

LOS APARATOS PRODUCTORES DE OLEAJE ARTIFICIAL EN EL LABORATORIO DE PUERTOS DE LA ESCUELA DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

Por RAMON IRIBARREN CAVANILLES,
con la colaboración de
CASTO NOGALES Y OLANO,
Ingenieros de Caminos.

Se hace en el presente artículo una descripción muy completa de las principales instalaciones del Laboratorio de Puertos de nuestra Escuela Especial, explicándose el fundamento del original aparato productor de oleaje. En otro próximo artículo se describirán algunos de los aparatos de medida y se dará cuenta de los ensayos que se vienen efectuando.

Desde el curso pasado está en funcionamiento el Laboratorio de Puertos, y en él se realizan actualmente investigaciones de gran interés, cuyos resultados se publicarán oportunamente. De momento juzgamos interesante dar a conocer a los lectores de la REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS algunas de las instalaciones que se han montado en dicho Laboratorio, y principalmente el canal y el tanque para ensayos, con sus originales aparatos productores de oleaje.

El canal de ensayos constituye uno de los elementos fundamentales para la experimentación. En él se pueden estudiar las teorías generales sobre las ondas, su formación, propagación, extinción y reflexión, así como su acción sobre el fondo y sobre los diques, tanto reflejantes como rompeolas, etc. Sirve, en definitiva, para todos los estudios que se realicen en dos dimensiones, mientras que el tanque tiene su aplicación en los de tres dimensiones.

El canal propiamente dicho tiene 32 metros de longitud, 1 metro de ancho y 1,50 metros de altura. Está formado por una estructura metálica resistente, con el fondo y la pared posterior de chapa. La pared anterior es de cristal, con lunas Securit de $1 \times 1,50$ metros y 6 mm. de espesor, con una cuadrícula de 5×10 cm. dibujada en toda la superficie. El apoyo y la impermeabilidad de los bordes de las lunas ha presentado grandes dificultades: después de ensayar diversos tipos de mástic, cementos y otros impermeabilizantes se ha resuelto mediante un apoyo elástico formado por tiras de goma virgen alheridas al hierro de la estructura y al borde de las lunas con una disolución de la misma goma en benzol, lográndose así una impermeabilidad absoluta, a pesar de las deformaciones. La pared posterior, de chapa, lleva dos tramos de 4 metros, también de cristal, esmerilado, con iluminación posterior para fines fotográficos.

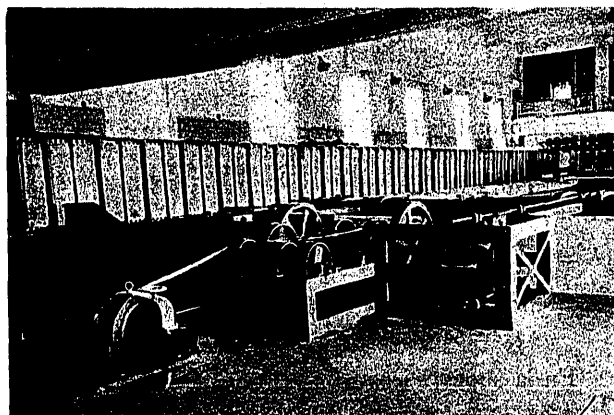


Foto 1.ª — Conjunto del canal de ensayos y mecanismo productor de oleaje artificial del tanque.

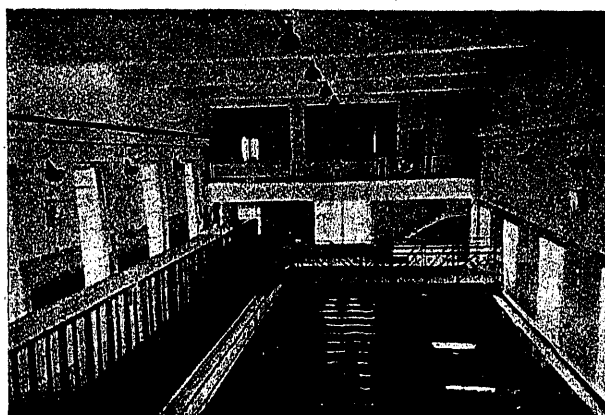


Foto 2.ª — Canal y tanque de ensayos.

En el extremo del canal se ha dispuesto una rampa rompeolas, cuyo talud se puede variar para lograr, en los casos que sea necesario, la rotura total y evitar la reflexión, aun parcial, de la onda. Debajo de esta rampa, que puede desmontarse fácilmente si se desea disponer una pared vertical, va la toma de agua y el desagüe del canal.

En el otro extremo del canal va dispuesta la paleta productora de oleaje, el mecanismo de accionamiento y, entre una y otro, un amortiguador para evitar la reflexión de la onda que se produce en la parte posterior de la paleta y lograr su rápida extinción. Este amortiguador, que funciona también con pleno éxito, está constituido por una serie de chapas dobladas en zigzag y colocadas una sobre otra, formando un nido de abeja. La onda penetra entre las chapas y consume rápida y totalmente su energía, sin dar lugar a perturbación alguna.

