• JUNTA DE INVESTIGACIONES TÉCNICAS •

OBRAS DE ABRIGO DE LOS PUERTOS

POR RAMÓN IRIBARREN CAVANILLES, INGENIERO DE CAMINOS

Se trata de un estudio completamente original y del mayor interés científico y técnico, que permite conocer la propagación y avance de un oleaje de características conocidas, teniendo en cuenta cómo lo modifican las profundidades y la configuración de las costas, así como las obras construídas o que se supongan construídas con una determinada ubicación. Los gráficos y fórmulas que nos presenta el Sr. Iribarren nos llevan a la determinación, con una exactitud práctica y aceptable, del abrigo que puede producir en un puerto una obra proyectada.

Planos de oleaje.

El trazado en planta de las obras de abrigo de un puerto, constituye uno de los más delicados problemas que se pueden presentar al ingeniero proyectista de obras marítimas.

Cuando no se procede por simple intuición en la determinación de la forma y orientación en planta de las obras de abrigo que se proyectan, se acepta, generalmente, como máxima aproximación teórica posible, la brusca y absoluta delimitación de la zona abrigada, por líneas rectas tan arbitrarias en su forma rectilínea como en su orientación.

En la determinación de estas caprichosas líneas, límites de la zona abrigada, no se tienen para nada en cuenta fenómenos de tanta importancia como la propagación o expansión lateral de la onda cortada, en su avance, por el obstáculo constituído por la obra o por algún saliente de la costa, ni la desviación gradual de la dirección de avance de la ola, y, como consecuencia, la variación de la forma en planta de la misma, motivada por su propagación en profundidades distintas y variables.

Los ensayos en modelos reducidos constituyen un procedimiento más aceptable, pero no siempre se dispone de los medios necesarios para efectuarlos con la debida escrupolisidad y difícil precisión, dado lo reducido de la escala, y no se debe de olvidar que la dificultad de determinación y de la debida aplicación de la ley de escalas, en esas grandes reducciones y en las complejas circunstancias en que estos fenómenos se producen, hacen de delicada aplicación, en escala natural, a los resultados obtenidos en el modelo.

De todo esto se desprende la gran conveniencia de conseguir desarrollar un método práctico que permita resolver, aunque no sea más que con cierta aproximación, los problemas planteados.

Sinceramente estimamos que, una vez debidamente precisado, el método que vamos a exponer y que pudiéramos denominar de los planos de oleaje, puede ser suficientemente aproximado para la mayoría de las aplicaciones prácticas.

Este método consiste, simplemente, en determinar la forma de propagación de un oleaje, de características y orientación conocidas en alta mar, al avanzar hasta una costa determinada, en la que se conocen sus profundidades o curvas batimétricas, y la forma y orientación de la costa natural, así como de las obras de abrigo ejecutadas o que se puedan suponer construídas.

Para ello, basémonos en la teoría trocoidal, hoy generalmente admitida, y que, debidamente aplicada, explica satisfactoriamente los fenómenos observados.

Recordando esta teoría, sabemos que las órbitas de las moléculas líquidas, agitadas por el oleaje, son círculos, siempre que aquél se propague en profundidades indefinidas. Aunque, teóricamente, es preciso que esta profundidad H sea infinita para poderla considerar como indefinida, prácticamente basta con que sea igual o superior a la semilongitud de la ola, para que las condiciones de propagación de la misma puedan considerarse como análogas a las de la ola, de iguales características, propagándose en profundidades mayores.

La simple observación de las curvas de la figura 1, en relación con sus asíntotas, justifican esta aproximación práctica, que puede concretarse diciendo que la ola, que se propaga en profundidades decrecientes, llega a tocar, prácticamente, el fondo, y comienza, por lo tanto, a deformarse y a modificar sus condiciones de propagación cuando la profundidad H del mar es igual o menor que la semilongitud de la ola originaria L_0.

En lo que sigue, supondremos conocidas, mediante observaciones directas, la altura $2\,h_0$ y la longitud $2\,L_0$, de la máxima ola posible en alta mar o mar profundo, para el cual $H \geqslant L_0$, y que, en una determinada dirección, aborda a la plataforma costera sobre la que proyectamos construir la obra.

Si esto no fuese así, podemos determinar, aproximadamente, las máximas características posibles de esa ola, mediante las expresiones $2\,h_0 = 1{,}2\sqrt[4]{F}$ y $2\,L_0 = 3{,}5\ (2\,h_0)^2$, en las que, si expresamos el *fetch*, línea de agua o largo F, correspondiente a la dirección considerada, en kilómetros, obtenemos la altura y la longitud de la máxima ola posible, en metros.

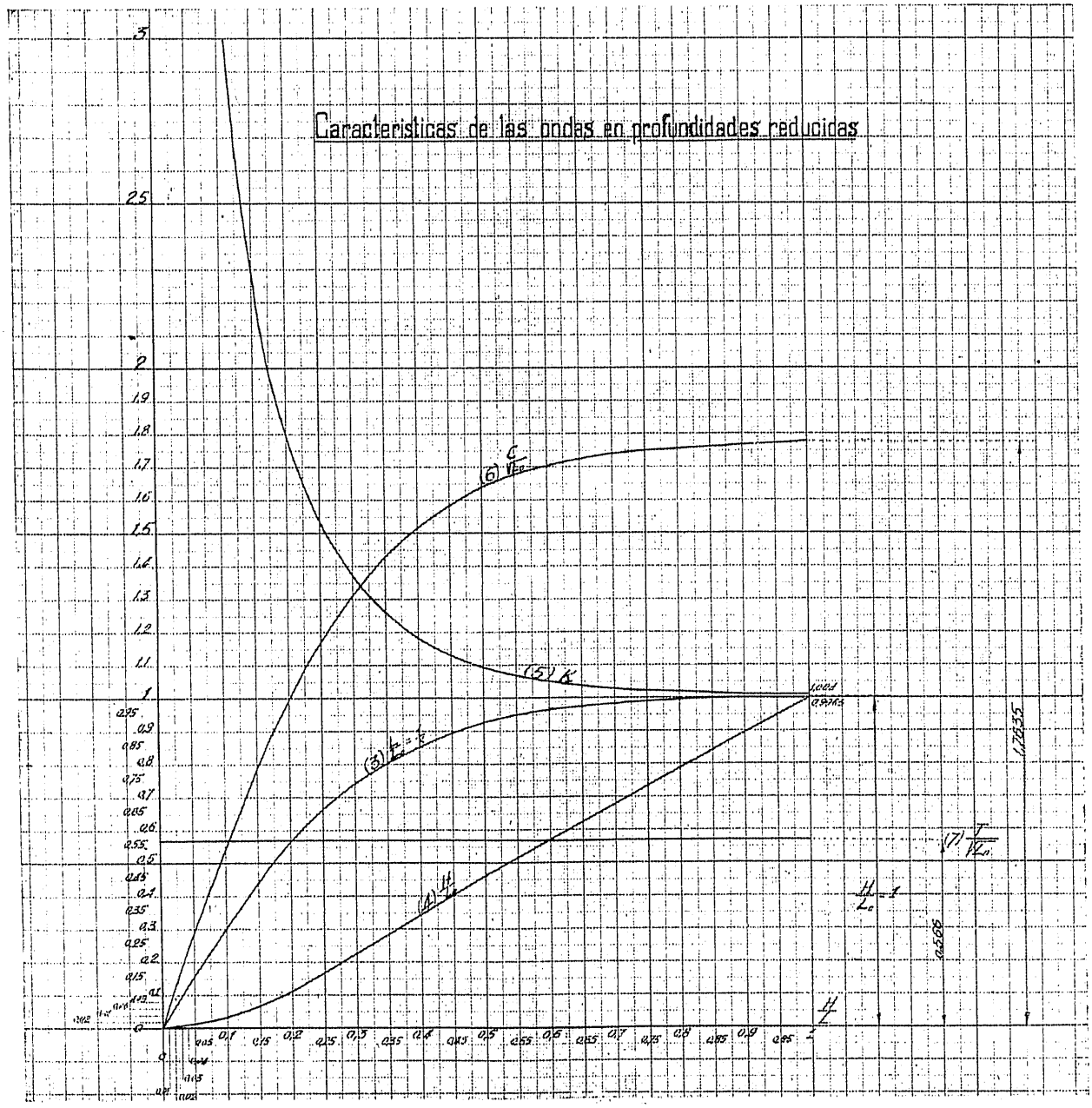


Figura 1.

