Ing. Jorge Lira Orrego

Cálculo de rompeolas verticales

(*Conclusión*)

Las experiencias de laboratorio debían permitir conocer las presiones producidas sobre una pared vertical que llegara hasta el fondo del agua, que es el caso que permite considerar el cálculo, y las que las mismas olas produjeran sobre la porción de paramento vertical expuesta a ellas, cuando hubiera una infraestructura: la comparación entre esas presiones permitiría deducir cuál era la influencia de dicha infraestructura.

Para producir las ondas y para que se propagaran en una longitud suficiente se construyó una canoa metálica de 15,50 metros de largo, 1.20 m. de alto y 0,35 m. de ancho; los dos extremos de esta canoa, que fué colocada horizontalmente, están cerrados con planchas metálicas, una de las cuales tiene una serie de agujeros de 3 centímetros de diámetro, situados sobre su eje vertical a distancias de 10 cm. desde 30 cm. de distancia del fondo hasta 90 cm. de él, que tienen por objeto instalar los dinamómetros destinados a medir las presiones. Una de las paredes laterales de la canoa es de vidrio de una longitud de 4,20 metros, en la parte que queda junto a los dinamómetros, con el objeto de poder hacer en el agua las observaciones y las medidas relativas a la forma de las ondas.

En el extremo opuesto de la canoa se encuentra la instalación destinada a la formación de estas últimas. En principio las experiencias tenían por objeto medir las presiones simultáneas que una ola determinada produciría sobre los diferentes dinamómetros; pero fué necesario renunciar a esta idea desde el primer momento, porque no era prácticamente posible construir dinamómetros suficientemente sensibles y sin inercia, de manera que hubo que disponer las cosas para hacer sucesivamente las observaciones en los diversos dinamómetros, lo que exigía que se pudiera producir olas cuyas caracteristieas fueran iguales, sin dejar nada entregado a la destreza del operador.

Respecto al tipo de onda para observar, lo mejor habría sido tratar de reproducir las olas del mar, es decir ondas periódicas, que se reflejaran en el extremo vertical de la canoa y que interfirieran con las siguientes, dando lugar al fenómeno llamado *clapotis* por los franceses. o de la *onda estacionaria;* pero una instalación de esta clase habría resultado más complicada y costosa que la que adoptamos y no habría conducido a resultados más dignos de fe que ella. Fué por eso que pensamos en emplear un tipo de onda solitaria, que fuera fácil de producir y que permitiera obtener en el momento deseado una onda cuyas características fueran fijas y cuya forma fuera parecida a las de las olas del mar.

Con este objeto, cerca del extremo de la canoa se colocó un carro C, reproducido esquemáticamente en la figura 3, que por medio de una armazón, sostiene una compuerta de madera vertical, sumergida en el agua hasta llegar a 0,20 m. de distancia del fondo, altura a la cual tiene charnelas, que permiten que la compuerta caiga, girando hacia la derecha. El funcionamiento de este conjunto es muy sencillo: se hace correr el carro hacia la derecha hasta sujetarlo con el gancho G; se levanta la compuerta de madera hasta que quede vertical y se la sujeta por medio del gancho S, que puede soltarse cuando se pone en tensión una cuerda amarrada a un