A todo lo largo del canal corre una pasarela, a media altura, para uso de los experimentadores, y diversas líneas eléctricas de corriente continua y alterna con cajas de toma convenientemente distribuidas para la conexión de los aparatos de medida y control.

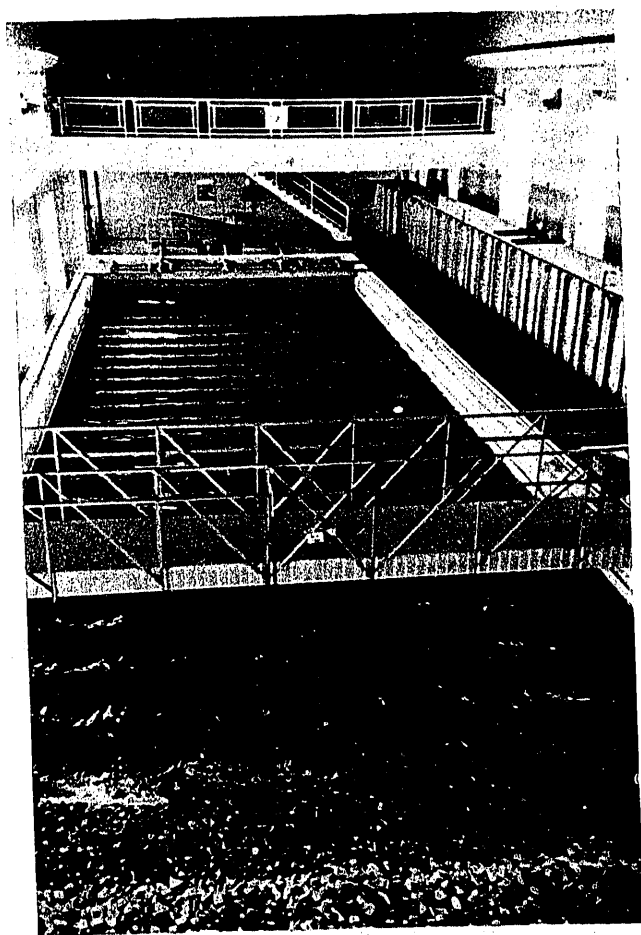


Foto 3.^a — Canal y tanque de ensayos.

En las fotografías 1.^a, 2.^a, 3.^a y figura 1.^a, puede apreciarse el conjunto del Laboratorio con el canal y tanque de ensayos.

Existen numerosos tipos de aparatos productores de oleaje artificial, formados, unos, por paletas articuladas en el fondo o a diversas alturas, o con movimientos de traslación; otros, por una viga que se sumerge alternativamente en el agua, por un cilindro excéntrico circular o elíptico, por una rueda de paletas, e incluso aparatos neumáticos. En la revista *La Houille Blanche* de 1951, números 2, 4 y 5, se describen varios de estos aparatos usados en diversos Laboratorios. No cabe duda que los mejores serán aquellos que, dentro de la sencillez de su construcción y la seguridad de su funcionamiento, se adapten lo más exactamente posible a las condiciones teóricas del movimiento que se trata de reproducir.

Antes de describir el aparato instalado en el Laboratorio de Puertos conviene recordar que, según la teoría tróctica, hoy generalmente aceptada, y cuyo grado de aproximación es suficiente para la mayoría de las aplicaciones prácticas, las órbitas descritas por las moléculas líquidas son elipses cuyo semieje mayor, horizontal, vale:

$$r = h \frac{\text{Ch } \pi \frac{H - z_0}{L}}{\text{Sh } \pi \frac{H}{L}}, \quad [1]$$

y el menor, vertical:

$$r' = h \frac{\text{Sh } \pi \frac{H - z_0}{L}}{\text{Sh } \pi \frac{H}{L}}. \quad [2]$$

El semiperíodo del movimiento es:

$$T = \sqrt{\frac{\pi}{g} \cdot L \cdot K}, \quad [3]$$

y la celeridad:

$$C = \sqrt{\frac{g}{\pi} \frac{L}{K}}, \quad [4]$$

siendo:

H = Profundidad del nivel medio del mar en movimiento.

$2h$ = Altura de la ola.

$2L$ = Longitud de la ola.

$$K = \text{Cth } \pi \frac{H}{L}.$$

z_0 = Profundidad del centro orbitario de la molécula considerada.

En la superficie, con $z_0 = 0$:

$$r_s = h \text{Cth } \pi \frac{H}{L} = h K,$$

$$r'_s = h,$$

y en el fondo, siendo $z_0 = H$:

$$r_f = \frac{h}{\text{Sh } \pi \frac{H}{L}},$$

$$r'_f = 0,$$

lo que demuestra que el movimiento es compatible con la presencia del fondo a la profundidad H , reduciéndose en él la órbita a una recta que recorre la molécula con movimiento armónico.

En grandes profundidades, y con suficiente aproximación cuando $H \gg L$, resulta:

$$r = r' = h e^{-\frac{\pi z_0}{L}}$$

y

$$T = \sqrt{\frac{\pi}{g} \cdot L}.$$

En la superficie:

$$r = r' = h;$$

y en el fondo:

$$r = r' \simeq 0;$$

condiciones que corresponden a la onda de oscilación pura con órbitas circulares y movimientos máximos en la superficie y casi nulos en el fondo.

