

## Rompeolas verticales

**L**a construcción de rompeolas de paramentos verticales se ha desarrollado mucho en los años corridos de este siglo, y ese desarrollo ha sido más marcado en los últimos quince de ellos. La razón de ser de ese desarrollo se encuentra en el hecho de que ese tipo de obra no exige conteneras de primera clase y hace posible muchas veces la construcción de las obras sin necesidad de ir a buscar los enrocados a grandes distancias, lo que los encarecería fuera de toda proporción. Por otra parte, el volumen de los rompeolas con paramentos verticales resulta mucho menor que el de los hechos principalmente con enrocados, y la demora en su construcción es de ordinario bastante menor, circunstancia que con mucha frecuencia tiene una importancia capital. Sin embargo, este tipo de obra presenta un inconveniente serio de principio, y es que exige el conocimiento de los esfuerzos a que va a encontrarse sometida la parte principal de la obra, a fin de poder asignarle dimensiones que no sean demasiado fuertes, pues el costo unitario del material que las forma es considerable, ni tampoco demasiado débiles, porque la reparación de los daños que produciría un accidente sería difícil y costosa.

El problema que se ha presentado en ese sentido a los ingenieros es de los más

complicados, porque no sólo no se ha llegado aún a determinar de una manera segura las presiones y las sub-presiones que son capaces de producir las olas, cuando se conocen sus características, sino que apenas se tiene una vaga idea de esas características mismas. En la mayor parte de las aplicaciones del tipo de obra que nos ocupa se han determinado sus dimensiones por comparación con otras y sin conocer bien las circunstancias en que se encuentran las obras comparadas.

El estudio teórico de este problema había sido hasta hace poco apenas abordado por los ingenieros, en vista de su complejidad; y el cálculo de las obras se hacía por métodos empíricos y sin base suficiente, que eran aplicados, a falta de otro, con criterios bastante diversos. Entre esos métodos se pueden señalar los derivados de las consideraciones relativas a la presión ejercida por las olas, contenidas en un estudio hecho por el señor Gaillard, en Estados Unidos; uno de esos métodos fué adoptado en 1910 y 1912 por la Comisión de Puertos para calcular las dimensiones de los molos de Valparaíso y Antofagasta; otro análogo pero con diferente criterio, en lo relativo principalmente a las sub-presiones, había sido aplicado por el señor Kraus en su proyecto de obras para Valparaíso.

Posteriormente, el señor Benezit, en

Francia, y el infrascrito, animados del mismo deseo de buscar soluciones que tuvieran relación más científica con los datos del problema, propusimos métodos de cálculo basados en el movimiento orbitario de las moléculas líquidas, pero introduciendo simplificaciones, que hicieran fácilmente abordable el problema, aunque se alejaran de los puntos teóricos de partida. Finalmente, el ingeniero francés, señor Sainflou, partiendo de la teoría del movimiento orbitario, desarrollada por Barré de Saint Venant en 1883, estableció una teoría completa de la acción de las olas contra los obstáculos verticales, estudiando en sus detalles el movimiento que ha recibido en francés el nombre de *clapotis*, que no tiene traducción a otro idioma y que es la interferencia de las ondas directas con las reflejadas por el obstáculo vertical Remito a los lectores al número IV de 1928 de los «Annales des Ponts et Chaussées», para el caso en que deseen conocer en sus detalles el desarrollo de la teoría, y al número del «Génie Civil» de 26 de Enero de 1929, para los que deseen sólo estudiar la manera de aplicarla.

La teoría desarrollada por el señor Sainflou tiene la misma base que el método de cálculo propuesto por mí dos años antes; pero no hace ninguna simplificación y no tiene por consiguiente nada de arbitrario, lo que lo hace naturalmente preferible. Además, su aplicación conduce casi siempre a resultados más desfavorables, es decir, que el coeficiente de seguridad será siempre mayor, lo que también aconsejaría darle la preferencia. Por último, su aplicación es muy sencilla y sólo exige construcciones gráficas y cálculos que no presentan ninguna dificultad.

En realidad, a mi juicio, con el estudio del señor Sainflou se ha dado un gran paso en el sentido de la solución del

problema que me ocupa y sólo queda la incertidumbre relativa a los datos que deben tomarse como punto de partida en cada caso y a la comprobación experimental de los resultados de la teoría.