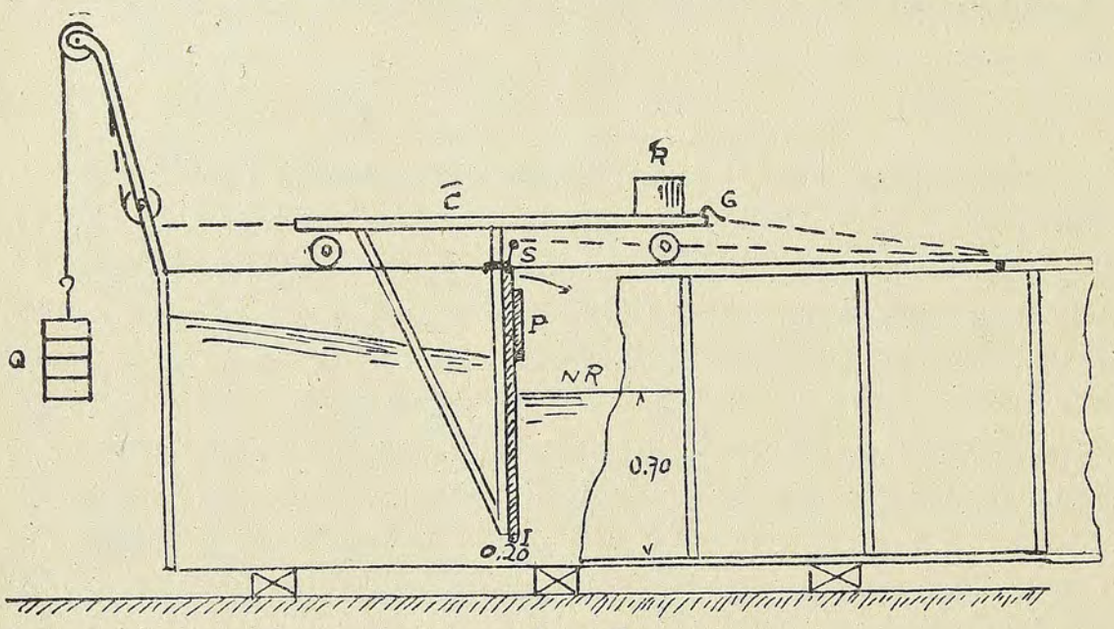

fig. 3

punto fijo de la canoa, cuerda que en la posición inicial del carro queda suelta; se coloca el contrapeso motor Q, que en las experiencias hechas pesaba 75 kilógramos, y todo está listo. En el momento en que se quiere producir una onda se suelta el gancho G, con lo cual el carro, arrastrado por el contrapeso, corre rápidamente hacia la izquierda; al moverse la compuerta vertical empuja el agua hacia la izquierda, elevando considerablemente su nivel; cuando la compuerta llega a cierta posición, la cuerda que maneja el picaporte S lo abre y la compuerta cae hacia la derecha, empujada por el agua acumulada a su izquierda y ayudada por un lastre de hierro P, fijo en ella, dejando pasar violentamente la masa de agua, que da origen a la formación de una onda solitaria, la cual se propaga hacia el extremo derecho de la canoa, en el que se refleja, elevándose contra el muro y dando lugar a sobrepresiones, que se miden por medio de los dinamómetros ahí instalados.

Los vidrios de la pared lateral de la canoa permiten observar perfectamente esas ondas en la parte que interesa y determinar sus características principales, las que dependen: del punto de partida del carro, que se fija con el gancho G, del punto en que se suelta la compuerta, que se fija por el largo de la cuerda que maneja el picaporte S, y del peso del contrapeso motor Q, que es fácil de modificar. Esas características fueron casi exactamente las mismas en las ondas que se produjeron al hacer el estudio experimental y sólo se tomaron en cuenta aquellas que podían ser consideradas como prácticamente iguales; como promedio de las que se tomaron en cuenta puede considerarse que la altura de las ondas fué $2h = 18{,}2$ cen-

tímetros y su largo 2l=640 centímetros; la altura de la onda quedaba dividida en dos partes desiguales por el nivel de reposo NR: 12,7 cm. encima de ese nivel y 5,5 cm. debajo de él, de manera que, siendo de 18,2 cm. el eje vertical de las órbitas elípticas de superficie, la altura de su centro sobre el nivel NR resulta de 12,7 — 9,1=3,6 cm.

Si con las características indicadas más arriba y la hondura de propagación H de 70 cm., que ha sido la adoptada en las experiencias, se calcula la altura del centro de las órbitas de superficie en el caso de olas, resulta K igual a 1,68 y

$$h_o = 3{,}14 \times 1{,}68 \frac{83}{640} = 0{,}68 \text{ cm.}$$

cantidad bastante menor que la de 3,6 cm. que corresponde a las ondas solitarias observadas, lo que indica que estas últimas se levantan más que las olas, cosa que no debe extrañarnos, porque así lo habían revelado las experiencias hechas en el laboratorio de Hidráulica de Losana.

