

# DIQUES DE ABRIGO.-ROMPEOLAS <sup>1</sup>

## IV

En anteriores artículos se han expuesto los procedimientos para el cálculo de los esfuerzos de las olas y su acción sobre los diques de paramento vertical, propuestos por Gaillard, Benezit y Lira, y en el artículo presente nos proponemos hacer una comparación de los resultados obtenidos, haciendo aplicación de esos métodos de Gaillard y Lira en un dique, tomando varias características de olas, para poder deducir en qué casos y con cuáles características parece más conveniente la aplicación de uno u otro método.

En este análisis comparativo, en que he sido eficazmente auxiliado por los alumnos de Puertos y en especial por los Sres. García Augustin y Núñez Fagoaga, se han hecho aplicaciones a los diques de Bilbao (parte construida y en construcción), del Musel y de Valencia; pero, prescindiendo de estos casos más particulares, se han considerado las siguientes bases características para nuestro análisis.

Se ha supuesto una profundidad (*H*) de 14 metros, alturas de ola (*h*) que varían de 4 a 14 metros y periodos (*T*) desde 7 a 12 segundos, y aunque se hacen en algún caso consideraciones que varíen esta relación, se ha supuesto una longitud de ola, *L*, de 15 veces la altura, *h*.

Este artículo se puede considerar dividido en tres partes: la primera, dedicada a comparar los resultados, teniendo solamente en cuenta la presión *estática* (única que, como se indicó, considera Benezit), naturalmente derivada de la altura que alcance la cresta de la ola; la segunda, al esfuerzo o la acción *dinámica*, especificada exclusivamente por Lira, y la tercera, a la comparación de la presión *máxima total*, según Gaillard y Lira, y a hacer algunas consideraciones sobre el resultado que en la estabilidad de la obra puede producir la distribución de presiones por ambos sistemas.

Además de exponer los resultados numéricos, se ha procurado traducir éstos en gráficos, de los cuales más fácilmente se obtienen las consecuencias.

### Primera parte.—Comparación de las presiones estáticas.

En la figura 1.<sup>a</sup> se representan como ordenadas las alturas a que llega la cresta de la ola sobre el nivel de *tranquilidad* o *reposo* que se toma como eje de abscisas, siendo éstas las diversas alturas de ola. Las ordenadas negativas son las profundidades, con relación a ese nivel, a que se encuentra la depresión de la ola.

La línea de trazo y punto representa la variación de alturas de crestas, según la fórmula dada por Gaillard,

$$A_g = \frac{h}{2} + c \frac{h^2}{L}$$

deducida de sus experiencias, y suponiendo el valor del coeficiente *c*=2. Es una recta, así como la línea de las depresiones, deducida restando de las ordenadas de aquella las alturas de ola.

Se observa que a medida que esa altura de ola va aumentando va elevándose más la cresta, absoluta y relativamente, sobre el nivel de reposo, y, por el contrario, se disminuye la distancia relativa de ese nivel a la depresión, y así debe efectivamente verificarse, acentuán-

dose más esa relativa variación a medida que aumenta la altura de la ola.

Las líneas llenas de esa figura 1.<sup>a</sup> representan, una, la superior, las alturas adonde llega la cresta de la ola, según la fórmula.

$$A_L = \frac{h}{2} + \frac{\pi k^2}{4} \cdot \frac{h^2}{L}$$

propuesta por Lira, que es una línea parabólica, porque, como se vió, *k* es función de la profundidad relativa, que,

