

TALUD LIMITE ENTRE LA ROTURA Y LA REFLEXION DE LAS OLAS

Por RAMON IRIBARREN CAVANILLES y CASTO NOGALES Y OLANO, Ingenieros de Caminos.

Los autores comentan en este artículo los resultados obtenidos en el Laboratorio de Delft sobre el interesante tema del talud límite entre la rotura y la reflexión de las olas, y comprueban la exactitud de la fórmula presentada por ellos en el XVII Congreso Internacional de Navegación celebrado en Lisboa.

Uno de los interesantes temas tratados en el XVII Congreso Internacional de Navegación, celebrado en Lisboa, es el referente a la determinación de las condiciones límites entre rotura y reflexión del oleaje.

Es necesaria esta determinación, no solamente para diferenciar los diques, o costas, rompeolas de los reflejantes, sino que es fundamental para el debido proyecto de las rampas rompeolas, o amortiguadoras, en lugar de muros de muelles reflejantes, en las zonas en las que el plano de oleaje del interior del puerto señale la existencia de ondas incidentes de alguna importancia y cuyas sucesivas reflexiones pudieran ser sumamente perjudiciales para su necesaria tranquilidad.

En casos justificados pueden cubrirse estas rampas con muelles en claraboya, pero nunca deben de construirse en estas zonas agitadas del interior de los puertos, y en especial en sus ángulos, muros de muelle reflejantes.

En relación con este tema, textualmente decíamos lo siguiente en nuestra ponencia, correspondiente a la Sección II, Comunicación 4.ª, del citado Congreso, a cuya lectura remitimos a quien interese la cuestión:

"Es de gran interés determinar el talud límite entre la rotura y la reflexión de la onda, en función de sus características. Existe teóricamente un talud límite que participa de ambos fenómenos y que al mismo tiempo los separa, de tal modo que, para taludes más rígidos, la onda se refleja, y para taludes más suaves, rompe; pero, en la práctica, hay una gama de taludes en los que la onda rompe y se refleja parcialmente, predominando uno u otro fenómeno hasta que se llega a un talud de rotura total o de reflexión total. No se puede propiamente hablar de taludes suaves o rígidos en absoluto, sino que esto depende de las características de la onda que los ataca."

A base del cuadrilátero de avancé, que tantos extremos hasta hoy inexplicables aclara, determinamos, en dicha ponencia, la expresión de la pendiente (in-

versa del talud), límite teórico entre rotura y reflexión:

$$i = \frac{4}{T} \sqrt{\frac{h}{g}},$$

siendo el período de la onda $2T$; su altura, $2h$, y g , la aceleración de la gravedad.

Como a continuación vamos a comprobar, es realmente satisfactorio el grado de aproximación, o mejor dicho, de exactitud, de dicha sencilla fórmula.

Los representantes del Laboratorio de Delft indicaron, en una de las sesiones del Congreso, haber llegado a determinar que, de acuerdo con las notaciones indicadas en la figura 1, pasadas para facilitar las comparaciones que vamos a establecer a nuestras notaciones, siempre que:

$$\frac{t}{2L} \leq \frac{1}{4};$$

la reflexión era total, y siempre que:

$$\frac{t}{2L} \geq \frac{1}{2},$$

se produce la rotura total.

A la simple vista de estos resultados estimamos, ya allí, que no podían ser aceptables como expresiones generales referentes a la rotura o reflexión de las olas.

En primer lugar no parece admisible que las condiciones de rotura no sean función, además de la longitud, o mejor dicho, período de la ola, de su altura, y tampoco parece admisible que la relación $\frac{t}{2L}$ defina dichas condiciones de rotura, salvo en los casos particulares en que $\frac{2L}{H}$ fuese constante, puesto que el talud, que según nuestro modo de entender la cuestión es la adecuada variable, vale:

$$\frac{t}{H} = \frac{t}{2L} \times \frac{2L}{H}.$$

La dimensión horizontal del talud, t , sólo puede

definir a éste, o a su inversa la pendiente, en profundidad, H , constante.

