = - \frac{1}{\bar{Y}} \frac{\partial^2 \bar{Y}}{\partial y^2} = -k^2$$

de aquí que podamos formar dos ecuaciones diferenciales ordinarias lineales y homogéneas:

$$\frac{d^2 \bar{X}}{dx^2} + \bar{X} k^2 = 0 \quad (1)$$

$$\frac{d^2 \bar{Y}}{dy^2} - \bar{Y} k^2 = 0 \quad (2)$$

La solución de (1):

La ecuación característica de (1) es:

$$\lambda^2 + k^2 = 0$$

de donde:

$$\lambda = \pm ki$$

de aquí que una solución de la ecuación sea:

$$\bar{X}_1 = e^{kix} \quad \text{y la otra}$$

$$\bar{X}_2 = e^{-kix}$$

como se puede comprobar

$$\frac{\partial \bar{X}_1}{\partial x} = ki e^{kix} \quad ; \quad \frac{\partial^2 \bar{X}_2}{\partial x^2} = k^2 i^2 e^{kix}$$

$$\therefore -k^2 e^{kix} + k^2 e^{kix} = 0$$

Pero  $\bar{X}_1$  y  $\bar{X}_2$  son soluciones imaginarias puesto que contienen a  $i$ . Nuestro interés práctico es obtener soluciones reales.

Para tal fin pondremos a  $\bar{X}_1$  y  $\bar{X}_2$  en otra forma, valiéndonos de la fórmula de Euler:

$$e^{kix} = \cos kx + i \operatorname{sen} kx$$

$$e^{-kix} = \cos kx - i \operatorname{sen} kx$$

entonces:

$$\bar{X}_1 = \cos kx + i \operatorname{sen} kx$$

$$\bar{X}_2 = \cos kx - i \operatorname{sen} kx$$

de estas dos ecuaciones obtenemos:



$$1/2 (\bar{X}_1 + \bar{X}_2) = \cos kx$$

$$1/2i (\bar{X}_1 - \bar{X}_2) = \operatorname{sen} kx$$

De aquí observamos que los segundos miembros son reales.

Aplicando el Teorema Fundamental que dice:

"Si una solución de una ecuación diferencial ordinaria lineal homogénea es multiplicada por cualquier constante, la función resultante es también una solución de la ecuación".

"Si dos soluciones de la ecuación se suman el resultado es también una solución".

Resulta la solución general:

$$\bar{X} = A \cos kx + B \operatorname{sen} kx$$

donde:

A y B son constantes arbitrarias.

La solución de (2):

La ecuación característica de (2) es:

$$\lambda^2 - k^2 = 0$$

$$\lambda = k \sqrt{1} = \pm k$$

y las soluciones son:

$$\bar{Y}_1 = e^{ky}$$

$$\bar{Y}_2 = e^{-ky}$$

Aplicando nuevamente el Teorema Fundamental enunciado an-

teriormente se llega a:

$$\bar{Y} = C e^{ky} + D e^{-ky}$$

donde:

C y D son constantes arbitrarias.

Ahora bien la ecuación ( A )

$$\phi(x, y, t) = \bar{X} \cdot \bar{Y} \cdot \bar{T}$$

resulta:

$$\phi(x, y, t) = (A \cos kx + B \operatorname{sen} kx)(C e^{ky} + D e^{-ky}) \bar{T}(t) \quad (3)$$

Ahora sólo falta encontrar  $\bar{T}(t)$  para obtener el potencial  $\phi$ .

Para encontrar  $\bar{T}(t)$  es preciso recurrir a la ola desplazándose. Considerando dos posiciones de una ola, una en el instante  $t = 0$  cuando la superficie de la onda corta al origen de coordenadas -- (Fig. 2.1.3.a) y otra un instante  $t = t$ , cuando la onda ya se desplazó del eje Y una distancia  $Ct$  (Fig. 2.1.3.b)

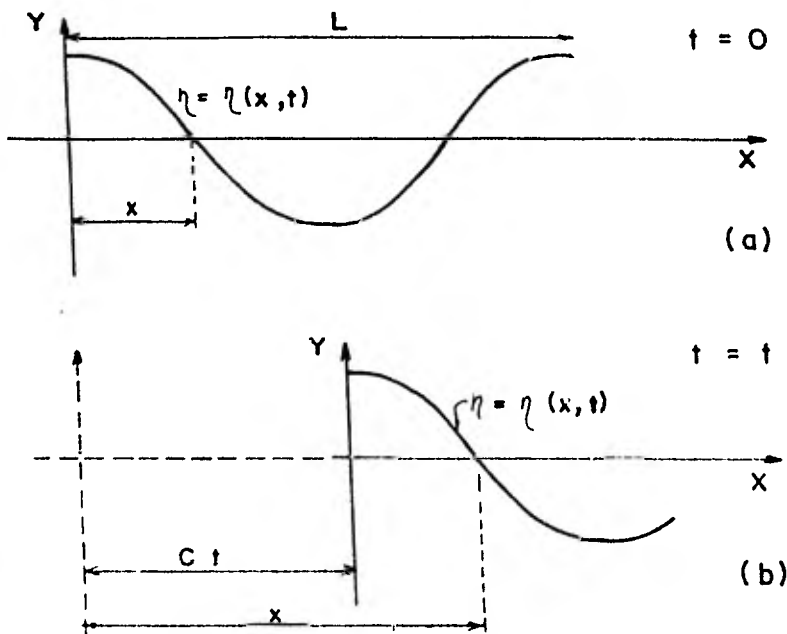


FIGURA 2.1.3

Cuando la ola se desplaza, puede considerarse un nuevo origen, como se muestra en la figura 2.1.3.b, en donde el perfil - esta ahora referido a él y sea función de  $X$ . Ahora  $x$ , medida - desde el eje original resulta:

$$\begin{aligned}
 x &= X + ct && \text{y} \\
 X &= x - ct && \text{y por lo tanto} \\
 \eta &= f(x, t) && \text{es} \\
 \eta &= f(x - ct)
 \end{aligned}$$

Para el caso de la onda progresiva armónica simple que -- nos ocupa, el perfil ( $\eta$ ) de la onda está dada por:

$$\eta = a \operatorname{sen} \theta$$

o bien, defasada:

$$\eta = a \operatorname{cos} \theta$$

en donde  $\theta$  es la fase.

Para el desarrollo que venimos efectuando no importa si la función es senoidal o cosenoidal por tanto podemos escribir en forma general:

$$\eta = a \begin{matrix} \operatorname{sen} \\ \operatorname{cos} \end{matrix} \theta$$

la fase  $\theta$  es:

$$\theta = 2\pi \left( \frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right)$$

como puede deducirse apoyandose en la figura (2.1.4).

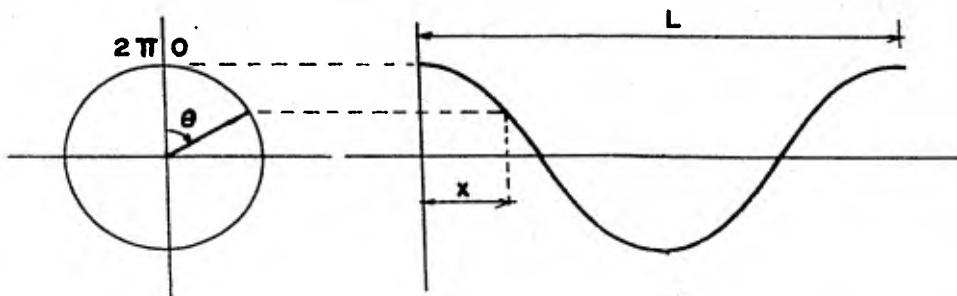


FIGURA 2.1.4.

Se cumple la proporción:

$$\frac{\theta}{2\pi} = \frac{x}{L}$$

y cuando la ola se mueve:

$$\frac{\theta}{2\pi} = \frac{x - ct}{L} \quad \text{pero} \quad c = \frac{L}{T}$$

en donde  $T$  es el período de la onda:

$$\frac{\theta}{2\pi} = \frac{x}{L} - \frac{Lt}{LT} \quad \therefore \quad \theta = 2\pi \left( \frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right)$$

quedando entonces el perfil:

$$\eta = a \frac{\sin}{\cos} 2\pi \left( \frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right) \quad (4)$$

de aquí se ve fácilmente que:

$$\bar{\omega}(t) = \frac{\sin}{\cos} \frac{2\pi}{T} t$$

A la relación  $\frac{2\pi}{T}$  se le llama "Frecuencia Angular de la Onda" y se designa usualmente por  $\sigma$ .

De esta manera la ecuación del potencial será ahora:

$$\phi = (A \cos kx + B \operatorname{sen} kx)(C e^{ky} + D e^{-ky}) \frac{\operatorname{sen} \sigma t}{\cos \sigma t} \quad (5)$$

De esta ecuación se puede obtener cuatro combinaciones elementales de los términos que son periódicos en: "x" y "t", las cuales en vista del Teorema Fundamental que se ha venido manejando, son soluciones de la ecuación de Laplace:

$$\phi_1 = A_1 (C e^{ky} + D e^{-ky}) \cos kx \cos \sigma t \quad (6)$$

$$\phi_2 = A_2 (C e^{ky} + D e^{-ky}) \operatorname{sen} kx \operatorname{sen} \sigma t \quad (7)$$

$$\phi_3 = A_3 (C e^{ky} + D e^{-ky}) \operatorname{sen} kx \cos \sigma t \quad (8)$$

$$\phi_4 = A_4 (C e^{ky} + D e^{-ky}) \cos kx \operatorname{sen} \sigma t \quad (9)$$

Con objeto de determinar las constantes arbitrarias A, --- (cualquiera  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  o  $A_4$ ) y C y D, se aplicará las condiciones de frontera a cualquiera de las ecuaciones 6, 7, 8 ó 9.

Escogiendo por orden a  $\phi_1$ , resulta:

En el fondo:

$$\left[ \frac{\partial \phi_1}{\partial y} \right]_{y = -d} = 0$$

$$0 = A_1 (-C k e^{-kd} + D k e^{kd}) \cos kx \cos \sigma t$$

$$0 = -C k e^{-kd} + D k e^{kd} \quad \therefore \quad C = D e^{2kd}$$

ahora la ecuación 6 queda:

$$\phi_1 = A_1 \left[ D e^{2kd} \cdot e^{ky} + D e^{-ky} \right] \cos kx \cos \sigma t$$

$$\phi_1 = A_1 \left[ D e^{kd} \cdot e^{ky} + D e^{-ky} \right] \cos kx \cos \sigma t$$

$$\phi_1 = A_1 D e^{kd} \left[ e^{k(d+y)} + e^{-k(d+y)} \right] \cos kx \cos \sigma t$$

multiplicando y dividiendo por 2 se obtiene:

o sea: 
$$\phi_1 = 2 A_1 D e^{kd} \cdot \frac{1}{2} \left[ e^{k(d+y)} + e^{-k(d+y)} \right] \cos kx \cos \sigma t$$

$$\phi_1 = 2 A_1 D e^{kd} \cdot \cos h \ k(d+y) \cdot \cos kx \cos \sigma t$$

Aplicando la condición de frontera en la superficie:

$$\eta = \frac{1}{g} \left[ \frac{\partial \phi_1}{\partial t} \right]_{y=0} \quad \text{da}$$

$$\eta = \frac{1}{g} \left[ -2 A_1 \sigma D e^{kd} \cdot \cos h \ kd \cdot \cos kx \sen \sigma t \right]$$

El máximo valor que puede adquirir  $\eta$  es "a" y ocurre -- cuando  $\cos kx \sen \sigma t = 1$

$$a = - \frac{2 A_1 \sigma D e^{kd}}{g} \cos h \ kd \quad \text{de aquí que:}$$

$$A_1 D e^{kd} = - \frac{ag}{2 \sigma \cos h \ kd} \quad \text{y así}$$

$$\eta = \frac{1}{g} \left[ -2 \sigma \left( - \frac{ag}{2 \sigma \cos h \ kd} \right) \cos h \ kd \cdot \cos kx \sen \sigma t \right]$$

simplificando:

$$\eta = a \cos kx \sen \sigma t$$

y  $\phi_1$  resulta:

$$\phi_1 = - \frac{ag}{\sigma} \frac{\cos h \ k(d+y)}{\cos h \ kd} \cdot \cos kx \cdot \cos \sigma t \quad (10)$$

En forma similar aplicando las condiciones de frontera a las ecuaciones 7, 8 y 9 se obtiene:

$$\phi_2 = \frac{ag}{\sigma} \frac{\cosh k(d+y)}{\cosh kd} \sin kx \sin \sigma t \quad (11)$$

$$\phi_3 = -\frac{ag}{\sigma} \frac{\cosh k(d+y)}{\cosh kd} \sin kx \cos \sigma t \quad (12)$$

$$\phi_4 = \frac{ag}{\sigma} \frac{\cosh k(d+y)}{\cosh kd} \cos kx \sin \sigma t \quad (13)$$

Debido a la linealidad de la ecuación  $\nabla^2 \phi^2 = 0$  las combinaciones de  $\phi_1$ ,  $\phi_2$ ,  $\phi_3$  y  $\phi_4$  serán también soluciones de ella.