La justificación y, posiblemente, al afino de esas expresiones, probablemente ya suficientemente aproximadas, aunque lógicamente implican cierto margen de seguridad, serán motivo de otro estudio que se publicará cuando sea posible recopilar mayor número de datos, realmente dignos de crédito y exentos de las exageraciones tan frecuentes en estas materias, motivadas por el imponente aspecto del fenómeno para el sobrecogido navegante expuesto a su acción, o por la subconsciente exageración del ingeniero que trata de justificar una avería.

Conocemos, pues, cuando menos aproximadamente, las características de la máxima ola posible que se propaga en mar profundo, $H \leqq L_0$, o sea su altura $2\,h_0$, su longitud $2\,L_0$, su celeridad $C_0 = \sqrt{\frac{g}{\pi}\,\frac{L_0}{K_0}}$ su período $2\,T_0 = 2\sqrt{\frac{\pi}{g}\,L_0\,K_0}$ y la relación de los semiejes orbitarios superficiales $K_0 = \cot\, h\,\frac{\pi\,H}{L_0}$ que, por aproximarse mucho en estas grandes profundidades a la unidad, nos vuelve a comprobar que si $H \leqq L_0$, estas órbitas son prácticamente circulares, y es lícito simplificar las expresiones anteriores, haciendo $K_0 = 1$.

Podemos ahora determinar las características de esa ola $2h$, $2L$, C, $2T$ y K cuando se propague, en su avance sobre la plataforma costera, en una profundidad H conocida y menor que L_0, para lo que empezaremos por indicar que $T = T_0$, ó sea $\sqrt{\frac{\pi}{g} L K} = \sqrt{\frac{\pi}{g} L_0}$, lo que equivale a admitir que, una vez establecido el temporal, pasan, como es lógico, el mismo número de olas, durante un tiempo determinado, por el extremo de la plataforma costera, o por un punto cualquiera de la misma; con lo que obtenemos la ecuación $L K = L_0$ que, junto con $K = \cot h \frac{\pi H}{L}$, nos permite determinar los valores de L y K, puesto que L_0 y H son conocidos.

La expresión de la teoría trocoidal $C = \sqrt{\frac{g}{\pi} \frac{L}{K}}$ nos permite también determinar la celeridad correspondiente a esta profundidad reducida H.

Para mayor facilidad, se ha calculado el cuadro siguiente, en el que se determinan las características L, H, K, C y T, correspondientes a profundidades reducidas $H \leqq L_0$, en función de la relación $\frac{H}{L}$ y de la semilongitud originaria L_0:

Características de las ondas en profundidades reducidas.

(1)	(2)	(3)	(4) = (1) × (3)	(5) = $\frac{1}{(3)}$	(6) = (3) $\sqrt{\frac{g}{\pi}}$	(7) = $\sqrt{\frac{\pi}{g}}$
$\frac{H}{L}$	$\frac{\pi H}{L}$	$\frac{L}{L_0} = \frac{1}{K} = \text{tgh} \frac{\pi H}{L}$	$\frac{H}{L_0} = \frac{H}{L} \cdot \frac{L}{L_0}$	$K = \text{cotgh} \frac{\pi H}{L}$	$\frac{C}{\sqrt{L_0}} = \frac{\sqrt{\frac{g}{\pi}}}{K}$	$\frac{T}{\sqrt{L_0}} = \sqrt{\frac{\pi}{g}}$
						0,566
1	3,14	0,996	0,996	1,004	1,764	
0,95	2,98	0,995	0,945	1,005	1,761	
0,90	2,83	0,993	0,894	1,007	1,758	
0,85	2,67	0,989	0,841	1,011	1,750	
0,80	2,51	0,987	0,789	1,013	1,747	
0,75	2,36	0,982	0,737	1,018	1,738	
0,70	2,20	0,976	0,683	1,023	1,727	
0,65	2,04	0,967	0,632	1,034	1,711	
0,60	1,88	0,955	0,573	1,047	1,690	
0,55	1,73	0,939	0,517	1,065	1,662	
0,50	1,57	0,917	0,459	1,091	1,623	
0,45	1,41	0,888	0,399	1,126	1,571	
0,40	1,26	0,851	0,340	1,175	1,506	
0,35	1,10	0,801	0,280	1,250	1,417	
0,30	0,94	0,735	0,221	1,361	1,301	
0,25	0,79	0,658	0,165	1,520	1,165	
0,20	0,63	0,558	0,112	1,792	0,989	
0,15	0,47	0,438	0,066	2,283	0,776	
0,10	0,31	0,300	0,030	3,333	0,532	
0,05	0,16	0,159	0,008	6,289	0,281	
0,04	0,126	0,125	0,005	8,000	0,222	
0,03	0,094	0,094	0,003	10,661	0,166	
0,02	0,063	0,063	0,001	15,898	0,111	
0,01	0,031	0,031	0,000	32,258	0,055	
0,00	0,000	0,000	0,000	∞	0,000	
Justificaciones. . . .		$L_0 = L K$			$C = \sqrt{\frac{g}{\pi} \frac{L}{K}} = \sqrt{\frac{g}{\pi} \frac{L_0}{K^2}}$	$T = \sqrt{\frac{\pi}{g} L K} = \sqrt{\frac{\pi}{g} L_0}$

De este cuadro se deducen, tomando como abscisas los valores de $\frac{H}{L}$ y como ordenadas, los valores correspondientes a cada columna, las curvas correspondientes a cada característica, dibujadas en la figura 1, y cuya aplicación práctica no puede ser más sencilla.

Conocida la semilongitud originaria L_0 y la profundidad H, correspondiente al punto considerado en la plataforma costera, conocemos la relación $\frac{H}{L_0}$, con la que entramos en el eje de ordenadas y determinamos el punto correspondiente de la curva (4). La ordenada que pasa por ese punto nos determina, en cada curva y en función de L_0, las demás características de la onda, correspondientes a esa profundidad reducida H de propagación.

No es necesario hacer la salvedad de que los movimientos orbitarios elípticos y demás aspectos del fenómeno, supuestos en la teoría trocoidal referente a profundidades reducidas, no son más que aproximados cuando la profundidad es variable; pero los

resultados obtenidos mediante la primera aproximación, que puede suponer la juiciosa aplicación de esta teoría, son muy aceptables para las necesidades prácticas, siempre que se deduzcan e interpreten debidamente.

Respecto a la utópica exactitud de los resultados obtenidos en la mayoría de los problemas ingenieriles, se debe hacer resaltar que, aun en las obras terrestres, en las que está demasiada generalizada la creencia de que lo sabemos todo, el grado de aproximación obtenido no es, frecuentemente, superior al que puede alcanzarse mediante la racional aplicación de los métodos que preconizamos para las obras marítimas.

Los defensores de los simples, pero demasiado frecuentemente catastróficos procedimientos, que pudiéramos denominar intuitivos o de ilusoria comparación, generalmente empleados para la redacción de los proyectos de obras marítimas, se resisten tenazmente a la aplicación de otros métodos cualesquiera, por tacharlos de poco aproximados. Si esto fuese así, ¿es justo que en las obras terrestres, en las que con excesiva frecuencia, repetimos, se estima que lo conocemos todo, empleemos amplios coeficientes de seguridad, y se pretenda, en cambio, aplicar los métodos propuestos para las obras marítimas, en las que, quizá demasiado cómodamente, se asegura que no se sabe nada, sin adoptar ningún margen de seguridad?

Sinceramente, estimamos que, con coeficientes de seguridad menores que los empleados en numerosas obras terrestres, pueden considerarse como seguros los resultados obtenidos por los métodos que proponemos para las marítimas, y que aún hemos de afinar mejor, mediante ulteriores estudios y detenidas observaciones.

Un aspecto que conviene aclarar es el de la profundidad H, que hemos de aplicar en las fórmulas o en las curvas, para determinar las características aproximadas de las olas que se propagan en profundidades variables.

Es indudable que en los admirablemente ordenados movimientos orbitarios de las moléculas líquidas, originados por el paso de la ola, no pueden producirse, más que en casos extremos, bruscas discontinuidades, en sus suaves gradaciones que, en cumplimiento de la ley del mínimo trabajo, tienden a disminuir los deslizamientos de unas moléculas con respecto a sus contiguas.

Esto se traduce, prácticamente, en cierta rigidez de forma de la ola, que hace que, si en la pendiente o forma del fondo hay discontinuidades, la ola que avanza no se adapte, instantáneamente y en cada punto, a la profundidad que a él estrictamente le corresponde, sino que se amolda a la profundidad media de una zona, de cierta extensión, que comprende al punto considerado.