Entre los temas que se trataron en el Congreso Internacional de Navegación de 1926, se comprendió el de las obras de abrigo de los puertos, y naturalmente se vió bien claramente el desarrollo que ha alcanzado la construcción de los rompeolas de paramentos verticales y la necesidad de establecer normas bien fundadas para el cálculo de sus dimensiones. Como consecuencia de esa necesidad el Congreso designó un comité, que quedó formado por cinco ingenieros, entre los cuales tuvo el honor de quedar incluido el infrascrito, que debía presentar al XV Congreso un informe sobre la medida de los esfuerzos ejercidos por las olas y su cálculo. El XV Congreso tuvo lugar en Venecia, en Septiembre de 1931, y el comité no alcanzó a presentar un informe sobre el tema que se le encomendó, a pesar de que se ha trabajado sin cesar y de que ya se tienen algunos resultados muy interesantes de experiencias realizadas en Francia, España e Italia.

Mientras tanto se han producido algunos accidentes serios en varias de las obras construídas con paramentos verticales, y de ellos pueden sacarse deducciones de mucha importancia, que permiten avanzar, tanto en el sentido de la comprobación del método de cálculo deducido por Sainflou, como en el de la magnitud de las presiones y subpresiones producidas por las olas. El estudio de esos accidentes es el objeto del presente artículo.

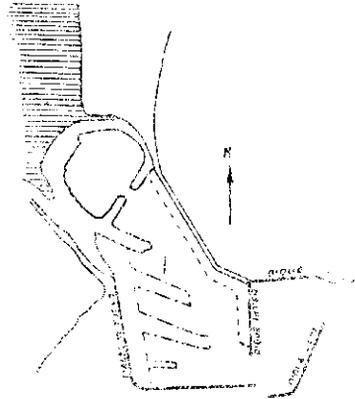
\* \* \*

Los accidentes a que se ha hecho referencia son cuatro: uno que en Diciem-

bre de 1926 produjo la destrucción de los 174 metros que se habían construido en el molo Este del Puerto de Valencia; dos accidentes ocurridos en Antofagasta, uno en 1928 y el otro en 1929, el último de los cuales destruyó la parte superior del molo en una longitud de 700 m., y el cuarto, que se produjo en Catania en 1930, y que afectó a toda la parte construida del molo con paramentos verticales en una longitud de más de 700 metros. Analizaremos detalladamente cada uno de estos accidentes, procurando deducir de ellos las enseñanzas que resulten, y ver hasta qué punto pueden comprobar los resultados de la teoría a que nos hemos referido.

En la fig. 1 puede verse el plano general del puerto de Valencia, y en él la ubicación de la obra que fué destruída. En la fig. 2 se indica el perfil transversal de

esa obra, derivado del que se estaba construyendo en Génova, que lleva el nombre de Víctor Manuel III.



PUERTO DE VALENCIA

figura 1

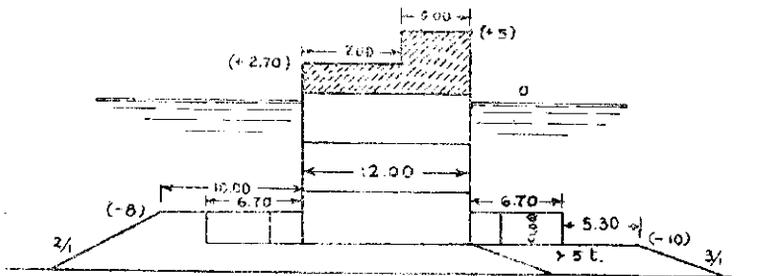


figura 2

El dique se componía de una infraestructura de enrocados, limitada a la cota (-10,00) por una plataforma horizontal, que servía de asiento al muro vertical. Este estaba formado por la superposición de tres capas de bloques huecos de 12,00 m. de largo, 6,00 m. de ancho y 4,50 m. de altura, que pesan 220 toneladas, y que se colocaban de modo que cada tres de ellos, después de rellenos de concreto, formaban monolitos de 12×6×10,50 m., cuyo peso total era de una:

1740 toneladas, que se reducía a cerca de 1,000 toneladas, por efecto de la subpresión. Una capa de concreto en sitio, de 2,20 m. de espesor y un parapeto del mismo material, de 2,50 m. de alto por 5,00 de espesor, debían formar la superestructura aparente encima del nivel del mar, que alcanzaba hasta la cota (+5,00).