Así restando la ecuación 10 a 11 resulta:

$$\phi = \phi_2 - \phi_1 = \frac{ag}{\sigma} \frac{\cosh k(d+y)}{\cosh kd} [\sin kx \sin \sigma t - \cos kx \cos \sigma t] \quad (14)$$

Simplificando según las fórmulas trigonométricas:

$$\phi = \frac{ag}{\sigma} \frac{\cosh k(d+y)}{\cosh kd} \cos(kx - \sigma t) \quad (15)$$

Las otras combinaciones de  $\phi_1 - \phi_2$ ,  $\phi_3 - \phi_4$  y  $\phi_4 - \phi_3$  conducen exactamente al mismo potencial  $\phi$  aunque en algunos casos corresponda a una onda que viaja en sentido negativo y en otros desplazada del eje de las ordenadas. Por tanto se ha llegado a determinar el potencial de velocidad:

$$\phi = \frac{+ag}{-\sigma} \frac{\cosh k(d+y)}{\cosh kd} \frac{\sin}{\cos} (kx - \sigma t) \quad (16)$$

Ya que  $\phi$  es periódico en "X" para una longitud de onda L, es necesario que  $K = (2\pi)/L$  por otra parte  $a = H/2$ ; sustituyendo estos valores en la ecuación 16 se obtiene finalmente:

$$\phi = + \frac{gHT}{4\pi} \frac{\cos h \frac{2\pi(d+y)}{L}}{\cos h \frac{2\pi d}{L}} \frac{\sin}{\cos} 2\pi \left( \frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right) \quad (17)$$

El cual en lo sucesivo se utilizará con signo (+), ola desplazándose en el sentido "+" de "X", y con la función coseno, --- cresta de la onda coincidiendo con el eje de las "Y".

### 2.1.2 Determinación de la celeridad y la longitud de las olas.

En la teoría lineal o teoría del oleaje de pequeña amplitud, puesto que la amplitud es muy pequeña en comparación con la longitud, es válido suponer que la variación del perfil de la onda respecto al tiempo, en una sección dada es igual a la velocidad en el eje de las "Y", así:

$$v = \frac{d\eta}{dt} = \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t}$$

puesto que la variación de  $\eta$  respecto de  $x$  es despreciable en esta teoría según lo expresado anteriormente, la velocidad resulta:

$$v = \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad \text{en la superficie } y = 0$$

como:

$$\eta = \frac{1}{g} \left[ \frac{\partial \phi}{\partial t} \right]_{y=0} \quad \text{y} \quad v = - \frac{\partial \phi}{\partial y} \quad \text{al cambiar}$$

$$\text{da:} \quad - \frac{\partial \phi}{\partial y} = \frac{1}{g} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \quad \text{en } y = 0$$



utilizando el potencial de velocidad indicado por la ecuación - 17, el primer miembro queda:

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} = \frac{HgT}{4\pi} \frac{\operatorname{senh} \frac{2\pi(y+d)}{L}}{\operatorname{cosh} \frac{2\pi d}{L}} \cos 2\pi \left( \frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right) \cdot \frac{2\pi}{L}$$

y el segundo:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = -\frac{HgT}{4\pi} \frac{\operatorname{cosh} \frac{2\pi(d+y)}{L}}{\operatorname{cosh} \frac{2\pi d}{L}} \operatorname{sen} 2\pi \left( \frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right) \cdot \frac{-2\pi}{T}$$

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = -\frac{HgT}{4\pi} \frac{\operatorname{cosh} \frac{2\pi(d+y)}{L}}{\operatorname{cosh} \frac{2\pi d}{L}} \cos 2\pi \left( \frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right) \left( -\frac{2\pi}{T} \right) \left( -\frac{2\pi}{T} \right)$$

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = -\frac{\eta Hg}{Td} \frac{\operatorname{cosh} \frac{2\pi(d+y)}{L}}{\operatorname{cosh} \frac{2\pi d}{L}} \cos 2\pi \left( \frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right)$$

igualando:

$$-\frac{HgT}{4\pi} \frac{\operatorname{senh} \frac{2\pi(y+d)}{L}}{\operatorname{cosh} \frac{2\pi d}{L}} \cos 2\pi \left( \frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right) \frac{2\pi}{L} = -\frac{\pi Hg}{Tg} \frac{\operatorname{cosh} \frac{2\pi(d+y)}{L}}{\operatorname{cosh} \frac{2\pi d}{L}}$$

$$\cos 2\pi \left( \frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right) \frac{2\pi}{L} \frac{Tg}{4\pi} \operatorname{senh} \frac{2\pi(d+y)}{L} = \frac{\pi}{L} \operatorname{cosh} \frac{2\pi(d+y)}{L} \dots$$

$$\frac{\operatorname{senh} \frac{2\pi(d+y)}{L}}{\operatorname{cosh} \frac{2\pi(d+y)}{L}} = \frac{2\pi L}{gT^2} \quad \text{en } y=0; \operatorname{tanh} \frac{2\pi d}{L} = \frac{2\pi L}{gT^2}$$

de donde la longitud de la onda resulta:

$$L = \frac{g T^2}{2 \pi} \tanh \frac{2 \pi d}{L}$$

puesto que  $C = \frac{L}{T}$  ;  $T^2 = \frac{L^2}{C^2}$

por lo tanto:

$$L = \frac{g L^2}{2 \pi C^2} \tanh \frac{2 \pi d}{L}$$

despejando a C queda:

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

Esta ecuación es conocida como Fórmula de Airy.

Como ya se conoce el potencial  $\phi$ , se puede determinar -- otras características del oleaje, como la velocidad en ambos -- ejes, la presión, etc., basta derivar y aplicar las condiciones de frontera apropiadas.

Analizando la ecuación que da la longitud de la onda, se pueden definir las dos situaciones: cuando la  $\tanh \rightarrow 1$  y -- cuando tienda a  $\frac{2 \pi d}{L}$ .

Quando  $\tanh 2 \pi d/L \approx 1$  entonces la longitud de la onda es independiente de la profundidad ya que:

$$L = \frac{g T^2}{2 \pi}$$

entonces se dice que se esta en zona de Aguas Profundas. Esto ocurre cuando el argumento  $\frac{2 \pi d}{L}$  es igual a  $\pi$  o sea:

$$\pi = \frac{2 \pi d}{L} \quad \therefore \quad d = \frac{L}{2}$$

Para fines prácticos se dice que las aguas profundas empiezan a una profundidad igual a  $L/2$ .

Ahora, cuando  $\tanh \frac{2\pi d}{L} \approx \frac{2\pi d}{L}$ ,  $L$  resulta:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \frac{2\pi d}{L} \quad \therefore \quad L = T \sqrt{gd}$$

y puesto que la longitud depende exclusivamente de la profundidad ya que  $T$  es constante, se dice que son Aguas Bajas, y ocurren cuando el argumento  $\frac{2\pi d}{L}$  es igual a  $\frac{\pi}{10}$   $\therefore d = \frac{L}{20}$ .

El caso intermedio; cuando se cumple con  $L = \frac{gT^2}{2} \tanh \frac{2\pi d}{L}$  se denomina Aguas Intermedias.

### 2.1.3 Velocidades orbitales.

Las velocidades orbitales  $U$  y  $V$  pueden fácilmente determinarse ya que:

$$U = -\frac{\partial \phi}{\partial x} \quad \text{y} \quad V = -\frac{\partial \phi}{\partial y}$$

así:

$$U = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh \frac{2\pi(d+y)}{L}}{\sinh \frac{2\pi d}{L}} \cos 2\pi \left( \frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right)$$

$$V = \frac{\pi H}{T} \frac{\sinh \frac{2\pi(d+y)}{L}}{\sinh \frac{2\pi d}{L}} \sin 2\pi \left( \frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right)$$

#### 2.1.4 Energía de una onda.

Una onda puesto que se desplace con una cierta celeridad, posee energía cinética y como se eleva respecto de un plano horizontal de comparación, el nivel estático, tiene energía potencial. La energía cinética de la onda está regida por la bien conocida ecuación:

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2$$

que para nuestro caso, en forma diferencial:

$$dE_{c_x} = \frac{1}{2} dm U^2 \quad \text{en el eje X}$$

$$dE_{c_y} = \frac{1}{2} dm V^2 \quad \text{en el eje Y}$$

La energía cinética total será:

$$dE_c = \frac{1}{2} dm U^2 + \frac{1}{2} dm V^2 = \frac{1}{2} dm (U^2 + V^2)$$

la masa esta dada por el producto de la masa específica ( $\rho$ ), por el volumen ( $dx dy$ ) por tanto:

$$dE_c = \frac{1}{2} \rho dx dy (U^2 + V^2)$$

La energía total promedio, por unidad de superficie, se -- obtiene introduciendo los términos  $\frac{dt}{T}$  y  $\frac{1}{L}$  respectivamente, así:

$$E_c = \frac{\rho}{2LT} \int_t^{t+T} \int_x^{x+L} \int_{-d}^{\eta=0} (U^2 + V^2) dx dy dt$$

sustituyendo los valores de U y V obtenidos anteriormente, ---- ecuaciones 18 y 19, resulta:

$$E_c = \frac{\rho}{2LT} \int_t^{t+\tau} \int_x^{x+L} \int_{-d}^{\eta=0} \frac{g^2 H^2 T^2}{L^2} \frac{1}{\cosh^2 \frac{2\pi d}{L}} \left[ \cosh^2 \frac{2\pi d}{L} \right. \\ \left. \sin^2 2\pi \left( \frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right) + \sinh^2 \frac{2\pi(d+y)}{L} \cos^2 2\pi \left( \frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right) \right] dx dy dt$$

simplificando con ayuda de las ecuaciones de Euler y otras ----  
igualdades trigonométricas:

$$E_c = \frac{\rho g^2 H^2 T^2}{2L \cosh^2 \frac{2\pi d}{L}} \int_t^{t+\tau} \int_x^{x+L} \int_{-d}^{\eta=0} \left[ \cosh \frac{4\pi}{L} (d+y) - \cos 4\pi \left( \frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right) \right] dx dy dt$$

Integrando resulta:

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

La energía potencial de una pequeña columna de agua  $(d + \eta)$   
espesor unitario y largo  $dx$  es:

$$dE_p = \frac{(d+\eta)^2}{2} \rho g dx \\ = \frac{(d+\eta)^2}{2} \gamma \cdot dx$$

y la energía potencial por unidad de superficie es:

$$E_p = \frac{\gamma}{2LT} \int_t^{t+\tau} \int_x^{x+L} (d + \eta)^2 dx dt$$

sustituyendo el valor de  $\eta$ , de la ecuación 4, resulta:

$$E_p = \frac{\gamma}{2LT} \int_t^{t+\Delta t} \int_x^{x+L} \left[ d^2 + Hd \sin 2\pi \left( \frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right) + \frac{H^2}{4} \sin^2 2\pi \left( \frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right) \right] dx dt$$

integrando:

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

Energía desde  $y = -d$  hasta la superficie.