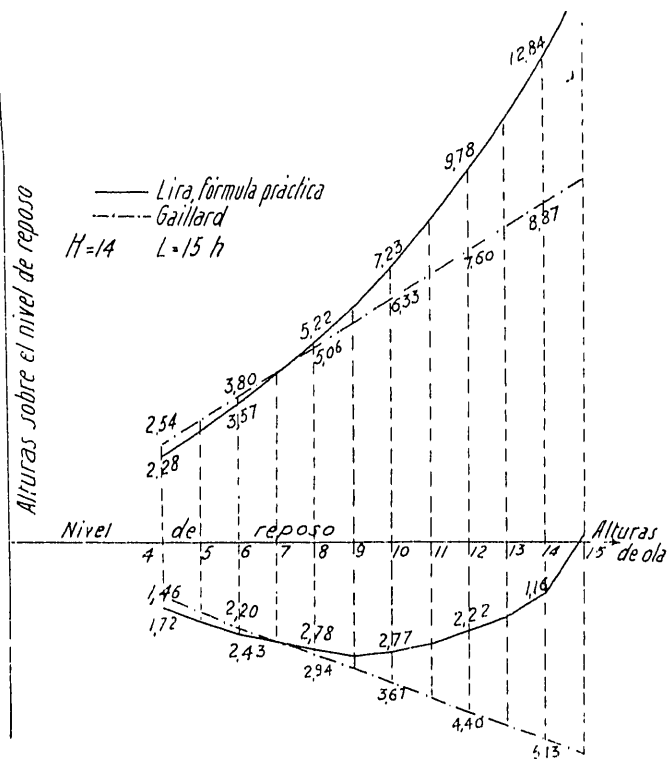


Figura 1.<sup>a</sup>

al considerar en este análisis *H* como constante, queda función de *L* también relacionada con *h*.

En la otra línea llena o curva de las depresiones se ve que su alejamiento relativo con respecto al nivel de tranquilidad también disminuye, casi como el caso de las líneas de Gaillard, hasta la ola de 9 metros; pero de allí en adelante disminuye con mucha mayor velocidad, llegando a confundirse con el nivel de tranquilidad y aun a superarlo en la ola de 14 a 15 metros. Esto es así, porque en ese límite la curva trocoide de la superficie de la ola se transforma en cicloide, y toda la onda queda sobre ese nivel de reposo, característica de la onda de traslación, y llega el caso de rompimiento de la ola al ser la altura de ésta igual a la profundidad.

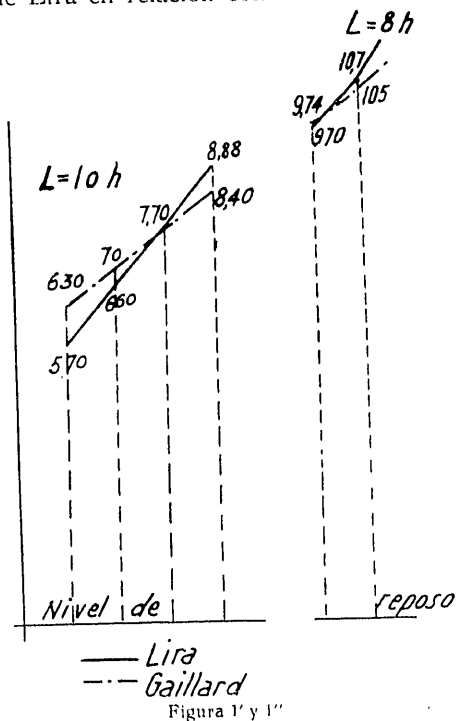
Del examen comparativo de estos dos gráficos (Gaillard y Lira) se deduce que, tratándose de alturas de ola hasta 9 ó 10 metros, el resultado no varía mucho tomando cualquiera de estas dos fórmulas, y, asimismo, se ve, comparando las curvas de momentos solicitantes consecuentes de esos esfuerzos estáticos, tanto en el caso de tomar la ley triangular de repartición que da la figura 2.<sup>a</sup>, como en la rectangular de la figura 2.<sup>a</sup>.

Las alturas a que alcanza la cresta de la ola son menores en la curva de Lira que en la de Gaillard, hasta la ola de 7 metros, y en los momentos solicitantes ocurre

<sup>1</sup> Ver REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS, números 1.<sup>o</sup> y 15 febrero y 1.<sup>o</sup> abril de este año, páginas 38, 63 y 120.

lo mismo hasta la ola de 9 metros en repartición triangular y hasta la de 7 en la rectangular.