Estas lógicas objeciones están de acuerdo con nuestra fórmula:

$$i = \frac{4}{T} \sqrt{\frac{h}{g}},$$

cuya pendiente, i , o talud límite teórico $\frac{1}{i}$, es función del período $2T$, que para cada profundidad, H , fija la longitud mediante la expresión:

$$T = \sqrt{\frac{\pi}{g} \cdot L \times \text{Cth } \pi \frac{H}{L}};$$

pero dicha pendiente límite es también función de la altura de la ola, $2h$.

Posteriormente llegó a nuestro poder la ponencia presentada también por los representantes del Laboratorio de Delft a la tercera reunión celebrada en Grenoble de la "Asociación Internacional de Investigaciones para los Trabajos Hidráulicos", en la que, con mayor detalle, se exponen las experiencias realizadas y los resultados obtenidos.

En el gráfico representado en la figura 1.^a, que es el correspondiente a taludes continuos, presentado en Grenoble, las ordenadas representan la relación $\frac{h_1}{h}$ entre las semialturas de la onda reflejada, h_1 , y la incidente, h , y las abscisas son la relación $\frac{t}{2L}$ entre la dimensión horizontal, t , del talud, y la longitud de onda, $2L$.

Conviene insistir en que esta segunda variable no es adecuada, pues el que pudiéramos denominar factor de amortiguamiento, $\frac{h_1}{h}$, dependería, de acuerdo con nuestra fórmula, no de la arbitraria relación $\frac{t}{2L}$, sino de la pendiente $i = \frac{H}{t}$, o de su inversa, el talud $\frac{t}{H}$.

Lógicamente resulta así que, pasando a esta nueva variable, mediante la sencilla expresión $\frac{t}{H} = \frac{t}{2L} \times \frac{2L}{H}$, obtenemos el gráfico de la figura 1', en la que la constelación de puntos resulta aún mejor agrupada que en la figura 1.

De los datos reseñados en la citada memoria presentada en Grenoble, referentes a las observaciones extremas (a las intermedias corresponderían también resultados intermedios), obtenemos los siguientes datos y sus correspondientes resultados.

Ondas denominadas cortas.

a) Datos.

Semiperíodo, $T = 0,45$ seg.; profundidad, $H = 0,3$ m.; longitud, $2L = 1,2$ m.; relación, $\frac{2L}{H} = 4$; relación, $\frac{L}{h} = 15$; luego, semialtura, $h = \frac{42}{2 \times 15} = 0,04$ m.

Mediante la aplicación de nuestra fórmula obtenemos la pendiente límite:

$$i = \frac{4}{0,45} \sqrt{\frac{0,04}{9,81}} = 0,568,$$

o sea, el talud:

$$\frac{t}{H} = \frac{1}{0,568} = 1,76.$$

b) Datos.

$T = 0,45$ seg.; $H = 0,3$ m.; $2L = 1,2$ m.; $\frac{2L}{H} = 4$; $\frac{L}{h} = 20$; $h = \frac{1,2}{2 \times 20} = 0,03$ m.,

y obtenemos:

$$i = \frac{4}{0,45} \sqrt{\frac{0,03}{9,81}} = 0,492,$$

o sea, el talud:

$$\frac{t}{H} = \frac{1}{0,492} = 2,03.$$

Ondas denominadas largas.

c) Datos.

$T = 0,8$ seg.; $H = 0,25$ m.; $2L = 2,3$ m.; $\frac{2L}{H} = 9,3$; $\frac{L}{h} = 15$; $h = \frac{2,3}{2 \times 15} = 0,077$ m.,

y obtenemos:

$$i = \frac{4}{0,8} \sqrt{\frac{0,077}{9,81}} = 0,442,$$

o sea, el talud:

$$\frac{t}{H} = \frac{1}{0,442} = 2,26.$$

d) Datos.