La energía cuando no existe ola es:

$$E_p = \frac{\gamma}{2LT} \int_t^{t+\Delta t} \int_x^{x+L} d^2 dx dt = \frac{\gamma d^2}{2}$$

por lo tanto la energía potencial de la ola será:

$$E_p = \frac{\gamma d^2}{2} - \frac{\gamma d^2}{2} + \frac{\gamma H^2}{16} = \frac{\gamma H^2}{16}$$

y la energía total:

$$E = E_c + E_p$$

$$E = \frac{\gamma H^2}{16} + \frac{\gamma H^2}{16} = \frac{\gamma H^2}{8}$$

## 2.2 Modelos hidráulicos marítimos.

Los modelos marítimos son aquellos que nos permiten reproducir a escala los fenómenos marítimos. Este tipo de modelos

físicos se pueden dividir en cuatro grupos:

- 1) Modelos de agitación de fondo fijo.- Donde se estudian los problemas de agitación en los vasos portuarios. Para lograrlo se simula el oleaje que llega al puerto y se obtienen resultados cualitativos y cuantitativos. No se deben distorsionar las escalas de líneas y se realiza en tres dimensiones.
- 2) Modelos de fondo móvil.- Donde se estudian los problemas relacionados con el arrastre de litoral, azolves, formación de playas y la solución más eficiente que se debe dar a las bocanas de los puertos. Este tipo de estudio se realiza en 2 ó 3 dimensiones y generalmente se distorsionan las escalas de líneas.
- 3) Modelos para comparar condiciones de estabilidad de estructuras diseñadas teóricamente. Se realizan en canales hidráulicos, empleándose batidores de paleta con filtros para evitar el reflejo de la ola en el batidor. Se obtienen resultados cualitativos y el estudio se hace en 2 dimensiones.
- 4) Modelos especiales. Son los modelos que se hacen para un cierto estudio, por ejemplo para el estudio de la reflexión del oleaje, agitación en vasos portuarios, etc., con el fin de obtener conclusiones o para demostrar teorías generales de tales fenómenos.

Por no existir un modelo matemático que represente los ---

efectos que produce el oleaje sobre los mexápodos, se decidió estudiarlos a partir de 2 modelos hidráulicos: uno bidimensional y el otro tridimensional. Para ello se construyó una sección transversal representativa de un rompeolas en base a esos elementos en el canal de olas cuya longitud es de 50 metros. La sección del canal es de 60 cm. de ancho y de 120 cm., de profundidad. En uno de los extremos cuenta con un generador de oleaje o batidor que puede producir olas con períodos entre 0.8 y 4 seg., y alturas de 20 centímetros.

Frente al batidor se tiene un filtro que evita que las ondas de corto período se crucen y para las de período mayor, atenúa las ondas parásitas de corto período. Este filtro consiste en dos cajas de 20 cm. de ancho y separadas entre sí 5 cm., colocadas paralelas al eje del canal y rellenas de tela de alambre.

Con la finalidad de estudiar el comportamiento de un morro formado con estos elementos, la sección transversal se construyó en la instalación denominada "tanque de morros". Esta instalación es de 15.40 x 7.20 m., cuyo fondo tiene una pendiente de 0.0086. Esta equipada con un generador de olas que puede producir olas con períodos entre 1 y 2.5 seg., y alturas hasta de 14 centímetros.

### 2.3 Leyes de similitud.

La fidelidad de un fenómeno hidráulico en modelo con respecto al prototipo y la predicción del comportamiento de éste -



en base a observaciones ejecutadas en aquel, hace necesario el establecimiento de ciertas relaciones que se deben conservar para un fenómeno dado. Estas relaciones constituyen las leyes -- que el Análisis Dimensional denomina Leyes de Similitud.

### 2.3.1 Similitud geométrica.

Exige que entre modelo y prototipo la forma sea idéntica y solo podrá diferir en tamaño. Con este tipo de similitud se -- persigue que exista semejanza en las trayectorias de flujo entre modelo y prototipo. Para lograr esta similitud se debe cumplir que la relación entre magnitudes lineales homólogas de ambos sistemas sea constante. Esta relación se denomina escala - de líneas y se define como:

$$L_e = \frac{\text{MAGNITUD EN PROTOTIPO}}{\text{MAGNITUD HOMOLOGA EN MODELO}} = \frac{L_p}{L_m}$$

En ciertas ocasiones no es posible cumplir esta similitud en las tres dimensiones y se recurre a modelos distorsionados - en los cuales se usan diferentes escalas de líneas.

### 2.3.2 Similitud cinemática.

En esta similitud se trata de lograr que las trayectorias de flujo, los tiempos empleados por las partículas en recorrer las mismas distancias sea constante. Para lograrlo se debe cumplir que la relación de velocidades en los puntos homólogos de ambos sistemas sea la misma.

$$V_p = \frac{\text{VELOCIDAD EN PROTOTIPO}}{\text{VELOCIDAD HOMOLOGA EN MODELO}} = \frac{V_p}{V_m}$$

### 2.3.3 Similitud dinámica.

Con esta similitud se trata de lograr que las fuerzas correspondientes de ambos sistemas estén en la misma relación. Estas fuerzas están constituidas por las fuerzas de fricción del fluido, las de inercia, las de gravedad y las de presión y tensión superficial. Estas fuerzas envuelven las propiedades de viscosidad, densidad, elasticidad y capilaridad.

En la mayoría de los casos es imposible satisfacer todos los requisitos que se necesitan para todas las fuerzas que se presentan en el fenómeno en estudio y se hacen permanecer en una relación constante para modelo y prototipo en la forma siguiente:

$$\frac{F_{1m}}{F_{2m}} = \frac{F_{1p}}{F_{2p}}$$

De esta expresión puede observarse que se cumplirá la similitud dinámica si se logra que un determinado número adimensional se mantenga constante para modelo y prototipo.

### 2.4 Selección de escalas.

Para seleccionar las escalas del modelo se tomaron en cuenta los siguientes factores: la altura que debería tener el oleaje en el modelo, el peso de los mexápodos y los efectos del fon

do del mar. Para reducir el último efecto se eligió un nivel de agua en reposo tal que el oleaje generado de mayor período estuviera en todo el recorrido en aguas intermedias. Como es sabido un oleaje está en aguas intermedias si cumple que:

$$\frac{l}{25} \leq \frac{d}{L} \leq \frac{l}{20}$$

Las características del oleaje que se simularon fueron las siguientes: alturas hasta de 7 metros y períodos entre 6 y 12 seg., se decidió reproducir olas hasta 7 m., ya que no se sabía a priori la resistencia de los mexápodos, además se deseaba conocer el alcance de la ola sobre el talud (runup) para una gama amplia de alturas y períodos. Los períodos de 6 a 12 seg., se escogieron pues períodos menores no han ocasionado daño a las estructuras y generalmente están asociados a alturas menores de un metro.

#### 2.4.1 Escala de líneas.

Tomando en cuenta los aspectos descritos en 2.3.1 y el área disponible se escogió una escala de líneas:

$$L_e = 50$$

#### 2.4.2 Escalas de longitudes, celeridades y períodos de oleajes.

En los modelos de fondo fijo las condiciones de similitud que deben cumplirse son las de Froude y de Airy.

La ecuación de Airy que rige al movimiento del mar está dada por:

$$C = \sqrt{\frac{g l}{2 \pi} \tanh \frac{2 \pi d}{l}} \quad (2.1)$$

donde:

$C$  = celeridad de una onda senoidal

$l$  = longitud de la onda

$d$  = distancia que hay entre el nivel medio del mar y el fondo

$g$  = aceleración de la gravedad

Como los modelos de fondo fijo requieren que no haya distorsión entonces la escala de líneas ( $L_e$ ) será igual a la escala de longitudes ( $\lambda_e$ ).

$$\lambda_e = \frac{L_p}{L_m} = L_e$$

El parámetro  $\frac{2 \pi d}{l}$  de la fórmula 2.1 debe ser igual en modelo y prototipo por lo que la relación de celeridades ( $C_e$ ) de la fórmula 2.1 nos queda

$$C_e = \frac{C_p}{C_m} = \frac{\sqrt{\frac{g_p l_p}{2 \pi}}}{\sqrt{\frac{g_m l_m}{2 \pi}}} = \sqrt{\frac{l_p}{l_m}}$$

$$C_e = (L_e)^{1/2}$$

Se sabe que: .

$$T = \frac{L_0}{C_0}$$

donde:

$T$  = período de la onda

por lo que

$$T = (L_0)^{1/2}$$

#### 2.4.3 Escala de velocidades orbitales de las partículas.

Según lo expresado por la teoría senoidal, la velocidad orbital de las partículas esta dada por las expresiones:

$$U = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh k(y+d)}{\sinh kd} \cos(kx - \sigma t)$$

$$V = \frac{\pi H}{T} \frac{\sinh k(y+d)}{\sinh kd} \sin(kx - \sigma t)$$

en que;

$$k = \frac{2\pi}{L}$$

$$\sigma = \frac{2\pi}{T}$$

$U$  = componente de la velocidad en la dirección  $X$ .

$V$  = componente de la velocidad en la dirección  $Y$ .

Por lo ya indicado queda, para ambas expresiones:

$$V_0 = \frac{H_0}{T_0} = \frac{L_0}{(L_0)^{1/2}} = L_0^{1/2}$$

que cumple con la condición de Froude.

#### 2.4.4 Escala de fuerzas y presiones.

El efecto más importante a tomar en cuenta es el equilibrio que hay entre las fuerzas por el oleaje y el peso de los elementos. Se debe cumplir por lo tanto la relación de Euler además - de la condición de Froude. La condición de Euler expresa:

$$\frac{\rho_e v_e^2 L_e^2}{F_e} = 1$$

donde:

$\rho_e$  = escala de densidades

$F_e$  = escala de fuerzas

Sustituyendo la escala de velocidades por su valor obtenido de la condición de Froude se tiene:

$$F_e = \gamma_e L_e L_e^2$$

$$F_e = \gamma_e L_e^3$$

Como el agua de mar tiene un peso específico de 1 028 Kg/m<sup>3</sup> y el agua en el modelo es de 1 000 Kg/m<sup>3</sup>, la escala de pesos específicos es:

$$\gamma = 1.028$$

La escala de presiones se obtiene de:

$$P_e = \frac{F_e}{A_e} = \frac{\gamma_e L_e^3}{L_e^2} = \gamma_e L_e$$

## 2.5 Dimensiones en el modelo.

Seleccionada la escala de líneas

$$L_e = 50$$

Las escalas restantes adquirieron los valores que a continuación se indica:

Areas	$A_e = L_e^2$	=	2 500.00
Volúmenes	$V_e = L_e^3$	=	125 000.00
Celeridades	$C_e = L_e^{1/2}$	=	7.07
Períodos	$T_e = L_e^{1/2}$	=	7.07
Longitudes de onda	$\lambda_e = L_e$	=	50.00
Fuerzas	$F_e = \gamma_e L_e^3$	=	128 500.00
Presiones	$P_e = \gamma_e L_e$	=	51.40

En el modelo se diseñó estudiar el efecto de oleajes hasta 7 m. de altura y 12 seg. de período, los cuales pueden ocurrir en el Pacífico. En la zona del Golfo, de 5 a 6 m., de altura y 12 seg., de período son ya extraordinarios.

