

## OLAS

Las tres cuartas partes de la superficie de la tierra están cubiertas de agua y la acción del sol, de la luna, la rotación de la tierra y las características físico-químicas del agua generan un sistema de circulación general y esta en corrientes principales. En su comportamiento influyen las condiciones del fondo, la cercanía a los continentes y las condiciones meteorológicas.

Las olas tienen por origen los vientos, la acción del sol y la luna y los sismos. Las generadas por estos últimos tienen gran longitud de onda y se producen en mares profundos y desarrollan su poder destructivo al alcanzar aguas poco profundas, se les denominan maremotos.

El sol y la luna producen olas de marea, que son predecibles en magnitud y en el tiempo.

El oleaje causado por el viento viaja en el mar formando “trenes” que contienen olas de diversos tamaños y períodos. La longitud del tren y las magnitudes de las olas dependen de la localización y tamaño del Fetch, y de la dirección y velocidad del viento.

Fetch es el área de la superficie sobre la cual sopla el viento.

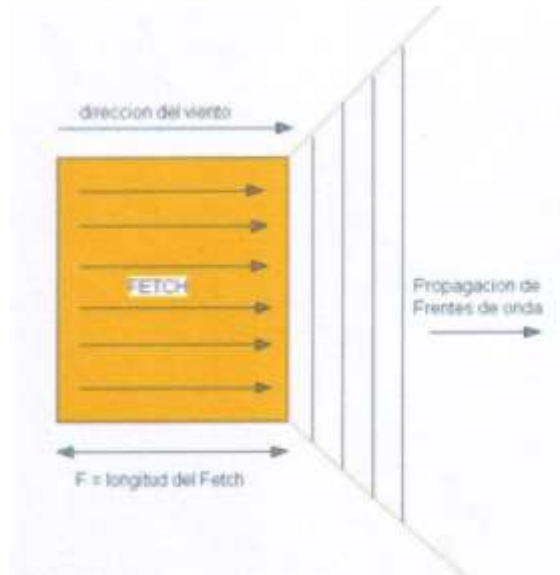


Fig. 1 Fetch

Las olas que llegan a la costa generan fuerzas que actúan sobre las estructuras que encuentren a su paso. Para determinar la magnitud de estas fuerzas es necesario conocer su amplitud, período y dirección. Estas se determinan conociendo las condiciones en que se generaron las olas, las pérdidas de energía en su recorrido y las modificaciones que sufren por difracción y refracción. Los trenes de olas se representan por medio de una ola característica que se denomina “ola significativa”.

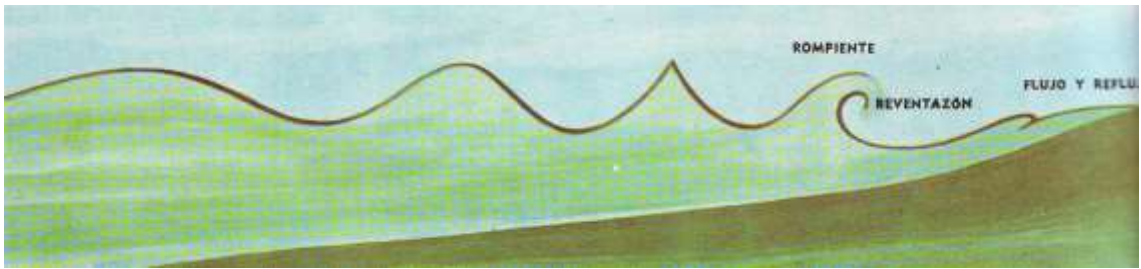


Fig. 2 Etapas de una ola.

Los puertos construidos en la costa o en la desembocadura de los ríos, están sometidos a las mareas, las que influyen en la sedimentación y en la formación de corrientes que dificultan la navegación.

Las playas costeras están sometidas a la acción de las mareas y el oleaje, en consecuencia cambian continuamente sus características. Deben protegerse si se desea una playa estable.