Cuando H es pequeña con relación a L , y con su-

ficiente aproximación cuando $\frac{H}{L} \ll 0,1$, se verifica que:

$$\text{Th } \pi \frac{H}{L} \simeq \text{Sh } \pi \frac{H}{L} \simeq \frac{\pi H}{L},$$

y quedará:

$$r_f = \frac{h}{\text{Sh } \pi \frac{H}{L}} \simeq \frac{h}{\text{tg } h \frac{\pi H}{L}} = h K = r_s,$$

en cuyo caso los recorridos son casi iguales en la superficie y en el fondo, que es el caso de la onda de traslación. La celeridad sería:

$$C = \sqrt{\frac{g}{\pi} \cdot \frac{L}{K}} = \sqrt{\frac{g}{\pi} L \text{tg } \pi \frac{H}{L}} \simeq$$

$$\simeq \sqrt{\frac{g}{\pi} \cdot L \cdot \pi \frac{H}{L}} = \sqrt{gH},$$

que es la fórmula de Lagrange para las ondas de traslación.

Vemos, pues, que la naturaleza de la onda depende de los valores de r y r' en la superficie y en el fondo, y que jugando con ellos podremos obtener toda la gama de ondas, desde la de traslación hasta la de oscilación pura, pasando por las intermedias.

El aparato ideal sería aquel que imprimiera a las moléculas líquidas un movimiento orbitario de las ca-

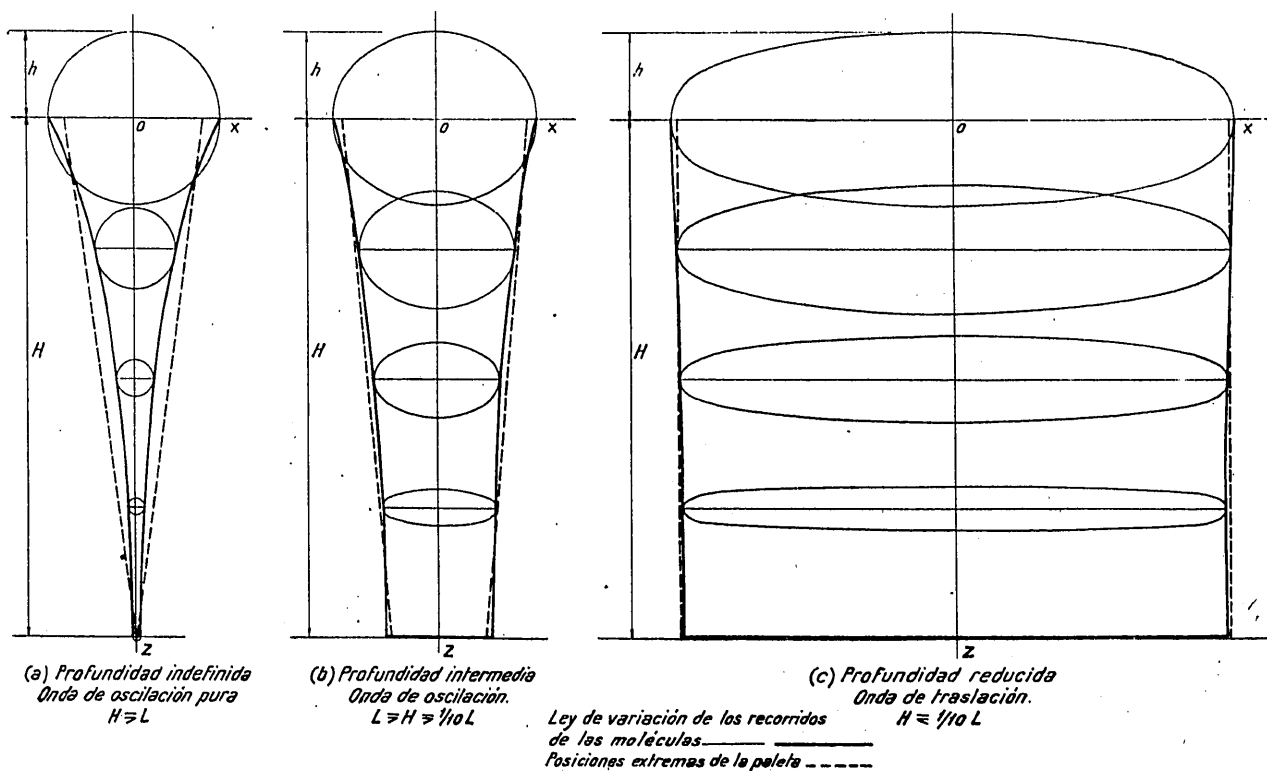


Fig. 2.^a — Diversos tipos de onda.

racterísticas que acabamos de citar y que fuera susceptible de reproducir los distintos tipos de ondas que interesan en la experimentación, representados esquemáticamente y a título de ejemplo, en la figura 2.^a (a), (b) y (c), que corresponden a los casos $H = L$, $H = 0,4 L$ y $H = 0,1 L$. En ellas se representan las órbitas descritas por las moléculas superficial y del fondo, y las situadas a las profundidades:

$$z_0 = \frac{H}{4}, \quad \frac{H}{2} \text{ y } \frac{3H}{4},$$

y, de trazo grueso lleno, las leyes de variación de los recorridos horizontales de las moléculas con la profundidad.