El batidor del canal de olas produce oleaje hasta 20 cm., de altura y sus períodos se pueden variar de 0.8 a 4 seg., los oleajes antes indicados, se pueden reproducir con facilidad.

El peso del mexápodo tipo "T" en prototipo es de 5 500 Kg, en el modelo su peso es de:

$$P_m = \frac{5\ 500}{(50)^3} = 44 \text{ gramos}$$

El material con el que se formaron los mexápodos debería tener una densidad de:

$$\gamma_{sm} = \frac{\gamma_{sp}}{\gamma_e} \quad ; \quad \gamma_{sm} = \frac{2\ 200}{1.028} = 2\ 140 \text{ Kg/m}^3$$

donde:

$\gamma_{sp}$  = peso específico del concreto.

El material que llenó estas características se denomina Model-Tech y está constituido por una resina epoxy cargada con un polvo muy fino de aluminio y su correspondiente catalizador. Este material una vez endurecido, después de haber sido mezclado con el catalizador y de haber sido sometido a un tratamiento térmico, adquiere propiedades especiales de electricidad y estabilidad que lo hacen ideal para fabricación de modelos.

## 2.6 Construcción de modelos.

Los materiales que componen el núcleo y la capa secundaria de la sección transversal representativa de la escollera se seleccionaron de acuerdo a los límites de tolerancia en peso indicados en la Fig.1.1. Una vez que se verificó que la densidad de los materiales en el prototipo era la misma que para el modelo se utilizó el siguiente rango de pesos para el núcleo y la capa secundaria:

- a) Para el núcleo, se utilizó material que peso ( $W_n$ ).



$$\frac{W}{4000} \leq W_n \leq \frac{W}{200}$$

$$\text{II } \text{mgrs} \leq (W_n) \leq 220 \text{ mgrs}$$

- b) Para la capa secundaria, se utilizó material que peso - aproximadamente.

$$\frac{W_m}{10} = 4.4 \text{ grs.}$$

Para simular lo más cercanamente a la realidad la construcción de este tipo de estructuras, se trataron de reproducir en el modelo, los métodos convencionales que se utilizan para construir las.

Los materiales del núcleo se colocaron dejándose caer desde una cubeta y se compactaron con un pisón de mano a fin de simular condiciones de compactación por efecto de oleaje en el prototipo. Además se le rocío posteriormente con una manguera a chorro de baja presión para garantizar una compactación adecuada.

Posteriormente se colocó la capa secundaria con pala y se afinó a mano sin ejercer ninguna presión adicional.

Los elementos de la coraza se colocaron en una sola capa, acomodados al azar y ordenadamente empezando de arriba y procediendo hacia abajo de tal suerte que no tuviera ninguna intertrabazón intencional de las unidades.

## 2.7 Calibración del batidor.

Una vez determinadas las escalas, se procedió a la calibración del batidor del canal de olas y del tanque de morros. Esta calibración consistió en obtener la altura de la ola generada -- con un período y brazo del excéntrico dada.

Por necesitar para cada período por estudiar, olas de diferente altura, se midieron para cada uno de ellos las alturas resultantes para diferentes brazos del excéntrico y se graficaron en escala aritmética la altura de ola contra excentricidad del brazo. Se obtuvo así una curva para cada período.

Para hacer las mediciones, se usó un olómetro que utiliza -- como sensor a un par de agujas paralelas. Dichas agujas al introducirse en el agua miden la cantidad de corriente que pasa de una a la otra y que está en función de la longitud sumergida de las agujas. La señal se envía al olómetro donde es amplificada y dibujada.

### 3. ESTABILIDAD DE LAS ESCOLLERAS.

Una estructura de enrocamiento del tipo comunmente empleado para proporcionar proteccion contra el oleaje, esta compuesta de un pedraplen construido a volteo, protegido con una coraza de piedras seleccionadas o elementos de concreto de formas especiales. Cuando se utilizan elementos prefabricados, estos se colocan en forma ordenada o al azar, con el objeto de lograr un cierto grado de trabazon entre los elementos individuales. Para cualquier procedimiento de colocacion es imposible en la actualidad, determinar por metodos rigurosamente, las fuerzas que se requieren para que se desplacen los elementos prefabricados de una coraza. Cuando las olas ejercen una fuerza sufi-

ciente sobre una estructura, produciendo un desplazamiento de los elementos de la coraza, también es imposible determinar teóricamente si una gran área de ésta se desplazara en masa talud abajo, o si serán suspendidos y rodados ya sea hacia arriba o hacia abajo del talud, solamente algunos elementos de la coraza.

Cuando olas de corto período inciden sobre una estructura pueden:

- a) romper completamente, proyectando un chorro de agua - aproximadamente perpendicular al talud,
- b) romper parcialmente produciendo un chorro no muy definido
- c) establecer un movimiento oscilatorio de las partículas del agua hacia arriba o hacia abajo del talud de la estructura, en una forma similar al movimiento de un clapotis en un muro vertical.

Por lo tanto se puede observar que cuando las olas atacan una estructura, la interacción resultante de las fuerzas causadas por el movimiento del agua inductor del oleaje y la sección resistente de los elementos de la coraza, presentan un panorama extremadamente complejo.

El tratar de resolver este fenómeno analíticamente no ha dado buenos resultados. Sin embargo, las pruebas de laboratorio han conducido a obtener bastantes buenos resultados para -

efectos de diseño en función del peso individual de los elementos de la coraza, la geometría de la escollera, batimetría local, características del oleaje, etc.

A este respecto Hudson ha logrado definir los parámetros que se deben considerar en el laboratorio. La fuerza principal que tiende a desalojar a los elementos de la coraza es la fuerza de arrastre:

$$F_a = 0.5 C_a k_a l^2 (\gamma / g) V^2 \quad (3.1)$$

donde:

$F_a$  = fuerza de arrastre

$C_a$  = coeficiente de arrastre

$l$  = dimensión lineal, característica tal que  $k_a l^2$  es el área proyectada del elemento de la coraza

$V$  = velocidad del agua incidiendo sobre el elemento de la coraza.

$g$  = aceleración de la gravedad.

La velocidad "V" del agua en una ola rompiendo, es igual a la velocidad de la partícula en la cresta, pudiéndose considerar que al momento de romper sobre la estructura "V" es ---- igual a la celeridad de la onda.

$$V = \sqrt{g d} \quad (3.2)$$

en que "d" es el tirante al pie de la estructura. Asimismo, se supone que "H = cd" en que "H" es la altura de la ola en --rompiente y "c" una función de "H/L" y la pendiente del fondo del lado de mar de la estructura.

La principal fuerza resistente en el peso sumergido de cada elemento de la coraza.

$$W_s = k_v l_c^3 (\gamma_s - \gamma) \quad (3.3)$$

donde:

$W_s$  = peso sumergido del elemento de la coraza

$l_c$  = dimensión lineal característica tal que  $K_v l_c^3$  es el volumen del elemento de la coraza.

Aún cuando las expresiones anteriores han sido abtenidas para oleaje rompiente, investigaciones anteriores (ref. 1 y 2) y los resultados presentados aquí indican que estas ecuaciones son también aplicables cuando se tiene oleaje no rompiente.

Para la condición de "inestabilidad incipiente" ( $F_a = W_s$ ) y el oleaje no rompiente con un ángulo de incidencia de  $90^\circ$  y una -sección particular de prueba se puede establecer que:

$$\frac{\gamma_s^{1/3}}{(S_r - 1)(W)^{1/3}} = f(\alpha, \Delta, d/L, H/L, D, P_T, R_N) \quad (3.4)$$

donde:

$S_r = \gamma_s / \gamma$  es la densidad relativa del elemento de la coraza.

$\Delta$  = factor de forma del elemento de la coraza

$D$  = parámetro de daño

$PT$  = técnica de colocación de los elementos de coraza

$R_N = \sqrt{g H^3} l_0 / \nu$  es el número de estabilidad de Reynolds

$l_0 = \Delta (W / \gamma)^{1/3}$  es la longitud característica

$\nu$  = viscosidad cinemática

El número de estabilidad principalmente se ve afectado por la profundidad de la cimentación y de la base protectora de enrocamiento con respecto al nivel de aguas de reposo y por la profundidad de la estructura en el lugar.

A partir de resultados experimentales (ref. 4) se establece que el "número de estabilidad" ( $N_e$ ) está definido por:

$$N = \frac{\gamma_s^{1/3} H_{SD}}{(S_r - 1) (W)^{1/3}} \quad (3.5)$$

es un buen indicador del grado de estabilidad de una escollera. En esta expresión " $H_{SD}$ " es la altura máxima de la ola que puede resistir la estructura sin daño alguno.

Si se comparan las ecuaciones 3.4 y 3.5, puede observarse que el número de estabilidad se obtuvo de lograr que el primer término de la ec. 3.4 fuera adimensional. Por otra parte, si

el número de estabilidad se deriva de la ecuación de Hudson se obtiene que:

$$N_e = \sqrt{k_D \cot \alpha} \quad (3.6)$$

por lo que puede considerarse que el coeficiente  $k_D$  de Hudson es un coeficiente de estabilidad.



#### 4. SOBREELEVACION MAXIMA Y MINIMA DEL OLEAJE.

La función primordial de los rompeolas es proporcionar -- protección adecuada contra la acción del oleaje a las áreas -- portuarias. Por lo tanto, la roción es permitida siempre y -- cuando no ocacione olas, en el área protegida, que excedan las limitaciones permisibles de agitación interior.

Para el diseño optimizado de una escollera es necesario - estimar la sobreelevación máxima (runup) y la sobreelevación - mínima (rundown) del oleaje para un rango anticipado de oleaje al que se sometera la estructura. Con el runup ( $R_u$ ) se deter~~mi~~nina la elevación de la corona y con el rundown ( $R_d$ ) la elevación mínima a que se colocarán los elementos de coraza.

Los principales parámetros que afectan al  $R_u$  y al  $R_d$  son:  $\alpha$ ,  $H/L$ ,  $d/L$ , ángulo de incidencia ( $\beta$ ), porosidad ( $P$ ) de la coraza y capas subyacentes así como la rugosidad hidráulica de la superficie del talud. Este último parámetro es de difícil valuación, sin embargo, puede suponerse que el espesor -- (t) de una capa de coraza resulta un indicador aproximado de la rugosidad.

En la referencia 4 se encontró a partir de resultados experimentales que el parámetro adimensional ( $\xi$ )

$$\xi = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H/L_0}} = T \left( \frac{g}{2\pi H} \right)^{1/2} \tan \alpha \quad (4.1)$$

donde:

$H$  = altura de ola al pie de la estructura

$T$  = período de la ola

$L_0$  = longitud de la ola en aguas profundas.

$\alpha$  = ángulo que forma el talud de la estructura con respecto a la horizontal

es un factor determinante de la estabilidad de la coraza así como la magnitud de la sobreelevación máxima y mínima del oleaje.

Para complementar el diseño de una escollera se necesita contar con información exacta que permita calcular el espesor y la porosidad de las varias capas de material como una función

de la forma, peso y peso específico de las unidades individuales de coraza o de las piedras de la capa subyacente.