En efecto en este laboratorio se experimentó sobre modelo con ondas periódicas (onda estacionaria) y con onda solitaria, cuyas características a la escala del modelo eran las mismas y correspondían a una altura 2.h de 7 metros y un largo 2.L de 185 metros, que se propagaban en una hondura de 15 metros, a la escala del modelo, y se midieron en los diferentes dinamómetros las presiones que permitieron dibujar las leyes de distribución de sobrepresiones que representa la fig. 4, en la cual se ve que las ondas solitarias se elevaron contra el muro a una altura bastante mayor que la onda estacionaria y que las sobrepresiones que solicitaban al muro eran también francamente mayores con ellas, siendo bastantes semejantes entre sí las curvas que en ambos casos representan la ley de variación de las sobrepresiones.

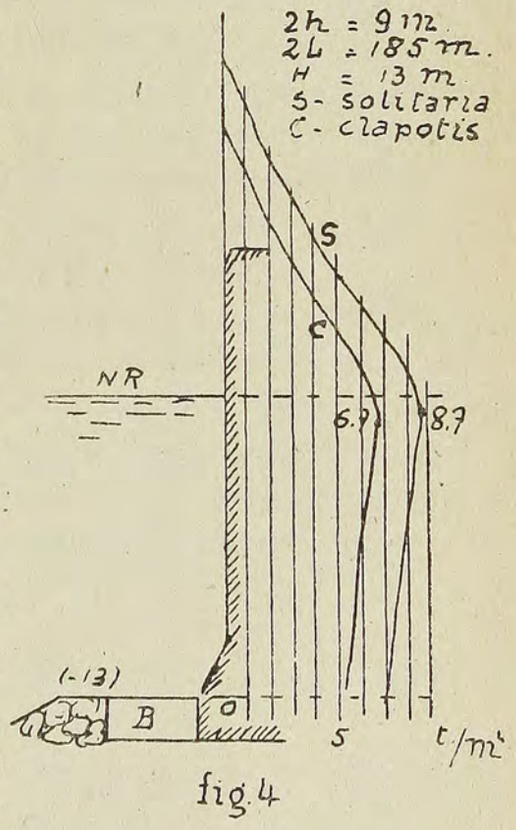

fig. 4

Si se recuerda que las medidas hechas en los instrumentos instalados en el mar y en el laboratorio de Losana indican sobrepresiones que concuerdan suficientemente con los resultados del cálculo basado en la onda estacionaria, esas observaciones nos permiten deducir que las medidas de sobrepresiones que efectuemos con ondas solitarias nos darán resultados mayores que los que indicaría el cálculo, pero parecidos a ellos, en cuanto a la forma de la ley de su distribución.

La medida de las presiones que soporta en cada momento un punto de la pared extrema de la canoa se hizo por medio de dinamómetros muy sencillos de construcción. Cada uno de ellos está formado por una lámina de caucho muy delgada, que tapa un agujero de 30 milímetros de diámetro hecho en la pared metálica, y que se mantiene fija por medio de un anillo de bronce convenientemente atornillado; por la parte exterior de la canoa esta lá-

mina de caucho se apoya en una pieza de bronce, sujeta por un resorte en la cual se halla fijo un espejito; un rayo luminoso, proveniente de un aparato de proyección, se refleja por medio del espejo y permite obtener en una pantalla blanca una imagen bien neta de unos 2 milímetros de diámetro; si la presión que obra sobre la lámina de caucho aumenta, esta imagen se mueve sobre la pantalla, y es fácil conocer la presión correspondiente a cada posición de ella por medio de la tara del instrumento, que se hace modificando el nivel del agua en la canoa.

Los dinamómetros que se instalaron fueron siete, pero sólo se hicieron observaciones en seis de ellos, porque el de más abajo quedaba tapado por la infraestructura en una de las series de observaciones: uno de ellos está instalado con su centro en la superficie del agua, situada a 70 centímetros sobre el fondo de la canoa, y los demás, a 10 y 20 centímetros encima del anterior, y los otros tres a 10,20 y 30 centímetros debajo de él. Los resortes que equilibran la presión del agua están formados por láminas de acero muy delgadas y su fuerza es diferente en todos ellos, pues las presiones que tienen que soportar son también muy diferentes y deben tener bastante flexibilidad; como no se pudo disponer sino de un espesor y un ancho de lámina de acero, la diferencia se obtuvo haciendo variar el número de láminas que los forman.