Recordando simplemente lo anterior, lo que realmente interesa es que conociendo las características de la ola en la realidad, su longitud $2L$, su altura $2h$ y la profundidad H , se debe reproducir la ola correspondiente a la escala del modelo. Si esta es λ , multiplicando por λ las características citadas y la profundidad, tendríamos las del modelo.

En la fórmula [3] del período, H y L se reducen en la misma escala, y K , que es adimensional, no varía de la naturaleza al modelo. Siendo además π otro número y $g_s = 1$, puesto que tanto el prototipo como el modelo están en el campo gravitatorio terrestre, dicha fórmula nos recuerda en primer lugar $\tau = \lambda^{1/2}$, o sea que, como es sabido, en los fenómenos de gravedad o peso, la escala de tiempos es la raíz cuadrada de la escala de longitudes.

Además de dicha fórmula se deduce que, para una

determinada profundidad, H , en el modelo, variando el período varía en el mismo sentido la longitud de onda, la cual puede fácilmente determinarse en función de aquél, o viceversa. Obtenida así, mediante la determinación del período, la longitud de onda en el modelo, su altura de ola queda determinada por los recorridos de las moléculas dados por las fórmulas [1] y [2] y representados en la figura 2.^a. Basta con fijar los recorridos horizontales r para obtener la altura deseada. Los otros recorridos deben de producirse en cumplimiento de la teoría, y pueden servir para comprobar su grado de aproximación.

En las paletas empleadas en algunos laboratorios, bien articuladas en el fondo, o bien con movimiento de traslación, sólo se pueden producir respectiva y correctamente ondas de oscilación pura, fig. 2.^a (a), o de traslación, fig. 2.^a (c), siendo así que las más interesantes en la técnica marítima son las intermedias, fig. 2.^a (b). Aunque la onda, al cabo de un cierto recorrido se regulariza y tiende a ajustarse a las condiciones teóricas del movimiento, interesa no perder longitud de canal y que la onda salga de la paleta lo más perfecta posible. Es también frecuente que la transmisión del movimiento a la paleta se haga mediante un mecanismo de biela y manivela que no da lugar a un movimiento armónico puro como exige la teoría, pues para conseguirlo sería preciso que la longitud de la biela fuera infinita.

Ambas circunstancias, que falsean sensiblemente la naturaleza del movimiento, se han evitado en el aparato productor de oleaje construido en el Labora-

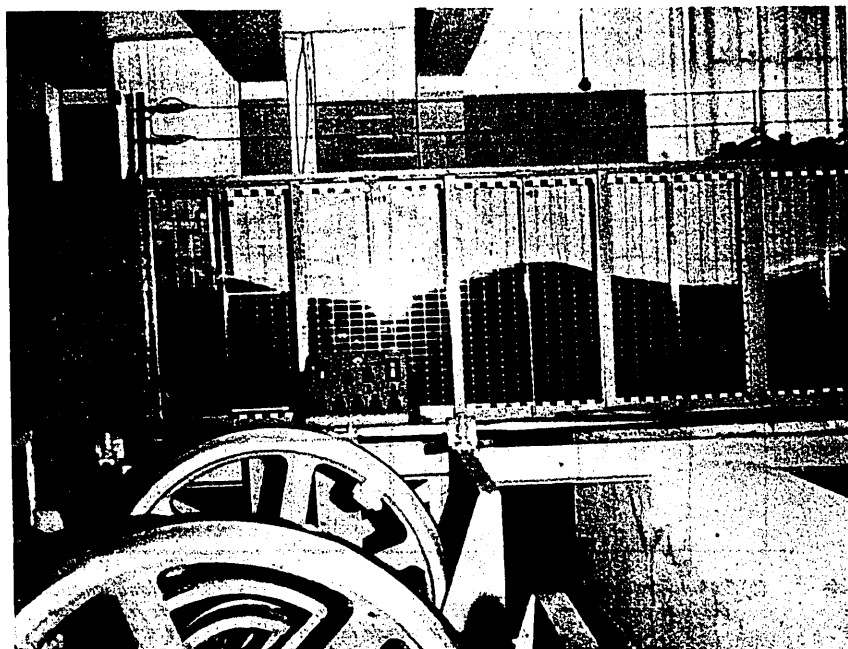


Foto 4.^a — Canal de ensayos. Paleta productora de oleaje y pupitre de mando. En primer término, el mecanismo de accionamiento de la paleta del tanque.