¿Qué amplitud corresponde prácticamente y con suficiente aproximación a esa zona? Como parece desprenderse lógicamente de lo expuesto anteriormente, en particular de la profundidad L, que prácticamente afecta al movimiento orbitario, así como de la estructura de las fórmulas obtenidas mediante la aplicación de la teoría trocoidal y de las ecuaciones de la propia trocoide, en las que también puede considerarse que su semiunidad de longitudes es precisamente esa semilongitud de ola L, y como además parece confirmarse por varios resultados experimentales, tales como los de Harris, resulta razonable admitir, en primera aproximación práctica, que la longitud que afecta, prácticamente y en ambas direcciones, tanto en el sentido longitudinal de propagación de la onda como en el transversal, a las características de la misma, correspondientes a un cierto punto, es la referida semilongitud de la onda L.

Como parece lógico, y la observación tiende a confirmar, la celeridad y las demás características de la onda disimétrica, respecto a la vertical que pasa por su cresta, dependen más de su semilongitud anterior que de la posterior. Esta disimetría de la onda deformada en profundidades muy reducidas, e interesante bajo otros aspectos, apenas tiene interés práctico en el presente estudio, más que en algún caso extremo.

Constituímos así el que pudiéramos denominar cuadrilátero de avance del punto considerado, que luego detallaremos.

Aunque, si como parece poco probable, ese supuesto no fuese suficientemente aproximado, bastaría con que los resultados obtenidos fuesen, como es lógico que sean, sensiblemente proporcionales a los reales, para que fuesen aceptables para la finalidad propuesta.

Además, en el caso general, en el que la pendiente del fondo, sobre el que la ola avanza, es prácticamente uniforme, todo esto pierde interés; pues basta tomar como profundidad H la correspondiente al punto considerado, y sólo es preciso recurrir a determinar la profundidad media del cuadrilátero de avance, cuando haya dentro de él discontinuidades de alguna importancia, como puede suceder en las costas rocosas y en las proximidades de las obras.

Con todo lo expuesto, tenemos lo necesario para determinar la forma de avance, sobre la plataforma costera, de un temporal de dirección y longitud de onda conocidos, en alta mar.

Sea la recta $M\,N$ (fig. 2) la cresta de la ola que avanza en dirección normal a ella misma, hacia

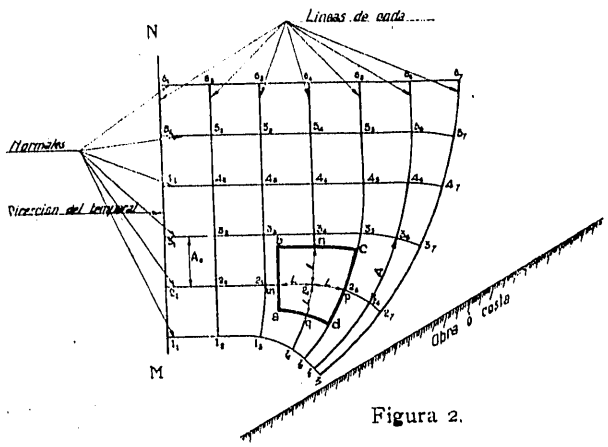


Figura 2.

la costa, y que todavía se propaga en profundidades mayores que su semilongitud L_0, anteriormente determinada.

Al cabo del semiperíodo T_0, cada punto 1_1, 2_1, 3_1, 4_1, 5_1, etc., distantes entre sí un ancho arbitrario A_0, que puede muy bien ser igual a L_0, habrán pasado a la posición 1_2, 2_2, 3_2, 4_2, 5_2 y constituirán una recta, paralela a la anterior, por haber avanzado todos ellos una semilongitud de onda $L = L_0$ en dirección normal a $A\,B$. Por conveniencias de escala puede tomarse, en lugar de L_0, un múltiplo suyo, aunque la aproximación obtenida, posteriormente, sea menor.

Así continuarán las cosas, en sucesivos avances iguales y rectilíneos, hasta que una parte de la onda, supongamos la de la parte inferior de la figura, encuentre, en su avance, profundidades menores que L_0.

A cada punto de esta zona, o en casos de fondos discontinuos a su cuadrilátero de avance, le corresponderá una profundidad H, menor que L_0. Determinada esta profundidad H, conocemos la relación $\frac{H}{L_0}$, con la que entramos en el eje de ordenadas de la figura 1, y determinamos el punto correspondiente de la curva (4), cuya ordenada nos determina, en las demás curvas, las características de la onda que se propaga en la profundidad H, y obtenemos así, en la curva (3), la relación $\frac{L}{L_0}$, ó sea el valor de L ó del avance buscado, correspondiente al semiperíodo, o a su múltiplo, y al punto considerado.

En algunos casos especiales, en los que se desee afinar más, se puede tomar como valor de L, o de su múltiplo, fijado por conveniencias de escala, la media de los valores correspondientes al origen y al final del avance buscado, para lo que puede procederse por tanteos, en forma similar a la que luego se indica para el cuadrilátero de avance.

En lugar de las curvas de la figura 1, puede también utilizarse, quizás más cómodamente, el cuadro del que se han deducido, determinándose, en cada caso particular, dos columnas más: una, de profundidades H, ó sean los valores de la columna (4), multiplicados por la L_0, correspondiente, y otra, de los avances respectivos, o sean los de la columna (3), multiplicados por la longitud representativa de L_0, ó de su múltiplo adoptado, a la escala del plano.

Para determinar, en caso necesario y con la suficiente aproximación, el cuadrilátero de avance, por ejemplo, el correspondiente al punto 2_4, constituído por dos tramos de líneas de onda $a\,b$ y $c\,d$ y sus normales correspondientes $b\,c$ y $a\,d$, hay que proceder por tanteos, presuponiendo la semilongitud L del avance buscado, que es la que sirve, en la forma indicada en la figura 2, para la construcción del citado cuadrilátero, y comprobando, como se acaba de explicar, si realmente coincide o se aproxima suficientemente a la supuesta. Con alguna práctica, basta generalmente el primer tanteo para obtener la suficiente aproximación, pues, como textualmente decía nuestro inolvidable profesor D. Eugenio Ribera, refiriéndose, con su gran sentido práctico, a la mayoría de los problemas ingenieriles: "De nada sirve aproximar los cálculos hasta las milésimas si las hipótesis no lo están en las décimas". En muchos de los casos que se puedan presentar, basta tomar como profundidad media del cuadrilátero $a\,b\,c\,d$ la media aritmética de las profundidades correspondientes a los puntos m, n, p y q.

Tanto para los tanteos indicados anteriormente como para otros muchos cálculos ingenieriles aproximados, en los que hay que efectuar numerosas operaciones, conviene recordar que la aproximación obtenida con la regla de cálculo es suficiente.

Las líneas de onda, o sean las posiciones sucesivas de sus crestas o senos, serán las curvas que resulten de la unión de los puntos correspondientes; por ejemplo, 1_4, 2_4, 3_4, 4_4, etc., y las normales pueden estar constituídas por tramos rectos, trazados cuidadosamente normales a la línea de onda anterior. Así, la 2_4, 2_5 podrá ser una recta normal en 2_4 a la curva 1_4, 2_4, 3_4, etc.

En el caso en que el cuadrilátero de avance quede cortado por la costa o por alguna obra, como en el punto P, de la figura 3, puede admitirse que sólo hay que considerar, para la determinación de la profundidad media de propagación de la onda, a la parte mojada del citado cuadrilátero, o sea la a, b, n, m, que es la que únicamente puede influir en las características de la onda, en lugar de la total a, b, c, d, pues los movimientos orbitarios sólo pueden afectar a dicha parte mojada.

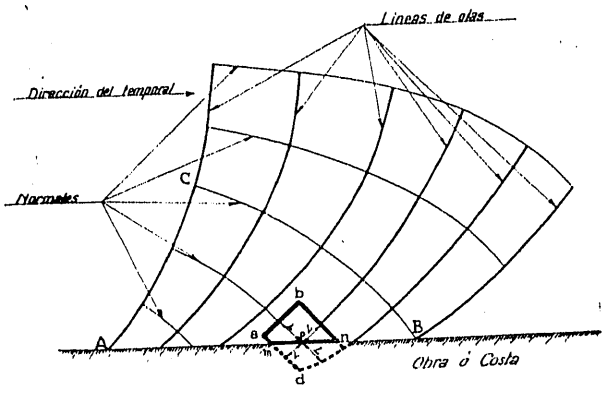


Figura 3.

Cabe determinar mejor esta profundidad media, en el caso de reflexión de la onda, teniendo en cuenta, tanto la parte mojada del cuadrilátero de avance de la onda incidente como la parte correspondiente del de la reflejada.

Con lo expuesto, tenemos cuanto se necesita para determinar con suficiente aproximación la forma de avance, en planta, de la ola, pues podemos dibujar sus posiciones sucesivas, que hemos denominado líneas de ondas, así como sus normales, y sólo nos falta conocer la altura de la ola, en cualquier punto, para tener resuelto el problema que nos hemos planteado.