La plataforma de asiento había sido protegida al lado exterior por una capa de bloques de concreto de 4,60×2,10×2,00, de 45 t. de peso aproximado; por

el lado interior la defensa era análoga, pero la infraestructura de enrocados se había hecho subir hasta el nivel superior de estos bloques.

Durante la construcción de estas obras, en circunstancias que se encontraba muy avanzado el dique Norte y en que en el dique Este sólo faltaba la superestructura de concreto en sitio y el parapeto, una violenta tempestad que azotó de frente a este último dique, con olas cuya altura alcanzó a 7 metros, produjo socavaciones enormes delante y detrás de la obra, las que causaron el derrumbe de ella, tumbándose las masas monolíticas hacia adelante o hacia atrás.

Si aplicamos el método de cálculo de Sainflou con la altura de ola de 7 metros y la profundidad de 12 metros, que es más o menos la que había en el sitio de ubicación del dique Este, tomando 150 metros como largo de las olas, cifra que no ha de distar mucho de la verdadera, de la cual no conozco observaciones, se llega a deducir un período de 14 segundos para las olas y una velocidad máxima en el fondo de 5,85 metros por segundo, que se produciría a una distan-

cia de 38 metros del frente del muro vertical.

Al producirse la tempestad la superestructura no estaba hecha, según hemos visto, de manera que el fenómeno de reflexión de las olas no se ha producido probablemente en toda su intensidad; es posible por eso que la velocidad en el fondo, cerca de la obra misma, no haya alcanzado a cerca de 6 metros por segundo, pero puede haber sido de 5 metros, lo que ya es enorme para un fondo formado por arena fina y fango. El cálculo explicaría, pues, perfectamente el accidente sufrido por esta obra, en lo que se refiere a las socavaciones producidas delante de ella. En cuanto a las socavaciones producidas detrás, no pueden ser sometidas a cálculo, pero se explican por las grandes cantidades de agua que han pasado por encima del dique, animadas por velocidades enormes. El dique Norte, que fué atacado longitudinalmente, no sufrió desperfectos que puedan tomarse en cuenta.

La reconstrucción del dique Este se llevó a cabo, con muy buen acuerdo, según el tipo de obra representado en la figura 3, que no pertenece al grupo de

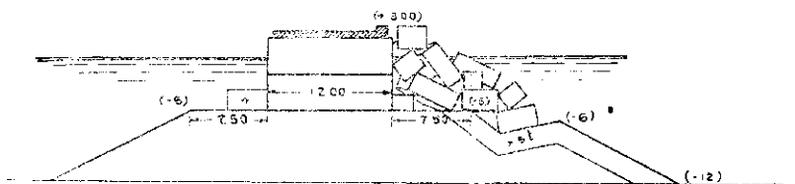


Figura 3

que nos ocupamos y que corresponde perfectamente a las circunstancias en que se lo ha aplicado.

En el Puerto de Antofagasta, cuyo plano general puede verse en la fig. 4, se produjeron según indicamos más atrás, dos accidentes de consecuencias graves: Uno en 1928 y el otro en 1929.

El Molo de abrigo de este Puerto se construyó en su parte principal según el tipo representado en la figura 5. Se compone de una infraestructura de enrocados, limitada superiormente a la cota (-9,25) en una plataforma de 23 metros de ancho, sobre la cual se construyó un muro de bloques artificiales de concreto, de