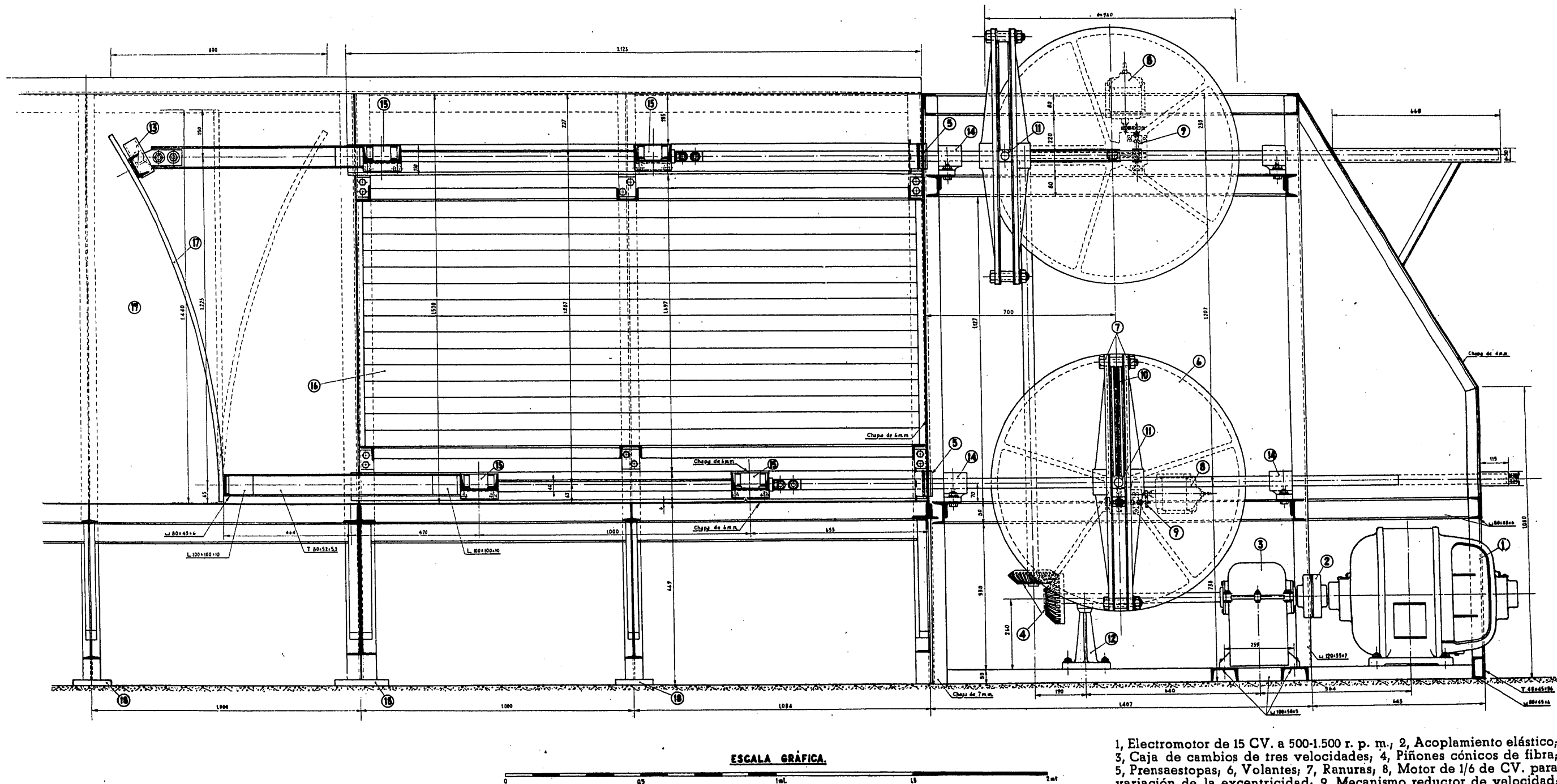


Figura 3.^a — Canal de ensayos. Aparato productor de oleaje artificial.

- 1, Electromotor de 15 CV. a 500-1.500 r. p. m.; 2, Acoplamiento elástico; 3, Caja de cambios de tres velocidades; 4, Piñones cónicos de fibra; 5, Prensaestopas; 6, Volantes; 7, Ranuras; 8, Motor de 1/6 de CV. para variación de la excentricidad; 9, Mecanismo reductor de velocidad; 10, Husillo para el deslizamiento del botón; 11, Botón de excentricidad variable; 12, Soporte; 13, Deslizadera; 14, Cojinetes-guía; 15, Carretón-guía; 16, Amortiguador de la ola; 17, Paleta de plexiglás; 18, Placas de asiento; 19, Vidrio «Securit».