Para ello, sabemos que la energía correspondiente

a la anchura A_0 (fig. 2), de la onda originaria, en mar profundo, y comprendida en la longitud de la ola, vale $E_0 = A_0\ \rho\ g\ L_0\ h_0^2$, en la que ρ es la densidad del líquido, g es la aceleración de la gravedad y h_0 y L_0 la semialtura y la semilongitud determinadas al principio de este estudio.

Expresión análoga de la energía $E = A\ \rho\ g\ L\ h^2$ puede emplearse en profundidades reducidas, siempre que la ola esté lejos de su rotura.

Si la energía E_0 se conservase en el avance de la onda, los acortamientos de L_0, que se reducen a la L correspondiente al punto considerado, implicarían un aumento de h_0, que se transformaría en la h correspondiente.

Aunque todavía no disponemos del número de datos necesarios para precisarlo, podemos admitir que el consumo de energía causado por el avance de la onda, compensa, aproximadamente, ese aumento de la semialtura h, producido por el acortamiento de la semilongitud L en las pendientes, frecuentes en las plataformas costeras, que se aproximan al 1 por 100 y siempre que la ola no esté próxima a su rotura..

Si bien pendientes más fuertes pueden aumentar algo esas alturas y pendientes más suaves pueden disminuirlas sensiblemente, y en forma que se precisará cuando sea posible recopilar los datos necesarios, mucha mayor importancia tiene, en relación con la variación de altura de propagación de la onda, su expansión, en sentido transversal a su avance y que puede determinarse por la divergencia de las líneas normales, antes precisadas. A esta expansión la denominaremos frontal, para distinguirla de la lateral, de la que luego nos ocuparemos.

Si, por ejemplo, en la figura 2, la anchura originaria A_0 de la posición inicial 1_1, 2_1, 3_1, 4_1, etc., se transforma, por expansión frontal, en la anchura A comprendida entre 2_6 y 3_6 y admitimos la conservación de la altura, compensada sensiblemente, por las dos causas opuestas que acabamos de exponer, obtenemos la altura aproximada correspondiente a este tramo, mediante la sencilla expresión $A_0\ h_0^2 = A\ h^2$,

o sea $h = h_0 \sqrt{\frac{A_0}{A}}$.

En efecto: si no hubiese expansión del tramo de onda 2_1, 3_1, en su avance hasta 2_6 3_6 y se verifica la compensación de alturas indicada, la energía del tramo, correspondiente a la longitud de la onda o a su período $2\ T = 2\ T_0$ y situada en la zona 2_6 3_6, sería $E = A_0\ \rho\ g\ L\ h_0^2$. La expansión hace que esa energía se reparta en la Anchura A, luego $E = A_0\ \rho\ g\ L\ h_0^2 = A\ \rho\ g\ L\ h^2$, de donde se deduce la expresión aproximada antes indicada.

Por este procedimiento, podemos obtener, aproximadamente, repetimos, todas y cada una de las alturas medias correspondientes a los tramos en que las líneas de ondas son divididas por sus normales y nos es dado dibujar la sección vertical, a lo largo de las crestas de las olas, representando, en la forma escalonada indicada en la figura 2′ las semialturas medias correspondientes a cada tramo.

Esta figura 2′ se refiere a la línea de onda 1_5 6_5 de la figura 2, en la que, en el tramo 6_5 3_5 se conserva la semialtura h de onda, por no haber expansión apreciable. En los tramos 3_5, 2_5 y 2_5, 1_5 hay disminución de altura, que puede determinarse en la forma expuesta, y que es consecuencia de la divergencia de las normales, que limitan estos tramos.

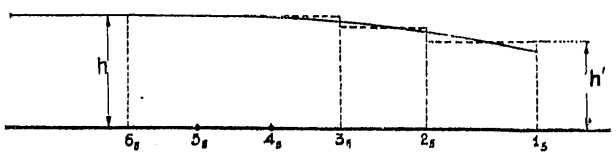


Figura 2′.

Como segunda aproximación, podemos pasar de la representación escalonada de alturas a la continua en la forma indicada en la figura 2′. Pueden obtenerse cuantos puntos se deseen de esta curva subdividiendo, en el plano de oleaje, cada tramo en las partes necesarias y trazando las normales correspondientes.

Visto todo esto, vamos a ocuparnos ahora de dos casos particulares interesantes.

En primer lugar, cuando la ondulación avanza, en dirección convergente, hasta una costa u obra, como en la figura 3, no hay más aclaración, en el método general expuesto, que hacer notar que no es el punto A, de la primera posición de la onda dibujada, el que corre hasta B, sino que es el punto C de la onda el que, en su avance, viene a parar a B.

En el caso contrario, que denominaremos de expansión lateral, para distinguirlo de la expansión frontal anteriormente estudiada, o sea cuando la ondulación avanza en sentido divergente de la obra o costa, tendiendo a separarse de ella, como sucede en la figura 4, a partir del punto B, la ola, cortada precisamente en B por el obstáculo, avanza, ateniéndose a las normas que hemos explicado, según la línea normal $B\ B_1\ B_2\ B_3$, etc., expansionándose, al faltarle apoyo, en el extremo cortado, hacia $B'\ B''\ B'''$, etcétera, a costa de la energía cedida, por la que podemos denominar zona de alimentación, que se extiende hacia $A\ A'_1\ A''_2\ A'''_3$, etc.

En este caso, los puntos $B'\ B''\ B'''$, etc., que conviene situar cuidadosamente para orientar la forma de la onda de expansión, son puntos sucesivos aproximados del avance de la onda, aunque, como luego veremos, no sean, en algunos casos, más que puntos hipotéticos, por no llegar algunas veces la onda, en su expansión lateral, hasta la parte que pudiéramos llamar interna, del obstáculo constituído por el dique o por la costa.

Para hacernos una idea de las condiciones aproximadas en que el fenómeno se desenvuelve, vamos a observarlo con cierto detenimiento.

En la posición que pudiéramos denominar inicial, o sea cuando la cresta de la ola llega a coincidir, en su avance, con el extremo del obstáculo B, que es cuando dicha cresta ocupa la situación $M\ B$, el seno que la precede ocupará la posición $M_1\ B_1$, distante de

$M\,B$ la semilongitud L correspondiente a cada punto, que puede no ser igual en todos ellos, y del mismo modo, por haberse vertido radialmente y a partir de B el extremo cortado de la onda, la línea del seno $M_1\,B_1$ se prolongará en la forma $B_1\,B'$ cuyos puntos distan de B la semilongitud L_B correspondiente a esta zona que rodea al repetido punto B.

Si, como es frecuente en los morros de los diques, las profundidades medias radiales de esta primera zona de expansión $B\,B_1\,B'$ son aproximadamente iguales, la línea $B_1\,B'$ se aproximará al arco de circunferencia cuyo centro es B.

Un semiperíodo $T = T_0$ después, la cresta de la onda $M\,B$ vendrá a ocupar la posición $M_1\,B_1\,B'$, y posteriormente, sus puntos seguirán avanzando en la dirección normal correspondiente a cada uno de ellos y según las reglas explicadas anteriormente, tanto en la zona $M_1\,B_1$ como en la de expansión $B_1\,B'$.

Todo esto, así como lo que sigue, está fundamentado, principalmente, en que la celeridad de avance de estas ondas longitudinales $C = \sqrt{\frac{g}{\pi}\,\frac{L}{K}}$ es sólo función de la semilongitud L y de la profundidad media de propagación H, indicada anteriormente, y no de la altura $2\,h$ de la onda, y se fundamenta también en el supuesto aproximado, según el cual podemos admitir que las ondas, transversales al avance, o sea las que se propagan según la cresta de la onda, tienen también en cada punto una celeridad aproximada a la de la onda longitudinal que se propaga en la misma profundidad. Siendo así que los excesos de presión originados, a lo largo de la vertical que avanza con la cresta de la ola, por la onda cortada por el obstáculo disminuyen gradualmente de la superficie al fondo, es lógico que las velocidades moleculares transversales disminuyan también en forma similar, por lo que es más que probable que las características de estas ondas transversales, y entre ellas su celeridad, se aproximen a las de la onda de oscilación que las originan.

Aunque tenemos en estudio el precisar si es posible llegar a una mayor aproximación asimilando estas ondas transversales, de propagación y cesión de energía, a otro género de ondas o teniendo en cuenta el efecto giroscópico producido por la caída de la onda cortada, puede admitirse, como una primera aproximación aceptable, el supuesto indicado.

