

Rompeolas verticales

(Conclusión)

En los números 3 y 4 de los ANALES de este año, he estudiado algunos accidentes producidos en rompeolas de paramentos verticales, con el objeto de ver hasta qué punto pueden explicarse por medio del cálculo los efectos notados en esos accidentes y deducir de ahí la mayor o menor confianza que puede tenerse en los métodos de cálculo aplicados. Al hacer las aplicaciones necesarias he hecho referencia a artículos publicados en otras revistas y a un informe presentado por mí al Congreso Internacional de Navegación de 1926, trabajos en que pueden encontrarse los elementos necesarios para el cálculo; pero como es muy probable que el ingeniero que, en un momento dado, desee resolver un problema de esta naturaleza, no encuentre a mano esos elementos, he creído conveniente reunir-

los en el presente artículo, que viene a servir de complemento a los dos anteriores.

Según la teoría llamada trocoidal, universalmente aceptada hoy día, las olas son el efecto de un movimiento orbital de las moléculas líquidas, las que describen órbitas cerradas, circulares, cuando la profundidad es indefinida, y elípticas, cuando la influencia del fondo se hace sentir. El perfil que resulta para la superficie del agua en el sentido de la propagación de la ola, es una trocoide, curva engendrada por un punto interior de un círculo o de una elipse que se traslada, girando con movimiento isócrono. Esta curva tiene un parecido vago con la sinusoides, pero es disimétrica, con curvatura menor en el fondo de la ola y más acentuada en la cresta.

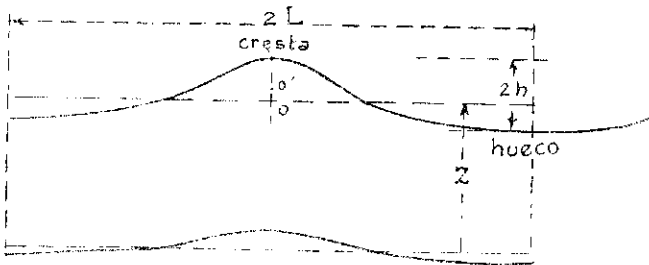


fig. 1

En la fig. 1 se indica, muy exagerada, la forma de la ola y sus elementos principales: el largo $2L$ y la altura $2h$. Por efecto de la disimetría de la curva, los centros o de las órbitas se elevan encima del nivel de reposo, y la ola queda dividida por este nivel en dos porciones de alturas diferentes.

Si las olas se propagan en profundidad indefinida, las órbitas de las moléculas líquidas son circulares; el radio de las órbitas correspondientes a la superficie del agua será igual a la mitad de la altura de la ola, es decir, valdrá h , y el radio de la órbita cuyo centro se encuentra a la profundidad z bajo el centro o' de la órbita de superficie, valdrá

$$r = h \cdot e^{-\frac{\pi \cdot z}{L}}$$

expresión en la cual e es la base de los logaritmos neperianos, cuyo logaritmo vale 0.434294.

La elevación oo' del centro de una órbita de superficie sobre el nivel de reposo, vale

$$oo' = \frac{\pi \cdot h^2}{2 \cdot L}$$

Con estos elementos se podría dibujar la forma de la superficie de la ola y la forma que toman las superficies de nivel a diversas profundidades, es decir, las superficies de igual presión en un momento dado.

Cuando las olas se propagan en profundidades reducidas, es decir, cuando la influencia del fondo se hace sentir en la forma de las órbitas, éstas se transforman de circulares en elípticas tanto más achatadas cuanto más sensible es la influencia del fondo, es decir, cuanto más disminuye la profundidad.

En alta mar las profundidades son

muy grandes, pueden considerarse prácticamente indefinidas, y las órbitas son sensiblemente circulares. A medida que la ola se acerca a la orilla y las profundidades disminuyen, las órbitas se transforman en elipses más y más achatadas, hasta llegar a una profundidad, sensiblemente igual a la altura $2h$ de la ola, más allá de la cual el movimiento ondulatorio se hace imposible y la ola rompe. Se ve, pues, que la profundidad desempeña un papel muy importante en la propagación del movimiento ondulatorio, pero lo que más importancia tiene es en realidad la profundidad relativa al largo de la ola,

es decir, $\frac{H}{2 \cdot L}$, como veremos en todo

lo que sigue más adelante.

Las órbitas elípticas tienen en la superficie un eje menor vertical, que será forzosamente igual a la altura $2h$ de la ola; de manera que, si lo llamamos $2b_s$, tendremos

$$b_s = h$$

El eje mayor de las elipses de superficie será a_s y vale

$$a_s = b_s \cot. \text{hip.} \frac{\pi H}{L}$$

expresión que para un valor dado de la profundidad relativa $\frac{H}{L}$ toma la forma

$$a_s = k \cdot h$$

siendo k la cot. hip. $\frac{\pi H}{L}$ que corresponde a un valor determinado de la profundidad relativa. En el cuadro I, que se inserta al final, se han anotado los valores de K , \sqrt{K} y $\sqrt{K^2-1}$, que se em-

plean en las expresiones que veremos más adelante.