Pasados estos límites, se observa que el nivel superior a que alcanza la ola aumenta muy rápidamente con la fórmula de Lira en relación con la de Gaillard, llegan-



te de 15 a 10 para olas de 9 a 12 metros, y se ve que así casi coinciden las dos fórmulas (fig. 1.ª), y también coinciden si se supone ese coeficiente de 8 en olas de 13 y 14 metros (fig. 1.ª').

En resumen, que los esfuerzos estáticos, siguiendo las fórmulas de Gaillard y Lira, coinciden sensiblemente en profundidad de 14 metros si se trata de olas hasta de 9 metros de altura con longitud 15 veces mayor que la altura, y con olas comprendidas entre 9 y 12 metros y longitud diez mayor, y con olas de 12 a 15 metros, siendo su longitud 8 veces esa altura.

Segunda parte.—Esfuerzos dinámicos.

Siguiendo el método Lira, se han calculado las presiones dinámicas máximas, o sea las de la superficie, según su fórmula

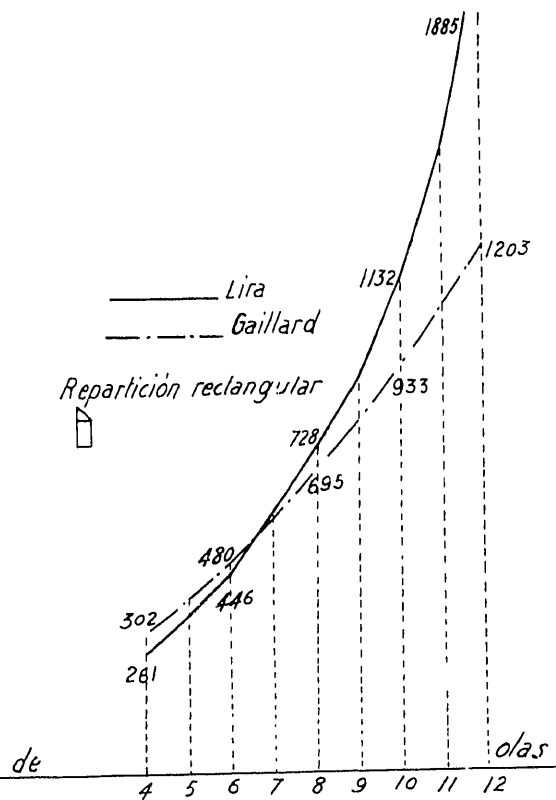
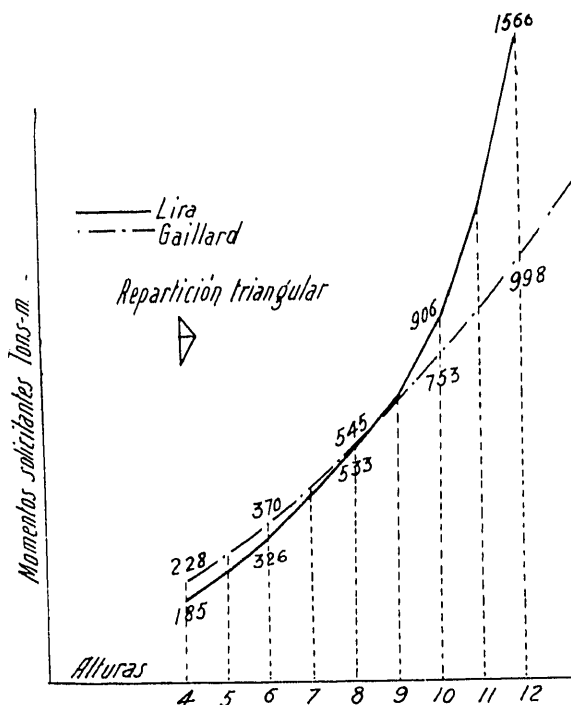
$$P = 200v^2 = 200 \left( \frac{2\pi kb_s}{T} \right)^2$$

y considerando distintas alturas de olas con longitud 15 veces mayor y distintos periodos y siempre con la profundidad de 14 metros indicada, se han obtenido las cifras en toneladas por metro cuadrado, insertas en el siguiente cuadro:

Alturas de ola (metros)	T PERÍODOS (segundos)						
	7 <sup>s</sup>	8 <sup>s</sup>	9 <sup>s</sup>	10 <sup>s</sup>	11 <sup>s</sup>	12 <sup>s</sup>	13 <sup>s</sup>
14	58,4	44,4	34,8	28,6	23,7	19,8	16,4
12	33,8	26,0	20,4	16,6	13,7	11,5	9,8
10	17,8	13,6	10,7	8,7	7,2	6,0	5,0
8	6,5	5,0	3,9	3,2	2,6	2,2	1,9
6	2,4	1,9	1,48	1,2	1,0	0,84	0,72
4	0,8	0,6	0,48	0,4	0,33	0,27	0,23

do a ser mucho mayores los esfuerzos con la primera cuando se pasa de la ola de 11 metros y dando resultados que difieren cada vez más pasando ese límite.

Se ha de hacer notar que se ha supuesto una longitud de ola de 15 veces su altura; pero aunque así, efectivamente, suceda hasta ciertas alturas, esa relación va siendo menor a medida que éstas aumenten; así resulta de



Figuras 2 y 2'

las observaciones de Gaillard, y siguiendo algo éstas se ha estudiado el resultado, disminuyendo aquel coeficien-

y se han dibujado las curvas, unas considerando constante el período T, variando la altura de ola que da la

parte (A) de la figura 3.<sup>a</sup>, y otras en que se considera el período variable, dentro de una misma altura de ola (parte B de la figura 3.<sup>a</sup>).

