

LOS METODOS DE CALCULO DE LOS DIQUES DE ABRIGO

Por EDUARDO VILA Y FANO

Ingeniero de Caminos

El autor, muy conocedor de los problemas marítimos a través de su experiencia de treinta años dedicados a la construcción de puertos, define — por aplicación de la teoría trocoidal de las olas y todas sus leyes de propagación, reflexión, planos de oleaje, etc., así como con los estudios y fórmulas de Benezit y Sainflou, correspondientes al chapoteo — el movimiento de las moléculas frente a los diques, causa de sus averías y constante preocupación de los ingenieros. Es sabido que los diques preexistentes al oleaje modifican éste en su forma normal de propagación y llega a determinar unas trayectorias de acuerdo con las observaciones directas. Señala el autor el camino que a su juicio debe seguirse, completado con ensayos de laboratorio, para encontrar una fórmula más de acuerdo con la realidad del fenómeno que la actualmente en uso.

El cálculo y proyecto de las obras de abrigo, pese a que ya hace cerca de un siglo se había llegado a una conclusión satisfactoria en materia del conocimiento de las olas con los estudios de Flamant, esbozados y orientados por Boussinesq, era aún hace pocos años completamente empírico y se reducía más bien a un estudio comparativo con obras ya ejecutadas.

Gaillard con sus diagramas puramente dinámicos; Benezit con su método de cálculo que se debe denominar hidrostático, puesto que no admite sino causas estáticas; y Lira con su sistema fundado en la idea de que las fuerzas que actúan sobre los diques son un complejo de fuerzas estáticas y dinámicas; fueron nuestros orientadores en los años del primer cuarto de siglo y principios del segundo.

Es indudable que la aplicación de la teoría de la ola trocoidal, ya conocida de antiguo (1888), sólo empieza a tener aplicación directa cuando Benezit, en 1923, propuso un método de cálculo fundado en la teoría de *clapotis* o interferencia de olas de iguales características pero de sentido opuesto.

Benezit, en su primer estudio, llegó a una aproximación alentadora; pero su precisión no es suficiente porque se funda en fórmulas correspondientes a calados ilimitados. Sin embargo, el método es, a nuestro modo de ver, el resultado de la aplicación lógica de principios perfectos aunque incompletos.

El Prof. Lira, en el Congreso de Navegación de El Cairo, en 1927, propuso un sistema dinamoestático que, si no es rigurosamente tan técnico como las teorías de Benezit, ofrece el acierto de colocarse en el caso de profundidad limitada. Correspondió a Lira el acierto de despertar el interés por el estudio científico de estos problemas.

En 1928, Sainflou formuló un admirable estudio denominado "Essai sur les diques maritimes verticaux", publicado en el fascículo IV (julio-agosto) de los *Annales des Ponts et Chaussées*. En este estudio

extiende el método de Benezit al caso de profundidad limitada, y llega a unas consecuencias tan rigurosas que parecen indiscutibles; pero, una vez más, prescinde de los efectos dinámicos.

Cuanto se haya hecho en apoyo de uno y otro sistema de cálculo, podrá ser más o menos aproximado en su resultado; pero, dentro de los errores inherentes a las hipótesis admitidas, como son la de que las olas son isócronas, cilíndricas e iguales, así como de que son ondulaciones puras que conservan íntegramente la energía y tantas cosas como es necesario admitir hasta llegar a las olas trocoidales que consienten prescindir los términos de grado superior, que son las que se someten a experiencias en los laboratorios, hay tal cúmulo de causas de error, que no es de extrañar que aparezcan diferencias sensibles. Es verdad que el reproche de prescindir de las fuerzas dinámicas, que Lira echa de menos en los sistemas hidrostáticos, tiene realidad, ya que hay masas de agua sometidas a movimientos importantes; pero, en todo caso, es preciso que su estudio se refiera a movimientos reales y no a movimientos imposibles, como son los recorridos en órbita elíptica, que en mucha distancia del dique no pueden producirse y muy especialmente en contacto con el paramento, donde tienen que ser precisamente verticales.

El acierto del Prof. D. Ramón Iribarren formulando los planos de oleaje, abre camino a nuevas investigaciones que consideramos imprescindible realizar, puesto que, conocida la dirección y características de la ola directa, queda todo reducido a su composición con las olas reflejadas.

El fundamento de los métodos hidrostáticos estriba en la realidad de que todas las olas, al tropezar con un obstáculo que no pueden superar, son rechazadas y se reflejan. El proceso del reflejo es la conversión de su energía cinética en potencial con aumento de altura, fenómeno perfectamente reversible que

se invierte al llegar a la máxima altura y se detiene y convierte en pérdida de potencial y transformación de nuevo en energía cinética con arreglo a la ley que corresponda según la naturaleza del obstáculo y el ángulo de incidencia.

Es evidente que si se lanza una esfera contra un plano inclinado, ésta remontará su superficie hasta detenerse e iniciar el descenso con arreglo a la ley $V = \sqrt{2gh}$.

Asimismo, al avanzar una ola hacia un dique, ya sea éste vertical o en talud, el volumen de la parte anterior de la ola encuentra ocupado su lugar con la masa del dique y el resto se remonta conservando su volumen hasta rebasar el dique o retroceder si no puede rebasarlo. Claro está que si el dique es permeable, parte de la energía de las olas incidentes se absorbe por el rozamiento y llenado de los huecos; pero, de todos modos, llegará a un momento en que la ola, al menos en parte, es reflejada y produce una ola de rechazo tanto más parecida a la incidente cuanto más impermeable sea el obstáculo y cuanto menos energía se pierda en la fricción de la ola con la superficie del dique, o sea, que la ola reflejada será exactamente igual a la incidente cuando el obstáculo es perpendicular a la trayectoria de la ola, vertical y carente de rugosidad. Esto se puede comprobar fácilmente en el más elemental laboratorio para un dique vertical atacado por un oleaje oblicuo, y comprobada la identidad de la ola reflejada, no hay inconveniente en extender la ley a la incidencia normal, llegando, en consecuencia, a la interferencia con todas sus consecuencias, sin que sea posible prescindir de ella, a menos que se prescinda totalmente de la teoría inicial, ya que, admitido el método oscilatorio, debe admitirse en su totalidad.

Con diques permeables y en talud, el fenómeno requiere estudio de laboratorio; pero siempre la ola de rechazo tendrá el carácter de igualdad de período, ya que no de altura. Su composición con la onda directa no será la de un chapoteo perfecto, pero sí será del tipo chapoteo, tanto más cuanto menor sea el talud y menores la rugosidad y la permeabilidad del dique.

En la exposición del método de Sainflou se admite que delante de los diques hay una zona en que el oleaje está perturbado (*Orbites que les molécules ne peuvent en fait parcourir*); pero no se analiza la naturaleza ni la extensión de la perturbación, y, sin embargo, es del mayor interés, ya que sirve para la comprensión del fenómeno.