Para que se generen olas se requiere de energía que se transmita al agua en reposo y que genere en esta un movimiento oscilatorio de las partículas del líquido, sin un desplazamiento de masa. Al pulsar una cuerda de una guitarra, por ejemplo, esta oscila sin que exista un transporte de masa a lo largo de la cuerda. La ola, en mar profundo, es una onda de energía, con un desplazamiento vertical.

Si hay un objeto flotando, como una pequeña boya, cuando la ola pasa describe un movimiento circular, retornando aproximadamente al lugar que ocupaba primitivamente. Esto significa que cada partícula de agua describe una trayectoria circular en el plano vertical, en ángulo recto con la línea de la ola.

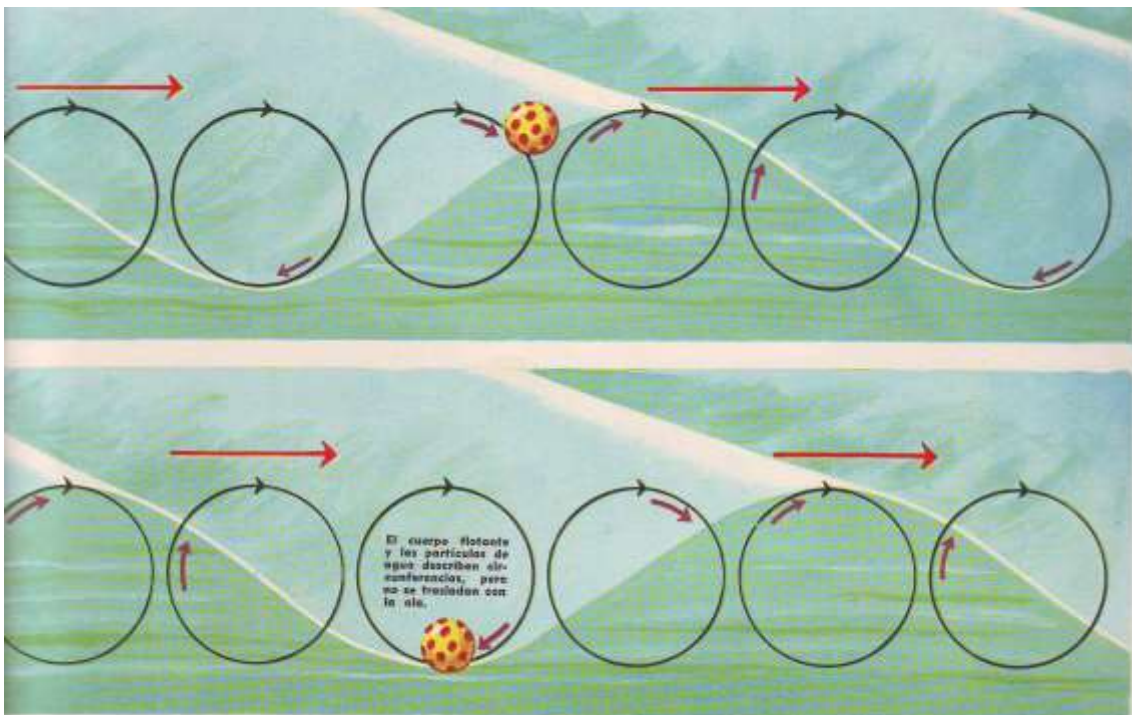


Fig. 3 Movimiento circular

El diámetro de estas órbitas disminuye y se transforman en elípticas con la profundidad, hasta llegar a ser nulas.