También es posible que, a partir de la posición inicial, en la que la onda de expansión afecta la forma sensiblemente circular, en planta, avance en direcciones radiales, expansionándose frontalmente. Las diferencias entre los resultados de esta hipótesis y los de la que a continuación exponemos son de muy pequeña importancia, pues aunque, según esto, la que luego denominaremos línea límite de la zona agitada, pudiese aproximarse algo más a la parte interior del dique u obstáculo, la agitación producida más allá de esa línea, determinada como a continuación se indica, sería de poquísima importancia.

Es probable que, generalmente, los fenómenos estudiados participen de expansión frontal y cesión lateral de energía, predominando uno u otro efecto, según los casos.

Tan pronto como nos sea posible disponer de ellos, utilizaremos los modelos reducidos para afinar juiciosamente desglosados, y no en su complejo conjunto, cada uno de los interesantes extremos a que nos referimos en este estudio.

¿De dónde procede la energía de la parte de la onda expansionada comprendida entre sus límites $B\,B_1$, B_2, B_3, etc., y $B\,B_1'$, B_1'', B_1''', etc., de la figura 4? Como hemos indicado, la formación de esta parte de la onda es debida, principalmente, al vertido lateral de la onda cortada que avanza a la izquierda del límite de la zona de expansión $B\,B_1$, B_2, B_3, etcétera, y, por lo tanto, es indudablemente esta zona la que proporciona la energía requerida por la onda

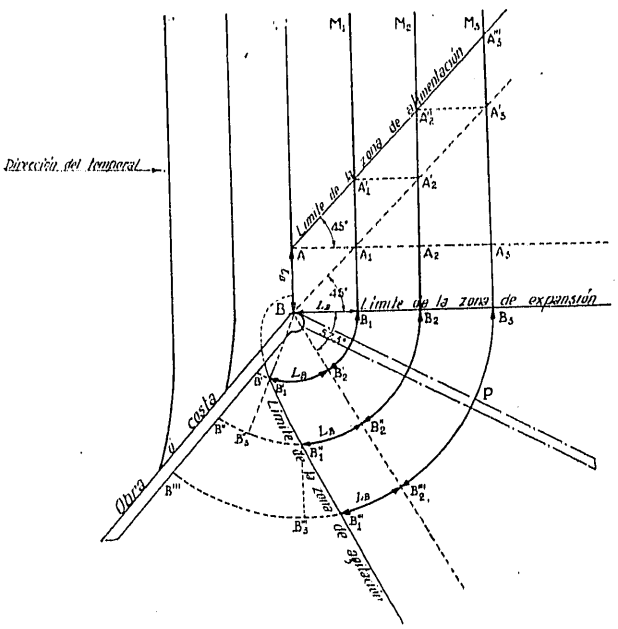


Figura 4.

creada, a sus expensas, a través del citado límite y situada a su derecha.

Ya en la posición inicial $M\,A\,B$ de la cresta de la onda, la formación de la onda expansionada, de longitud L , comprendida en B_1, $B\,B'$, implica una cesión o alimentación lateral de energía que, indudablemente, origina una disminución de altura en la zona próxima de B hacia $B\,M$.

Es más que probable que la creación, durante el semiperíodo $T = T_0$, de dicha semionda expansionada inicial $B\,B_1\,B'$ sea formada a expensas de una onda negativa que, durante ese mismo período, haya avanzado, de B hasta A, una longitud aproximada también a L_B, de acuerdo con la celeridad de avance transversal antes recordada.

Al avanzar posteriormente la cresta de la onda hasta las posiciones $M_1\,B_1\,B'$, $M_2\,B_2\,B''$, etc., el límite de la zona de alimentación, o sea de la zona en

que la onda pierde altura a causa de la expansión lateral, será la línea $A\,A'_1\,A''_2\,A'''_3$, etc., en la que $A_1\,A'_1$, $A'_2\,A''_2$, $A'_3\,A'''_3$, etc., serán, respectiva y aproximadamente, iguales a $A\,A_1$, $A'_1\,A'_2$, $A''_2\,A'_3$, etcétera. Solamente en el caso de que la profundidad sea constante, esa línea límite será la paralela $A\,A'''_3$ a la recta $B\,A'_3$, que forma el ángulo de 45° con $B\,B_3$ y distante de ella la semilongitud L_B, medida según las crestas de las olas.

La energía así cedida formará las ondas anteriormente definidas en planta $B_1\,B'_1$, $B_2\,B''_1$, $B_3\,B'''_1$, cuyas longitudes, según las líneas de ondas o de crestas, serán también, respectiva y aproximadamente, iguales a la semilongitud L_B, más los avances $B\,B_1$, $B\,B_2$, $B\,B_3$, etc. Si se desea más precisión, en lugar de sumar a L_B los avances citados, habrá que añadirle, respectivamente, los avances totalizados, correspondientes al extremo de la onda, o sea $B\,B'_1$, $B\,B'_1 + B'_1\,B''_2$, $B\,B'_1 + B'_1\,B''_2 + B''_1\,B'''_3$, etc. También, solamente en el caso de que las profundidades sean constantes, la línea $B'_1\,B'''_1$ se aproximará a la paralela a la recta $B\,B''_2$ que forma con $B\,B_3$ un ángulo igual al radian, o sea de 57,3° y distará de ella la semilongitud L_B, medida según las crestas de las olas.

Tenemos así determinadas, con cierta aproximación, las tres líneas límites que nos interesan.

La línea límite de la zona de expansión B, B_1, B_2, B_3, constituída por las normales, que conviene trazar cuidadosamente, en cada uno de esos puntos, a las líneas de onda $M\,B$, $M_1\,B_1$, $M_2\,B_2$, etc.

La línea límite de la zona de alimentación $A\,A'_1\,A''_2\,A'''_3$, etc., en la que, por ejemplo, $A'''_3\,B_3$ ha de ser igual a $L_B + A\,A_1 + A'_1\,A'_2 + A''_2\,A'_3$.

Y la línea límite de la zona de agitación $B'_1\,B''_1\,B'''_1$, etc., en la que, por ejemplo, $B_3\,B'''_1$ ha de ser igual a $L_B + B\,B'_1 + B'_1\,B''_2 + B''_1\,B'''_3$.

Solamente, repetimos, en el caso particular de que la profundidad sea constante, las tres líneas límites serán las rectas $A\,A'''_3$ y $B\,B_3$, indicadas en la figura 4, y la línea $B'_1\,B'''_1$, que se obtiene sumando, según las crestas, a los puntos correspondientes de la recta $B\,B'''_2$ el arco de círculo de longitud constante L_B, pero de radio variable.

En los casos corrientes, las líneas límites no diferirán mucho de estas tres líneas así determinadas.

Con esto tenemos cuanto se necesita para determinar la semialtura media correspondiente a cada posición de la onda, en la zona afectada por la expansión lateral, pues si, por ejemplo, nos interesa la posición $A'''_3\,B'''_1$ de la figura 4, obtenemos su semialtura h',

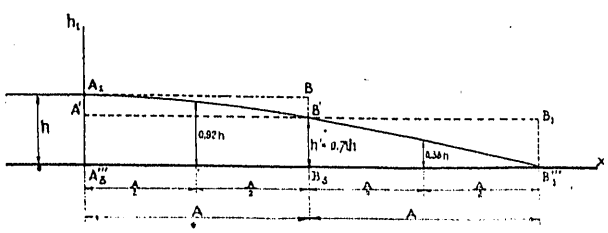


Figura 4'.

representada en la figura 4', mediante la sencilla expresión $h' = h\sqrt{\dfrac{A'''_3\,B_3}{A'''_3\,B'''_1}}$, en la que h es la semialtura media correspondiente a la zona de alimentación $A'''_3\,B_3$.

Es preciso pasar ahora de esta representación escalonada de alturas a la continua, más aproximada a la realidad.

En el caso general, similar al de la figura 4, en el que la línea interior de la obra o costa, causante de la expansión lateral, queda fuera de la línea límite de la zona agitada, la expansión es total.

En este caso general, y si, como es muy frecuente, las profundidades que las líneas de ondas van encontrando en su avance, no son muy distintas a lo largo de cada una de ellas, la energía representada por el rectángulo $A'''_3\,B_3\,B\,A_1$, de longitud $A = A'''_3\,B_3 = B_3\,B'''_1$, en la figura 4', se reparte en el rectángulo $A'''_3\,B'''_1\,B_1\,A'$, de doble longitud $2A = A'''_3\,B'''_1$, o con más aproximación a la realidad, en el cuarto de sinusoide, $A'''_3\,B'''_1\,B'\,A_1$, de la misma longitud $2A$ y que puede muy bien ser la representación continua de las semialturas de la ola expansionada, puesto que la energía representada en el citado rectángulo $A'''_3\,B_3\,B\,A_1$ es igual a la correspondiente a dicho cuarto de sinusoide $A'''_3\,B'''_1\,B'\,A_1$, de doble longitud.