Si consideramos en un principio que el obstáculo es un dique vertical con paramento lo suficientemente liso para despreñar el gasto de energía de la fricción durante la reflexión de la ola, se producirá el chapoteo tan perfecto como lo sea la ola incidente, así en su forma como en su regularidad y período.

Considerando por separado las ondas incidentes

y reflejadas, es evidente que la ola incidente continúa, invariablemente, actuando contra el paramento, mientras la reflejada es una ola de iguales características, de sentido inverso, y que se propaga sobre una superficie en completo reposo, esto es, como una ola que se propaga en un puerto a partir del dique. Habrá, pues, que considerar que el dique AD se comporta como productor de un tren de olas creado por la reflexión, que penetra en la boca del puerto, cuyo dique virtual es AC , y haciendo los trazados habituales, se obtendrán las diversas zonas límites de expansión, alimentación y reposo (fig. 1.^a).

Admitiendo ahora la presencia de las olas incidentes, se tendrán las zonas a la izquierda de BM , donde el chapoteo es perfecto; entre M y N , donde el chapoteo está disminuido en altura porque la expansión redujo la altura de la ola reflejada al $0,71$ de la incidente, y el sector ANP , donde la onda reflejada tiene sus crestas concéntricas con su centro en A , con altura variable de $0,71 \times h$ a cero, y que se cortan con las olas directas formando intumescencias en los cruces.

Esto se observa con frecuencia en la dársena de la Marina en el puerto de La Coruña, donde se ve claramente cómo las pequeñas olas que se forman dentro del puerto, reflejadas en los espigones, forman unas zonas de chapoteo, mientras frente a la boca se conserva la forma de la ola normal progresiva que, en contraste con las ondas estacionarias, da la sensación de un río que penetra en la dársena.

Pero un dique, o termina en una costa que absorbe el oleaje por su irregularidad, o tiene un cambio de alineación. En el primer caso, hay una simple expansión, y en el segundo, se producirá la doble expansión de las olas. De cualquier modo, la zona de perturbación tiene un alcance limitado, ya por expansión, ya porque la ola reflejada, marchando contra la dirección del oleaje, va perdiendo su energía por rozamiento debido a fricción interna o a la acción retardatoria del viento.

En conclusión, la interferencia, aunque no sea perfecta, será tanto más próxima a la teoría cuanto las olas cumplan más aproximadamente las hipótesis fundamentales; pero, de cualquier modo, el tipo de oleaje ante el dique será chapoteante y desde luego se cumplirá rigurosamente en contacto con el dique, que es donde más nos interesa. Esto es una realidad aunque no se han tenido en cuenta efectos dinámicos, porque su consideración tan sólo produce modificación en la altura de los afloramientos; pero el fenómeno sólo tiene explicación cuando es compatible con las condiciones físicas del problema, y solamente el método hidrostático reúne estas condiciones, tanto en contacto con el dique como en la zona que se extiende ante él.

La fórmula propuesta por Sainflou para el chapoteo en calado limitado es el resultado de introducir

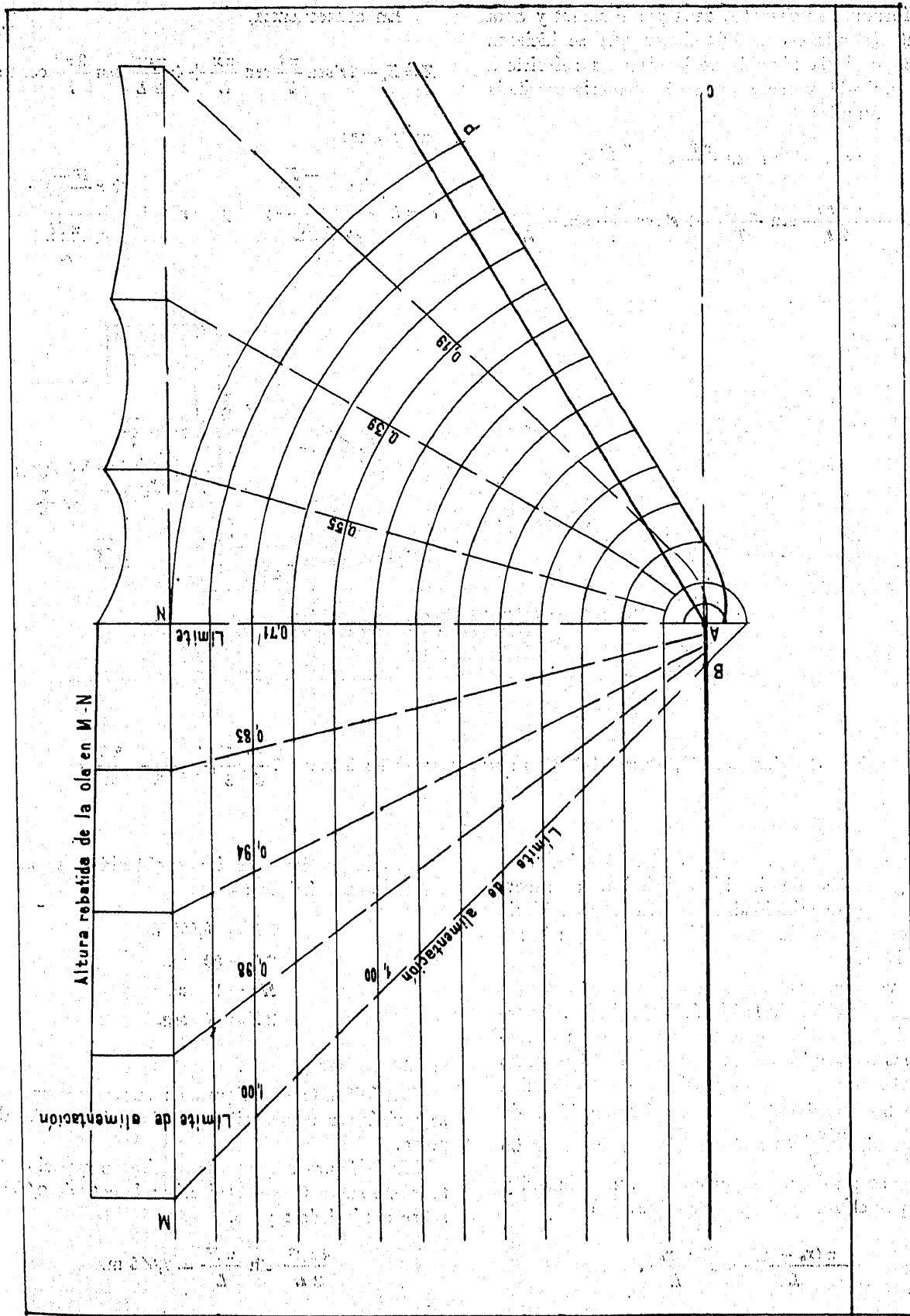


Fig. 1.ª — Propagación de la ola reflejada.

