

# ANALES

DEL INSTITUTO DE INGENIEROS DE CHILE

Calle San Martín N.º 352 - Casilla 487 - Teléf. 88841 - Santiago - Chile

---

Año LII (1)    A    Oebre. y Novbre. de 1939    A    N.º 10 y 11

(1) Año LII desde la fecha de su primera publicación en 1898 como «Anales del Instituto de Ingenieros». Año XXXIX desde la fecha de su primera publicación, Enero de 1901, como «Anales del Instituto de Ingenieros de Chile».

---

Ing. Jorge Lira Orrego

## Puertos en playas de arena

Entre los temas que se trataron en la sección «Navegación Marítima» en el Congreso Internacional de este ramo, que se celebró en Bruselas en 1935, figuraba, en primer lugar, el relativo a la construcción de Puertos en Playas de Arena, tema que ha dado origen a una cantidad enorme de trabajos y que había sido tratado con detalle en el Congreso Internacional de Navegación que se celebró en San Petersburgo en 1908. En aquella ocasión se presentaron informes muy interesantes, entre los cuales merece particular mención el del ingeniero italiano señor Lo Gatto, y se discutió largamente el tema, considerado desde un punto de vista general; pero como había algunas ideas sobre las cuales no se podía adoptar acuerdos, porque las aplicaciones de ellas eran demasiado recientes, se dejaron pasar algunos años y solamente se volvió a tratar esta cuestión en las sesiones del Congreso en 1935. En este Congreso las opiniones de todos los ingenieros que presentaron informes y que intervinieron en la discusión, entre los cuales me cuento yo, estuvieron de acuerdo, de manera que las conclusiones a que llegó el Congreso pueden considerarse como normas que deben tenerse a la vista al elaborar los proyectos de esta clase de obras o al estudiar modificaciones en las obras existentes

El problema de la construcción de puertos en las playas de arena, es decir en aquellas en que este material es transportado en abundancia, ha preocupado a los Ingenieros desde que se principiaron a construir obras de abrigo de importancia, hace más de un siglo, porque además de la necesidad de que esas obras resistieran a los embates de las olas, era necesario que sus disposiciones generales impidieran la entrada de la arena a los recintos abrigados o que facilitaran su evacuación, una vez que hubiera entrado. En numerosas ocasiones se observó que, después de construídas las obras exteriores de un puerto, era necesario prolongarlas, modificando muchas veces su dirección, y en numerosas ocasiones fué preciso construir obras enteramente nuevas, que hasta tenían ubicaciones diferentes de las consultadas al principio. Desde que se construyeron las primeras obras de esta clase, se pudo reconocer que las cantidades de arena que el mar transporta a lo largo de las playas son a veces enormes y que los ingenieros no disponían de métodos de estudio que permitieran evaluarlas, siquiera de una manera aproximada. Conocido es en este sentido el caso del puerto de Howth, en Irlanda, que, a causa de la gran cantidad de arena que lo invadió,

debida en gran parte, a la pequeña profundidad en que fué construído y a la orientación defectuosa de su entrada, no pudo ser utilizado en la forma que se había previsto; igualmente conocido es el caso del puerto de Ceara, en el Brasil, que, habiendo sido proyectado y construído bajo la dirección de uno de los ingenieros ingleses de mayor reputación, fué igualmente invadido por la arena durante su construcción. En Chile, en Constitución, tenemos un ejemplo parecido, que demuestra la enorme cantidad de arena transportada por las corrientes marítimas. Más adelante me ocuparé con algún detalle de estos últimos casos, así como del puerto de Sec-Bruge, que son de los más interesantes, como ejemplos de esta clase de obras. Basta simplemente citar estos casos, elegidos entre un sinnúmero de otros de menor importancia, para formarse idea de las dificultades que presenta el problema que nos ocupa y para explicarse que la Asociación Internacional de los Congrésos de Navegación se haya ocupado desde hace treinta años en estudiarlo y en tratar de establecer las normas que deben seguirse en la confección de los proyectos correspondientes, suponiendo conocidas las condiciones en que se efectúa el transporte de la arena en la playa, sin lo cual, naturalmente no hay proyecto posible.