En efecto: si $h_1 = h$ sen α representa la ley sinusoidal de variación de semialturas, correspondientes al citado cuarto de sinusoide, de longitud $2A$ en la figura 4', deberá de verificarse la proporción

$$\frac{x}{2A} = \frac{\alpha}{\frac{\pi}{2}}\,;\ \text{luego}\ \alpha = \frac{\pi x}{4A}\ y\ d\,x = \frac{4A}{\pi}\,d\,\alpha.$$

Como consecuencia de esto, tenemos

$$\int_0^{2A} h_1^2\,d\,x = \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} (h\ \text{sen}\ \alpha)^2\,d\,x = \frac{4A}{\pi}\,h^2 \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi}$$

$$\text{sen}^2\,\alpha\,d\,\alpha = \frac{4A}{\pi}\,h^2\left(-\frac{1}{4}\ \text{sen}\ 2\,\alpha + \frac{1}{2}\,\alpha\right)\Bigg|_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} = A\,h^2$$

luego la energía representada por el cuarto de sinusoide $\rho\,g\,L\displaystyle\int_0^{2A} h_1^2\,d\,x$ es equivalente a la correspondiente al rectángulo $\rho\,g\,L\,A\,h^2$. Este cuarto de sinusoide, cuyo máximo está en A_1, o sea en el punto correspondiente al límite de la zona de alimentación, pasa por B', o sea por el punto correspondiente al límite de la zona de expansión y situado en el rectángulo de la representación escalonada de alturas.

En casi todos los demás casos, incluso en el que por la orientación del dique, tal como la $B\,P$ de la figura 4, no se permita la expansión total del extremo de la onda, puede generalizarse, con suficiente aproximación, el método expuesto, trazando también, como representación continua de las semialturas, la sinusoide que, arrancando horizontalmente a la semialtura h, sobre el límite de la zona de alimentación,

pase por el punto análogo al B', determinado anteriormente y situado también sobre el límite de la zona de expansión, a la semialtura correspondiente a la representación escalonada de semialturas correspondiente a este caso. Basta para determinarlo, sustituir en la sencilla expresión indicada anteriormente, $A'''_3 P$ en lugar de $A'''_3 B'''_1$, con lo que resultará que $h' = h \sqrt{\frac{A'''_3 B_3}{A'''_3 P}}$, lo que nos permite situar el punto similar al B' que define a la sinusoide buscada.

A base de las ideas expuestas, el buen juicio del proyectista podrá resolver los diversos e innumerables casos particulares que se pudieran presentar y que sería absurdo pretender abarcar en un estudio general como el presente.

Tenemos, pues, resuelto con cierta aproximación, o cuando menos en vías de solución, el interesante problema planteado.

Antes de terminar, hemos de repetir, una vez más, que no estimamos haber llegado a soluciones exactas, ni mucho menos; pero sí creemos haber obtenido un grado de aproximación suficiente para la mayoría de los casos prácticos y similar al alcanzado en muchas de las soluciones adoptadas para la ingeniería terrestre.

Esperamos afinar más este método de los planos de oleaje, como consecuencia de los estudios teórico-prácticos emprendidos, y si, como hemos indicado, los ensayos en modelos reducidos son difícilmente aplicables para los complejos casos generales, los estimamos de inapreciable utilidad para conseguir afinar sencillos, pero interesantes e instructivos, casos particulares, juiciosamente desglosados, por lo que utilizaremos dichos modelos reducidos tan pronto como nos sea posible disponer de ellos.

Probablemente, serán también de gran utilidad las observaciones que en el mar real se puedan verificar, para utilizar las cuales y para cuanto pueda aportar alguna luz sobre estos interesantes temas, recabamos la cooperación de cuantos compañeros se interesen por ellos, no en el plan de espectaculares polémicas, generalmente infecundas por demasiado apasionadas, sino en el más modesto y eficaz, de franca y entusiasta colaboración, en la que tan interesantes son las observaciones que corroboran como las que tienden a modificar o afinar las ideas expuestas.

Aplicación al puerto de Palma.

Como primer caso de utilización práctica del método expuesto, lo hemos aplicado al proyecto de dique de abrigo del puerto de Palma de Mallorca.

Después de lo expuesto, basta con una somera explicación de los métodos seguidos, para determinar los tres planos de oleaje que se adjuntan.

Dada la orientación de la bahía de Palma, solamente puede estar expuesta a temporales cuya dirección puede variar del SO. al SE., por lo que hemos estudiado estos dos temporales extremos y su intermedio, o sea el S.

Aproximándose las líneas de agua correspondientes a esas tres direcciones, respectivamente, a 600, 300 y 400 km., las alturas máximas de ola originaria, obtenidas mediante la aplicación de la fórmula $2h_0 = 1{,}2 \sqrt[4]{F}$, se aproximarán a 5,93, 5,04 y 5,36 metros, respectivamente, y sus longitudes correlativas, obtenidas mediante la aplicación de la expresión $2L_0 = 3{,}5\ (2h_0)^2$ no diferirán mucho de 123, 89 y 100 metros.

Con estos datos aproximados, se ha comenzado por dibujar los planos de oleajes correspondientes, sobre la carta de la Comisión Hidrográfica, denominada Carta de la Isla de Mallorca, y sobre cada una de cuyas rectas representativas de la ola originaria, en alta mar, se han tomado, por conveniencia del dibujo, los puntos equidistantes situados a una separación $A_0 = 50\ L_0$, o sea 3 075, 2 225 y 1 750 metros, respectivamente.

Mediante avances sucesivos de esos puntos, correspondientes a 50 semiperíodos ó $50 L$, se han dibujado, ateniéndose al método anteriormente expuesto, los tres planos de oleaje, correspondientes a los temporales SO., S. y SE., con sus líneas de ondas y sus normales.

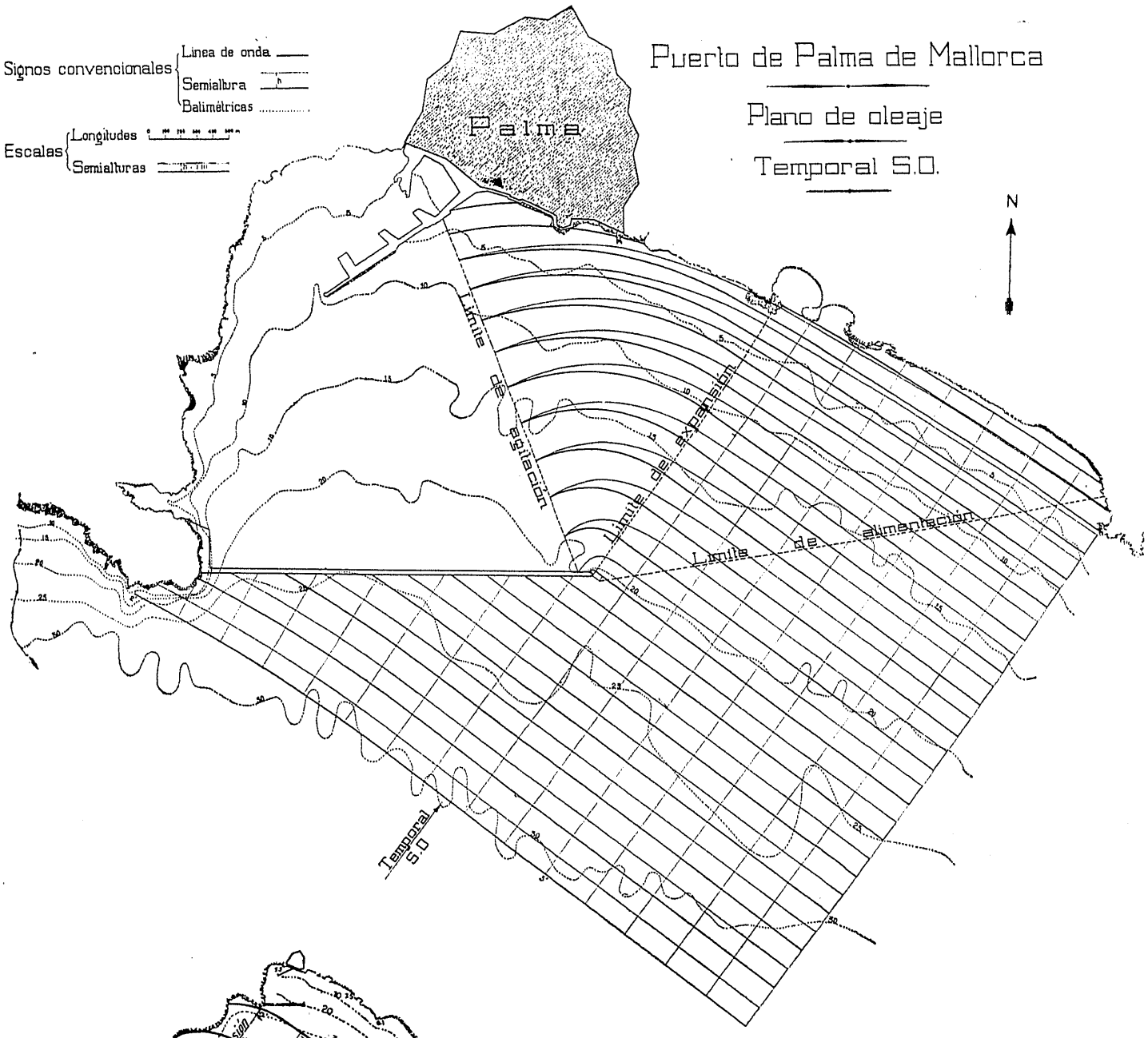
En el plano correspondiente al temporal SO., se observa una franca expansión lateral a partir del punto A, pues la normal $A\,2\,2'$ se separa de la costa situada a su izquierda.