y que los afloramientos máximos y mínimos son, respectivamente, con relación al nivel de reposo,

$$\frac{4 \pi h^2}{2L} \operatorname{cth} \frac{\pi H}{L} \pm 2 h = \begin{cases} 2,666 + 6,666 = 9,333 \text{ m.} \\ 2,666 - 6,666 = -4,000 \text{ m.} \end{cases}$$

Asimismo se ven representados los niveles de la superficie al cabo de los tiempos de 0 a T y en los intermedios

$$\frac{T}{6}, \frac{2T}{6}, \frac{3T}{6}, \frac{4T}{6} \text{ y } \frac{5T}{6}$$

altura $\frac{1}{2} L$ sobre el nivel de reposo, y que los arcos de círculo que con el centro expresado pasen por los puntos 2, 3 y 4, representan con bastante aproximación, sobre todo en la parte central y a todos los niveles, las trayectorias de los respectivos puntos. Los desplazamientos de las verticales 1, 2, 3, 4 y 5 alcanzan en cada semiperíodo las posiciones 1-1', 2-2', 3-3', 4-4' y 5-5', en sus movimientos hacia la derecha, e igualmente 1-1'', 2-2'', 3-3'', 4-4'' y 5-5'', en sus movimientos hacia la izquierda. De la observación de los espacios recorridos por las moléculas

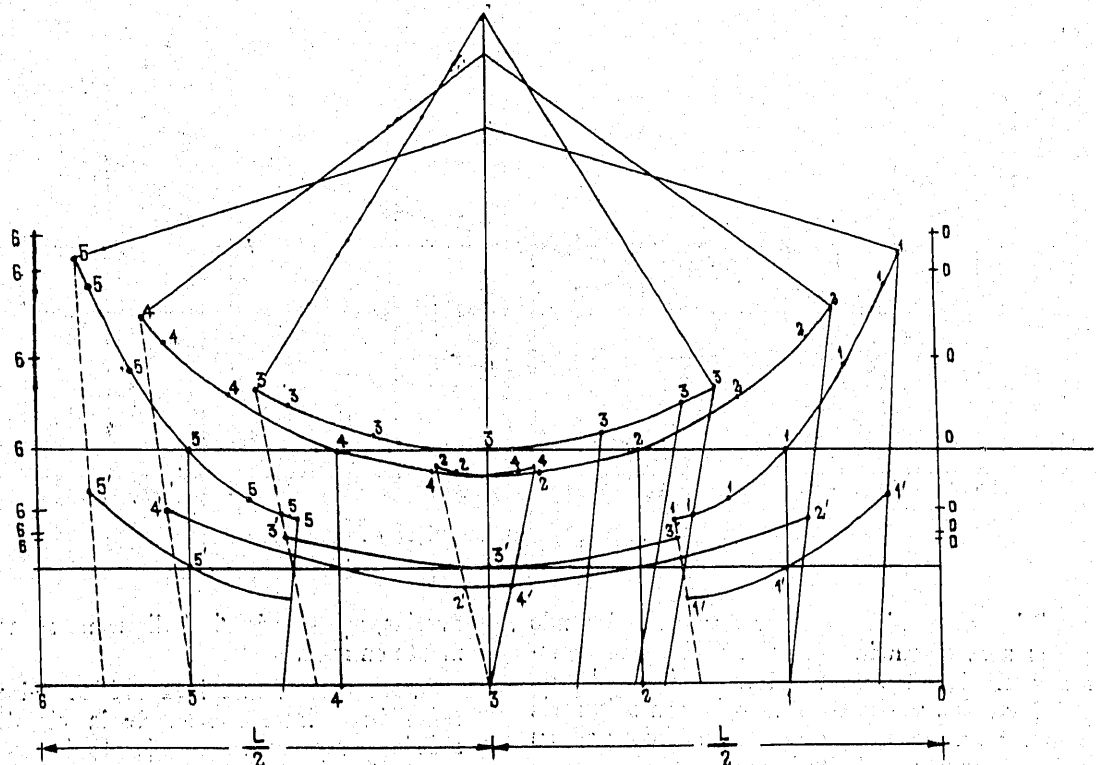


Fig. 3.a — Trayectoria de puntos en superficie plano medio y fondo.

Las trayectorias de los puntos desde el 0 hasta el 6 son, respectivamente, las 0, 1, 2, 3, 4, 5 y 6. Son ramas de parábolas. Para mayor claridad, las reproducimos en la figura 3.a, en la que se añaden los recorridos de las moléculas de fondo deducidas de la fórmula. También se han representado las trayectorias de los puntos correspondientes al nivel intermedio, o sea en la sonda de 5 m. y las líneas 11', 22', 33', 44', 55', que representan los desplazamientos de las líneas verticales del 1 al 5 al cabo de los tiempos 0 y T.

Del examen de esta figura se deduce que el recorrido parabólico es asimilable a un movimiento oscilatorio cuyo centro está aproximadamente a la

de superficie y de fondo, se deduce que el máximo recorrido por las moléculas de superficie en el semiperíodo T corresponde al punto central 3, con recorrido en la superficie de 20,40 m. (muy próximo a $\frac{L}{2} = 20$), y que medidos los caminos recorridos en las fracciones de T, o sea, cada $\frac{T}{6}$, la máxima velocidad corresponde a $\frac{T}{6}$, o sea, cuando la superficie trocoidal se confunde con el nivel de reposo. Corresponde en este punto un recorrido de 5 m. en un tiempo de T/6, o sea, en 0,6 de segundo, lo que supone una velocidad de 8 m./seg., y en el fondo, 6,67 metros/seg., velocidades que equivalen, para un canto

que está en la superficie, una subpresión dinámica igual a

$$\frac{v^2}{2g} = \frac{64}{19,6} = 3,26 \text{ Tn./m.}^2$$

que aun en el caso de estar fuera del agua, es superior a las 2,75 Tn. que pesa el m.³ de los granitos. En el fondo, la subpresión dinámica sería 2,28, pero con un canto sumergido cuyo peso restante por su pérdida por desplazamiento sería tan sólo 1,75 toneladas/m.³. Se ve, pues, que las rocas aisladas de un

nivel de reposo. Se establece, pues, entre la zona libre o boca del dique y el largo de éste un desnivel de 5,333 m., que necesariamente produce una corriente según la longitud del dique que, al saltar bruscamente el apoyo del mismo, debe producir una corriente turbulenta cuya velocidad aproximada es

$$V = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \times 9,80 \times 5,33} = 10,20 \text{ m.}$$

Claro es que el morro debe tener trazado y desarrollo adecuado para que la pendiente no sea brusca; pero aun así, durante la construcción son de prever