### I.—TRANSPORTE DE LA ARENA

Desde las primeras observaciones que se hicieron acerca de los depósitos de arena provocados por las obras de abrigo construídas, se trató de buscar las causas del transporte de dicha arena por el mar, y se creyó encontrarla en las corrientes de marea, que se propagan, como es sabido, hasta profundidades muy grandes con velocidades constantes o apenas disminuídas; luego se vió que había corrientes, que indudablemente provocaban ese transporte, que no eran debidas a la propagación de la marea ni a la influencia que sobre ella ejerce la forma de la costa, y por último se observó que en muchos casos no hay corrientes en el mar y el transporte de arena se efectúa a pesar de eso, y a veces con mucha intensidad, lo que condujo a atribuir ese transporte a las olas. Examinando las cosas más de cerca, es fácil comprender que cada una de las causas indicadas puede originar el transporte de los materiales por el mar, combinándose generalmente entre sí y predominando una u otra, según sean las circunstancias locales.

Sin entrar en muchos detalles sobre esta materia, que ha sido desarrollada en los diversos tratados de Obras Marítimas, entre los cuales merecen particular mención los de Quinette de Rochemont, de Cordemoy, Coen-Cagli y de Joly y Laroche, en los informes presentados a los Congrésos de Navegación y en un interesante trabajo sobre el Régimen del litoral del Mediterráneo, publicado últimamente por el ingeniero italiano señor d'Arrigo, y en muchos otros trabajos, que sería largo enumerar, voy a examinar las diferentes causas del transporte de la arena y la manera cómo se verifica ese transporte; después veremos la manera cómo se deposita la arena en el interior de los puertos y lo que sería necesario hacer para evitar ese depósito o suprimir sus inconvenientes.

Desde luego, por lo que se refiere al efecto de las corrientes, se puede observar que la arena que se encuentra en suspensión en el agua del mar está solicitada en todo momento por su peso, que tiende a hacerla caer al fondo y por el frotamiento con el agua, que se produce al bajar, resistencia cuyo efecto será tanto más marcado cuan-

to mayor sea la superficie de los granos relativamente a su peso, es decir, mientras más pequeños sean ellos, de aquí se deduce naturalmente que la rapidez de decantación de las arenas gruesas será mucho mayor que la de las finas y que, si en una sección cualquiera de la corriente se examina la distribución de los diferentes tamaños de arena, se encontrará que cerca de la superficie del agua no hay sino granos finos y que cerca del fondo domina la proporción de granos gruesos. Si la velocidad de la corriente es pequeña, estos granos podrán depositarse sobre el fondo y formar ahí una capa más y más espesa; pero cuando la velocidad de la corriente llegue a ser suficiente para impedirlo, ese depósito no se producirá. Es fácil observar que para cada clase de material, es decir para cada tamaño, forma y densidad de granos, habrá una corriente límite, pasada la cual no podrá producirse la sedimentación; son conocidas a este respecto las tablas de Dubuat, que figuran en todos los tratados de Hidráulica.