$T = 0,8$ seg.; $H = 0,25$ m.; $2L = 2,3$ m.; $\frac{2L}{H} = 9,3$; $\frac{L}{h} = 20$; $h = \frac{2,3}{2 \times 20} = 0,0575$ m.,

GRÁFICO DEL LABORATORIO DE DELFT.
TALUDES CONTÍNUOS.

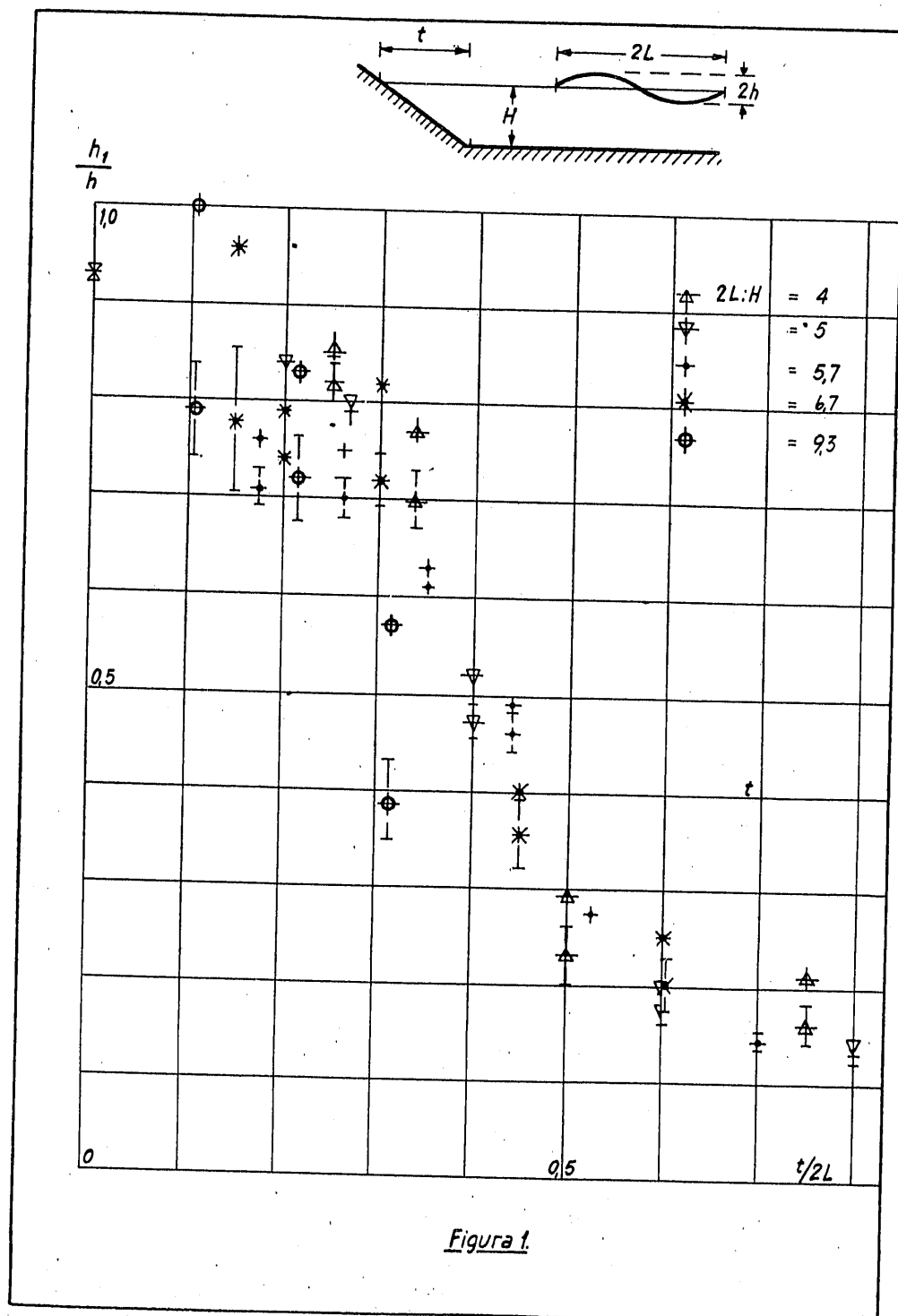


Figura 1.