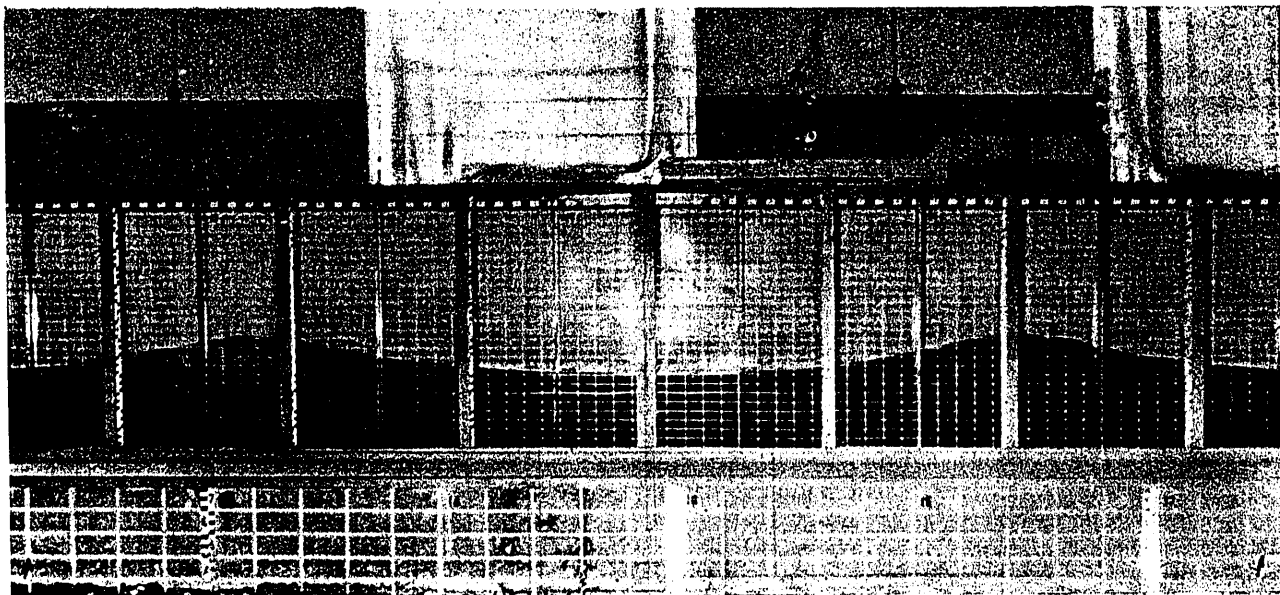


Foto 5.ª — Canal de ensayos. Onda de 4,30 m de longitud.

torio de Puertos de la Escuela de Caminos (1). El movimiento circular del motor se transforma en un movimiento armónico puro mediante un mecanismo de botón y ranura. Al girar el botón con velocidad angular constante, se produce, por intermedio de una ranura vertical rígidamente unida a un vástago, un movi-

miento de éste, horizontal y armónico. Modificando la posición del botón se puede variar la amplitud del movimiento, y disponiendo de dos mecanismos similares y en fase, de los cuales uno transmite el movimiento a la parte superior de la paleta y otro a la parte inferior, se fijan los recorridos en la superficie y en el fondo:

(1) Este aparato fue construido en 1948, con arreglo a las enseñanzas obtenidas con otro, de menores dimensiones y fundado en los mismos principios, que está en funcionamiento desde el año 1944.