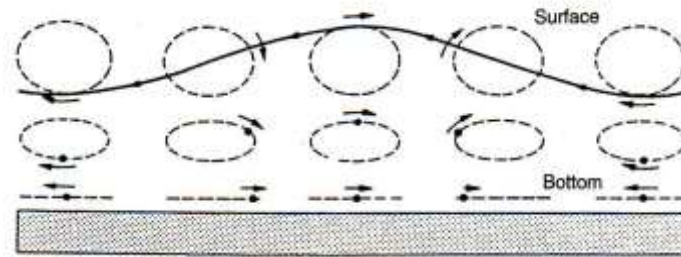


Fig.4 Cambio en las órbitas con la profundidad

Es esencial que no se confunda el concepto de ola con las mareas o corrientes de agua, ya que estas últimas implican un desplazamiento de masas de agua, en cambio las olas no. Por esto las olas generadas muy lejos, por ejemplo en la Antártida, y que llegan al continente no transportan hielos.

El desarrollo de la teoría se basa en la teoría Trocoidal o en la aplicación de las ecuaciones de Navier y Stokes para un flujo viscoso y no permanente.

La teoría Trocoidal utiliza una formación de la ola como se puede observar en la siguiente figura:

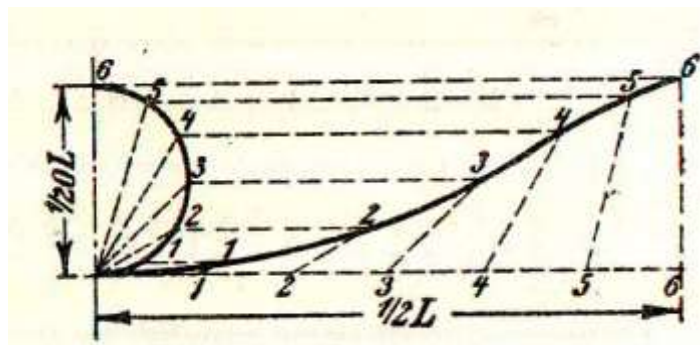


Fig.5 Trocoide

Las ecuaciones de Navier-Stokes para un flujo incompresible y que no incluyen las variaciones de tensión de segundo orden son las siguientes:

$$\frac{DV_x}{Dt} = B_x + \frac{1}{\rho} \left( \frac{\delta\sigma}{\delta_x} + \mu\nabla^2 V_x \right)$$

$$\frac{DV_y}{Dt} = B_y + \frac{1}{\rho} \left( \frac{\delta\sigma}{\delta_y} + \mu\nabla^2 V_y \right)$$

$$\frac{DV_z}{Dt} = B_z + \frac{1}{\rho} \left( \frac{\delta\sigma}{\delta_z} + \mu\nabla^2 V_z \right)$$

Como se observa son relaciones muy complejas.

Para el estudio de olas de pequeña magnitud se emplea la teoría Lineal desarrollada por Stokes, utilizando sólo el primer término de la ecuación de Navier-Stokes, generandose una ola sinusoidal, con las siguientes características:

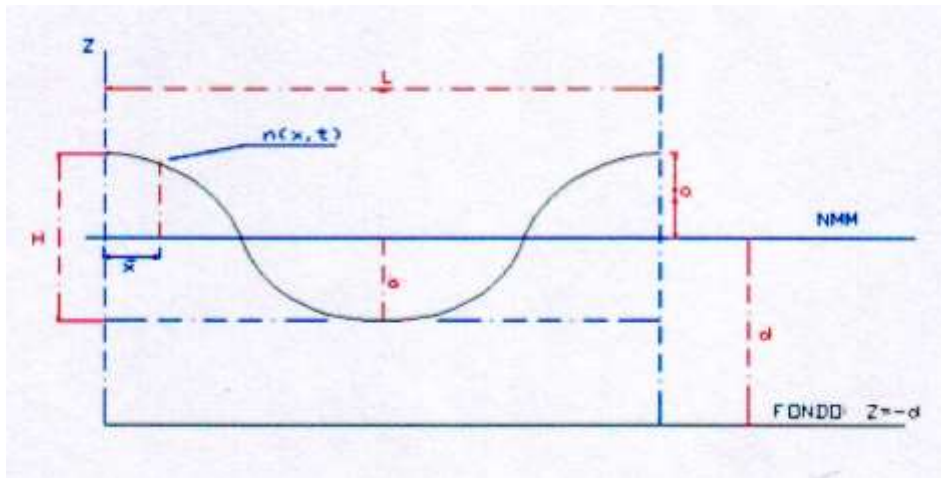


Fig. 6 Ola de pequeña magnitud

NMM = nivel medio del mar	$n(x,t)$ = Variación instantánea de la superficie
$d$ = profundidad del mar	$a$ = amplitud de la ola
$H = 2 a$ = altura de la ola	$L$ = longitud de la ola
$n(x,t) = a \cos(K x - S t)$	$K$ = número de la ola = $2 \pi / L$
$S$ = frecuencia angular = $2 \pi / T$	$T$ = período de la ola

Para el análisis de olas finitas, Stokes agrega los términos de orden superior de la ecuación de Navier-Stokes, en este caso los términos de segundo grado.

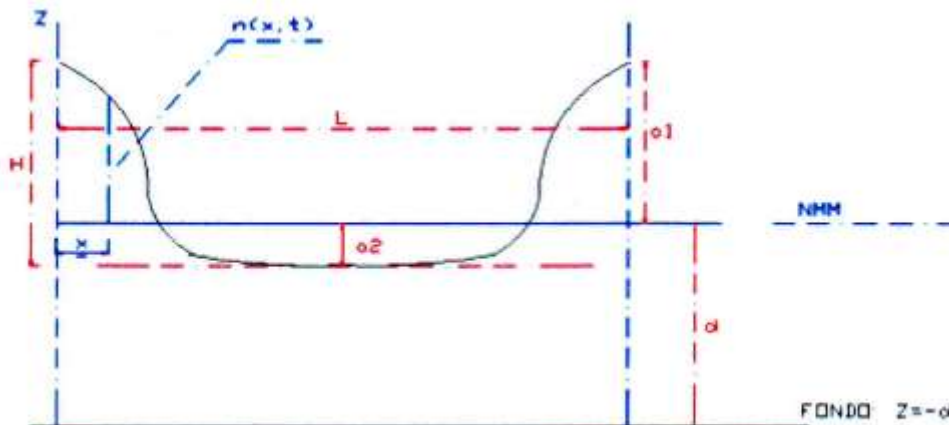


Fig. 7 Ola finita.

NMM = nivel medio del mar	$n(x,t)$ = Variación instantánea de la superficie
$d$ = profundidad del mar	$a_1$ = amplitud superior de la ola
$a_2$ = amplitud inferior de la ola	$H = a_1 + a_2$ = altura de la ola
$L$ = longitud de la ola	$n(x,t) = n_1 + k_1 k_2 k_3$
$n_1 = 0,5 H \cos(k x - S t)$	$k_1 = \pi H / 4 L$

$$k_2 = H ( 1+3/(2\text{senh } K d) ) \quad k_3 = \text{Ctgh}( K d )\cos 2(K x-S t)$$

$$K = \text{número de la ola} = 2 \pi / L \quad S = \text{frecuencia angular} = 2 \pi / T$$

$$T = \text{período de la ola}$$

Las características de una ola son:

$$H = \text{Altura} \quad L = \text{Longitud} \quad T = \text{Período}$$

El período es la característica constante de la ola durante su existencia, las otras variables se modifican en el transcurso del tiempo.