GRÁFICO CON ABCISAS CORREGIDAS $\frac{t}{H}$ (TALUD)
TALUDES CONTÍNUOS.

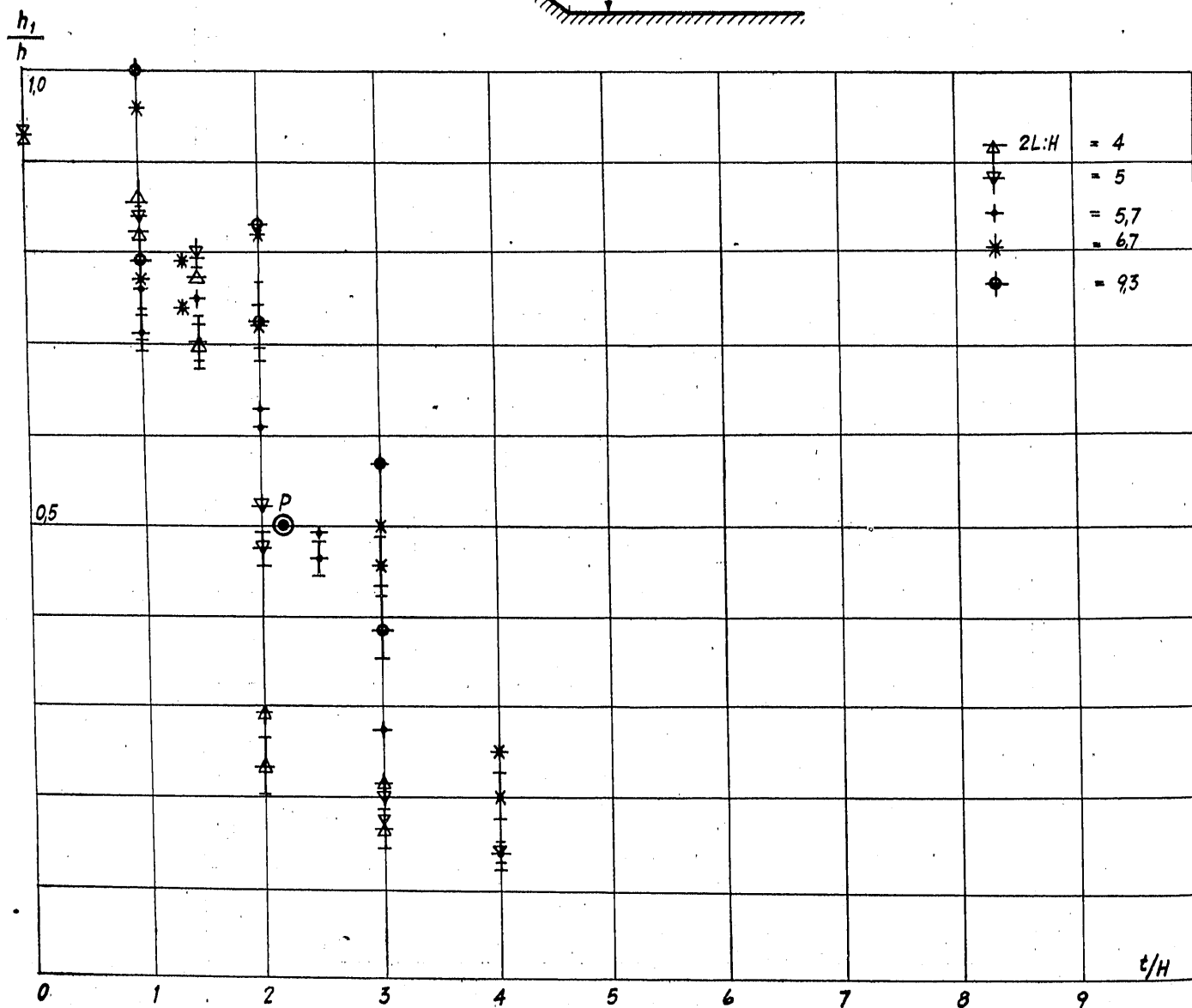
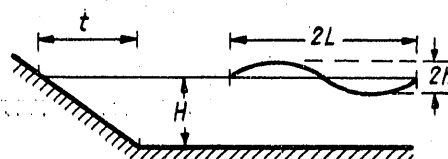