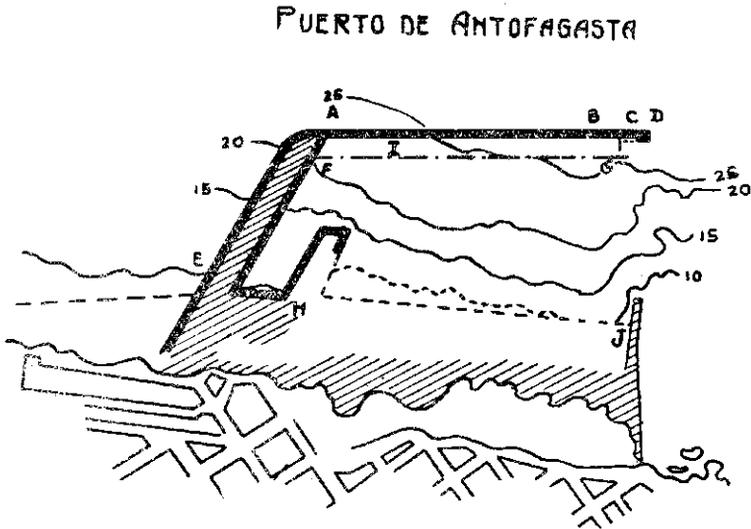


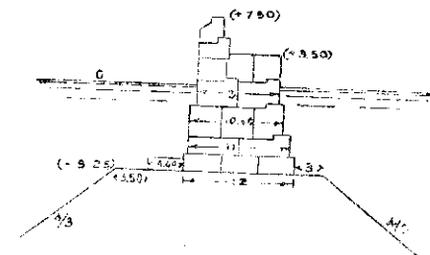
Figura 4

60 toneladas de peso unitario, que alcanzaba hasta la cota (+3,50), y que tenía por el lado exterior un parapeto, hecho igualmente de bloques del mismo peso, limitado a la cota (+7,50). La parte correspondiente al extremo Norte de este Molo, en una longitud de 20 metros, se reforzó considerablemente, aumentando a 16 metros el espesor del muro en su base

y a 13 metros en su parte superior, como se indica en la figura 6.

Esta obra fué terminada en 1926. Tanto durante su construcción como después de su recepción, soportó sin inconveniente varios temporales, algunos de violencia superior a los que se habían tenido en vista al proyectar la obra, que consideraba olas de seis metros de altura y 90 metros de largo.

El 10 de Julio de 1928, al fin de un temporal de considerable violencia, tres olas sucesivas de 9 metros de altura, 250 metros de largo y 15 segundos de período, según los datos suministrados por las Autoridades del Puerto, abrieron una brecha de 56 metros de largo en la parte extrema del Molo, brecha que alcanzó a la parte reforzada, sin causarle perjuicio. El daño sufrido por el Molo se limitó a la caída de las capas de bloques superiores; entre las dos capas inferiores no había ningún saliente que se opusiera al deslizamiento, y por ese motivo los bloques de la capa inferior no se movieron,



Costa (-23)  
Fig. 5

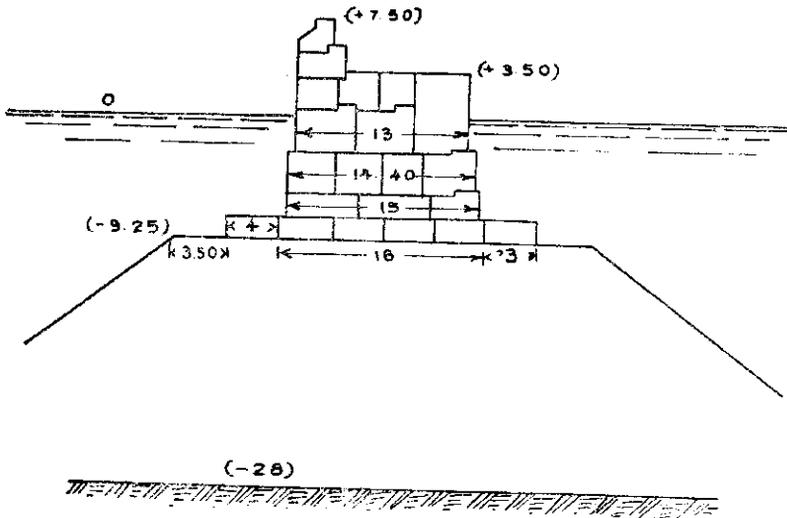


Fig. 6

salvo los de la parte interior, que arras-  
trados por el frotamiento de los situados  
encima de ellos, deslizaron sobre los en-  
rocados, formando en planta una curva  
cuya flecha alcanzó hasta unos 0,50 m.  
En la figura 7 se ve una elevación y una