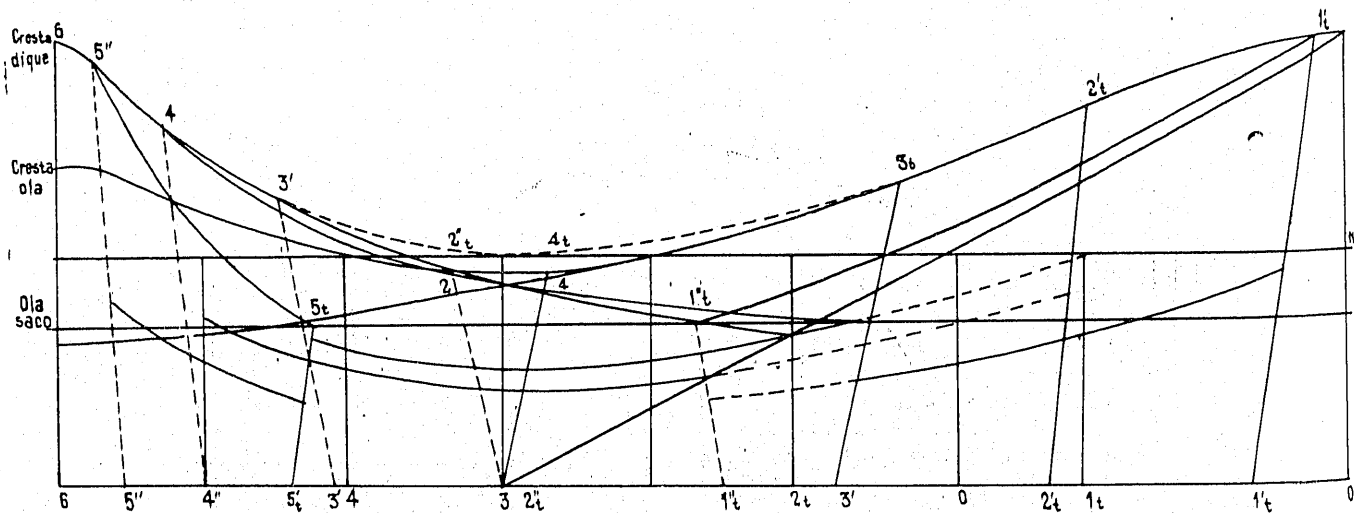


Fig. 4.ª — Chapoteo con dique en talud.

metro cúbico sumergidas en contacto con el fondo y situadas a la distancia $L/2$, son fácilmente removidas por el chapoteo tanto al movimiento de ida como al de vuelta, y esta consecuencia, tan sólo sería interesante para no prescindir del método por su trascendencia en el cálculo de bermas, cuando la obra vertical no se asiente directamente sobre el fondo.

Consecuencia inmediata del chapoteo es la sobre-elevación de la ola a lo largo del dique. Cuando se estudia el aumento de altura de la ola producido por la propia obra, se tropieza con la misma dificultad que al ignorar el estado de agitación ante el dique, zona en la que no puede existir, según hemos dicho, un estado de cosas que permite la libre propagación de las olas con movimiento orbitario de las moléculas, ni circulares ni elípticas, como se requiere de acuerdo con las hipótesis dinamoestáticas. Si se admite, por el contrario, la teoría estática o del chapoteo, el problema queda automáticamente resuelto.

Las olas cuyas características obedecen a las cifras citadas, tienen su centro de oscilación a la altura de 0,666 m., o sea, al cuarto de la altura correspondiente al chapoteo, y como la semialtura de ola es 3,333, la cresta de la ola se eleva a la cota de 4,00 m. sobre el

avertías, sobre todo si el dique no se asienta directamente en roca.

Para darnos una idea gráfica del proceso de la reflexión e interferencia de la ola directa con la reflejada, representaremos la ola de las características establecidas, referida al nivel de reposo (fig. 9.ª) r r. Con arreglo a las fórmulas establecidas, tendremos:

Elevación del centro de oscilación de ola $cr = 0,666 \text{ m.}$

Elevación del centro de oscilación de chapoteo $c'r = 2,666 \text{ m.}$

Depresión del seno de la ola $rs = 3,333 - 0,666 = 2,666 \text{ m.}$

Depresión del seno del chapoteo, $rn = 6,666 - 2,666 = 4,000 \text{ m.}$

Elevación cresta de ola, $rp = 0,666 + 3,333 = 4,000 \text{ m.}$

Amplitud de la ola, $2h = 6,666.$

Amplitud del chapoteo, $4h = 13,333.$

Afloramiento calculado, $rm = 2,666 + 2 \times 3,666 = 9,333 \text{ m.}$

Sumando las ordenadas, $rm' = 13,333 - 2,666 = 10,666 \text{ metros.}$

Para obtener este resultado hemos partido de una ola inicial de las características dadas y supusimos que avanza hacia el dique con el seno a la cota —0,666 hasta llegar a la cresta. Para mayor sencillez, se fija la ola y se traslada hacia atrás el dique.

Al llegar la ola hasta el punto 5, por ejemplo,

la ola, o sea, con relación al nivel de reposo los 10,666 calculados.

Esta elevación es mayor que la obtenida por Saint-flou; pero es de tener en cuenta que esto sólo sucederá para una primera ola, porque partimos de un solo principio, que es la conservación del volumen,