Figura 1'

GRÁFICO DEL LABORATORIO DE DELFT.
TALUDES DISCONTÍNUOS.

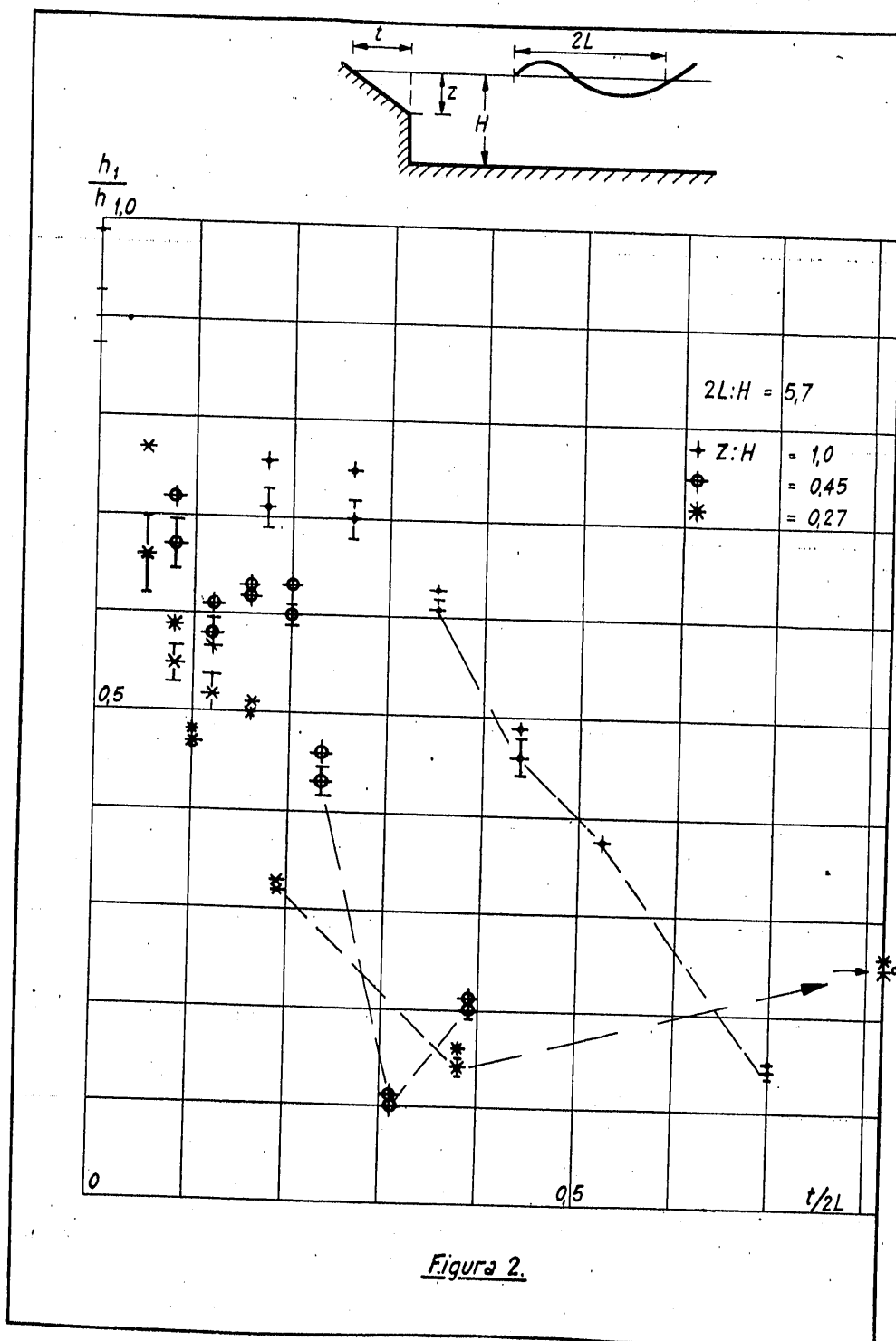


GRÁFICO CON ABCISAS