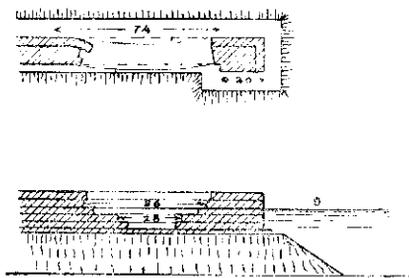


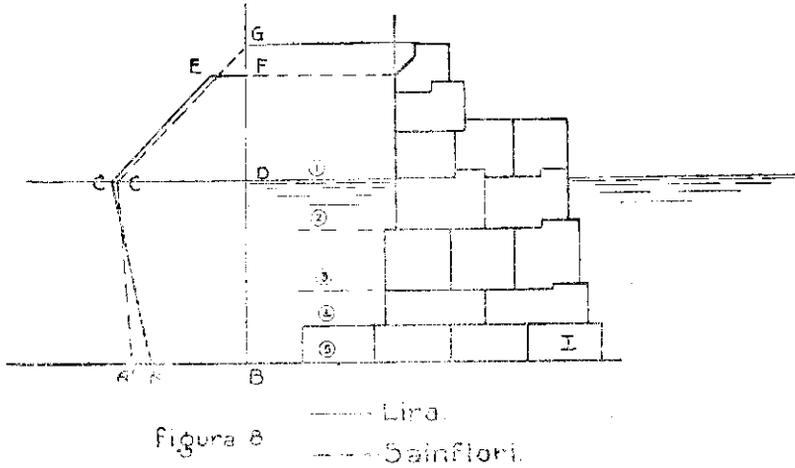
Figura 7

planta aproximadas de la brecha en  
cuestión.

Es fácil explicarse un accidente de esta  
naturaleza, desde el momento en que las  
olas cuyas características se han anotado

más arriba, fueron de una violencia muy  
superior a las que se habían tenido en  
vista al proyectar la obra, a las cuales  
se atribuyó, como he indicado más atrás,  
una altura de 6 metros, un largo de 90  
metros y un período de 8 segundos apro-  
ximadamente; pero lo que más nos inte-  
resa por el momento es ver si el cálculo  
es capaz de explicarnos las dos cosas  
constatadas como consecuencia de este  
accidente: que una parte del molo, si-  
tuada cerca de su extremo no resistiera  
y que el extremo mismo, que era más  
robusto permaneciera indemne.

En el Génie Civil, número de 24 de  
Noviembre de 1928, publiqué un estudio  
sobre este accidente, del cual reproduzco  
los resultados numéricos, que se refieren  
a la figura 8. Esos resultados fueron  
debidos a la aplicación del método de  
cálculo propuesto por mí al Congreso  
de Navegación de 1926, y de ellos se de-  
duce que la parte que falló debió fallar  
y la que resistió debió resistir.



Nivel	Empuje	Tipo fig. 5			Tipo fig. 6		
		P.	0,6 P.	0,54 P.	P.	0,6 P.	0,54 P.
	ton.	ton.					
1	24,9	26.—	15,6	14.—	.....	.....	.....
2	42,3	57,7	34,5	31,3	64,1	38,5	34,4
3	62,8	111.—	66,6	60,0	145.—	87,3	78,5
4	73,4	126.—	75,8	68.—	189,4	113,6	102,0
5	83,8	147.—	86,2	.....	233,0	139,8	.....

Las cifras contenidas en este cuadro tienen los significados siguientes: las de la primera columna se refieren al número del plano correspondiente a cada juntura horizontal en la figura 8; las de la segunda indican el empuje, en toneladas, soportado por la porción del molo situada encima de cada nivel; las dos columnas P corresponden al peso, en toneladas, de la parte situada sobre cada nivel, descontada la pérdida de peso por sub-presión; las columnas 0,6 P y 0,54 P representan la resistencia límite al deslizamiento, to-

mando los coeficientes de frotamiento 0,6 y 0,54, el primero de los cuales es el que se emplea ordinariamente y el segundo fué determinado experimentalmente con los bloques de Antofagasta, entre sí.

Examinando las cifras relativas al tipo de obra en que se produjo la brecha, en la columna 0,54 P se ve que el esfuerzo resistente al deslizamiento fué menor que el empuje hasta el nivel 4, y en la columna 0,6 P se ve que el esfuerzo resistente al nivel 5 fué muy ligeramente su-

perior al empuje correspondiente. A este último nivel he considerado el coeficiente 0,6, porque los bloques descansan sobre los enrocados. Ahora bien, estos resultados numéricos concuerdan con los hechos, porque el deslizamiento de los bloques se produjo hasta el nivel 4, y apenas se movieron los bloques 1 al nivel 5.

El examen de las cifras correspondientes al tipo de obra que se empleó en el extremo mismo (fig. 6) acusa una resistencia suficiente, que también concuerda con los hechos.