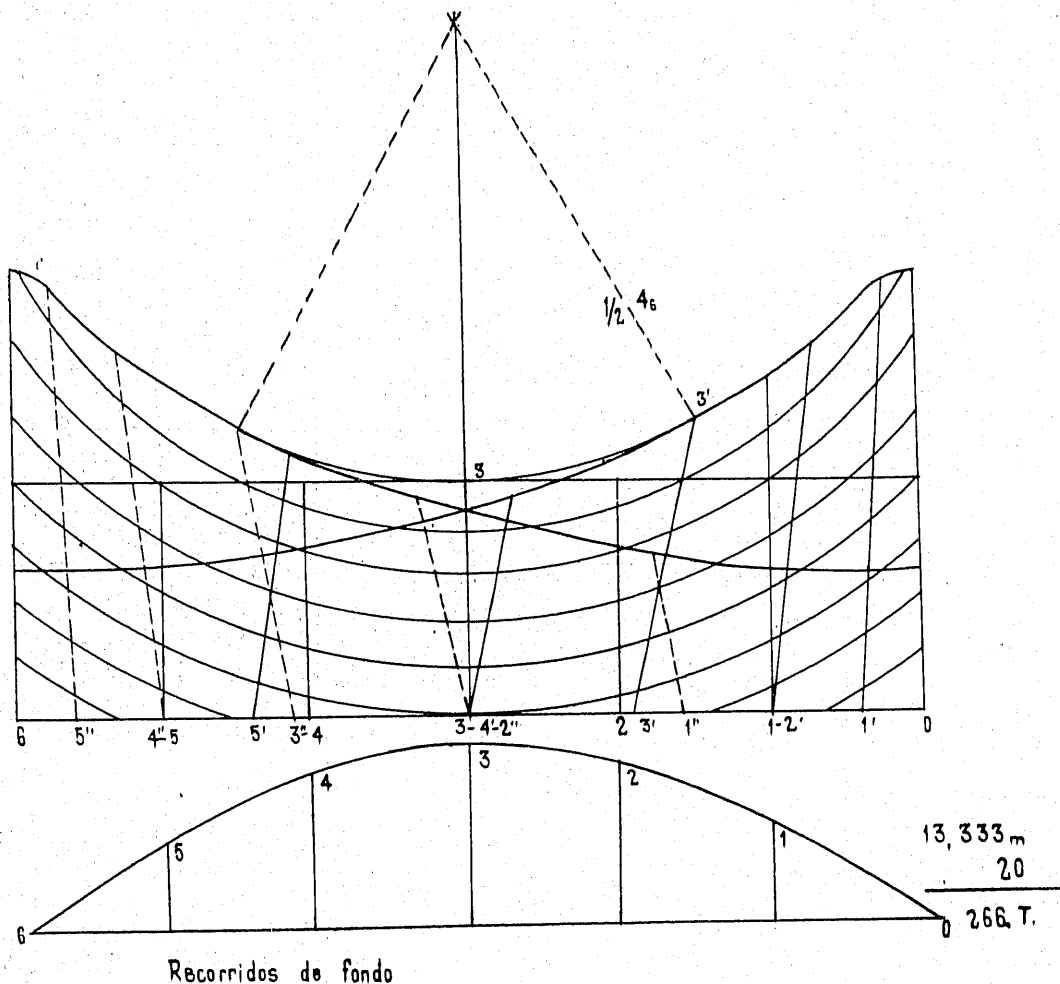


Fig. 5.ª — Esquema funcional de chapoteo.

el trozo de ola (5-5 — S_00) se habrá reflejado y habrá producido la onda (5-5 — S_{10-10}), que se sumará a la parte que precede a la izquierda del 5-5. La altura (5-5) se habrá elevado a 5,5' duplicando su elevación y en la cresta habrá de sumarse a la cota de la cresta la ordenada de la onda directa con la de la parte reflejada, obteniéndose la elevación (6-6'), y sucesivamente hasta llegar a la línea 10, donde se extingue el reflejo y queda tan sólo la ola primitiva.

Al llegar la ola al punto 6, se obtendrá la posición de la cota, sumada $4/h$ con la ordenada del seno de

ecuación de continuidad; pero al iniciarse el retroceso éste se verificará siguiendo las trayectorias anteriormente calculadas en los planos correspondientes, que son tangentes en el exterior a la superficie libre o casi paralelas en el interior y corresponden a las ramas abiertas de parábola. Las trayectorias de los puntos superficiales 1, 2 y 3, y sus simétricos 5, 4 y 3, pueden sustituirse por arcos circulares cuyos radios son de diecinueve a veinte metros, y sin mayor error pueden hacerse iguales a 20 m., que es, a su vez, igual a $\frac{L}{2}$; como las velocidades medias corres-

pondientes son, aproximadamente, de 4,00 m. en el tiempo $\frac{T}{6} = 6,6$ seg., o sea, $40/6 = 6,66$ m./seg., se tendrá una fuerza centrífuga de $\frac{43}{20} = 2,2$ m., lo que nos indica que el nivel de la superficie libre está sometido a la presión centrífuga, que la deprime hasta alcanzar los niveles previstos por Sainflou, sin perjuicio de que otras fuerzas no consideradas por éste nos prueban que el afloramiento sufre nuevas modificaciones.

La ola incidente que llega al dique con sus carac-

terísticas que pasa por $\frac{L}{2}$ y a la altura $\frac{L}{2}$. Las amplitudes de estos movimientos son las comprendidas entre las verticales en 0, 1, 2, 3, 4, 5 y 6, desviadas a 1', 2', 3', 4' y 5', y los recorridos de fondo son los 0,1', 1'2', 2'3', 3'4', 4'5' y 5'6', con los simétricos con segundo índice. En la figura se ve claramente cómo, así por ser los mayores recorridos como por no tener más que componente horizontal, el punto de máximo recorrido es el 3, y en contacto con el dique y en la distancia L , son los recorridos mínimos, y con la máxima componente vertical corresponde a

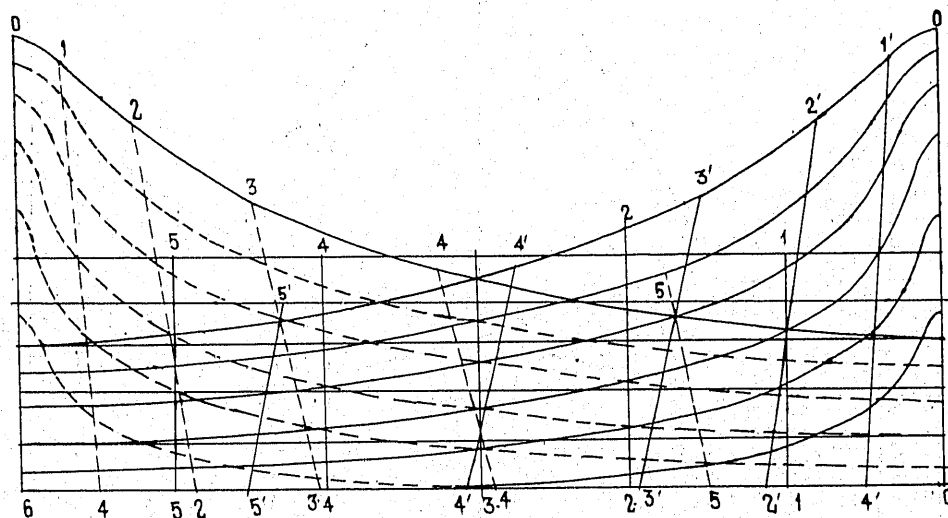


Fig. 6.ª — Chapoteo. Posición de las líneas de nivel y verticales.

terísticas oceánicas al avanzar la longitud, elevó su altura a $4/1$ con relación al seno, esto es, se duplicó; pero alcanzada su máxima altura, se ve obligada a retroceder, y al retroceder la magnitud L , se encuentra obligada a detenerse por la llegada de la ola siguiente, ya que en los múltiplos de L se verifica la interferencia y los recorridos son verticales. Por estas razones, la ola queda encajada en su semilongitud, si bien conserva la totalidad de su energía por haber duplicado su altura.

El movimiento del chapoteo, según se desprende de la observación de la figura representativa de los siete perfiles instantáneos correspondientes a los tiempos de cero a T , forma en realidad un balance de la superficie con un punto nodal a la distancia $\frac{L}{2}$ donde el nivel no sobrepasa el de reposo y en los instantes 0 y T alcanza la máxima depresión, descendiendo poco más de un metro. Las trayectorias de los puntos (fig. 5.ª) siguen, aproximadamente, arcos de círculo cuyo centro es el punto situado en la línea

los puntos 1 y 5 para llegar a ser totalmente vertical y con recorridos de 4 m. en 0,6 segundos (máximos), o sea 6,666 m./seg. en los instantes $T/2$ y en los múltiplos de L .