CORREGIDAS $\frac{t}{z}$ (TALUD)
TALUDES DISCONTÍNUOS.

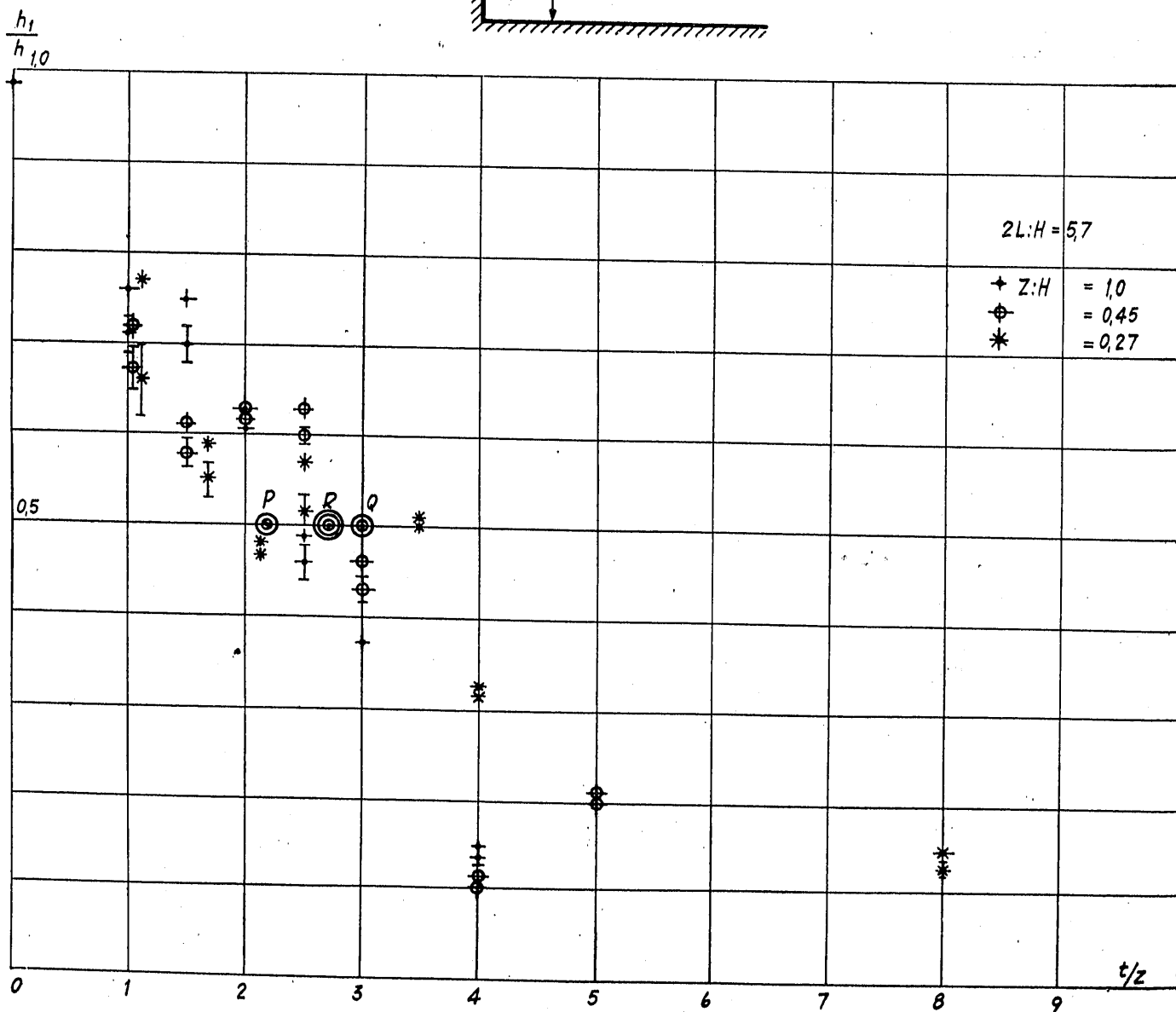
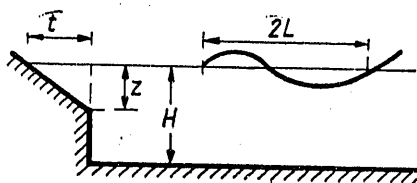