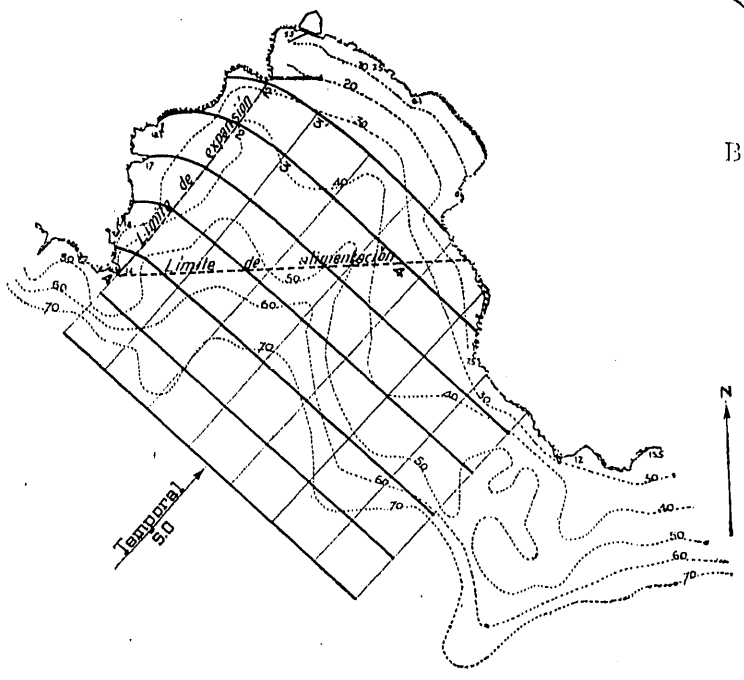
La máxima expansión corresponde a la situación de la ola 1, 2, 3, 4, en la que la energía correspondiente a la zona de alimentación 2 - 4 nutre a la onda expansionada 1 - 4, cuya semialtura media se aproximará a $h' = h \sqrt{\frac{2-4}{1-4}} = 2{,}41$. En el perfil de onda correspondiente, esta semialtura $h' = 2{,}41$ m., nos precisa el punto B, que define a la sinusoide, representación continua aproximada de las semialturas de la onda expansionada, lateral pero parcialmente, y cuyo máximo está en C.

Las semialturas correspondientes a los puntos 2 y 3 se mantienen hasta 2' y 3', por no haber expansión sensible entre el tramo 2 - 3 y el 2' - 3', por lo que conocemos, tanto en planta como en alturas, las características y situación de dicho tramo 2' - 3', que pasamos al plano denominado Plano del puerto de Palma, para proseguir con el avance de la onda a escala más conveniente (1).

En este plano de oleaje, del temporal SO., tiene lugar una expansión lateral, situada en el extremo del

(1) La menor reducción de escala de este plano de detalle permite afinar debidamente los avances de las líneas de ondas, disminuyendo a sólo cinco semiperíodos su tiempo de avance, en lugar de los cincuenta con que hemos operado en el plano de conjunto. Como consecuencia, los avances correspondientes serán de 5 L., o sea de cinco semilongitudes, en lugar de 50 L.