Mar profundo se considera a aquel en que la relación longitud de ola a profundidad es mayor a 2. En este caso la rugosidad del fondo no afecta su comportamiento. Al pasar a un mar poco profundo, la fricción del agua con el fondo hace disminuir la longitud de la ola y aumentar su altura.

$$\text{Mar profundo } d/L_0 > 1/2$$

$$d = \text{profundidad del mar} \quad L_0 = \text{longitud de la ola} \quad H_0 = \text{altura de la ola}$$

$$T = \text{período} \quad C_0 = \text{celeridad o velocidad de fase} = L_0 / T$$

$$C_0 = 1,56 T \quad [\text{m/s}]$$

Para mares medianamente profundos  $1/2 > d/L > 1/10$

$$L = L_0 \text{tgh}( K d) \quad C = C_0 \text{tgh}( K d)$$

Para mares poco profundos  $d/L < 1/10$

$$L = T ( g d )^{1/2} \quad C = ( g d )^{1/2}$$

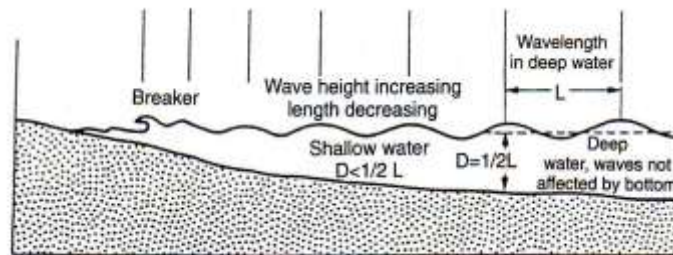


Fig. 8 Desarrollo de la ola.

Cuando el viento sopla sobre una superficie de agua, se genera en la masa de agua unos movimientos oscilatorios, cuya magnitud depende de la velocidad, dirección y tiempo en que actúa el viento, también del área de la superficie sobre la que sopla, fetch, y de la profundidad del agua. Las alteraciones en el nivel del agua que se producen constituyen las olas, que se desplazan formando trenes de olas, como se señaló anteriormente, con diferentes amplitudes y períodos.

Al proyectar cualquier construcción en el mar y sus costas se debe conocer cual es el posible oleaje a que estarán sometidas, tanto en las etapas de construcción como de operación. Es necesario predecir el comportamiento del oleaje en los valores medios y extremos de amplitud, período, longitud y celeridad.

Para esto se emplean dos métodos:

- Análisis estadístico. Esta es una recopilación “histórica” del oleaje en la zona del proyecto. Estos datos son escasos y probablemente no existen para el lugar de las obras.

De existir, hay toda una metodología para su tratamiento, y determinar la magnitud y período de la ola “significativa” y de las máximas esperadas.

- Empírico. Estos se basan en estudios realizados en otros lugares y se extrapolan esas experiencias. Para aplicar este método se necesita la siguiente información:
  1. El Fetch
  2. Profundidad del agua en el Fetch
  3. Magnitud, direcciones y duración de los vientos que soplan en el Fetch
  4. Distancia del Fetch hasta la costa
  5. Batimetría en la zona de mar poco profundo y en costas
  6. Magnitudes de ciclones.

Los métodos empíricos determinan la amplitud, período y dirección de la ola significativa en el sitio de salida del Fetch. Desde ese punto la ola se prolonga hacia la costa, modificándose por las siguientes causas:

- Gasto de energía. Se supone que en este tramo la acción del viento no existe, se va gastando la energía acumulada en el Fetch, y si la distancia es considerable la ola puede desaparecer.
- Refracción. (Refracción: Cambio de dirección de una onda al pasar de un medio a otro). Con un Fetch rectangular y en mar profundo, los frentes de olas que se propagan son rectos y paralelos, como en la figura 1. Ahora cuando el Fetch no es rectangular, o no está en aguas profundas, es complejo determinar su geometría, y la influencia de las irregularidades del fondo afectan la velocidad de la ola. Adicionalmente cuando la profundidad a lo largo del frente de la ola no es constante, se producen zonas de la ola que viajan a distinta velocidad, produciéndose la refracción, en que el frente de la ola deja de ser recto y se modifica tanto la amplitud, como la longitud de la ola.

Si  $H_0$  es la amplitud de la ola al salir del Fetch y  $H$  al llegar a la costa:

$$H = H_0 K_r K_f$$

$K_r$  es el coeficiente de refracción.