Si se considera una órbita elíptica cuyo centro se encuentra a la profundidad z bajo el de la órbita de superficie (1), sus semiejes valen

$$b_s = \frac{e^n + e^{-n}}{e^p - e^{-p}}$$

$$b = b_s \frac{e^n - e^{-n}}{e^p - e^{-p}}$$

expresiones en las cuales n y p valen

$$n = 2\pi \frac{h^2 - z}{2L}$$

$$p = 2\pi \frac{H}{2L}$$

En el cuadro II se indican los valores de $e^{2\pi x}$ y $e^{-2\pi x}$ que pueden servir para calcular los numeradores y denominadores de a y b .

Es particularmente interesante el eje mayor en el fondo $2a_f$, profundidad a la cual la elipse se transforma en recta, pues b_f no puede tener otro valor que 0. Este eje mayor es igual a la distancia focal de la órbita elíptica en el fondo que vale,

$$2c = 2 \cdot a_f = 2 b_s \frac{2}{e^p - e^{-p}}$$

cantidad independiente de L y función sólo de la profundidad relativa. Es fácil deducir que la distancia focal es la misma en todas las órbitas, y se la puede calcular para la superficie,

(1) En la práctica se puede medir z a partir del nivel de reposo.

$$2c = 2 \sqrt{a_s^2 - b_s^2}$$

y como $a_s = k b_s$,

resulta

$$2c = 2h \sqrt{k^2 - 1} = 2a_f$$

En el cuadro I se encuentran los valores de $\sqrt{k^2 - 1}$ que corresponden a los valores más comunes de la profundidad relativa $\frac{H}{2L}$.

Finalmente, para concluir de determinar la forma de la ola, es necesario conocer la cantidad h_0 , que llamaremos h_0 , en que se eleva sobre la superficie de reposo el centro de las órbitas de superficie, y que vale

$$h_0 = \frac{2\pi h^2}{L} \cot. \text{hip.} \frac{\pi H}{L}$$

que podemos escribir bajo la forma

$$h_0 = 2 \cdot \pi \cdot k \frac{h^2}{L}$$

fácil de calcular con ayuda del cuadro I.

De las medidas hechas por el señor Gaillard, se deduce que la expresión

$$h_0 = 2\pi k^2 \frac{h^2}{L}$$

calza mejor con el resultado de la experiencia; pero como esas medidas han sido pocas y abarcan un campo muy limitado, es mejor atenerse a la expresión teórica de h_0 .

En cuanto al período $2T$ de las olas que se propagan en aguas de profundidad limitada, se le obtiene por la expresión

$$2T = 2 \sqrt{\frac{\pi L}{g} \cdot \cot, \text{hip.} \cdot \frac{\pi H}{L}}$$

o sea

$$2T = 2\sqrt{k} \sqrt{\frac{\pi L}{g}}$$

en que k tiene el valor ya conocido. Este elemento es el más fácil de medir en la práctica y de él se puede deducir L cuando se conoce H.

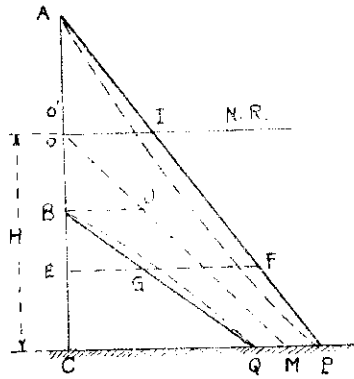


Fig. 2

PRESIÓN CONTRA UN PARAMENTO VERTICAL

No entraré a desarrollar el estudio teórico del señor Sainfiou, al que ya he hecho referencia en varias ocasiones, limitándome a exponer la manera de aplicar su método de cálculo.

Cuando una ola llega a chocar con un muro vertical, si la profundidad al pie del muro es suficiente, la ola se refleja y se produce la interferencia de la onda directa con la reflejada por el muro. Por efecto de esta interferencia el agua sube a lo largo del muro hasta una altura 2h, igual a la de la ola, sobre el centro de las órbitas de superficie, y baja hasta una altura igual bajo ese mismo centro.