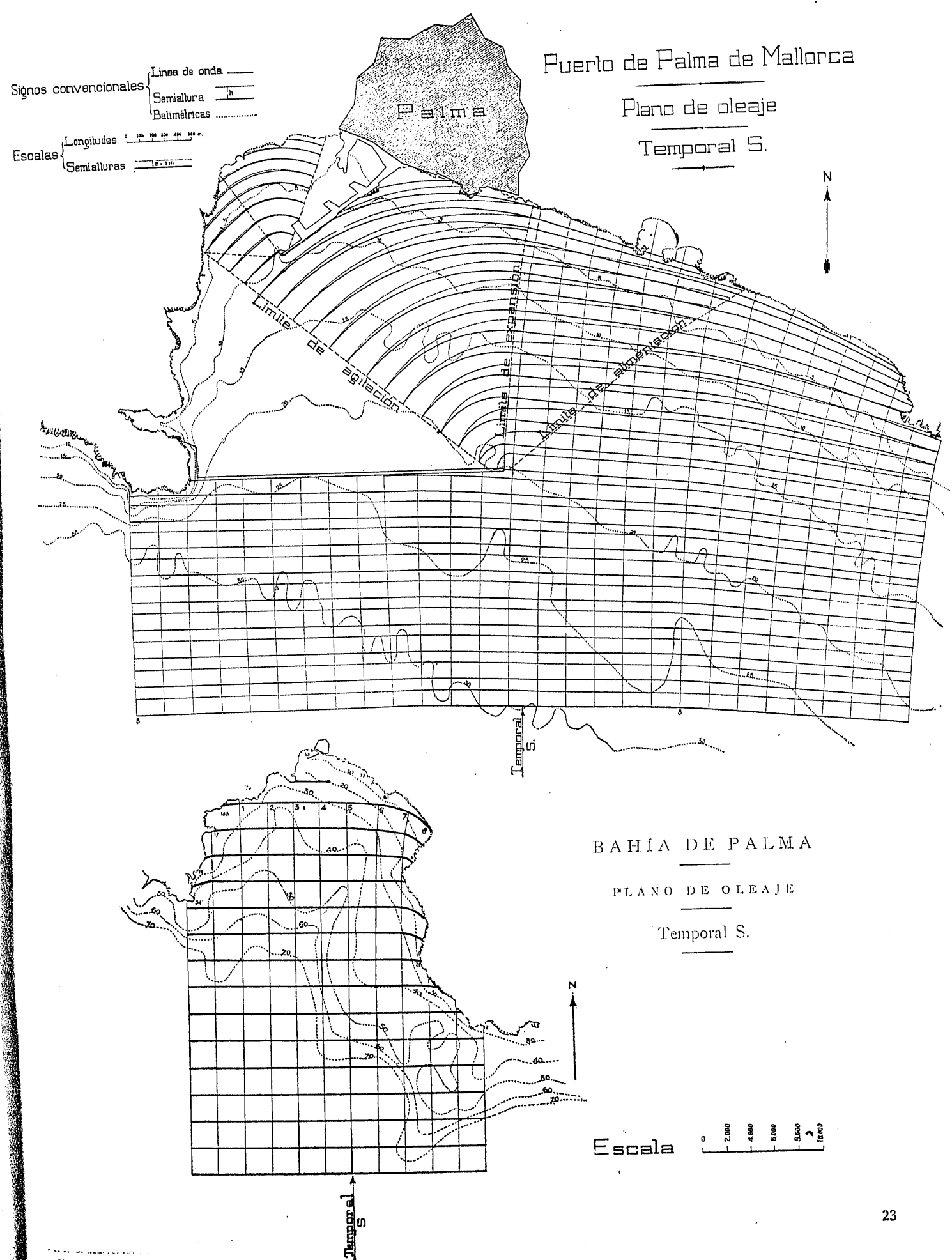


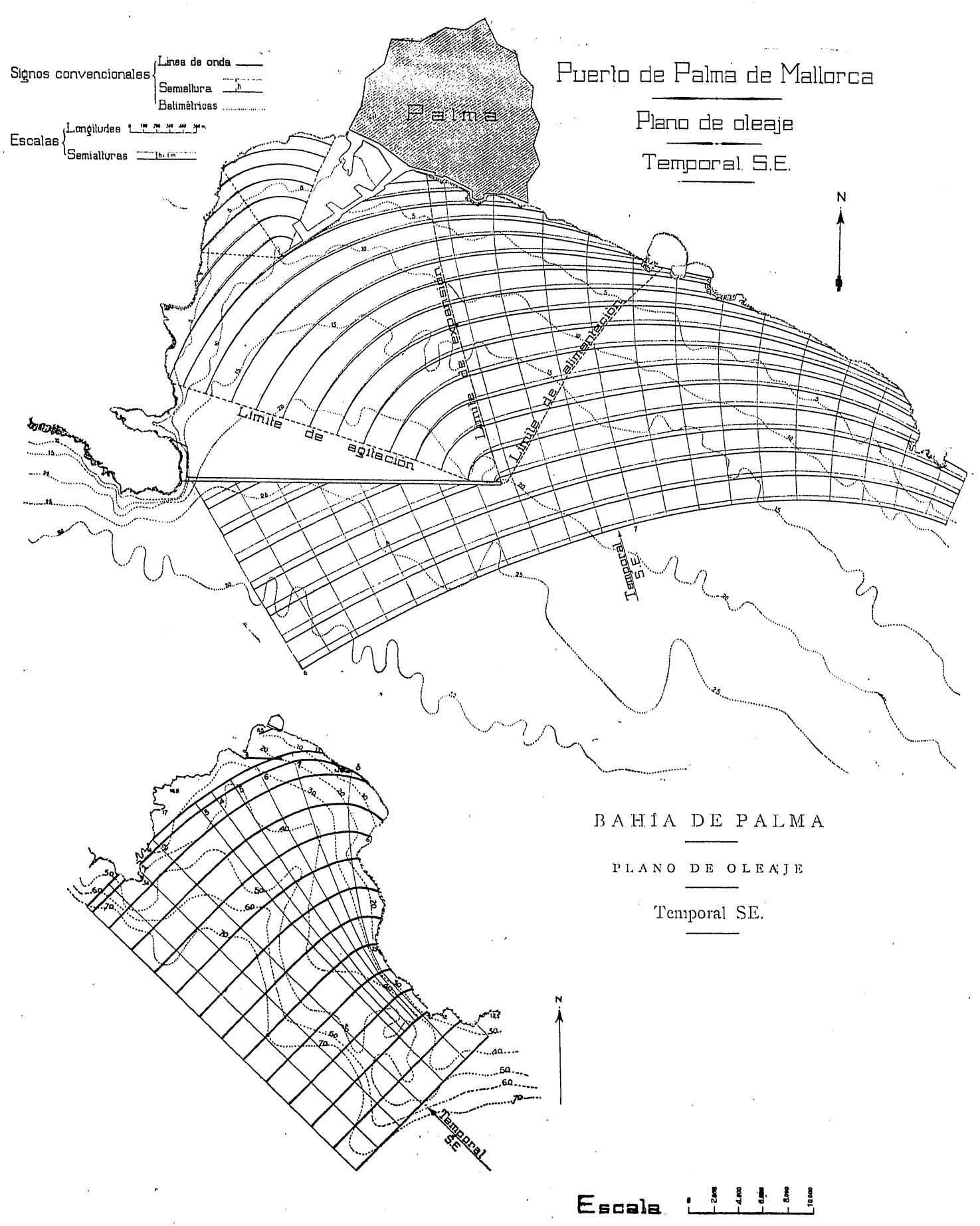
BAHÍA DE PALMA

PLANO DE OLEAJE

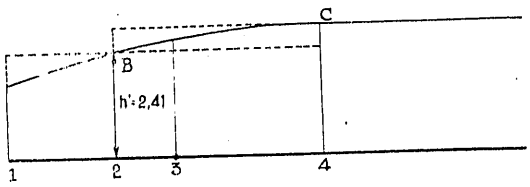
Temporal SO.

Escala 2.000 4.000 6.000 8.000 10.000

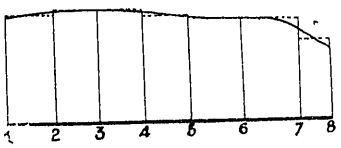

Puerto de Palma de Mallorca
Plano de oleaje
Temporal S.
Signos convencionales
Linea de onda
Semialtura
Batimétricas
Escalas
Longitudes
Semialturas
Palma
N
Limite de agitación
Limite de expansión
Limite de alimentación
Temporal S.
BAHÍA DE PALMA
PLANO DE OLEAJE
Temporal S.
N
Escala
0
2.000
4.000
6.000
8.000
10.000
Temporal S


Signos convencionales
Linea de onda
Semialtura
Batimètricas
Escalas
Longitudes
Semialturas
Palma
Puerto de Palma de Mallorca
Plano de oleaje
Temporal S.E.
N
Limite de agitación
Limite de alimentación
Temporal S.E.
BAHÍA DE PALMA
PLANO DE OLEAJE
Temporal SE.
N
Temporal SE
Escala

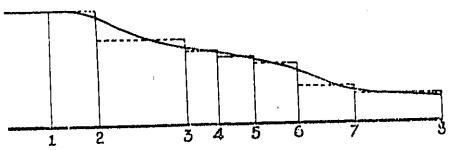
PERFILES DE ONDAS



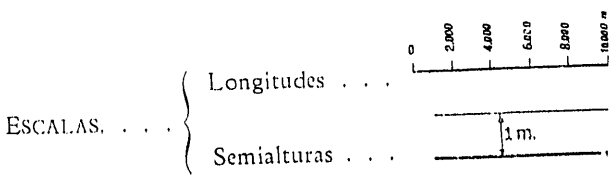
Temporal SO.



Temporal S.



Temporal SE.



dique proyectado, y cuyas líneas límites de las zonas de alimentación, expansión y agitación, quedan claramente determinadas de acuerdo con el método expuesto, ateniéndose al cual se determinan también los cuartos de sinusoides, representativos de las alturas de las ondas expansionadas lateral y totalmente.

Con esto dibujamos el plano de oleaje correspondiente, en el que, con suficiente aproximación para las necesidades prácticas, se determinan, tanto la dirección como la altura de la ola en cualquier punto del puerto futuro, así como las zonas totalmente abrigadas del mismo.

Por no rebasar la línea límite de la zona agitada el morro del dique construído, quedará el puerto actual totalmente abrigado de este temporal del SO.

Siguiendo análogo procedimiento, en el caso del temporal S., dibujamos su plano general de oleaje, a reducida escala, en el que no hay más que pequeñas expansiones frontales, hasta que la onda originaria en alta mar llega a la posición 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8, cuyas alturas medias y perfil continuo aproximado dibujamos en el gráfico correspondiente.

Pasamos después el tramo 3-5 y sus alturas correspondientes al plano a mayor escala y continuamos determinando, como en el caso del temporal SO., sus sucesivos avances y alturas, teniendo en cuenta que, en este caso de temporal S., hay una expansión lateral en el extremo de cada uno de los diques proyectado y construído, por lo que se producirá alguna agitación en el interior del puerto actual.

En el plano general de oleaje, a reducida escala, correspondiente al temporal SE., se produce una gran expansión frontal que hace que al llegar la onda originaria, en su avance, a la posición 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8, experimente el gran descenso de alturas, en su zona de la derecha, que se representa en el perfil de onda correspondiente, cuyo tramo 6 - 7 se pasa al plano a mayor escala, para continuar su avance y dibujar el plano de oleaje correspondiente a esta dirección de temporal SE.

A la vista de estos tres planos de oleaje, correspondientes a los temporales SO., S. y SE., se observa que las violencias de los dos primeros son comparables, y que el abrigo producido por el dique proyectado es más eficaz para el temporal SO. que para el S., que es, a su vez, el temporal más temible para la obra misma, debido a la normalidad con que sus olas la abordan.

El dique proyectado produce mucho menor abrigo contra el temporal SE., que penetrará en el interior de casi todo el puerto futuro, pero que, afortunadamente, pierde su violencia posible, debido al abrigo natural producido por la forma y orientación de la costa y a la distribución de calados.

Queda, pues, determinado, con suficiente aproximación para muchas de las necesidades prácticas, por este método de los planos de oleaje, cuanto se necesita conocer para resolver cualquier problema que se pudiera presentar; por ejemplo, dilucidar si es más conveniente, tanto económica como prácticamente, mejorar el abrigo del puerto futuro, mediante la construcción de un contradique que arranque desde tierra en dirección más o menos aproximada a la N. S., o si es posible o preferible, obtener parecido resultado mediante la prolongación del dique proyectado en la dirección más conveniente para el fin propuesto.

Es indudable que con el método expuesto, que hemos de precisar aún mejor, pueden resolverse, con mucho mayor grado de aproximación que con los peligrosos métodos intuitivos, tan en boga hasta hoy, estos importantes temas de ingeniería marítima, en los que tan frecuentes y costosos han sido los errores y consiguientes fracasos sufridos.