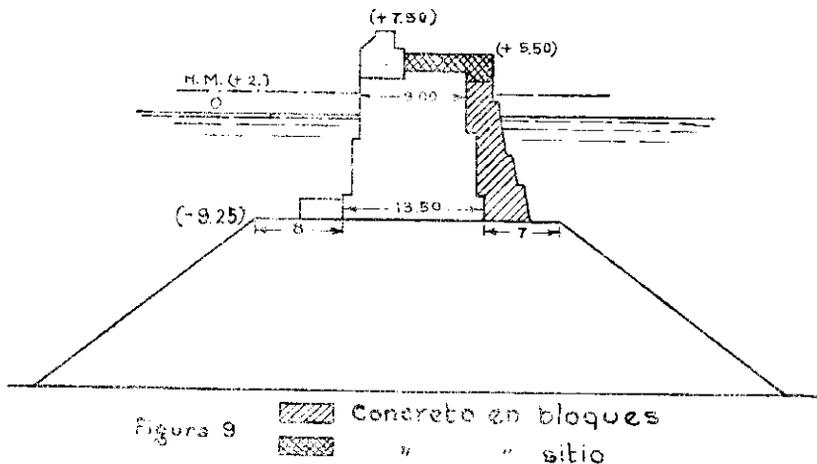
En el «Cenit Civil», número 26 de Enero 1929, el señor Sainfiou hizo una exposición resumida de su teoría y método de cálculo, a la cual ya he hecho referencia, y, aplicándolos a olas de 6.60 m. de altura, llega a una repartición de presiones casi idéntica a la encontrada por mi método con las olas de 9 m. de altura. En la parte izquierda de la fig. 8 se han dibujado las dos leyes de distribución de las presiones, con línea llena en ACEFDB la mía, y con línea de segmentos A'C/GDB la del señor Sainfiou. Los resultados del cálculo son casi idénticos, según ambos métodos, pero como los del señor Sainfiou son hechos considerando olas de menor importancia, es indudable que se debe dar la preferencia a su manera de considerar la cuestión, que es mucho más pesimista. Por lo demás, ambos métodos parten de la misma teoría del movimiento trocoidal, como he dicho más atrás, pero yo he introducido hipótesis simplificadoras que me facilitaron la solución del problema, simplificaciones que conducen a resultados inaceptables cuando los datos del problema salen de los valores ordinarios; en cambio, el método del señor Sainfiou conduce a resultados aceptables siempre.

Pero, respecto al accidente que me ocupa, hay una observación que hacer, que es muy interesante. El señor Sainfiou

consideró olas de 6.60 m., porque eran las más grandes que, según su teoría, podían atacar ese molo sin que alcanzaran a sobrepasar su parapeto, y esas olas resultarían suficientes para producir el accidente. En realidad, las olas pasaron por encima del molo *en la parte que se rompió*; pero, a mi juicio, no porque su altura fuera mayor, sino porque venían desde el SO y su elevación iba acentuándose al llegar al molo a medida que se acercaban a su extremo, de manera que, en realidad, las olas no tenían los 9 m. de altura que les atribuyeron en Antofagasta, y sólo se levantaron hasta esa altura al llegar al extremo del molo, en la parte en que causaron el perjuicio de que hemos tratado.

En vista de que las olas que causaron este accidente eran mucho más fuertes que las previstas, y de que la parte extrema del molo había resistido perfectamente a su acción, se acordó reconstruir la parte dañada, según el mismo tipo, pero dándole una resistencia equivalente a la del extremo de la obra. Como era necesario empalmar la parte reparada con la que no había sufrido, no se podía modificar ni el tamaño ni la disposición de los bloques; y para que el agregado que se hiciera formara un solo cuerpo con el resto del muro, se dispuso el refuerzo, agregando los bloques hachurados en la fig. 9 y elevando el muro por medio de una capa de concreto en sitio de 2 m. de espesor. Esta última capa debía desempeñar un papel muy importante, no sólo porque aumentaba considerablemente el peso sin aumentar la subpresión, sino porque permitía tener elementos monolíticos de unas 200 toneladas de peso, que cubrirían y protegerían a los bloques del muro contra los golpes del mar.