$$r_s = h K \quad \text{y} \quad r_f = \frac{h}{\text{Sh} \pi \frac{H}{L}},$$

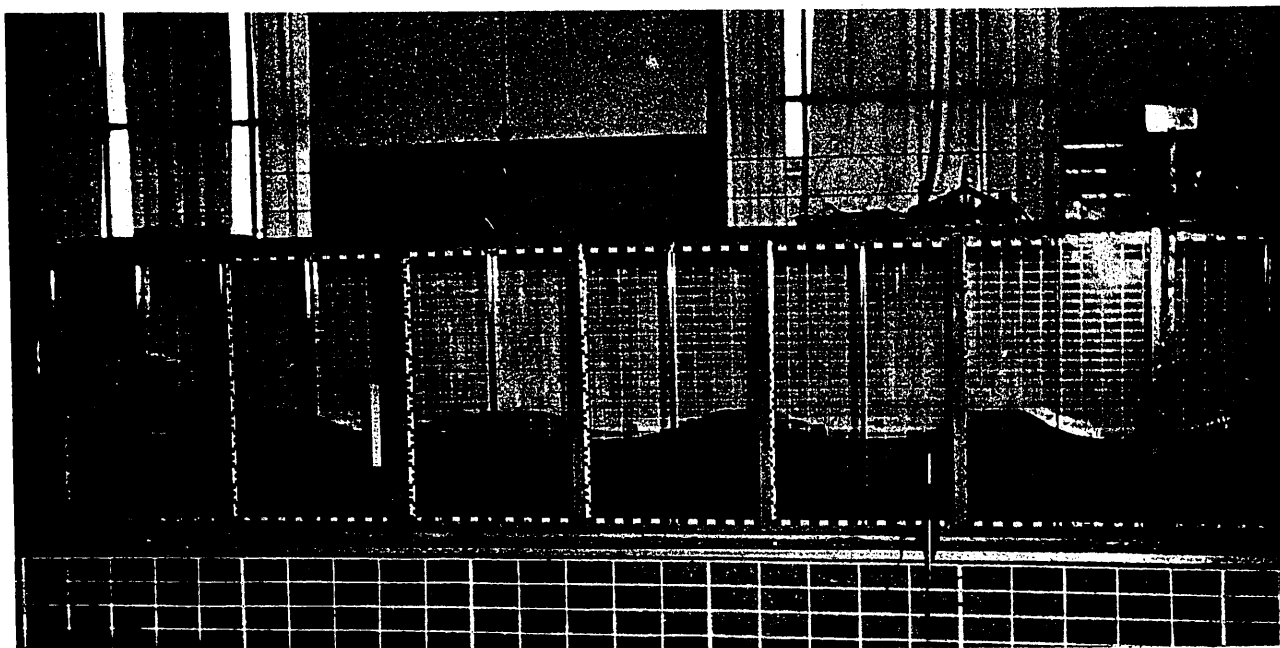
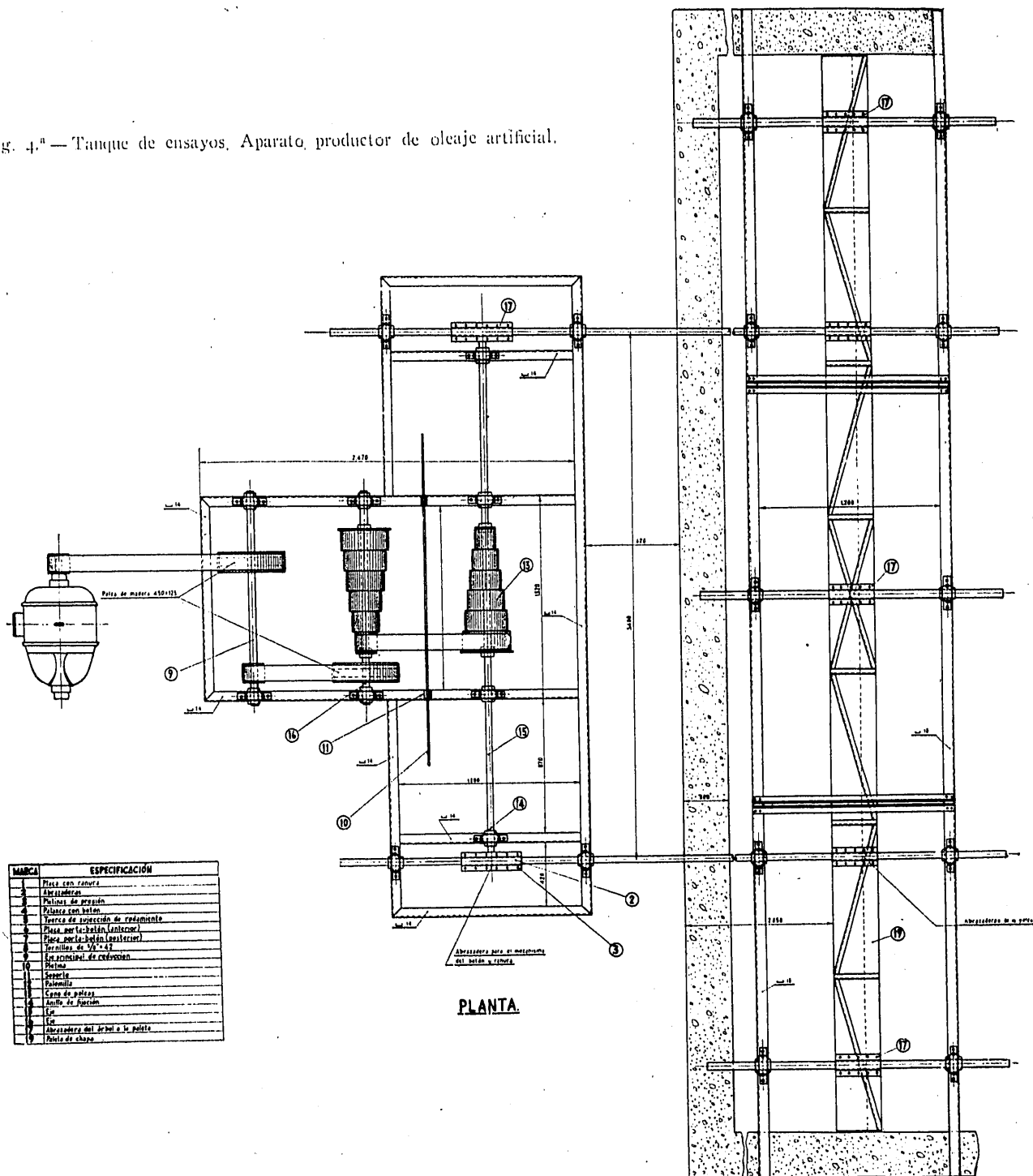


Foto 6.ª — Canal de ensayos. Onda de 1,50 m. de longitud.

Fig. 4.^a — Tanque de ensayos, Aparato productor de oleaje artificial.



MARCA	ESPECIFICACIÓN
1	Placa con ranura
2	Abrastador
3	Palmas de presión
4	Palmas con brida
5	Tercera de roscado de rodamiento
6	Placa perforada (interior)
7	Placa perforada (exterior)
8	Varillas de 1/2" x 4'
9	En principal de coque
10	Pluma
11	Soporte
12	Placa
13	Cable de alambre
14	Anillo de fijación
15	Cable
16	Abrazadera del árbol a la palanca
17	Palanca de chapa



Foto 7.^a — Rotura de la ola en la rampa del canal de ensayos.

pudiendo incluso anularse éste cuando el botón coincide con el eje de giro. Se consigue así toda la gama de ondas, desde la de oscilación pura cuando se hace $r_f = 0$, hasta la de traslación, si $r_f = r_s$.