Correspondiente a la máxima velocidad y mínima sección (fig. 7.ª) en el traslado de la masa de aguas de 133,333 m.³, resulta un caudal medio de

$$\frac{133,333 \text{ m.}^3}{10 \times 3,5 \text{ seg.}} = 3,05 \text{ m.}^3/\text{s.}$$

En realidad, la masa que experimentó el movimiento pendular es $L \times H = 40 \times 10 \text{ m.}^3$, o sea 400 Tn., puesto que toda la semilongitud de la ola se ve precipitada alternativamente contra el dique y contra la otra semionda; pero hemos fijado la atención tan sólo en la parte más visible del movimiento. Si consideramos el movimiento total, tendremos (figura 8.ª) que el centro de gravedad, que en reposo ocupa la posición g_3 , se traslada hacia la derecha

ocupante, al fin de las instantáneas $T_0 - 1/6 T \dots$
 $\dots 5/6 - T$ las posiciones $g_0 \dots g_6$, con un recorrido
total de 8,60 m. y un peso de 400 Tn. en lugar de las
133,333 Tn. y recorrido de 26,666 m., cuyos pro-
ductos respectivos son:

$$26,666 \times 133,333 = 35477;$$

$$8,80 \times 400 = 35200.$$

de parte del agua en llenar huecos, aparece la disi-
pación de parte de la energía.

Dada la irregularidad de las olas y que éstas, en
la práctica, no son cilíndricas sino que están consti-
tuídas por cachones que apenas comienzan a orde-
narse; considerando que originariamente ataca al
dique la ola en su forma primitiva; no obstante, al
abordar al dique la ola tomará la forma de chapoteo

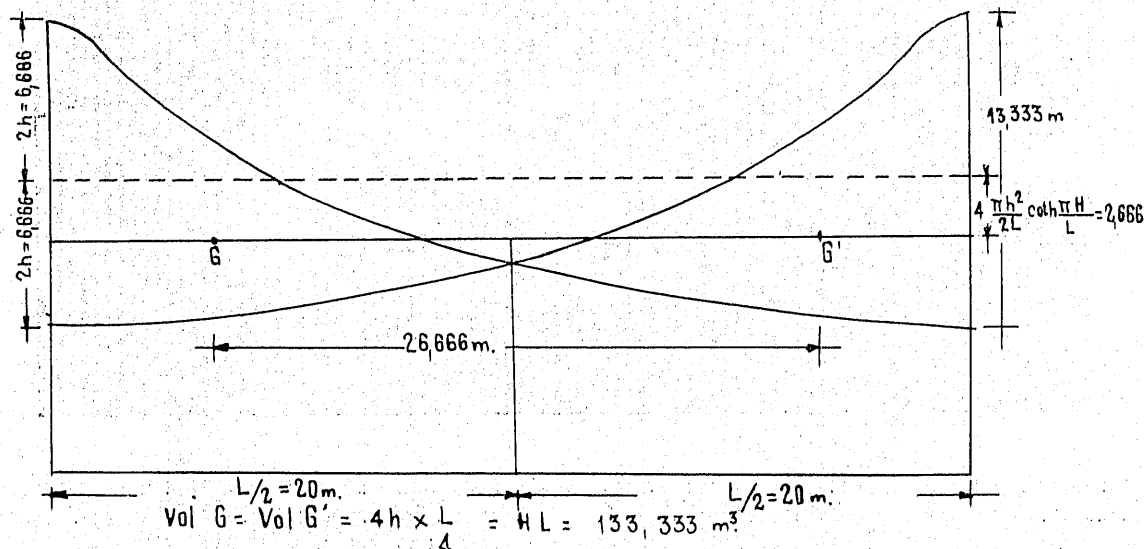


Fig. 7.ª — Chapoteo. Traslación de masas.

La reflexión de las olas en los planos en talud
es del todo análoga a la de los planos verticales.
La altura a que se eleva una masa de agua al chocar
con un obstáculo es independiente de que éste sea
vertical o inclinado, siempre que el obstáculo sea
impenetrable y poco rugoso. Sólo al admitir la pér-
dida de energía por rozamiento o por la penetración

y alcanzará en la hipótesis admitida de rugosidad
e impermeabilidad la misma cota de afloramiento,
esto es, la cota de 9,333 m.

El punto de contacto de la ola primitiva con el
dique estará al nivel del seno de la ola y la parte
delantera, cuyo centro de oscilación está a 0,666 m.
sobre el nivel de reposo (P.M.V.E.) y cuya cresta está

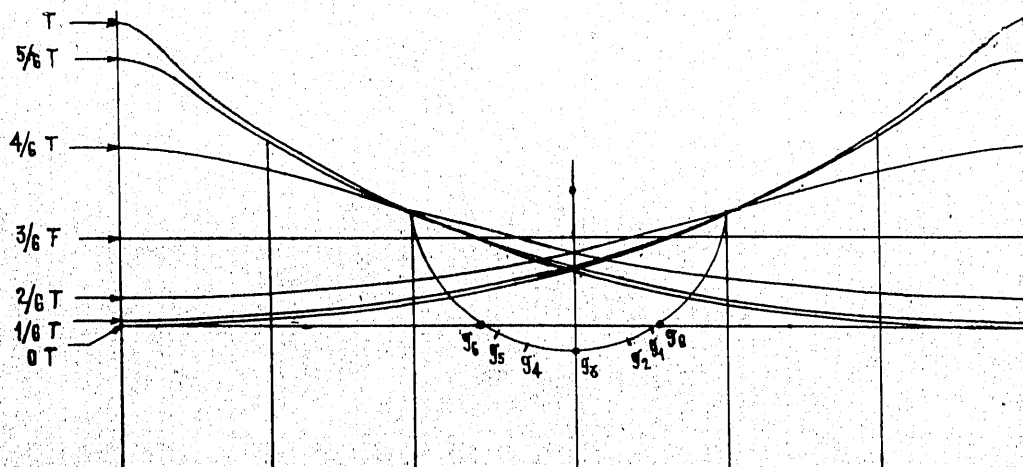


Fig. 8.ª — Desplazamiento del centro de gravedad.

a la cota de 4 m. sobre el mismo y tendrá el seno a la cota de -2,666 m.

Al avanzar la ola, la longitud L alcanzará, si el obstáculo es vertical, el nivel de afloramiento en A ,

formará la ola estacionaria, exactamente igual que si hubiera procedido de la reflexión en un dique vertical.

Todas las restantes consideraciones respecto a la



y el mismo cuando sea inclinado, porque en realidad lo alcanzan por nivel, así que el volumen total de la ola comprendida entre el plano de nivel del seno y la cresta será invariable.

En todo caso, siempre el movimiento molecular será igual al ya estudiado anteriormente en los diques verticales, esto es, en órbitas abiertas y parabólicas, si bien en este caso con la deformación oblicua. El movimiento de retroceso será inverso del de avance y al interferirse con la onda siguiente del oleaje se

propagación de la ola reflejada, nivel del afloramiento y corrientes transversales al oleaje, subsisten en todos los aspectos.