Figura 2'

y obtenemos:

$$i = \frac{4}{0,8} \sqrt{\frac{0,0575}{9,81}} = 0,383,$$

o sea, el talud:

$$\frac{t}{H} = \frac{1}{0,383} = 2,61.$$

El valor medio de los taludes límites obtenidos será:

$$\frac{t}{H} = \frac{1,76 + 2,03 + 2,26 + 2,61}{4} = 2,165.$$

Como ya se indicó en nuestra ponencia, e incluso se comprobó experimentalmente, el talud límite teórico debe corresponder, muy aproximadamente, al valor medio entre el talud de rotura total, $\frac{h_1}{h} = 0$, o de reflexión total, $\frac{h_1}{h} = 1$, o sea, debe lógicamente corresponder al valor $\frac{h_1}{h} = \frac{0+1}{2} = 0,5$. Con esta ordenada, $\frac{h_1}{h} = 0,5$, y la abscisa obtenida, $\frac{t}{H} = 2,165$, fijamos el punto P en la figura 1, que, al coincidir con gran exactitud con el centro de la constelación de puntos experimentales, comprueba, una vez más, el grado de exactitud de la fórmula empleada.

Aun son más interesantes, si cabe, los resultados obtenidos por análogo procedimiento en los taludes discontinuos, cuyo gráfico, como en cierto modo se indica ya en la propia Memoria presentada en Grenoble (fig. 2), es tan desordenado y sus puntos tan dispersos, que difícilmente se pueden deducir de él fundadas conclusiones.

La principal razón de esta dispersión es que la variable adoptada para las abscisas, $\frac{t}{2L}$, es aún menos aceptable, en estos casos de taludes discontinuos, por ser ahora el talud real de la rampa rompeolas:

$$\frac{t}{z} = \frac{t}{2L} \times \frac{2L}{z},$$

y la relación:

$$\frac{2L}{z} = \frac{2L}{\pi} \times \frac{H}{z}$$

es aquí esencialmente variable por serlo principalmente $\frac{z}{H}$.

FEBRERO 1950.

Si, mediante este sencillo cambio de variable, adoptamos como abscisas los valores del talud $\frac{t}{z}$ en lugar del arbitrario $\frac{t}{2L}$, obtenemos el gráfico de la figura 2', tan ordenado y admisible como el de la figura 1'.

Este interesantísimo resultado prueba, una vez más también, que la variable fundamental para el estudio de la rotura o reflexión de las olas, ha de ser siempre el talud de la rampa $\frac{t}{z}$, o su inversa la pendiente, y no $\frac{t}{2L}$.