La porosidad de varias capas puede determinarse como:

$$P = \left( 1 - \frac{N W}{A \gamma_s t} \right) 100 \quad (4.2)$$

El espesor de la coraza y el número de elementos requeridos para su construcción pueden calcularse por medio de las siguientes fórmulas:

$$t = n k_{\Delta} \left( \frac{W}{s} \right)^{1/3} \quad (4.3)$$

$$N = A n k_{\Delta} \left( 1 - \frac{P}{100} \right) \left( \frac{\gamma_s}{W} \right)^{2/3} \quad (4.4)$$

donde:

P = porosidad en porcentaje

N = número de unidades colocadas sobre una superficie determinada A.

t = espesor promedio de la capa de coraza o capas subyacentes.

n = número de capas

$k_{\Delta}$  = coeficiente experimental, función de la forma de la unidad y del modo de colocarse.

$W$  = peso de un elemento de la coraza o de roca en capas subyacente.

$\gamma$  = peso específico del elemento de la coraza o de roca subyacente.

Una vez que se ha determinado para un elemento de coraza de ciertas características los valores de  $P$  y  $k_{\Delta}$ , el número de elementos de coraza necesarios por unidad de superficie puede expresarse como:

$$\frac{N}{A} = c \sqrt[2/3]{V} \quad (4.5)$$

donde:

$$c = n k \left( 1 - \frac{P}{100} \right)$$

$V$  = volumen de cada unidad de coraza ( $W / \gamma_s$ ).

## 5. CRITERIO DE DISEÑO.

Los diferentes criterios de diseño de las escolleras utilizados en la actualidad son coincidentes en el objetivo de que estas estructuras sean seguras, eficientes y económicas. Esto implica que sean capaces de resistir el embate del oleaje que satisfagan las condiciones de protección admisibles y que su costo sea el más bajo posible.

El cumplimiento de los objetivos anteriores se ve fuertemente influenciado por parámetros de tipo permanente y casual, incluyéndose en el primer caso, entre otros: el peso específico de la roca (natural o artificial), talud, colocación y permeabilidad. Para el segundo caso, la magnitud y la frecuencia

de ocurrencia de eventos extremos tales como: la altura y duración de las olas y el daño permisible.

De acuerdo al anterior conjunto de parámetros el de mayor dificultad en definir desde el punto de vista económico es el relacionado al daño permisible que un cierto oleaje puede ocasionar sobre la estructura lo cual ha permitido establecer los diferentes criterios de diseño.

En este trabajo se utiliza el criterio de diseño denominado "criterio sin daño".

#### 5.1 Criterio Sin Daño.

Establece que cuando el daño no sea superior al 5% la estructura no ha sufrido daño alguno.

Este se obtiene como la relación en por ciento entre el -- número de elementos desplazados, por el oleaje y el número total de elementos dentro de la zona de ataque del oleaje. En este criterio se considera que la falla total de la zona de -- ataque del oleaje ocurre cuando casi seis filas de elementos de la coraza podrían resbalar simultáneamente.

El Criterio Sin Daño se define numéricamente a través del coeficiente de estabilidad  $k_D$  de Hudson, que conforme aumenta el número de investigaciones sobre la estabilidad de escolleras sus valores son cada vez mas confiables.

## 6. DESARROLLO EXPERIMENTAL.

Los experimentos tuvieron por objeto obtener información para el diseño de los mexápodos tipo "T" colocados tanto en el cuerpo como en el morro de las escolleras. Las variables consideradas para obtener esta información fueron:

- a. Fondo de la estructura (fijo).
- b. El talud de la estructura por el lado del mar.
- c. La forma de colocar los elementos de coraza (acomodados y al azar).
- d. Las características del oleaje (longitud, altura y período de ola).
- e. Tipo de oleaje (rompiente y no rompiente).

- f. Si el agua rebasa o no la corona de la escollera (con o sin overtopping)

La estructura estuvo expuesta a un oleaje monocromático - por un período de tiempo de 30 min., en cada ensayo, considerando este tiempo como suficiente para que la sección se estabilizara. Además, se evitó que olas reflejadas llegaran a incidir sobre la escollera, con objeto de evitar que la sección llegara a estar expuesta a grupos de oleaje incontrolado o de espectro indefinido.

Para obtener las máximas alturas de ola que no causaran -- arriba de un 5% de daño en la estructura, para cada juego de variables elegido se probaron 3 diferentes alturas de ola y 3 diferentes períodos.

Hudson considera que el número crítico de Reynolds para evitar efectos de escala es :  $R_N = 3 \times 10^4$ , por lo cual para las presentes pruebas se seleccionó el tamaño de los elementos de coraza y las dimensiones del oleaje tales que el efecto de escala fuera insignificante ( $R_N$  mayor que  $3 \times 10^4$ ).

Durante cada ensayo se obtuvo la siguiente información:

- a. Las características del oleaje al pie de la estructura.
- b. La magnitud de la sobreelevación máxima y mínima del oleaje.
- c. El daño que se presentó en la estructura al final del ensayo.



- d. La forma en que se dá la falla total cuando ésta se --  
presenta.
- e. En los casos en que el agua rebasa la corona de la es-  
collera se observó el daño que sufren los elementos que  
están del lado de aguas tranquilas.

Para determinar el  $R_u$  y el  $R_d$  se utilizó un limnómetro de punta montado sobre rieles. Por medio de éstos el limnómetro se deslizaba a lo largo de la estructura de prueba, realizando se cuatro mediciones y el promedio de éstas es el resultado que se reporta.

Para determinar el coeficiente de estabilidad  $K_D$  se utilizó la fórmula de Hudson y para evaluar el grado de estabilidad en la estructura para los diferentes ensayos se empleo la expresión que define el número de estabilidad  $N_e$ .

## 7. RESULTADOS

### 7.1 Canal de olas

Se ensayaron secciones transversales con las siguientes - características: ancho de corona de 5.00 m y nivel medio del mar (S.W.L.) a 8.00 m abajo de la corona con taludes por el lado del mar de 1.25:1, 1.50:1, 1.75:1, 2.00:1 y 2.50:1 la obra se desplanto a la - 12.00, midiéndose en cada uno de los ensayos las variables indicadas en el capítulo anterior y obteniéndose los resultados siguientes.

#### 7.1.1 Oleaje no rompiente.

En la Tabla 7.1 se reportan las características del oleaje, el  $R_u$ , el  $R_d$  y el daño medidos en los ensayos realizados con una escollera formada con mexápodos colocados acomodados y sin overtopping (ver fotos 1, 2, 3 y 4).

En la Tabla 7.2 se presentan los valores del runup relativo ( $R_u/H$ ), rundown relativo ( $R_d/H$ ) y el parámetro adimensional  $\xi$  correspondiente a las condiciones de la Tabla 7.1 y para el criterio sin daño. En la Fig. 7.1 se ilustra gráficamente la variación de  $R_u/H$  y  $R_d/H$  con respecto al parámetro adimensional  $\xi$ . La línea AB representa en ambos casos al mejor ajuste obtenido por el método de mínimos cuadrados (coeficiente de correlación,  $r$ : de 0.40 y 0.49). La línea A'B' representa en ambos casos un límite superior de los datos experimentales obtenidos.

En la Tabla 7.3 se muestran los valores de  $H/L$ ,  $d/L$  y  $N_e$  correspondientes a las condiciones de la Tabla 7.1 y para el criterio sin daño. Puede observarse que se encuentra un número de estabilidad máximo de 4.05 y un mínimo de 2.18. En la Fig. 7.2 se ilustra la variación de  $N_e$  con respecto a  $\cot \alpha$  para un determinado valor de  $d/L$ . Las líneas rectas indicadas corresponden al mejor ajuste obtenido por el método de mínimos cuadrados (coeficiente de correlación de 0.85, 0.98 y 0.71).

En la Tabla 7.4 reportan los máximos valores del coeficiente de estabilidad obtenidos para cada serie de ensayos realizados con un talud determinado, para el criterio sin daño y sin overtopping, considerando los elementos acomodados en una

capa. Es interesante observar que los máximos valores de  $K_D$  - se obtienen para taludes entre 1.25:1 y 1.75:1.

En la Tabla 7.5 se reportan las características del oleaje, el  $R_u$ , el  $R_d$  y el daño medido en los ensayos realizados -- con una escollera formada con mexápodos colocados al azar y -- sin overtopping (ver fotos 5. 6 y 7).

En la Tabla 7.6 se presentan los valores de  $R_u/H$ ,  $R_d/H$  y  $\xi$  correspondientes a las condiciones de la Tabla 7.5 y para el criterio sin daño. No hay relación entre los valores de --  $R_u/H$  y  $R_d/H$  y el parámetro  $\xi$  (coeficiente de correlación --- próximos a cero).

En la Tabla 7.7 se muestran los valores de  $H/L$ ,  $d/L$  y  $N_e$  correspondientes a las condiciones de la tabla 7.5 y para el criterio sin daño. Puede observarse que se encuentra un número de estabilidad máximo de 3.58 y un mínimo de 2.22. No existe relación entre  $N_e$  y  $\cot \alpha$  para un valor determinado de  $d/L$  - (coeficiente de correlación próximos a cero).

En la Tabla 7.8 se reportan los máximos valores del coeficiente de estabilidad obtenidos para cada serie de ensayos realizados con un talud determinado, para el criterio sin daño y sin overtopping, considerado los elementos colocados al azar - en una capa. Es interesante observar que los máximos valores de  $K_D$  se obtienen para taludes 1.25:1 y 1.50:1.

### 7.1.2 Oleaje rompiente.

Las mediciones realizadas del  $R_u$  y el  $R_d$  presentaron fuertes variaciones para un oleaje de las mismas características - debido a la rampa articulada (ver foto 8) utilizada para simular el oleaje rompiente. Es por esta razón que estos daños no se consignan aquí.

En las Tablas 7.9 y 7.10 se reportan los resultados de los ensayos realizados en el cuerpo de la estructura con los mexá-podos colocados y al azar respectivamente.

En las Tablas 7.11 y 7.12 se da el valor máximo del coeficiente de estabilidad obtenido para cada serie de ensayos -- realizados con un talud determinado, para el criterio sin daño y sin overtopping, considerando elementos de 5.5 ton. de peso y peso específico de 2.2 ton /m<sup>3</sup>. Es interesante observar que los máximos valores de  $K_D$  se obtienen para taludes entre 1.25:1 y 1.75:1.

### 7.1.3 Espesor y porosidad.

El espesor promedio de la capa fue de 1.40 y 2.70 m para elementos de coraza acomodados y al azar respectivamente. Esto conduce al correspondiente valor de  $k_A$  de 1.03 y 1.99.

El número de elementos de coraza por 100 m<sup>2</sup> resulto ser de 26 y 41 al ser colocados acomodados y al azar respectivamente. Esto conduce al correspondiente valor de la porosidad de 53% y 62%.

#### 7.1.4 Modo de falla.

Las fallas parciales y totales que se presentaron consistieron de un deslizamiento de la capa de coraza (ver fotos 9, 10 y 11). Es importante indicar que esta falla se acelera en el modelo hidráulico debido a la poca fricción que existe en los puntos de contacto entre los elementos individuales de coraza al ser fabricados con plástico. En la referencia 5 se obtuvo un coeficiente de fricción para mortero de concreto que varió de 0.72 a 0.79 y para modelos plásticos de tetrapodos y dolos varió de 0.64 a 0.69. Estos valores bien pueden aplicarse a los modelos de mexápodos.

#### 7.2 Tanque de morros.

Los ensayos en el tanque de morros se hicieron considerando un rompeolas con las siguientes características: ancho de corona de 5.00 m y el nivel de S.W.L. a 5.00 m abajo de la corona, la obra se desplanto a la -10.00, con taludes de 1.25:1, 1.50:1, 1.75:1 y 2.00:1. El oleaje se hizo variar de 3.00 a 7.00 m con un período constante igual a 10.00 seg.

En estos ensayos se colocó el rompeolas de dos formas distintas:

- a. Rompeolas perpendicular a los frentes de ola (fotos 12, 13 y 14)
- b. Rompeolas paralelo a los frentes de ola (foto 15 y 16)

En las Tablas 7.13 y 7.14 se presenta un resumen de resul

tados que cumplen con el criterio "sin daño" y que corresponde a la primera forma indicada para el rompeolas.