$K_f$  es el coeficiente de pérdida de energía entre Fetch y costa.

- Difracción. (desviación que sufre una onda al encontrar un obstáculo o abertura de dimensiones similares a su longitud de onda) Al entrar la ola a un puerto, y siguiendo los principios de Huygens, que establece que cada punto del frente de onda es

una fuente de nuevas ondas, pueden producirse aumentos importantes en la amplitud.

Si  $H$  es la amplitud antes de entrar al puerto y  $H_i$  es la amplitud en algún punto del puerto:

$$K_i = \frac{H_i}{H}$$

$K_i$  es el coeficiente de difracción que puede ser mayor o menor que uno.

La energía que puede contener una ola es muy variable, desde cero prácticamente para mares en calma, sobre los 10000 [kW/m] para grandes y profundas olas. Lo más frecuente puede ser una media de 60 a 80 [kW/m] (valores para las costas del Pacífico en USA.).

A continuación una tabla que presenta la designación que toman el viento y las olas y algunas de sus características.

**Tabla 9. Escala de Beaufort internacional**

Fuerza del viento					Estado del mar		
Grado	Designación del viento	Velocidad m/seg	Presión viva Kg/m <sup>2</sup>	Presión efectiva Kg/m <sup>2</sup>	Grado	Designación del mar	Altura de las olas m
		1)	2)	3)			
0	Calma . . . . .	0 - 0,5	< 0,02	< 0,02	0	Calma chicha . .	0
1	Brisa . . . . .	0,6 - 1,7	0,02 - 0,2	0,03 - 0,2	1	Muy tranquilo . .	< 1
2	Flojito . . . . .	1,8 - 3,3	0,2 - 0,7	0,3 - 0,9	2	Tranquilo . . . .	1 - 2
3	Flojo . . . . .	3,4 - 5,2	0,7 - 1,7	1,0 - 2,2	3	Marejadilla . . .	2 - 3
4	Bonancible . . . .	5,3 - 7,4	1,8 - 3,5	2,3 - 4,5	4	Marejada . . . . .	3 - 4
5	Fresquito . . . . .	7,5 - 9,8	3,6 - 6,1	4,6 - 7,9	5	Marejada fuerte (mar picada) . .	4 - 5
6	Fresco . . . . .	9,9 - 12,4	6,2 - 9,7	8,1 - 12,6	6	Marejada muy fuerte . . . . .	6 - 7
7	Muy fresco . . . .	12,5 - 15,2	9,9 - 14,6	12,8 - 19,0	7	Mar gruesa (muy picada) . . . . .	8 - 9
8	Frescachón . . . .	15,3 - 18,2	14,8 - 20,9	19,2 - 27,2	8	Mar muy gruesa . .	10 - 12
9	Duro . . . . .	18,3 - 21,5	21,2 - 29,2	27,5 - 38,0	9	Mar furiosa . . . .	> 12
10	Muy duro . . . . .	21,6 - 25,1	29,5 - 39,8	38,3 - 51,8			
11	Huracanado . . . .	25,2 - 29,0	40,1 - 53,2	52,2 - 69,1			
12	Huracán . . . . .	> 29	> 53,2	> 69,1			

Presión viva es la que se produce sobre una superficie expuesta al viento, considerando su acción solamente por barlovento.

Presión efectiva considera, además, la depresión que se genera por sotavento.

## ROMPEOLAS

Un rompe olas tiene por objetivo

- mejorar el régimen marítimo de la localidad y en lo posible no introducir alteraciones en dicho régimen.
- Prestar abrigo de marejadas, oponiendo la mayor resistencia al embate de las olas.

Cualquier obstáculo que se levante en el mar produce detrás de si una calma, que provoca depósitos de los arrastres de las olas y las corrientes, cuya magnitud dependerá de la naturaleza del fondo marino. Si es roca dura y poco atacable los depósitos serán mínimos, pero si se trata de arena y atacable los depósitos serán considerables.