Los datos, correspondientes a la nueva experimentación efectuada para estos taludes discontinuos, facilitados en la memoria presentada en Grenoble, son los siguientes:

$$\frac{2L}{H} = 5,7; \quad \frac{2L}{2h} = 40; \quad H = 0,316 \text{ m.};$$

de los que se deduce:

$$2L = 0,316 \times 5,7 = 1,80 \text{ m.}; \quad h = \frac{1,80}{2 \times 40} = 0,0225 \text{ m.};$$

$$K = Cth \pi \frac{H}{L} = 1166; \quad T = \sqrt{\frac{\pi}{g} \cdot L \cdot K} = 0,58 \text{ seg.}$$

La relación $\frac{z}{H}$ tuvo, en la experimentación efectuada, los valores:

$$\frac{z}{H} = 1; \quad \frac{z}{H} = 0,45; \quad \frac{z}{H} = 0,27.$$

Para $\frac{z}{H} = 1$ estamos en el mismo caso de los taludes continuos, cuya experimentación se ha utilizado también aquí, por lo que su punto P correspondiente se aproximará mucho al obtenido anteriormente.

Para:

$$\frac{z}{H} = 0,46; \quad z = 0,45 \times 0,316 = 0,142 \text{ m.} > 2h = 0,045,$$

y obtenemos la pendiente límite:

$$i = \frac{4}{0,58} \sqrt{\frac{0,0225}{9,81}} = \frac{1}{3},$$

o sea, el talud:

$$\frac{t}{z} = 3,$$

cuyo punto Q se representa también en la figura 2'.

Para:

$$\frac{z}{H} = 0,27; \quad z = 0,27 \times 0,316 = 0,853 \text{ m.} > 2h = 0,045,$$

obtenemos la misma pendiente límite $i = \frac{1}{3}$ y el

mismo talud $\frac{t}{z} = 3$, por lo que su punto representativo, Q , será el mismo que acabamos de obtener.

La abscisa media, correspondiente al punto P y a los dos puntos Q , cuyo número de experiencias de cada uno de ellos se aproxima a las de P , será:

$$\frac{t}{z} = \frac{2,16 + 3 + 3}{3} = 2,72,$$

que es la que nos determina el punto R perfectamente centrado también en la constelación de puntos de la figura 2'.

Esto prueba, creemos que definitivamente, que la fórmula de la pendiente límite:

$$i = \frac{4}{T} \sqrt{\frac{h}{g}}$$

es muy aceptable, y aunque su aplicación podría afinarse aún más, estimamos que tal como se ha efectuado es suficientemente aproximada para la mayoría de los casos prácticos, pues quizás convenga repetir, una vez más, que mediante los métodos y fórmulas que preconizamos para la técnica marítima, no pretendemos utópicas exactitudes teóricas, sino aceptables aproximaciones prácticas.

Conviene hacer notar que la experimentación efectuada para los taludes discontinuos es aceptable, pues como se ha comprobado, toda ella cumple con la condición, determinada en nuestra ponencia al Congreso, de que la profundidad en el extremo del talud $H_e = z$, sea igual o mayor que la altura $2h$ de la ola, o sea, $H_e = z \geq 2h$.

También procede hacer resaltar que los resultados de la interesante experimentación de Delft han confirmado los de la nuestra, recopilada en la citada ponencia al Congreso, según la cual los taludes de reflexión total y rotura total, cuya media es el talud límite entre ambos, están prácticamente en la relación de dos a uno, por lo que, obtenido, mediante nuestra fórmula, el talud límite, o su inversa la pendiente, basta multiplicarlo o dividirlo por $\frac{4}{3}$ ó por $\frac{2}{3}$ para obtener cada uno de ellos.

Para las rampas rompeolas o amortiguadoras de oleaje, cuya eficacia viene algo aumentada por la rugosidad de las escolleras, basta generalmente, siempre que cumplan con la condición $H_e = z \geq 2h$,

con darles la pendiente límite $i = \frac{T}{4} \sqrt{\frac{h}{g}}$, pues si

la altura de la onda reflejada se reduce a menos de la mitad de la de la onda incidente, su energía se reduce a mucho menos de la cuarta parte.

Todo lo expuesto confirma nuestro criterio según el cual, para llegar a soluciones aceptablemente aproximadas para los complejos temas de la técnica marítima, es preciso la entusiasta y franca colaboración de todos: teóricos, técnicos y laboratorios.