En todos los ensayos realizados para el morro de la estructura se utilizaron los elementos de coraza colocados en dos capas y al azar. En la Tabla 7.13 se reporta un resultado que corresponde a elementos de coraza colocados en una capa y al azar y puede observarse que no se obtiene estabilidad adecuada.

Al colocar y ensayar el rompeolas en forma paralela a los frentes de ola, como se observa en las fotos 15 y 16, la falla total se presentó como un deslizamiento de toda la capa de coraza, lo que fue congruente con la falla observada en el canal de olas. Este tipo de falla puede ser debido a la poca fricción existente al pie de la estructura. Para comprobarlo se colocó una capa de arena en el desplante de la estructura, lo cual evitó el deslizamiento mencionado, foto 16. Estos ensayos se hicieron únicamente para oleaje rompiente y se reportan en la Tabla 7.15.

### 7.3 Overtopping.

Cuando el agua rebasa la corona de la escollera, tanto en el canal de olas como en el tanque de morros, no se observó ningún efecto nocivo en la corona y el lado de aguas tranquilas para los oleajes generados.

Tabla 7.1 Mediciones experimentales obtenidas en el canal de olas para una escolera formada con mexápedos colocados acomodados, sujetos o oleaje no rompiente, y sin overlapping.

Col $\alpha = 1.25$					
Lo (m)	H (m)	T (seg)	R <sub>w</sub> (m)	R <sub>d</sub> (m)	% Oaño
73.04	4.26	7.07	3.43	1.87	
88.04	5.03	7.77	4.06	2.49	
87.02	5.41	8.48	6.56	3.12	
103.54	6.00	9.19	6.87	3.59	5.0
109.09	6.63	9.89	7.96	3.74	10.0
Col $\alpha = 1.50$					
73.04	3.82	7.07	3.05	2.35	
88.04	5.00	7.77	4.29	2.35	
87.02	5.56	8.48	4.99	3.05	
103.54	5.63	9.19	4.99	3.18	
109.09	6.00	9.89	6.65	3.74	2.0
Col $\alpha = 1.75$					
73.04	3.64	7.07	3.10	1.24	
88.04	4.77	7.77	3.84	1.38	
87.02	5.00	8.48	5.41	2.60	
103.54	6.60	9.19	7.93	2.72	2.0
Col $\alpha = 2.00$					
73.04	3.56	7.07	2.90	1.78	
88.04	4.50	7.77	4.02	2.23	
87.02	5.31	8.48	5.14	2.90	
103.54	6.04	9.19	5.47	3.13	
109.09	6.28	9.89	5.81	3.57	1.5
Col $\alpha = 2.50$					
73.04	3.68	7.07	2.78	1.11	
88.04	4.04	7.77	3.52	1.67	
87.02	4.31	8.48	3.89	2.04	
103.54	5.14	9.19	4.45	2.22	
109.09	5.92	9.89	5.01	2.41	

NOMENCLATURA

- Lo = Longitud de la ola en aguas profundas.
- H = altura de ola al pie de la estructura.
- T = período de la ola.
- R<sub>w</sub> = runup
- R<sub>d</sub> = rundown
- d = 12 m, frente al pie de la estructura.
- $\alpha$  = ángulo del talud

Tabla 7.2 Valores de R<sub>w</sub>/H<sub>so</sub>, R<sub>d</sub>/H<sub>so</sub> y f para una escolera formada con mexápedos colocados acomodados, sujetos a oleaje no rompiente, y sin overlapping.

Col $\alpha = 1.25$					
L (m)	H <sub>so</sub> (m)	T (seg)	R <sub>w</sub> /H <sub>so</sub>	R <sub>d</sub> /H <sub>so</sub>	f
73.04	4.26	7.07	0.8052	0.4390	3.422
88.04	5.03	7.77	0.8072	0.4950	3.462
87.02	5.41	8.48	1.2125	0.5767	3.643
103.54	6.00	9.19	1.1450	0.5983	3.749
Col $\alpha = 1.50$					
73.04	3.82	7.07	0.7984	0.6152	3.027
88.04	5.00	7.77	0.8580	0.4700	2.910
87.02	5.56	8.48	0.8975	0.5486	3.011
103.54	5.63	9.19	0.8863	0.5648	3.245
109.09	6.00	9.89	1.1083	0.6233	3.379
Col $\alpha = 1.75$					
73.04	3.64	7.07	0.8516	0.3407	2.639
88.04	4.77	7.77	0.8050	0.2851	2.533
87.02	5.00	8.48	1.0820	0.5200	2.702
103.54	6.60	9.19	1.2015	0.4121	2.546
Col $\alpha = 2.00$					
73.04	3.56	7.07	0.8148	0.5000	2.340
88.04	4.50	7.77	0.8933	0.4956	2.288
87.02	5.31	8.48	0.9680	0.5461	2.298
103.54	6.04	9.19	0.9056	0.5182	2.334
109.09	6.28	9.89	0.9252	0.5685	2.467
Col $\alpha = 2.50$					
73.04	3.68	7.07	0.7554	0.3016	1.841
88.04	4.04	7.77	0.8713	0.4134	1.933
87.02	4.31	8.48	0.9025	0.4733	2.042
103.54	5.14	9.19	0.8657	0.4319	2.029
109.09	5.92	9.89	0.8463	0.4071	2.029

NOMENCLATURA

- Lo = Longitud de la ola en aguas profundas.
- H<sub>so</sub> = altura de ola al pie de la estructura sin oleaje.
- T = período de la ola.
- d = 12 m, frente al pie de la estructura.
- R<sub>w</sub> = runup.
- R<sub>d</sub> = rundown.

$$f = T \left( \frac{g}{2\pi H_{so}} \right)^{1/2} \tan \alpha.$$

$\alpha$  = ángulo del talud.



Tabla 7.3 Valores de  $N_e$  para una escollera formada con mexópodos colocados acomodados, sujetos a oleaje no rompiente y sin overlapping.

Col $\alpha = 1.25$					
$L_o/m$	$H_{s/m}$	T (seg)	$d/L_o$	$H_{s0}/L_o$	$N_e$
73.04	4.26	7.07	0.1643	0.0583	2.6156
88.04	5.03	7.77	0.1363	0.0571	3.0884
87.02	5.41	8.48	0.1379	0.0622	3.3217
103.54	6.00	9.19	0.1159	0.0579	3.6840
Col $\alpha = 1.50$					
73.04	3.82	7.07	0.1643	0.0523	2.3455
88.04	5.00	7.77	0.1363	0.0568	3.0700
87.02	5.56	8.48	0.1379	0.0639	3.4138
103.54	5.63	9.19	0.1159	0.0544	3.4568
109.09	6.00	9.89	0.1100	0.0550	3.6840
Col $\alpha = 1.75$					
73.04	3.64	7.07	0.1643	0.0498	2.2350
88.04	4.77	7.77	0.1363	0.0542	2.9288
87.02	5.00	8.48	0.1379	0.0574	3.0700
103.54	6.60	9.19	0.1159	0.0637	4.0524
Col $\alpha = 2.00$					
73.04	3.56	7.07	0.1643	0.0487	2.1858
88.04	4.50	7.77	0.1363	0.0511	2.7630
87.02	5.31	8.48	0.1379	0.0610	3.2603
103.54	6.04	9.19	0.1159	0.0583	3.7086
109.09	6.28	9.89	0.1100	0.0576	3.8539
Col $\alpha = 2.50$					
73.04	3.68	7.07	0.1643	0.0504	2.2599
88.04	4.04	7.77	0.1363	0.0499	2.4806
87.02	4.31	8.48	0.1379	0.0495	2.6463
103.54	5.14	9.19	0.1159	0.0496	3.1980
109.09	5.92	9.89	0.1100	0.0543	3.6349

NOMENCLATURA

- $L_o$  = Longitud de la ola en aguas profundas.
- $H_{s0}$  = altura de ola al pie de la estructura sin daño.
- T = período de la ola.
- $d$  = 12 m., frente al pie de la estructura.
- $N_e$  = número de estabilidad
- $\alpha$  = ángulo de talud.

TALUD	T (seg)	H (m)	DAÑO (%)	$N_e$
1.25:1	9.19	6.00	5.0	40.00
1.50:1	9.89	6.00	2.0	33.33
1.75:1	9.19	6.90	2.0	36.03
2.00:1	9.89	6.28	1.5	28.66
2.50:1	9.89	5.92	0.0	19.21

Tabla 7.4 Resumen de resultados de los ensayos realizados en el cuerpo de la estructura con los mexópodos colocados en una capa acomodada, para los mismos valores de altura de ola de rompimiento que se producen daño.

Tabla 7.5 Mediciones experimentales obtenidas en el canal de olas para una escollera formada con mexabedros colocados al azar, sujetos a oleaje no rompiente, y sin overlapping.

Cot $\alpha = 1.25$					
Lo (m)	H (m)	T (seg)	Ru (m)	Rd (m)	% Daño
73.04	4.27	7.07	3.27	1.71	2.0 TOTAL
88.04	5.03	7.77	3.59	1.87	
87.02	5.92	8.48	5.46	2.18	
Cot $\alpha = 1.50$					
73.04	3.72	7.07	2.91	1.66	5.0 TOTAL
88.04	3.86	7.77	2.94	2.11	
87.02	5.09	8.48	3.46	2.21	
103.54	5.72	9.19	5.30	2.77	
Cot $\alpha = 1.75$					
73.04	3.65	7.07	2.72	1.48	4.00 6.00
88.04	3.26	7.77	3.47	3.22	
87.02	5.12	8.48	4.06	3.22	
103.54	5.62	9.19	5.70	3.47	
Cot $\alpha = 2.00$					
73.04	3.46	7.07	2.90	1.56	4.00 TOTAL
88.04	4.27	7.77	3.68	2.01	
87.02	5.35	8.48	4.69	2.45	
103.54	5.80	9.19	5.14	2.45	
Cot $\alpha = 2.50$					
73.04	3.31	7.07	2.04	0.95	5.0 8.0
88.04	3.50	7.77	2.41	1.85	
87.02	4.26	8.48	3.34	3.22	
103.54	4.29	9.19	4.17	3.06	
109.09	5.68	9.89	4.45	3.62	

NOMENCLATURA

- Lo = Longitud de la ola en aguas profundas.
- H = altura de ola al pie de la estructura.
- T = período de la ola
- Ru = runup.
- Rd = rundown.
- d = 12 m. tirante al pie de la estructura.
- $\alpha$  = ángulo del talud.

Tabla 7.6 Valores de  $R_u/H_{so}$ ,  $R_d/H_{so}$  y  $f$  para una escollera formada con mexabedros colocados al azar, sujetos a oleaje no rompiente, y sin overlapping.

Cot $\alpha = 1.25$					
Lo (m)	H <sub>so</sub> (m)	T (seg)	R <sub>u</sub> /H <sub>so</sub>	R <sub>d</sub> /H <sub>so</sub>	f
73.04	4.27	7.07	0.7658	0.4005	0.3023
88.04	5.03	7.77	0.7137	0.3718	0.2987
Cot $\alpha = 1.50$					
73.04	3.72	7.07	0.7823	0.4462	0.3384
88.04	3.86	7.77	0.7617	0.5466	0.3139
87.02	5.09	8.48	0.6798	0.4342	0.3628
Cot $\alpha = 1.75$					
73.04	3.65	7.07	0.7452	0.4055	0.3919
88.04	3.96	7.77	0.8763	0.8131	0.3712
87.02	5.12	8.48	0.9688	0.6289	0.4244
Cot $\alpha = 2.00$					
73.04	3.46	7.07	0.8382	0.4509	0.4354
88.04	4.27	7.77	0.8618	0.4707	0.4405
87.02	5.35	8.48	0.8766	0.4579	0.4960
Cot $\alpha = 2.50$					
73.04	3.31	7.07	0.6163	0.2810	0.5321
88.04	3.50	7.77	0.6886	0.5286	0.4987
87.02	4.26	8.48	0.7840	0.5211	0.5334
103.54	4.29	9.19	0.9720	0.7133	0.5087

NOMENCLATURA

- Lo = Longitud de la ola en aguas profundas.
- H<sub>so</sub> = altura de ola al pie de la estructura sin oleaje.
- T = período de la ola.
- Ru = runup.
- Rd = rundown.
- d = 12 m. tirante al pie de la estructura.
- f =  $T \left( \frac{g}{2H_{so}} \right)^{1/3}$  ton/m
- $\alpha$  = ángulo del talud.