La reparación de la brecha quedó terminada en Abril de 1929, y como no era

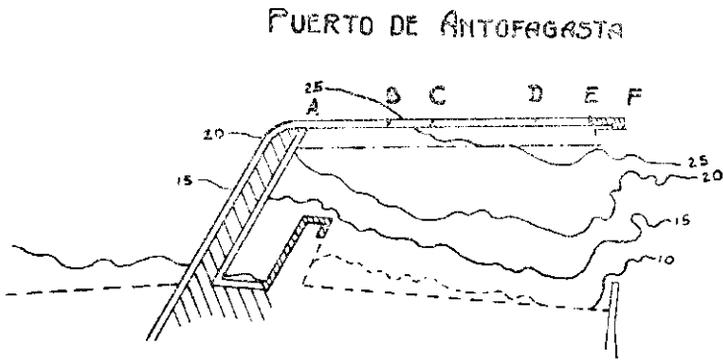


posible colocar inmediatamente la capa de concreto en sitio por consideraciones derivadas del asentamiento del muro, se la reemplazó por una capa de bloques artificiales, cuyo peso era en realidad algo superior al del concreto que se iba a poner después.

Se encontraba la obra en estas condiciones, cuando, el 9 de Agosto de 1929, durante un temporal de mediana intensidad, sobrevinieron varias olas extraordinariamente largas, cuyo origen se ha atribuido a algún fenómeno sísmico, que cubrieron por completo el molo en toda su longitud y arrastraron la parte superior del muro en casi toda la extensión del brazo Norte-Sur. De la misma manera que en el accidente anterior, se produjo el deslizamiento sobre la capa inferior; pero esta vez el efecto de las olas fué irresistible, y tanto la parte recién reconstruída y reforzada, como el extremo del molo, que había resistido perfectamente, cuando ocurrió el accidente de 1928, resultaron deficientes: en parte fueron arrastrados los bloques que las formaban y en parte giró la obra entera, sin afectar a los enrocados de la infraestructura y sin experimentar dislocación.

En el caso de este accidente, así como en el que se produjo en 1928, no se hicieron observaciones que permitieran deducir la altura y el largo de las olas; solamente se vió que, antes de producirse las grandes olas, el nivel del mar bajó en la parte abrigada del puerto en una forma inusitada, alcanzando a un nivel 1.30 m. más bajo que la más baja marea, y se elevó después rápidamente, dando lugar a dos o tres enormes olas, que abrieron una brecha de unos 100 metros de ancho en el molo, a 200 metros del fin de la curva, (fig. 10).

Cerca de dos horas después, en la media noche, se produjo un nuevo descenso extraordinario del mar, seguido de una rápida elevación, que en el interior del puerto alcanzó a 2 m. más arriba de la más alta marea, y entonces otras olas extraordinariamente grandes, cubriendo enteramente el molo, abrieron una segunda brecha de unos 100 m. de ancho, a 300 m. de la anterior; luego después, bajo el efecto de otras olas de la misma clase, cayó toda la parte visible del molo comprendido entre el fin de la curva y el extremo, salvo el extremo mismo y una parte del frozo reconstruído después



- BC - Primera brecha
- DE - Segunda "
- AB - CD - Tercera caída
- EF - Trozo aislado que quedó en pie.

Figura 10

del accidente de 1928, Hasta las 11 A. M. del día siguiente, de cuando en cuando se veían olas extraordinarias, que cubrían enteramente el trozo aislado que había quedado en el extremo del molo, haciendo caer algunos de los bloques que lo formaban y derrumbando la parte

término, probablemente por socavación de los enrocados. Hasta ahora no ha sido posible reconocer la efectividad de esta suposición, porque los bloques amontonados no permiten hacer un reconocimiento de la infraestructura. Las observaciones hechas desde que pasó el tempo-

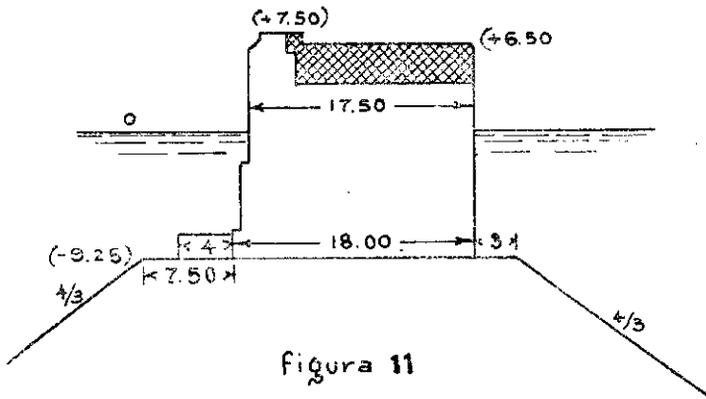


Figura 11

ral y los trabajos de reconstrucción han permitido constatar que la caída de los bloques no fué regular en toda la extensión dañada del molo: en algunas partes alcanzaron a deslizar los bloques de la capa inferior y en otras sólo cayeron los de las capas superiores.