La tara de los dinamómetros se hacía partiendo del nivel de 60 centímetros sobre el fondo, y aumentando la altura del agua de 2 en 2 centímetros; se anotaba la posición correspondiente del punto luminoso en la pantalla, sobre una recta previamente graduada en centímetros. Esta tara se hacía para cada uno de los dinamómetros inmediatamente después de haber observado las desviaciones del rayo luminoso producido por las ondas reflejadas en la pared frontal de la canoa en cada uno de los tres casos que interesaba observar, a saber:

A) Sin infraestructura de enrocados, es decir que el paramento vertical llegaba hasta el fondo, situado a la hondura de 70 centímetros;

B) Con infraestructura de enrocados de poca altura, cuya plataforma superior se encontraba a 45 cm. de hondura y 25 cm. sobre el fondo.

C) Con infraestructura de enrocados de mucha importancia, sobre la cual la hondura era sólo de 30 cm.

La disposición que se adoptó para obtener fácilmente las diferentes condiciones de los tres casos A, B y C, y volver a A consiste en una especie de cajón de madera, de forma trapecial, cubierto con una delgada capa de piedras fijas con mortero que se colocaba en la forma que indica la fig. 5, en la cual H' es la hondura a que se encuentra la berma horizontal de los enrocados, que fué de 45 cm. o de 30 cm. En esa misma figura se indica la situación y la numeración de los diversos dinamómetros observados.

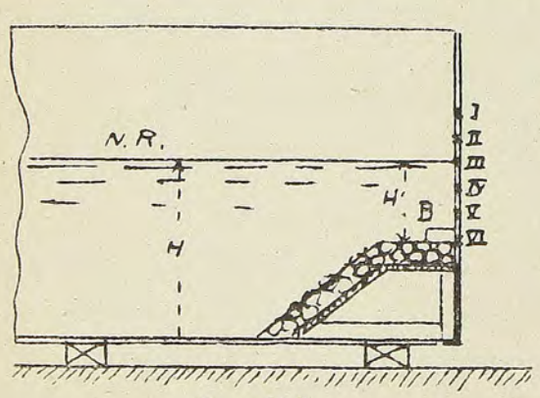

fig. 5

Las observaciones se hicieron para cada dinamómetro primero sin infraestructura, caso A, y después con el B y el C; como complemento se hicieron medidas de sobrepresiones, en el caso C, colocando un modelo de bloque de defensa del pie del muro, indicado en B en

la fig. 5. Después de hechas las observaciones se hacía la tara del dinamómetro empleado, de manera que se estuviera seguro de ella. Con el objeto de obtener la mayor precisión en las medidas hechas, el trabajo se dividió entre cuatro personas de la manera siguiente: una se hacía cargo de la producción de las ondas, otra observaba en una graduación convenientemente dispuesta el nivel más alto de la cresta de la onda y el más bajo de su seno, una tercera, anotaba el nivel más alto alcanzado por la onda junto al muro al reflejarse, y la cuarta se ocupaba de anotar las desviaciones del punto luminoso en la graduación de la pantalla. En la medida de estas desviaciones se aproximaban los milímetros, que en general correspondía a variaciones menores en la altura de agua correspondiente a la presión, lo que daba una sensibilidad más que suficiente. Al hacer las observaciones con cada dinamómetro se las repitió un gran número de veces en cada uno de los casos, y en cada uno de ellos se tomaron los promedios de tres olas en cuyas características las diferencias fueran prácticamente despreciables; los resultados de estas observaciones se consignan en el cuadro siguiente, en el cual las alturas de agua equivalentes a las presiones sobre los dinamómetros se expresan en centímetros:

Dinamómetros	CASOS		
	A	B	C
	Alturas de agua		
I	11	11	11,5
II	16	17	17
III	26	26	26
IV	23	23	24
V	22	22	23
VI	18	18	19

Si se comparan entre sí las cifras de las diferentes filas horizontales, se ve que, tanto entre las de los casos A y B como entre las de los casos B y C, hay cuatro dinamómetros en que esas cifras no varían y que en aquellas en que hay diferencia ésta no alcanza a 5%. En cambio, si se comparan las cifras de las columnas A y C, se observa que estas últimas son sistemáticamente mayores, salvo en el dinamómetro que corresponde al nivel de reposo NR, pero la diferencia, casi constante, apenas pasa de 5%, lo que muestra que la influencia de la infraestructura en el valor de las presiones es de bien poca importancia.