La paleta rígida no permite fijar más que las amplitudes del movimiento en la superficie y en el fondo, y sus posiciones límites serían las indicadas de trazos en la figura 2.^a (a), (b) y (c), que se aproximan mucho a las teóricas indicadas de línea llena.

Teniendo en cuenta que la tangente a la curva teórica de variación de z con z_0 es vertical en el fondo, puesto que siendo:

$$r = h \frac{\text{Ch } \pi \frac{H - z_0}{L}}{\text{Sh } \pi \frac{H}{L}},$$

resulta:

$$\frac{dr}{dz_0} = -\frac{\pi}{L} h \cdot \frac{\text{Sh } \pi \frac{H - z_0}{L}}{\text{Sh } \pi \frac{H}{L}} = -\frac{\pi}{L} r_f$$

que en el fondo, $r'_f = 0$, se anula.

Debido a esto, puede obtenerse aún una mayor aproximación mediante una paleta flexible empotrada verticalmente en su mecanismo del fondo, cuya elástica se aproximará todavía más a la curva teórica que la paleta recta. Con una paleta de sección adecuadamente variable, la aproximación sería aún algo mayor.

En el aparato construido en la Escuela de Caminos, y representado en la figura 3.^a, la paleta de 1 m. $\times$ 1,50 m., se construyó primeramente de plexiglas, con sección de igual resistencia, pero al cabo de algún tiempo de funcionamiento llegó a partirse, indudablemente por la fatiga de esfuerzos repetidos y alternados, y se ha sustituido provisionalmente, hasta estudiar otra solución, de paleta flexible, por una rígida de chapa y articulada en el mecanismo del fondo.

La posición de los botones de los mecanismos su-

perior e inferior se regula mediante dos motores auxiliares que actúan sobre dos sin fines de paso irreversible, y puede variarse con el aparato en marcha. Todos los mandos están centralizados en un pupitre portátil, en el que se registran tanto los períodos del movimiento como las amplitudes de los recorridos superiores e inferiores, y, por consiguiente, el operador puede, con toda comodidad, fijar desde el lugar de observación las características del oleaje y variar éstas a voluntad.

Entre el motor y la transmisión a los dos mecanismos de botón y ranura se ha interpuesto un volante regulador y una caja de cambios. El período puede variar desde 0,5 hasta 5 segundos, y los recorridos de la paleta pueden llegar a ser de 40 cm. a un lado y otro de su posición central, con lo que se puede conseguir una gama de ondas considerable.

En las fotografías 4.^a a 8.^a se pueden apreciar varios detalles del canal y aparato productor de oleaje, así como algunas de las ondas en él experimentadas.

Al tanque, destinado a ensayos de tres dimensiones, se le han dado las máximas que permite el local. Tiene 21 m. de longitud, 7 de ancho y 0,70 m. de profundidad. La realización de una paleta de 7 m. de longitud, con características análogas a las del canal, independencia y automatismo de movimientos, etc., hubiera dado lugar a dificultades considerables de construcción, por lo que, teniendo en cuenta que en el tanque se han de efectuar ensayos de obras portuarias construídas en profundidades reducidas, y que los movimientos moleculares se asemejan, por consiguiente, más a los de la figura 2.^a (c), que a los representados en las (a) y (b) de la misma figura, se ha dotado a la paleta de movimiento armónico de traslación únicamente, realizado mediante un mecanismo de botón y ranura reglable. La transmisión se ha realizado por correas, con varias poleas para poder variar el período también desde 0,5 a 5 segundos. Para cambiar la posición del botón es preciso parar el mecanismo.

Por encima del tanque corre una pasarela-puente, desde la que el observador puede efectuar las mediciones.

En la figura 4.^a se representa la paleta y el mecanismo que la acciona.

En otro artículo describiremos algunos de los aparatos de medida y daremos cuenta de algunos resultados de los ensayos que se vienen efectuando.

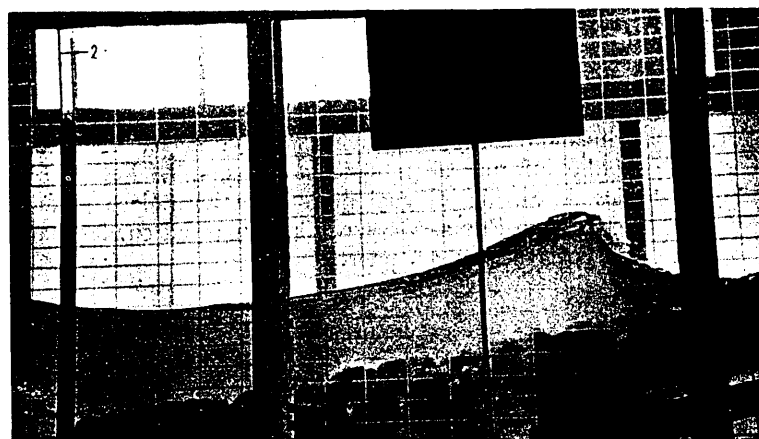


Foto 8.^a — Rotura de la ola en la rampa →
del canal de ensayos.