Si el dique es permeable y su superficie es áspera, las circunstancias varían; habrá que tener en cuenta, por una parte, que el volumen de la masa de agua que resbala sobre el paramento del dique en sentido ascendente o descendente, circula a través de los cantos llenando el espacio hueco, y por otra, hay una pérdida de energía por fricción; pero, de todos mo-



dos, la ola será finalmente rechazada, o sea, reflejada, a menos que sobrepase el nivel del agua o que lo demuela. Así, pues, la ola reflejada estará atenuada y, naturalmente, la onda estacionaria no será de interferencia, sino de composición de armónicas, de igual longitud y período pero de distinta altura.

* * *

La consecuencia fundamental que se deduce del método es que las olas no atacan a los diques normalmente a sus paramentos, sino por el contrario,



mientras que el del chapoteo está a

$$2h + \frac{4\pi h^2}{2L} \operatorname{cth} \frac{\pi H}{L} = 9,333 \text{ m,}$$

hay un desnivel siempre superior de 5,333 m., que al precipitarse hacia el interior produce un movimiento turbulento cuya velocidad llega a

$$\sqrt{116,6} = 10,70 \text{ m/s.,}$$

cuyo poder destructor es muy grande.

lamiendo sus superficies en todos los casos e infiltrándose en el cuerpo de las escolleras, con un movimiento aproximadamente paralelo al mismo que las pone en estado de emulsión con la masa de agua, elevándolas, para luego caer el conjunto animado del propio peso y del rechazo de la reflexión.

El dique está sometido a las siguientes fuerzas:

a) La subida por su paramento y a través de su cuerpo de una masa de agua cuyo volumen máximo es, aproximadamente:

$$\frac{1}{2} 4h \times \frac{L}{2} = \frac{L}{2} \times 2h = Lh = 3,333 \times 40 = 133,333 \text{ m.}^3$$

b) Al retroceso y descenso de la misma, que por alcanzar un nivel no ya superior al de reposo sino aun al de la cresta de la ola, determina una fuerte corriente transversal.

c) En el extremo del dique se produce una fuerte corriente hacia el interior del puerto, debido al alto nivel de afloramiento con relación al nivel de reposo:

Los desniveles producidos serán los siguientes:

Como la cresta de la ola frente a la boca está a la

$$\frac{h}{2} + \frac{h^2}{2L} \operatorname{cth} \frac{\pi H}{L} = 3,333 + 0,666 = 4,000 \text{ m,}$$

Estas causas explican la avería normal de los diques de escollera en construcción. La ola ataca el avance de la obra y proyecta las escolleras hacia adelante, en el primer momento, y hacia el interior del puerto contorneando el morro provisional y en sentido opuesto al oleaje, cuando hay partes más firmes desprovistas de escollera. En todo este proceso, la escollera se desclasifica, cayendo al fondo con menos desplazamiento la más pesada y esparciéndose hacia el interior los núcleos.

En cuanto a los morros, es evidente que debe evitarse:

1.º Un morro bajo, que las olas monten su coronación, la cual no debe estar más baja que el afloramiento máximo.

2.º La ola, al desprenderse del dique, debe estar apartada del chapoteo, esto es, debe estar en la parte en que la ola reflejada está ya expansionada.

3.º Es conveniente que el extremo del dique forme un ángulo de un radián con la dirección de las olas, lo cual se evitará mediante un tramo curvo de amplio radio, para que la circulación transversal se produzca en una larga zona y pierda su pendiente.

Como consecuencia de lo expuesto, llegamos a la

conclusión de que el único método que tiene verdadero rigor científico es el de Benezit, si bien es preciso completarlo. Es cierto que el tiempo, y en consecuencia la velocidad y fuerza viva, no se han con-

También es preciso tener en cuenta que el estado del mar ante el dique es el referido de interferencia o chapoteo con las expansiones a que haya lugar, así como que la expansión de la ola hacia el interior se

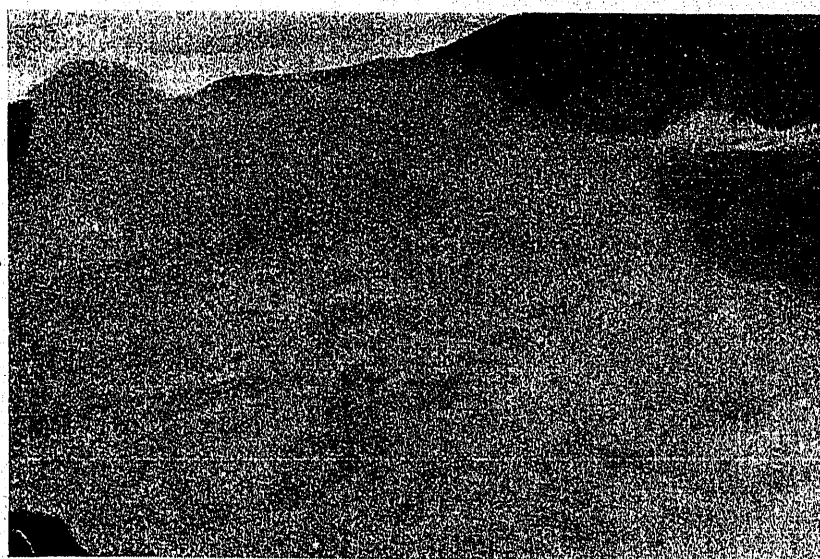


siderado, y sin embargo las hay; pero no pueden tener más manifestación que una proyección vertical de agua aumentando la altura de afloramiento.

Hay, evidentemente, una traslación pendular de una masa de agua que, en tiempo T , cambia de posición, con un recorrido aproximado de su centro de gravedad de $\frac{2}{3}L$ y un peso aproximado de $4h \times \frac{L}{4}$, que en el caso estudiado es de (por metro de dique) 133,333 Tm. en 3,5 segundos.

debe a una altura considerablemente mayor que el desnivel entre la cresta de la ola y el nivel de reposo, lo que sin duda se trata de paliar con los martillos que se aconsejan al extremo de los diques reflejantes.