La profundidad mínima compatible con la reflexión es

$$H_c = \frac{1}{2} \sqrt{2h} \cdot \text{Log.} \frac{T + \sqrt{2h}}{T - \sqrt{2h}}$$

Si el valor de H es mayor, el fenómeno puede someterse al cálculo y las presiones que se producen por lado del mar a lo alto del paramento vertical se determinan de la manera siguiente (Fig. 2):

Sobre la vertical OC, siendo NR el nivel de reposo, se marca la distancia OO' equivalente a la elevación del centro de la órbita de superficie

$$h_o = 2 \cdot \pi \cdot K \cdot \frac{h^2}{L}$$

Tomando en seguida a partir de O' las distancias O'A y O'B, iguales a la altura 2h de la ola, se marcan los puntos A' y B' a que alcanza el agua hacia arriba y hacia abajo; se traza la recta CM, correspondiente a la ley de distribución de las presiones hidrostáticas en reposo; a partir de M, tomando hacia la derecha y hacia la izquierda las longitudes iguales MP y MQ, que valen

$$MP = MQ = \frac{2h}{e^n + e^{-n}}$$

se trazan las rectas AP y BQ. Las leyes de distribución de las presiones soportadas por el muro corresponden a curvas logarítmicas que pasan por los puntos A,P y B,Q, parecidas a las que señalan con segmentos, curvas que pueden reemplazarse sin error sensible por las rectas

A, P y B, Q; de manera que las presiones sobre el muro se medirán por las ordenadas horizontales de estas rectas, tales como EF y EG para el punto situado a la hondura OE.

Como lo que nos interesa conocer es la sollicitación del muro, y la presión hidrostática del agua en reposo obra siempre por detrás del muro, habrá que considerar en realidad la diferencia entre las presiones debidas al movimiento ondulatorio y las del reposo, como se indican en la Fig. 3, marcando los puntos P' y Q', para lo cual se toma CP' = MP = CQ' = MQ, y uniendo el punto P con I y con J. Las presiones que sollicitan al muro hacia el interior serán las ordenadas de la línea AIP', que corresponden al momento en que la ola alcanza al punto A; las presiones que lo sollicitan hacia el lado exterior serán las ordenadas horizontales de OJQ', que corresponden al momento en que la ola alcanza a bajar hasta el punto B.

Para terminar con lo relativo al cálculo derivado a la reflexión de la ola, sólo nos queda por considerar el valor de la velocidad máxima que se produce en el fondo en las inmediaciones del muro. Esa velocidad es igual a

$$v_f = \frac{2\pi a_f}{T}$$

de la cual ya hemos visto como se calculan los elementos. La distancia del

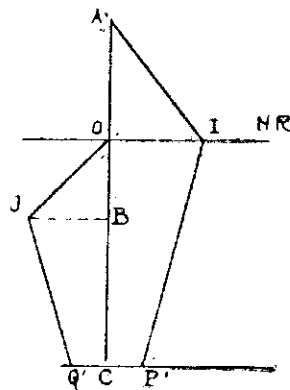


fig. 3

muro a la cual se produce esa velocidad es la cuarta parte del largo de la ola, es decir, $D = \frac{L}{2}$. Esta velocidad máxima

es particularmente interesante en los casos en que la profundidad es pequeña y el fondo socavable, porque éste puede ser removido, como sucedió en Valencia, y porque si se la toma en cuenta se puede defender el fondo para evitar la socavación.

CUADRO I

$\frac{H}{2L}$	K	\sqrt{K}	$\sqrt{K^2-1}$
0,03	5,38	2,32	5,18
0,04	4,07	2,02	3,94
0,05	3,29	1,81	3,13
0,06	2,78	1,66	2,59
0,07	2,48	1,57	2,27
0,08	2,20	1,48	1,96
0,09	1,99	1,41	1,72
0,10	1,80	1,34	1,49
0,11	1,68	1,29	1,35
0,12	1,57	1,25	1,21
0,13	1,49	1,22	1,10
0,14	1,41	1,19	0,99
0,15	1,36	1,16	0,92
0,16	1,31	1,14	0,85
0,17	1,27	1,13	0,78
0,18	1,24	1,11	0,74
0,19	1,21	1,10	0,68
0,20	1,18	1,09	0,62
0,21	1,16	1,08	0,58
0,22	1,14	1,07	0,55
0,23	1,12	1,06	0,50
0,24	1,11	1,05	0,48
0,25	1,09	1,04	0,44
0,26	1,08	1,04	0,41
0,27	1,07	1,03	0,38
0,28	1,06	1,03	0,35
0,29	1,05	1,02	0,32
0,30	1,045	1,02	0,31
0,31	1,04	1,02	..
0,32	1,035	1,01	..

CUADRO II

N	$e^{2\pi x}$	$e^{-2\pi x}$
0,03	1,207	0,829
0,04	1,286	0,778
0,05	1,369	0,732
0,06	1,458	0,686
0,07	1,552	0,646
0,08	1,653	0,606
0,09	1,760	0,568
0,10	1,874	0,534
0,11	1,995	0,502
0,12	2,125	0,471
0,13	2,262	0,443
0,14	2,409	0,416
0,15	2,565	0,390
0,16	2,740	0,365
0,17	2,908	0,344
0,18	3,097	0,323
0,19	3,298	0,303
0,20	3,511	0,285
0,22	3,981	0,251
0,24	4,514	0,222
0,26	5,118	0,196
0,28	5,803	0,173
0,30	6,580	0,152
0,32	7,460	0,134
0,34	8,859	0,117