Tabla 7.7 Valores de  $N_e$  para una escalera formada con mexá-  
podos colocados al azar, sujetos o oleaje no rompiente, y sin overlapping

Cot $\alpha = 1.25$					
Lo (m)	H <sub>so</sub> (m)	T (seg)	d/L	H/L	N <sub>e</sub>
73.04	4.27	7.07	0.1643	0.0585	2.8600
88.04	5.03	7.77	0.1363	0.0571	3.3691
Cot $\alpha = 1.50$					
73.04	3.72	7.07	0.1643	0.0509	2.4917
88.04	3.86	7.77	0.1363	0.0438	2.5854
87.02	5.09	8.48	0.1379	0.0585	3.4093
Cot $\alpha = 1.75$					
73.04	3.65	7.07	0.1643	0.0500	2.4448
88.04	3.98	7.77	0.1363	0.0450	2.6524
87.02	5.12	8.42	0.1379	0.0508	3.4294
Cot $\alpha = 2.00$					
73.04	3.46	7.07	0.1643	0.0474	2.3175
88.04	4.27	7.77	0.1363	0.0485	2.8600
87.02	5.35	8.48	0.1379	0.0615	3.5834
Cot $\alpha = 2.50$					
73.04	3.31	7.07	0.1643	0.0453	2.2170
88.04	3.50	7.77	0.1363	0.0398	2.3443
87.02	4.26	8.48	0.1379	0.0490	2.8533
103.54	4.29	9.19	0.1159	0.0414	2.8734

NOMENCLATURA

Lo = Longitud de la ola en aguas profundas.

H<sub>so</sub> = altura de ola al pie de la estructura sin daño.

T = período de la ola.

d = 12 m, frente al pie de la estructura.

N<sub>e</sub> = número de estabilidad.

$\alpha$  = ángulo del talud.

Talud	T (seg)	H (m)	Daño (%)	K <sub>D</sub>
1.25:1	7.77	5.03	2.0	30.59
1.50:1	8.48	5.09	5.0	26.42
1.75:1	8.48	5.12	4.0	23.05
2.00:1	8.48	5.35	4.0	23.01
2.50:1	9.19	4.29	5.0	9.49

Tabla 7.8 Resumen de resultados de los ensayos rea-  
lizados en el cuerpo de la estructura con los mexápodos  
colocados en una capa al azar, para los máximos valores  
de altura de ola no rompiente que no producen daño.

Tabla 7.9 Resultados de los ensayos realizados en el cuerpo de la estructura con los mexapódos colocados en una capa acomodados y sujetos a oleaje rompiente.

TALUD	T (seg)	H <sub>p</sub> (m)	H (m)	DAÑO (%)	K <sub>DHP</sub>
1.25:1	9.4	3.59	2.61	11.36	8.11
	10.0	3.88	----	90.0	10.28
1.50:1	9.4	3.83	3.62	0.0	8.24
	10.0	4.49	4.35	0.0	13.28
	11.0	4.53	----	100.0	13.83
1.75:1	9.4	3.51	3.27	0.0	5.44
	10.0	4.68	4.07	1.18	12.04
	11.0	5.05	4.68	30.0	16.19
2.00:1	9.04	3.02	2.63	0.0	3.02
	10.0	4.10	3.58	0.0	7.55
	11.0	4.83	4.70	8.7	12.36
	12.0	----	6.34	27.3	----
2.50:1	9.4	2.93	2.90	0.0	2.21
	10.0	4.13	3.60	0.0	6.18
	11.0	4.49	----	3.5	7.94
	12.0	5.99	----	15.0	10.87

H<sub>p</sub> = Altura de ola al pie del talud.

H = Altura de ola en aguas intermedias.

Tabla 7.10 Resultados de los ensayos realizados en el cuerpo de la estructura con los mexapódos colocados en una capa al azar y sujetos a oleaje tipo rompiente.

TALUD	T (seg)	H <sub>p</sub> (m)	H (m)	DAÑO (%)	K <sub>DHP</sub>
1.25:1	1.4	3.28	3.02	5.4	6.18
	10.0	3.71	----	95.0	-8.95
1.50:1	9.4	3.22	3.02	0.0	4.87
	10.0	3.78	3.39	100.0	7.89
1.75:1	9.4	3.28	3.02	0.06	4.42
	10.0	2.65	----	27.7	2.34
	11.0	5.25	----	100.0	16.19
2.00:1	9.4	3.29	3.02	0.0	3.90
	10.0	4.00	3.49	12.0	7.07
	11.0	4.41	3.92	95.0	9.40
2.50:1	9.4	3.30	2.93	0.0	3.16
	10.0	3.90	3.38	0.0	5.20
	11.0	5.11	----	12.38	11.71
	12.0	5.53	----	100.00	14.88

TALUO	T (seg)	H (m)	DAÑO (%)	K <sub>D</sub>
1.25:1	-----	-----	-----	-----
1.50:1	10.0	4.49	0.0	13.28
1.75:1	10.0	4.68	1.18	12.64
2.00:1	10.0	4.10	0.0	7.55
2.50:1	11.0	4.49	3.5	7.94

Tabla 7.11 Resumen de resultados de los ensayos realizados en el cuerpo de la estructura con los maderos colocados en una capa acomodados para los máximos valores de altura de oto reemplante que no producen daño.

TALUO	T (seg)	H (m)	DAÑO (%)	K <sub>D</sub>
1.25:1	9.4	3.28	5.4	6.18
1.50:1	9.4	3.22	0.0	4.67
1.75:1	9.4	3.28	0.01	4.42
2.00:1	9.4	3.29	0.0	3.90
2.50:1	10.0	3.90	0.0	5.20

Tabla 7.12 Resumen de resultados de los ensayos realizados en el cuerpo de la estructura con los maderos colocados al azar en una capa para los máximos valores de altura de oto reemplante que no producen daño.

TALUO	H (m)	DAÑO (%)	K <sub>D</sub>
1.25:1	8.50	0.0	29.28
1.50:1	* 3.00	* 4.25	* 3.96
	4.25	1.20	11.25
1.75:1	8.50	1.54	20.91
2.00:1	5.00	0.0	13.78

Tabla 7.13 Resumen de resultados de los ensayos realizadas para el morro de la estructura con maderos colocados en dos capas y al azar para los máximos valores de altura de oto reemplante que no provocan daño.

\* Uno sets cape

Tabla 7.13 Resultados de un ensayo con la escotera colocada paralela al frente de olas sin y con una plantilla de arena y para oleaje rampante.

TALUD	H (m)	DAÑO (%)	$K_0$
1.25:1	7.80		74.25
1.50:1	7.00	4.97	50.30
1.75:1	6.00	3.30	27.15
2.00:1	5.50		18.30

Tabla 7.14 Resumen de resultados de los ensayos realizados para el morro de la estructura con mezapodas colocadas al azar en dos capas, para los máximos valores de altura de ole rampante que no provocaron daño.

Caso 1 Sin plantilla de arena y elementos de coraza colocados al azar en el cuerpo de la estructura.

TALUD	H (m)	DAÑO (%)	$K_0$	OBSERVACIONES
1.25:1	3.00		4.75	
	3.50		7.54	
	4.00		11.26	
	4.25		13.51	
	4.50	6.96	16.03	Falta en el cuerpo de la estructura

Caso 2 Con plantilla de arena y elementos de coraza colocados al azar en el cuerpo de la estructura.

TALUD	H (m)	DAÑO (%)	$K_0$	OBSERVACIONES
1.25:1	3.00		4.75	
	3.50		7.54	
	4.00		11.26	
	4.50		16.03	
	5.00		22.00	
	5.37	5.80	27.20	Falta en el morro de la estructura