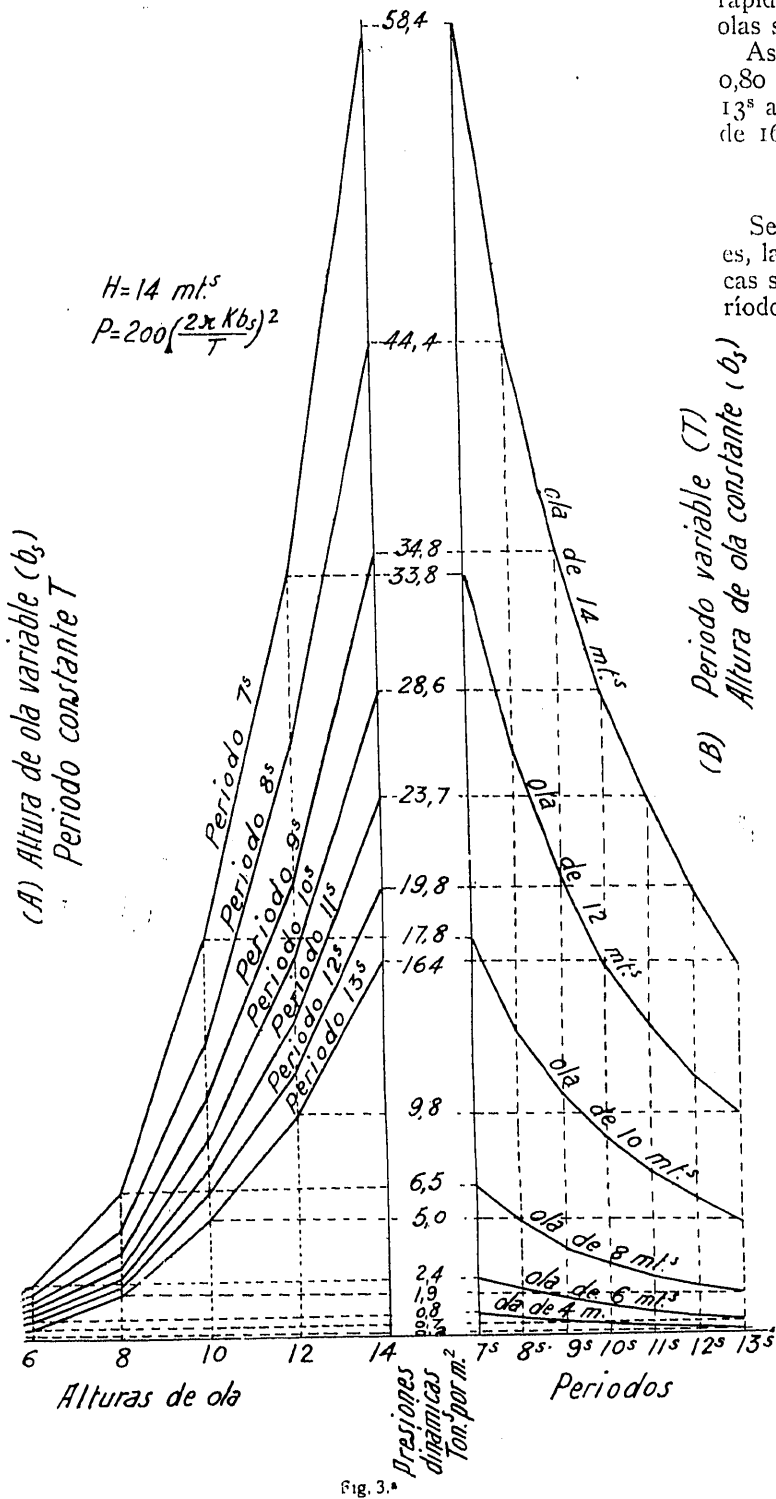


Fig. 3.<sup>a</sup>

De la observación de estos resultados se deduce que la presión aumenta con más rapidez al aumentar la altura de la ola, a medida que el período es menor. Así, resulta que con período de 13<sup>s</sup> pasa cada presión dinámica máxima solamente de 0,23 a 16,4 toneladas por metro cuadrado con olas de 4 y 14 metros, respectivamente, y con el período de 7<sup>s</sup> pasa esa presión máxima de 0,8 a 58,4 toneladas por metro cuadrado entre las mismas alturas de ola antes indicadas, esto es, que en el período de 13<sup>s</sup> hay una variación de 16,2 toneladas, y

con el período de 7<sup>s</sup> esa variación es de 57,6 toneladas entre los mismos límites de 4 a 14 de alturas de ola.

También se ve (parte B, figura 3.<sup>a</sup>) que las presiones no solamente son mayores, sino que aumentan con más rapidez a medida que disminuye el período, cuando las olas son de mayor altura.

Así, en la ola de 4 metros varía el esfuerzo de 0,23 a 0,80 de tonelada por metro cuadrado con períodos de 13<sup>s</sup> a 7<sup>s</sup>, y en la de 14 metros, con el período de 13<sup>s</sup>, es de 16,4 toneladas y llega hasta 58,4 con 7<sup>s</sup> de período.

Tercera parte.—Presiones máximas totales.

Se han comparado las presiones máximas totales, esto es, la máxima suma de las presiones estáticas y dinámicas según el procedimiento Lira en los dos casos de períodos de 8<sup>s</sup> y 12<sup>s</sup> en olas de 4 a 14 metros, con las