Si tomamos como escala del modelo la de 2,5 centímetros por metro, la que daría una distancia de 4 metros entre los centros de los dinamómetros, la altura de las ondas equivaldría a 7,30 metros y su largo a 250 metros, que corresponde bien a las características de grandes olas de bravezas de mar en nuestras costas, la profundidad total del agua equivaldría a 28 metros y las honduras sobre las bermas de enrocados serían de 18 metros en el caso B, y de 12 metros en el caso C, hondura esta última que no se haría menor en la práctica para olas de esa altura.

En la la fig. 6 se han representado gráficamente los resultados de las experiencias, a la escala indicada, considerando en los casos A y B sólo la parte del paramento situada encima de la profundidad de 12 metros, que es la única que nos interesa. En la figura se puede ver claramente que los casos A y B pueden, sin error apreciable, considerarse como iguales; en cambio se ve que en los casos extremos A y C las diferencias son sensibles; sin embargo, si se calculan las sumas de las sobrepresiones, que corresponden a los empujes soportados por el muro en ambos casos, se ve que en el caso A vale 169,2 toneladas por metro lineal, y 177,6 toneladas en el caso C, y que la diferencia entre ambos, 8,4 toneladas, corresponde, casi exactamente a 5% lo que no es gran cosa, y en todo caso relativamente menos que la incertidumbre en el valor de la altura de las olas que deben considerarse al hacer los cálculos.

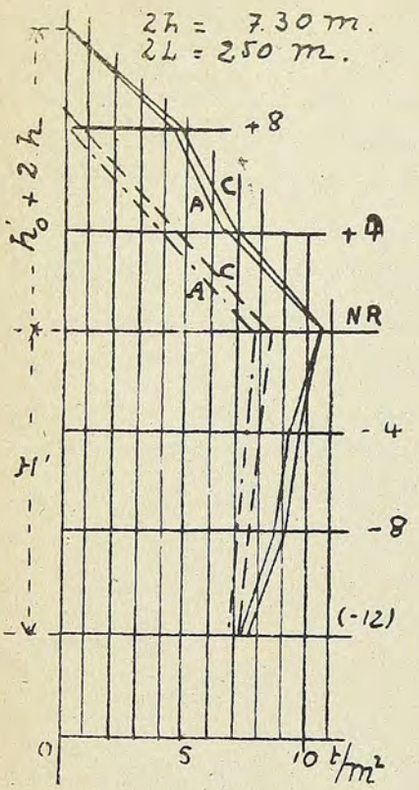

fig. 6

Si admitimos que el efecto relativo que producen una forma dada de infraestructura sobre las presiones que soporta el muro es el mismo, ya sea que se trate de olas o de ondas solitarias, para calcular esas presiones, o las sobrepresiones correspondientes, que son las que nos interesan, deberíamos tomar un valor de H que, para las condiciones del caso C nos diera un empuje 5% mayor que el que corresponde al caso A. En la misma figura 6 se han dibujado las líneas que representan las variaciones de las sobrepresiones, calculadas para olas por el método Sainflou, para los dos casos A y C, con valores de H de 28 m. y 12 m. Como se ve en esa figura, esas sobrepresiones, que concuerdan suficientemente con las verdaderas, según ya hemos dicho, son menores que las deducidas experimentalmente en caso de ondas solitarias, lo que corrobora las observaciones a que se refiere la figura 4.

Por otra parte, si se consideran sólo los resultados del cálculo, se ve que en el caso C las sobrepresiones son mayores que en el caso A y que la diferencia entre esos dos casos son mayores que las que se midieron en las experiencias hechas con ondas solitarias, lo que quiere decir, desde luego, que al calcular las sobrepresiones en el caso C, tomando como valor de H la hondura de la berma horizontal de los enrocados, se obtienen valores mayores que los verdaderos.