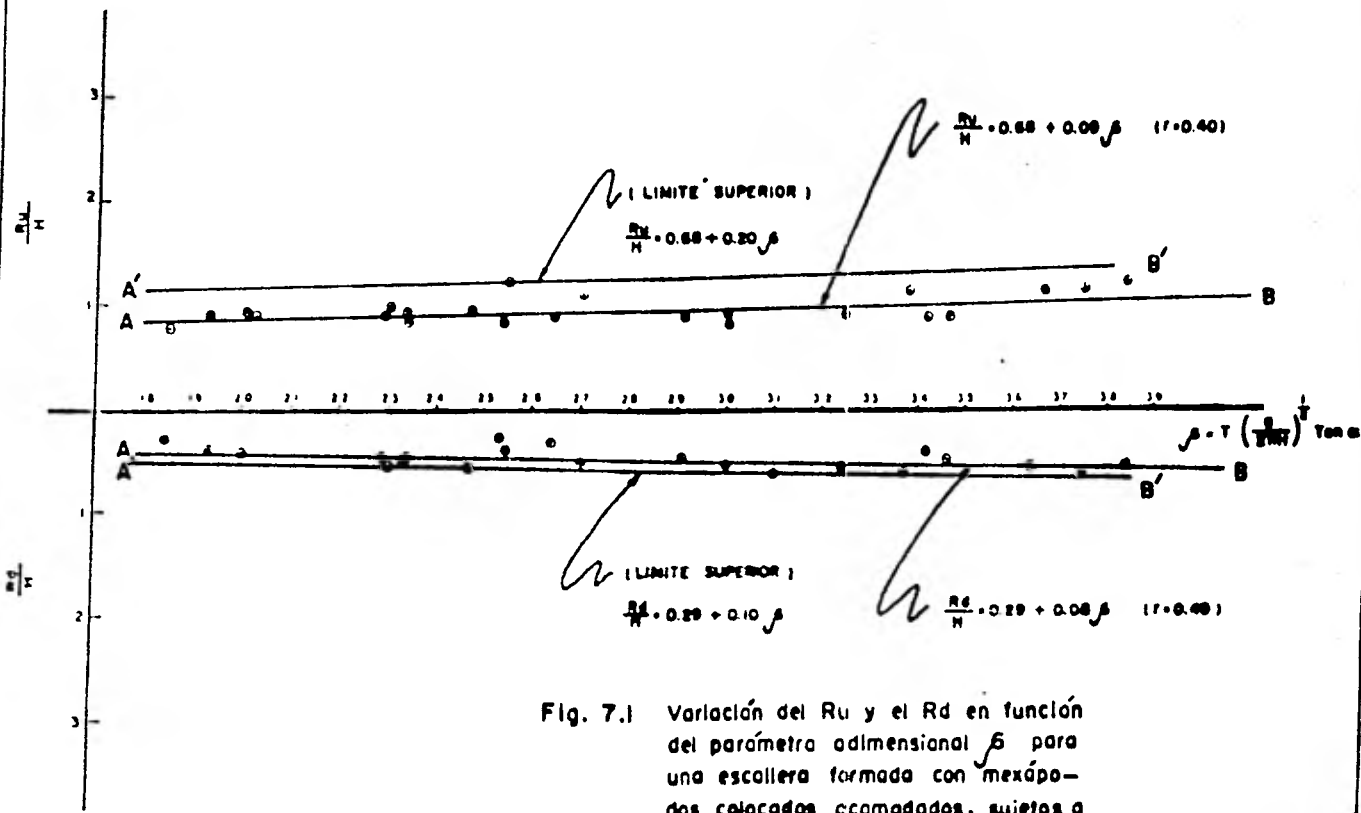
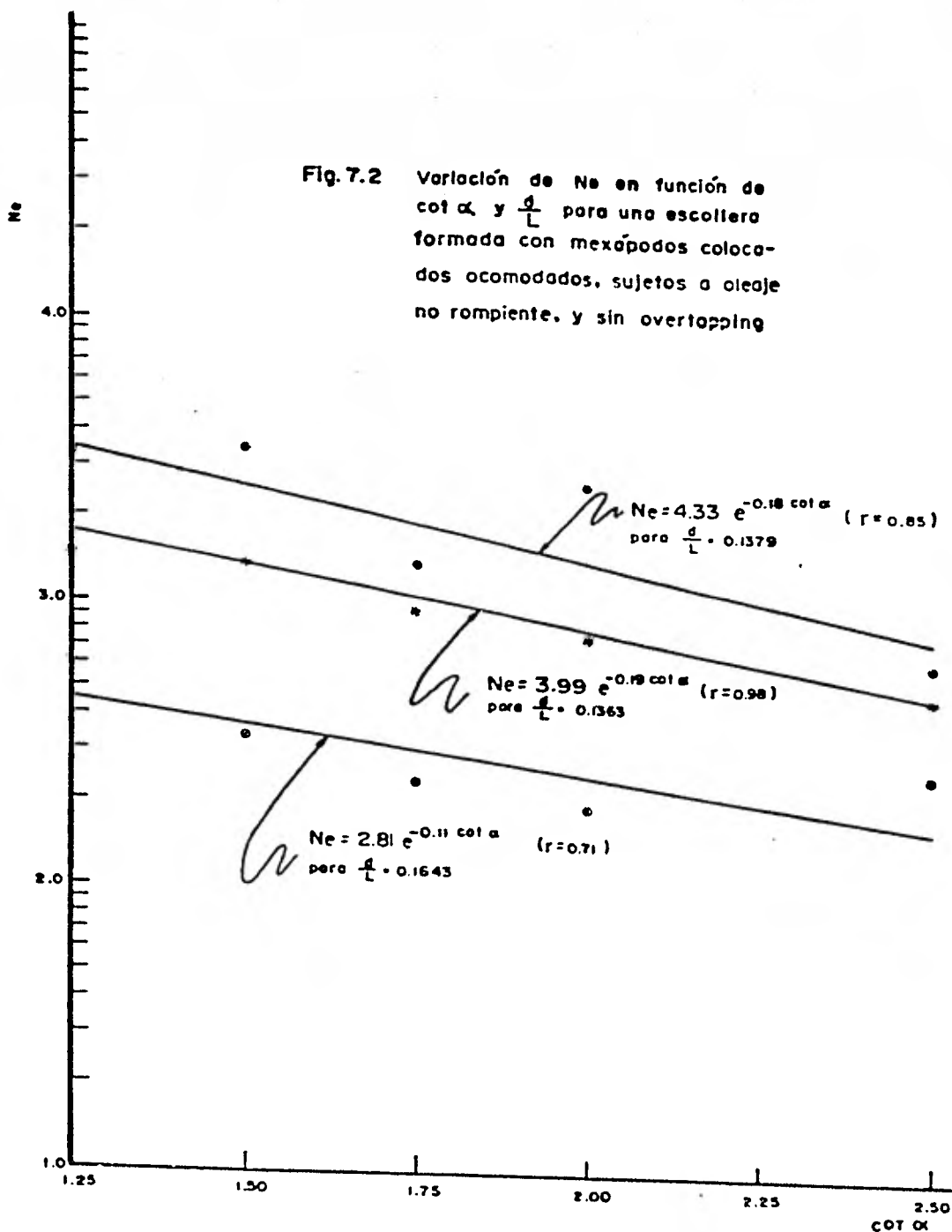


Fig. 7.1 Variación del  $R_u$  y el  $R_d$  en función del parámetro adimensional  $\beta$  para una escalera formada con mexápidos colocados camados, sujetos a oleaje no rompiente, y sin overlapping





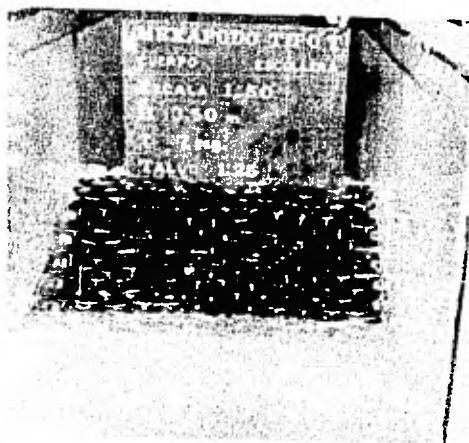


FOTO 1



FOTO 2

## CANAL DE OLAS

ESCOLLERAS FORMADAS CON MEXAPODOS  
TIPO "T" COLOCADOS ACOMODADOS.  
(FOTOS 1, 2, 3 Y 4)



FOTO 3



FOTO 4



FOTO 5

CANAL DE OLAS  
ESCOLLERAS FORMADAS  
CON MEXAPODOS TIPO  
"T" COLOCADOS AL  
AZAR. ( FOTOS 5, 6 Y 7 )



FOTO 6



FOTO 7

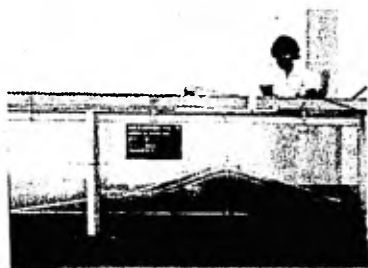


FOTO 8

## CANAL DE OLAS

RAMPA UTILIZADA PARA  
SIMULAR EL OLEAJE  
ROMPIENTE. ( FOTO 8 )



FOTO 9



FOTO 10

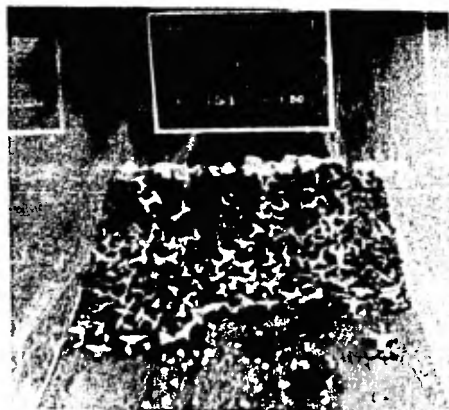


FOTO 11

## CANAL DE OLAS

MODO DE FALLA.  
( FOTOS 9 10 Y 11 )



FOTO 12

### TANQUE DE MORROS

ROMPEOLAS PERPENDICU  
LAR A LOS FRENTES  
DE OLA. (FOTOS 12 Y 13)



FOTO 13

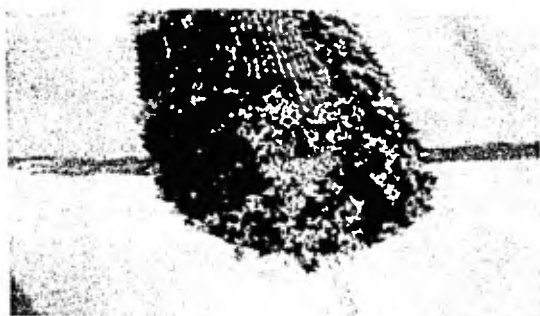


FOTO 14

### TANQUE DE MORROS

MODO DE FALLA.  
(FOTO 14)

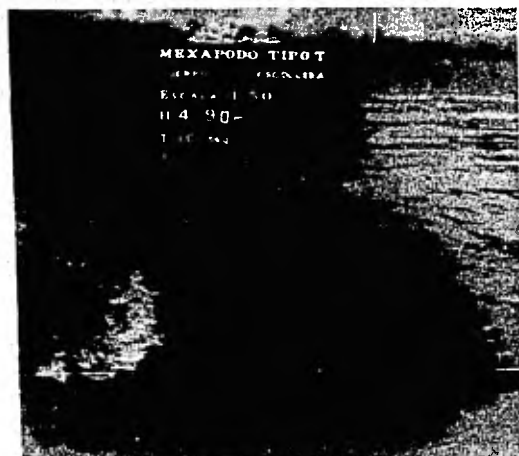


FOTO 15

### TANQUE DE MORROS

ROMPEOLAS PARALELO  
A LOS FRENTES DE  
OLA. (FOTO 15)



FOTO 16

### TANQUE DE MORROS

ROMPEOLAS QUE TIENE  
COLOCADA UNA CAPA  
DE ARENA EN EL  
DESPLANTE DE LA  
ESTRUCTURA. (FOTO 16)

## 8. CONCLUSIONES

De los ensayos llevados a cabo con los mexápodos como elementos de coraza en los rompeolas, sujetos a oleaje de tipo --rompiente y no rompiente, se puede concluir que:

Cuerpo de la escollera.

- a. El grado de estabilidad de la coraza resulta ser función de la forma de colocar los elementos. Se obtiene una mayor estabilidad si los elementos se colocan acomodados, tanto para oleaje rompiente como no rompiente.
- b. La estabilidad de la coraza es mayor para taludes comprendidos entre 1.25:1 y 1.75:1 tanto para oleaje rom-

piente como no rompiente.

- c. Para una escollera formada con mexápodos colocados acomodados y sujetos a oleaje no rompiente se obtiene un número de estabilidad máxima de 4.05 y un mínimo de -- 2.18.
- d. Para una escollera formada con mexápodos colocados al azar y sujeta a oleaje no rompiente se obtiene un número de estabilidad máximo de 3.58 y un mínimo de 2.22.
- e. Para oleaje no rompiente y mexápodos colocados acomodados el número de estabilidad resulta ser función del - talud y de  $d/L$ .
- f. Para oleaje no rompiente y mexápodos colocados acomodados el  $R_u$  y el  $R_d$  resultan ser función del parámetro - adimensional  $\xi$ .

Morro de la escollera.

- a. En el morro los mexápodos no pueden colocarse acomodados.
- b. Al utilizar una sola capa en el morro de la estructura no se obtuvo una estabilidad adecuada.
- c. Al colocar dos capas de mexápodos en el morro de la es tructura se logro una estabilidad adecuada.
- d. La ola al romper sobre el morro ocasiona que los mexá-

podós se traben mejor y se obtenga una estabilidad que cuando se tiene ola de tipo no rompiente.

- e. Se logro una mayor estabilidad cuando se dió una mayor fricción al pie de la escollera por medio de una delantal de arena.



## R E F E R E N C I A S .

1. Hudson , R.Y. , "Design of Quarystone Cover Layers for Rubble-Mound Breakwaters", Research Report No. 2-2 , Jul 58, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, CE, Vicksburg, Miss.
2. Jackson. R.A., "Design of Cover Layers for Rubble-Mound Breakwaters Subjected to Nonbreaking Waves", Research Report No. - 2-11, Jun 68, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station CE, Vicksburg, Miss.
3. Carver, R.D. , and Davison , D.D. , "Doios Armor Unite on Rubble Mound Breakwater Trunks Subjected to Nonbreaking Waves with no Overtopping", Technical Report H-77-19, Nov 77, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, CE, Vicksburg, Miss.
4. Burcharth H.F. , "Effect of Waves on On-Shore Structures", --- Annual Report 1977, Departament of the Enviroment, Hydraulics Research Station, Wallingford, Oxfordshire.
5. Gravesen, H., Jensen , O.J., Sorensen, T., "Stability of ----- Rubble Mound Breakwaters II".