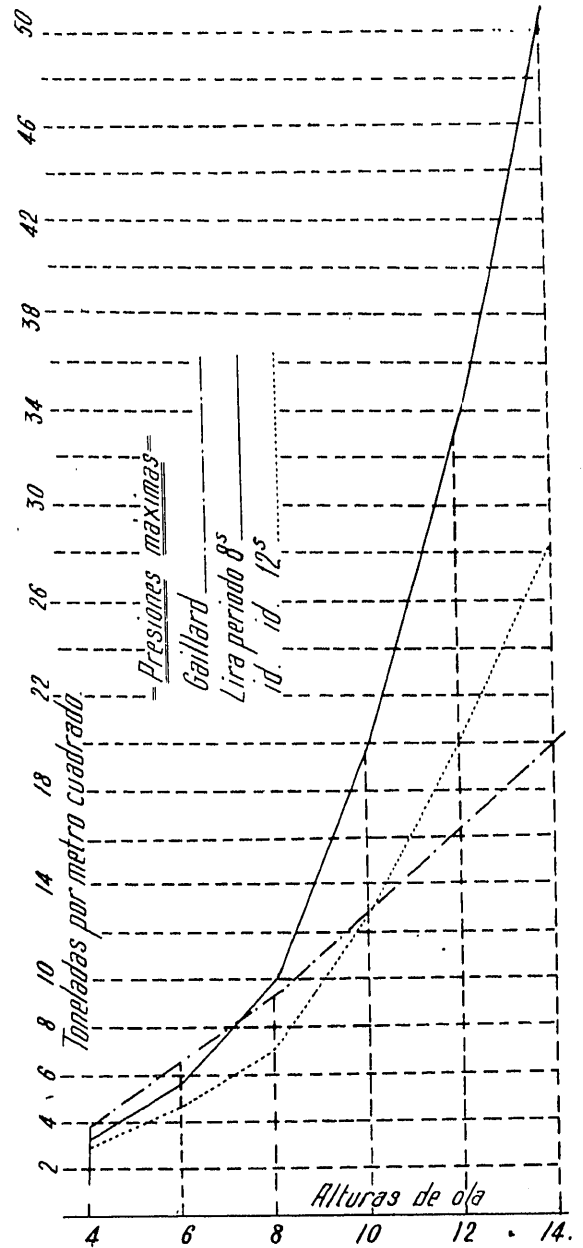


Fig. 4.<sup>a</sup>

presiones máximas dadas por la fórmula propuesta por Gaillard,

$$P = \frac{\rho''' \left( \frac{4}{3} \gamma \right)^2}{2g}$$

ya indicada en artículos anteriores.

Estableciéndose en el primer procedimiento esa presión máxima en el nivel de tranquilidad y en el segundo a  $\frac{1}{12}$  de la altura de la ola sobre ese nivel.

Se insertan esos resultados en el siguiente estado, que, traducido en gráfico, da las curvas de la figura 4.<sup>a</sup>, y, como se ve, sigue una ley lineal el método Gaillard y parabólica Lira, por la influencia que tienen en esas presiones totales las estáticas:

Presiones máximas (toneladas por m<sup>2</sup>)

Alturas de ola .....		14	12	10	8	6	4	
Gaillard .....		20	10,3	12,7	9,5	6,5	3,8	
Lira.	Período 8 <sup>s</sup>	Estáticas .....	12,8	9,8	7,2	5,2	3,8	2,5
		Dinámicas .....	38,3	23,3	12,3	4,6	1,7	0,6
	Totales .....		51,1	33,1	19,5	9,8	5,5	3,1
	Período 12 <sup>s</sup>	Estáticas .....	12,8	9,8	7,2	5,2	3,8	2,5
		Dinámicas .....	16,8	10,2	5,2	2,1	0,8	0,3
		Totales .....		29,6	20,0	12,4	7,3	4,6

Tratándose del período de 12<sup>s</sup> son mayores, según Gaillard, hasta olas de 10 metros, quedando inferiores a partir de esa altura, acentuándose cada vez más esa in-

ferioridad. En general, serán mayores los dados por Lira, y tanto más cuanto más disminuya la altura de la ola y disminuya el período.

Se podría terminar este estudio determinando la presión total en cada uno de los casos propuestos en el cuadro y gráfico y deducir también los momentos solicitantes; pero esto sería un poco laborioso y aumentaría mucho la pesadez de este artículo, y por ahora sólo se expone la comparación en croquis de dos diagramas de esfuerzos en dos casos bastante diferentes: uno de 12<sup>s</sup> de período y ola de 6, y otro de 8<sup>s</sup> y ola de 12 metros de altura (fig. 5.<sup>a</sup>), viéndose en ellos cómo aumenta considerablemente la presión total por el método Lira y cómo aumenta el momento de vuelco, aunque éste no siga la proporción que la presión total.