Si la intensidad de la corriente que se considera no es constante, como sucede por ejemplo con las corrientes de marea, los materiales que en un momento dado no pueden detenerse en el fondo, al disminuir la velocidad se detendrán y sólo volverán a ponerse en movimiento, cuando la velocidad de la corriente adquiera un valor suficiente para ello; pero la nueva velocidad, necesaria para poner en movimiento los materiales que se habían depositado, debe ser considerablemente mayor que la que era capaz de mantenerlos en movimiento, y podrá suceder el caso de corrientes que puedan acarrear materiales y que, una vez que éstos se depositen no sean capaces de volver a arrastrarlos, lo que traerá como consecuencia la acumulación de materiales por esa corriente. En este sentido puede ser interesante recordar el resultado de experiencias hechas por el señor Vaughan Cornish, que en Dorset y Norfolk hizo observaciones de las cuales dedujo que granos de arena de  $1/60$  de pulgada (0,42 mm) eran removidos formando ondulaciones en el fondo (riplemarks), cuando la velocidad pasaba de 0,35 por segundo, y que con arena de  $1/50$  de pulgada (0,51 mm) pasaba lo mismo, cuando la velocidad excedía de 0,45 m. por segundo, en ambos casos, Cuando la velocidad pasaba de 0,62 m. y de 0,65 m. por segundo respectivamente, la arena era transportada rápidamente, desapareciendo las ondulaciones del fondo y enturbiándose el agua en la capa cercana a él, por efecto de la suspensión continua de la arena.

El señor d'Arigo, en su obra citada, reproduce un cuadro debido a L. Sudry (Mónaco), en el cual se indican en la columna A) las velocidades mínimas que principian a mover los materiales que constituyen el fondo rodando unos sobre otros, en la columna B), las velocidades necesarias para que principie el acarreo en masa y C) la que lo produce rápidamente, borrando las ondulaciones del fondo.

MATERIALES	Tamaño medio mm.	VELOCIDADES		
		A m/s	B m/s	C m/s
Arena finísima .....	0,2	...	0,11	0,31
Arena fina.....	0,4	...	0,18	0,45
Arena media .....	0,6	0,04	0,23	0,55
Arena gruesa.....	1,5	0,09	0,38	0,88
Guijarros muy chicos.....	3,5	0,16	0,60	1,40
Guijarros pequeños.....	6,5	0,24	0,85	1,90
Guijarros pequeños.....	10,0	0,30	1,10	2,50

Es fácil ver que las cifras de este cuadro son un poco menores que las que indicamos más atrás, lo que no es de extrañar, porque ellas se refieren a materiales de granos redondos.

En caso que haya materiales finos mezclados con otros más grandes, la velocidad necesaria para producir el arrastre será menor, porque los materiales más finos se mueven primero y es más fácil que se muevan los segundos. Por último, si hay arcilla mezclada con la arena, la velocidad necesaria para arrastrar los materiales será mayor, por efecto de la cohesión que produce la arcilla.

Conociendo, aunque sólo sea de una manera vagamente aproximada, la velocidad necesaria para poner en movimiento los materiales que constituyen el fondo del mar, se puede estudiar el efecto que sobre esos materiales pueden producir las olas, para lo cual basta recordar que, si llamamos  $2h$  la altura de las olas,  $2L$  su largo y  $H$  la profundidad en que se propagan, el eje mayor de las órbitas descritas por el agua en el fondo vale (1):

$$2a_f = 2 \cdot h \sqrt{K^2 - 1}$$

el período  $2T$  vale

$$2 \cdot T = 0,8 \sqrt{K} \sqrt{2L}$$

y la velocidad máxima en el fondo

$$v_f = \frac{\pi h \sqrt{K^2 - 1}}{T}$$

Por medio de estas fórmulas, en las cuales  $K$  es la cotangente hiperbólica  $c \frac{\pi \cdot H}{L}$ , cuyo valor se puede obtener de un formulario de Ingeniería, o bien del artículo

(1) Ver ANALES N.º 4 de 1936, pág. 194 y siguientes.

de los ANALES ya citado, se pueden deducir las velocidades en el fondo que interesen. Para mayor comodidad he reproducido en la Fig. 1, las curvas que dan a conocer las velocidades en el fondo correspondiente a las olas de 1 hasta 6 metros de altura y largos de 70, 80, 90, 100, 150 y 200 respectivamente, haciendo variar la profundidad  $H$  entre 2 y 12 metros; las curvas sólo se han trazado hasta las profundidades decrecientes compatibles con el movimiento ondulatorio. El examen de esas curvas nos permitirá formular una serie de observaciones interesantes relacionadas con el movimiento de la arena.