Es interesante aplicar los métodos de cálculo de las presiones ejercidas por las olas al accidente de que me ocupo, porque de esta aplicación pueden deducirse observaciones muy útiles. Como hemos dicho anteriormente, no pudieron hacerse medidas de las características de las olas: sólo puede asegurarse que han alcanzado la cota (+9,50), pasando por encima del parapeto en lmina llena, cuyo espesor se ha estimado en 2 metros, y que entre una y otra de las grandes olas mediaban aproximadamente 4 minutos. A este período corresponde una longitud de ola de 1,800 m., longitud extraordinaria, que no se observa en olas producidas por el viento. Con estas características se explicaría que las olas hubieran alcanzado a elevarse hasta la cota (+10) al chocar con el molo, lo que concuerda bastante bien con lo observado y autoriza a aceptarlas.

Si se aplica a este caso el método de cálculo propuesto por mí, se llega a la

distribución de presiones contra el muro que indica la línea ABEF, fig. 12, cuya resultante hasta el nivel (5) vale 104 to-

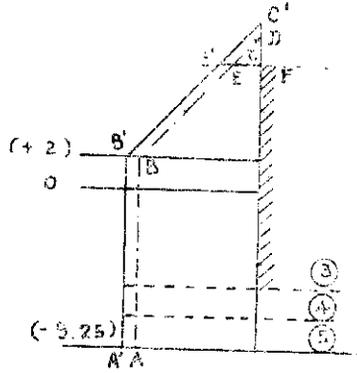


figura 12

neladas por metro lineal; y aplicando el método del señor Sainou, se llega a la distribución A'B'E'F' de la misma figura, cuya resultante vale 118 toneladas.

En el cuadro siguiente se indican las cifras correspondientes a los empujes y a los esfuerzos de frotamiento, f. P., calculados suponiendo que las subpresiones obren con toda su intensidad en la base de asiento del muro sobre los encoados; y tomando el valor 0,6 para el coeficiente de frotamiento de los bloques sobre las piedras de la base.

Nivel	Empuje Q		Valores de R = f. P					
			Tipo fig. 5		Tipo fig. 9		Tipo fig. 11	
	Lira	Sainflou	Lira	Sainflou	Lira	Sainflou	Lira	Sainflou
3	77	88	.....	.....	.....	.....	.....	.....
4	90	103	.....	.....	.....	.....	.....	.....
5	104	118	33	23	129	115	195	188

En este cuadro puede verse que el esfuerzo resistente al deslizamiento en el tipo de molo representado en la fig. 5, que fué el que se construyó, es mucho menor que el empuje solicitante, ya sea que se aplique el método de cálculo del señor Sainflou o el mío; de manera que en este caso tanto un método como el otro conducen a resultados que están de acuerdo con los hechos; pero no sucede lo mismo si se trata del tipo representado en la fig. 9.

En efecto, si se calcula la sollicitación que resultó para esta parte de la obra, aplicando el método de cálculo mío, se llega a un empuje solicitante de 104 toneladas por metro corrido y un esfuerzo resistente de 129, cifras según las cuales la obra debió haber resistido, aunque con un pequeño margen de seguridad; si se

aplica en cambio el método del señor Sainflou, se llega a un empuje de 118 toneladas y un esfuerzo resistente de 115 toneladas, cifras según las cuales la obra debió ceder, pero estando muy cerca del equilibrio. El resultado del accidente fué que esta parte de la obra fué movida por las olas, haciéndola deslizar sobre la infraestructura de enrocados, con un desplazamiento máximo de 1,20 m. aproximadamente, pero sin que se desorganizara el arrimo de los bloques, lo que indica que el esfuerzo solicitante fué poco superior al resistente; de manera que los hechos han venido a justificar el método de cálculo del señor Sainflou.

En las últimas columnas se indican los esfuerzos resistentes del tipo de reconstrucción adoptado en 1929, que está en construcción actualmente.

(Continuará).