Antes de terminar, y observando que todos estos estudios están basados en las características de las olas y sus relaciones entre sí, se ha de patentizar la importancia suma que tiene el conocimiento real y preciso de esas características y la profundidad, para tener la necesaria garantía en el resultado e indicaciones de estos estudios y lo necesario e importante que es tener datos experimentales de la relación entre las características de esas olas y los esfuerzos producidos para contrastar esos cálculos; por eso es tan de desear que se obtengan satisfactorios resultados de los trabajos en curso de realización por el Comité internacional para medir los efectos de las olas y que pueda en cada momento determinarse, ese efecto, en relación con la altura, longitud y

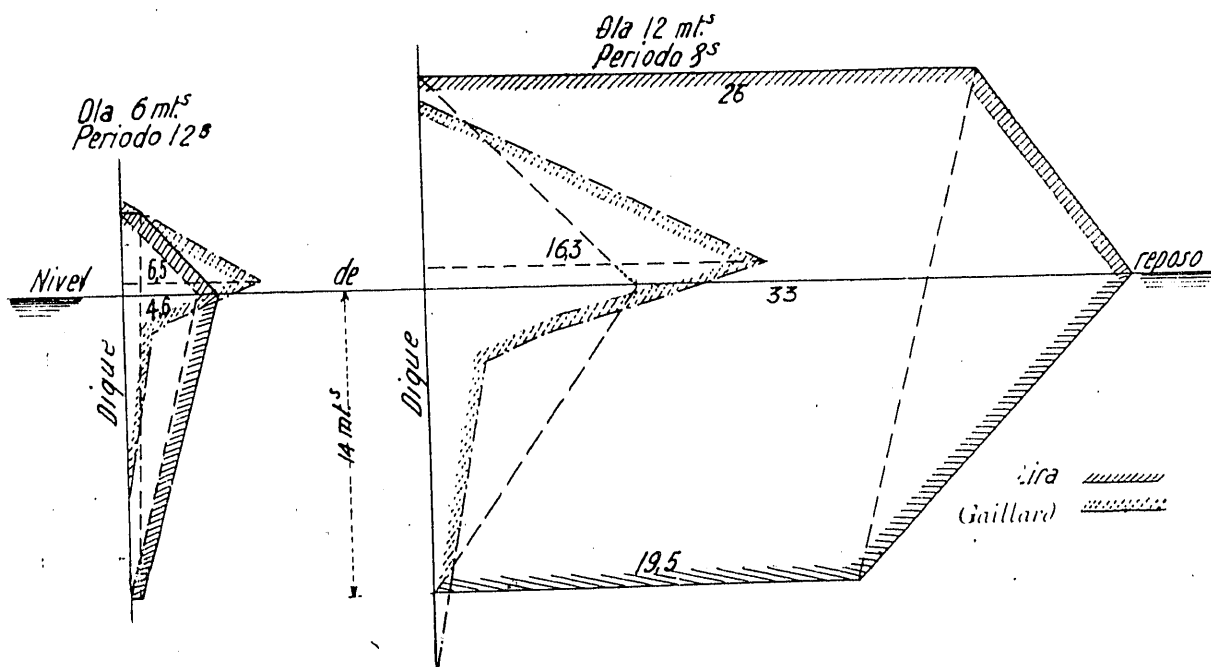


Fig. 5.<sup>a</sup>

ferioridad. Con período de 8<sup>s</sup> son superiores las presiones Gaillard solamente hasta la ola de algo más de 7 metros, sobrepasándose en este límite el esfuerzo dado por Lira, aumentando con gran rapidez ese exceso.

Aun cuando sean mayores las presiones máximas de Gaillard, no son mayores las totales en toda la altura del dique, deducidas de los gráficos dados por ambos ingenieros, y, como consecuencia, los momentos solicitantes que se deducirán de la aplicación de la resultante pre-

período de la ola que lo produjo y con la conocida profundidad en el sitio de la obra.

Con esto se da por terminado lo referente al estudio de los esfuerzos de las olas, y en próximos artículos se indicarán las principales y más características secciones de diques o rompeolas presentadas en el Congreso XIV de Navegación con la justificación de su adopción y los resultados efectivos de los construídos y probables de las proyectadas o propuestas.

Ramón HERNÁNDEZ MATEOS,  
Profesor de la Escuela de C., C. y P.