Se justifican, entonces, en lugares abiertos en que el oleaje choca con ímpetu contra la costa que se quiere defender.

La experiencia indica que en un mar agitado se disminuye considerablemente la altura de las olas haciendo flotar objetos, que al parecer no debieran tener ninguna influencia. Por ejemplo: una red de pesca, tablas de madera unidas formando una especie de reja, aceite o petróleo esparcido. De aquí nace la idea de rompeolas flotantes, se consideran como un elemento provisorio, no permanente, ya que difícilmente podría resistir el embate de un temporal.

Los rompeolas flotantes no deben impedir el paso del agua y constan de la parte flotante y de las amarras que lo sujetan al fondo.

Los rompeolas flotantes no deben ser una construcción continua, sino formada por una serie de cuerpos flotantes, dispuestos apropiadamente, y convenientemente sumergidos para proveer de mayor efectividad y por otra parte, que la parte sobresaliente del agua menos expuesta a la acción del viento.

En las figuras siguientes se muestra el artificio de Tayler y su disposición.

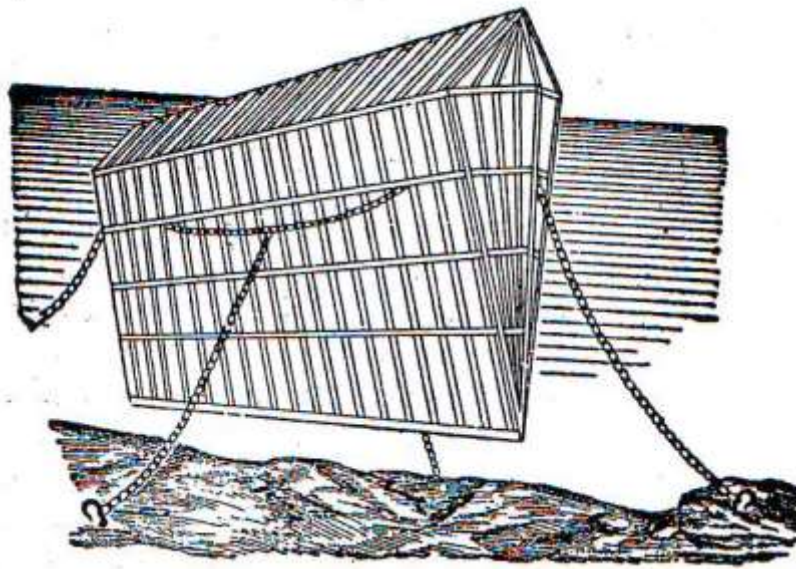


Fig. N°9 Rompeolas flotante



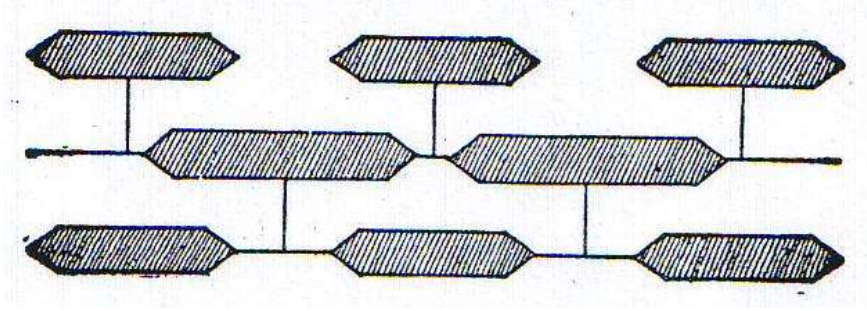


Fig. N° 10 Disposición del rompeolas.

La naturaleza proporciona rompeolas flotante, el ejemplo más notable es el mar de los Sargazos, es sabido que rara vez se agita. Se han propuesto rompeolas imitando estas plantas.