En el cuadro siguiente he copiado los valores de las cantidades $h_o' + 2h$, elevación de la superficie junto al muro y las sobrepresiones al nivel de reposo y a la hondura de 12 metros, que corresponde al límite de la infraestructura en el caso C, calculadas para valores de H iguales a: 28 metros (caso A), 20 metros, 18 metros (caso B) y 12 metros (caso C); y he agregado los valores del empuje E por metro lineal de muro, o sean las sumas de las sobrepresiones, expresadas en toneladas.

CASO CONSIDERADO	$h_o' + 2h$ m.	SOBREPRESIONES NR t/m²	SOBREPRESIONES —12 t/m²	E t.
Caso A..... H 28 m.	8,40	7,80	6,90	118,9
» B..... H 20 m.	8,75	8,10	7,10	126,6
» B..... H 18 m.	8,90	8,10	7,15	127,5
» C..... H 12 m.	9,80	8,50	7,20	135,8

Si comparamos los empujes sobre el muro que indica este cuadro para los casos A y C, vemos que la diferencia entre ellos, que vale 16,9 toneladas por metro lineal de muro representa casi el 10% del empuje menor, mientras que las experiencias hechas en el laboratorio nos indican que esa diferencia es sólo del orden de magnitud del 5%. Esto nos hace ver que la forma exterior de la infraestructura de enrocados no reduce en este caso el valor de la profundidad H que debe tomarse en cuenta al efectuar los cálculos a 12 metros, o sea a la profundidad de la base del muro, que daría presiones exageradas por exceso; por otra parte, no debe tampoco calcularse con la profundidad de 28 metros, al pie de la infraestructura, que daría presiones menores que las probables.

Si comparamos ahora los empujes que corresponden a los valores de H de 28 metros, caso A y 20 metros, término medio entre 28 y 12 m., vemos que la diferencia entre ellos es de 7,7 toneladas por metro lineal de muro, que equivale aproximadamente al 6,5% del empuje menor, diferencia superior sólo en 1,5% a la del empuje probable en el caso C. y que no puede ser tomada en cuenta.

Esta comparación entre los dos casos extremos nos permite, pues, recomendar como criterio para calcular las sobrepresiones en el muro la adopción en los cálculos de un valor de H para la profundidad ficticia de propagación de las olas igual al término medio entre las que hay al pie del muro y al pie de la infraestructura de enrocados, tal como se hizo al adoptar el valor de H igual a 17 metros en el caso del ejemplo numérico de más atrás.

Como complemento del estudio experimental que nos habíamos propuesto realizar se hicieron en los diferentes casos y con los diversos dinamómetros medidas de las sobrepresiones después de colocados los bloques de pie, y el resultado fué, como era de preverse, dada la poca importancia relativa de esos bloques, que no se pudo notar diferencia entre las sobrepresiones con el bloque y sin él. Esto es digno de ser tenido en cuenta, porque a veces se ha exagerado la influencia de esos bloques, y en realidad parece que no hay que preocuparse de ellos.

Para terminar con lo que se refiere al estudio experimental quiero llamar la atención hacia el hecho de que la hondura a que se encuentra la plataforma superior de la infraestructura de escollera, 12 metros a la escala del modelo, equivale a 1,65 de la altura de las olas, 7,30 m., razón que es casi el límite que se recomienda adoptar en la práctica: sería, sin embargo, interesante hacer una nueva serie de ex-

periencias con olas un poco más grandes, cuya altura fuera de unos 20 centímetros en el modelo, que correspondería a 8,00 metros a la misma escala, con lo cual se llegaría al límite de 1,50.

En realidad, después de terminada la serie de experiencias de que me he ocupado, se llevaron a cabo algunas con olas de 20,5 y 21,5 centímetros de altura en el modelo, y las desviaciones del rayo luminoso en el diafragma IV, que fué el único observado, fueron prácticamente las mismas en los casos A y C, lo que quiere decir que, con esas olas, la influencia de la forma de la infraestructura, dentro de los límites aconsejables en la práctica, no tendría importancia; pero, como estas experiencias fueron muy incompletas, no es prudente considerar los resultados de ellas como dignos de servir de base a ninguna conclusión, y considero prudente mantener el criterio indicado más arriba.