Pero lo fundamental es el hecho, para nosotros indudable, según se manifiesta en las fotografías que acompañamos, de que las olas no atacan a las escolleras normalmente al talud, sino, según se ha dicho, paralelamente a él y, por lo tanto, la asimilación ha de buscarse en las teorías del chapoteo estudiando las



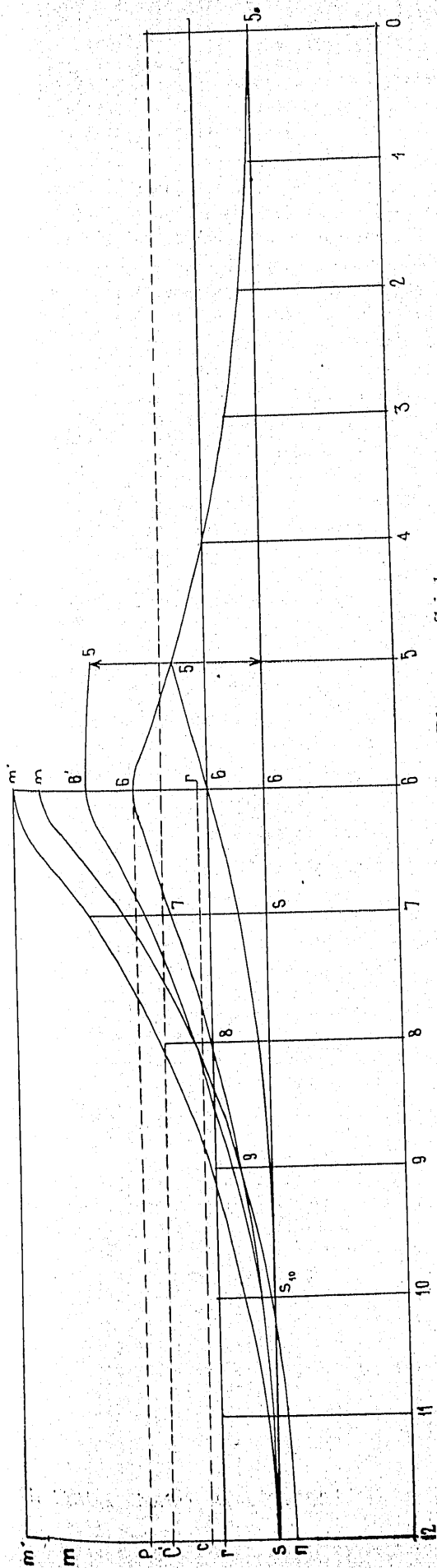


Fig. 9.ª — Composición de olas. Directa y reflejada.

Amplitud del chapoteo $m-n=13.333$ m.
 Elevación C-O ola $rc=0.666$.
 Depresión seno ola $rs=3.333-0.666=2.666$ m.
 Elevación C-D chap. $rc'=2.666$ m.

Depresión sen. chap. $rn=6.666-2.666=4.000$ m.
 Elevación de chapoteo $rm=6.666+2.666=9.333$ m.
 Elevación de reflejo $rm'=13.333-2.666=10.666$ m.
 Velocidad lineal $4m.p$ 0.6 seg. $=6.67$ m. p. s.

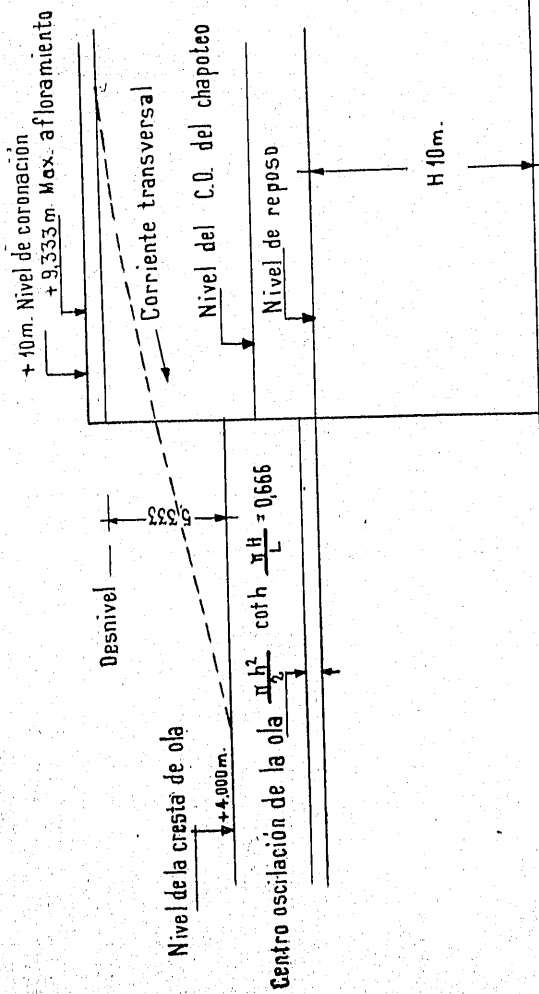


Fig. 10. — Niveles de afloramiento de la ola y chapoteo.

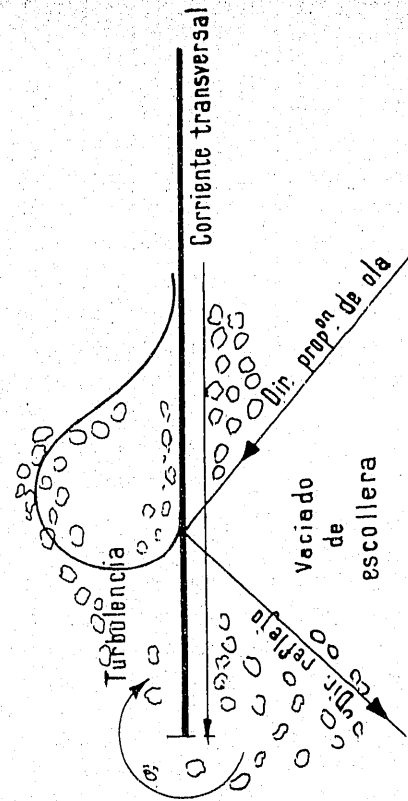


Fig. 11. — Avería más frecuente en los diques de escollera.

velocidades de penetración, elevación y descenso, por lo cual no se puede proponer una fórmula en tanto no se hagan pruebas de *permeabilidad* y capacidad de absorción de la energía para obtener las velocidades de reflexión y las alturas de afloramiento.

Con lo expuesto creemos haber evidenciado que los sistemas de cálculo adolecen de una subestimación de la altura de afloramiento de las olas al ser rechazadas por los diques (aun los de escollera), y que la sobreelevación de la ola producida por la obra misma se produce no por modificación de sus características, sino por interferencia.

Interesa, pues, ofrecer a las olas un volumen de escollera permeable suficiente para el rechazo y, en consecuencia, el fenómeno de la interferencia se produzca en el seno de la escollera misma y la masa de agua que se desplaza se aloje, por lo menos en una buena parte, en los huecos de ella, de modo que

los cantos no se hallen sometidos a circulaciones con velocidad suficiente para producir, ni al atacar ni al retirarse, el estado de flotabilidad que es la causa principal de su descomposición.

Los ensayos deben hacerse en el canal de producción de las olas para estudio del perfil del chapoteo y estabilidad de las escolleras en el cuerpo del dique, bajo ondas chapoteantes en las que predominan las traslaciones de fondo que nos darán idea de lo que pasa en la base del dique para ver la capacidad de elevación de los cantos y el perfil que adopte al descenso, así como la altura de afloramiento.

En estanque plano deben hacerse estudios de chapoteo ante el dique, reflexión, extinción del chapoteo, estabilidad de los morros y penetración del oleaje en el puerto; pero todo ello partiendo de la idea de las interferencias, ya que, fundando todo en la teoría trocoidal, no es posible dejar de tener en cuenta sus últimas consecuencias.