Desde luego se ve que las velocidades en el fondo son tanto mayores cuanto más grandes son las olas, lo que es muy natural. En seguida se ve que en las profundidades menores de 4 metros todas las olas son capaces de remover la arena, pues a las de 1 m. de altura, que son muy pequeñas en el océano corresponde una velocidad en el fondo de 0,73 metros por segundo, velocidad que alcanza a 1,50 m/s. para las olas de 2 m de altura; se puede deducir de ahí que hasta la profundidad de 4 m. el movimiento de arena es permanente, salvo los días de calma extraordinaria, que son raros. Se ve también que las olas grandes, de más de 4 m. de altura, pueden producir el movimiento de la arena en masa, aun a profundidades de más de 12 metros, pues las velocidades son superiores a 1,50 m. por segundo, alcanzando a más de 2,50 m. con las olas de 6 m. de altura.

Examinando un poco más de cerca la manera cómo las olas mueven la arena, se puede establecer una diferencia, considerando por una parte la región situada antes que las olas revienten, en que la hondura es francamente mayor que la altura de las olas, y por otra, la que queda después que han reventado. En esta última región el movimiento de la arena es muy marcado y muy visible: al reventar las olas, el movimiento ondulatorio del agua se destruye, dando lugar a uno de translación muy rápido, en virtud del cual, arrastran una cantidad de arena proveniente del fondo, porque las velocidades orbitarias han alcanzado valores muy elevados; por otra parte, el movimiento debido a la reventazón de la ola hace que se produzca una remoción tan enérgica de los materiales del fondo que se les ve obscurecer el agua hasta la superficie, y la masa de agua que la ola lanza hacia la orilla, animada de una velocidad de translación considerable, arrastra los materiales que la ola había puesto en suspensión; esos materiales suben con el agua por el plano inclinado de la playa, depositándose a medida que disminuye la velocidad de ésta; cuando el agua vuelve hacia el mar por efecto de la gravedad, su velocidad se va acentuando y poco a poco principia a arrastrar hacia adentro los materiales que había depositado al subir. Cuando las olas son muy fuertes, la resaca que producen es considerable y arrastran la arena hacia las profundidades; en tiempo tranquilo domina el movimiento hacia tierra y la arena se acumula en la playa. Es muy frecuente observar, por eso, que las playas se embancan en primavera y en verano y se socavan en invierno. En la zona que se encuentra antes que las olas revienten, el movimiento ondulatorio subsiste, pero las velocidades orbitarias han ido aumentando mucho a medida que ha disminuído la profundidad: cuando esas velocidades alcanzan un valor suficiente para producir el movimiento de la arena en masa, los granos de arena, que en el fondo tenían un movimiento rectilíneo alternativo, principian a ser mantenidos en suspensión en el agua en toda su profundidad, porque las moléculas líquidas que describen órbitas elípticas los van haciendo describir órbitas de la misma forma, mezclándolos con el agua en

toda la altura: de ahí viene el color café más o menos obscuro que se observa en el agua del mar, hasta bastante distancia de la orilla, cuando las olas no son muy pequeñas, distancia que corresponde a la profundidad en que la arena es removida y que llega a varios cientos de metros durante las tempestades en las playas más o menos tendidas.

Si las olas llegan normalmente a la playa, los movimientos de la arena son perpendiculares a ella y no hay en realidad transporte a lo largo de la costa. La arena se mueve, recorriendo muchas veces el mismo camino en sentido alternativo y gastándose poco a poco. Si las olas llegan oblicuamente a la playa, Fig. 2, suponiendo que AB sea la proyección de la cresta de una ola que se propaga en profundidades grandes, cuando la ola llega a cierta profundidad, en que el efecto retardador del fondo se hace sentir, el punto A se moverá todavía como antes; al cabo de cierto tiempo la cresta de la ola se proyectará en A' B', línea que no es paralela a AB; al cabo de otro tiempo igual, la cresta se proyectará a A'' B'' y así sucesivamente, girando siempre, hasta que terminará por proyectarse según la línea A''' B''', paralela a las curvas de nivel en la orilla. Esta rotación de las olas es fácil de observar en cualquier parte y es particularmente sensible cuando hay una variación acentuada en la forma de la costa, como por ejemplo una puntilla, y son numerosos los ejemplos de esta clase en que las olas rompen en la playa, después de haber girado, con dirección opuesta a la que tenían al principio. Los extremos de las obras artificiales con taludes suavemente inclinados producen un efecto de esta naturaleza en la propagación de las olas, efecto que se agrega al de la formación de ondas derivadas, debido al movimiento ondulatorio del agua.

Esta manera de propagación de las olas oblicuas va a tener mucha influencia en el movimiento de la arena de la playa. Si la adaptación de la forma de las olas a la de las curvas de nivel no es completa, como sucede con mucha frecuencia, las olas tienen todavía una dirección oblicua al llegar a la profundidad en que revientan y los filetes líquidos llegan a la playa con la dirección AB, Fig. 3, arrastrando la arena que mueven en esa dirección, arena que se va depositando en la playa a medida que la velocidad del agua decrece; el agua que ha subido hasta B en virtud de la velocidad que tenía, vuelve siguiendo la línea de máxima pendiente BC, arrastrando hacia el mar, cuando su velocidad ha llegado a ser suficiente, la arena que una ola anterior había depositado entre B y C. Este movimiento se repite una y otra vez y el agua junto con la arena va recorriendo un camino en forma de dientes de sierra, como el que indica la línea ABCDFG, lo que tiene como consecuencia que una parte de la arena que, en un momento dado se encontraba en A, algún tiempo después haya llegado a G, recorriendo un camino que tiene como resultante una translación a lo largo de la costa.

El movimiento de la arena en la zona en que la profundidad es mayor y las olas no alcanzan a reventar es distinto; en efecto las moléculas líquidas describen órbitas cerradas y el movimiento que transmiten a la arena es de la misma clase y se traduce en el fondo mismo por un movimiento alternativo, siguiendo la forma del fondo, movimiento de la misma dirección de las olas, pero que no origina transporte en el sentido longitudinal de la costa.

Respecto al movimiento de materiales del fondo submarino producido por las olas, son muy interesantes los estudios hechos por el matemático italiano Cornaglia, quien estableció una teoría completa de ese movimiento, de la cual pueden deducirse

muchas conclusiones interesantes. Sin entrar en detalles ni en cálculos, que nos llevarían demasiado lejos, nos limitaremos a recordar que, según él, un grano de arena del fondo por efecto del movimiento ondulatorio del agua, se encuentra sometido a un movimiento alternativo, dirigido hacia tierra, es decir, en el sentido de la propagación de las olas, cuando el nivel del agua está encima del nivel de reposo, y en sentido contrario, cuando el nivel del agua se encuentra bajo dicho nivel de reposo, correspondiendo la velocidad máxima hacia tierra al paso de la cresta de la ola por el punto que se considera y la velocidad máxima hacia mar adentro al paso del hueco. La energía que el grano de arena recibe y que trata de impulsarlo hacia tierra en el movimiento directo es mayor que la que recibe en el movimiento inverso que trata de arrastrarlo hacia las grandes profundidades, de manera que el primer movimiento predomina sobre el segundo; pero la gravedad que produce sobre él un efecto, tanto más notable cuanto mayor es la densidad de la arena y la inclinación del suelo, favorecerá el segundo movimiento, así como tenderá a disminuir el primero, de aquí resultará que cuando el efecto producido por el movimiento orbitario hacia tierra, menos el debido a la gravedad, sea igual al efecto debido al movimiento orbitario inverso más el de la gravedad, la arena se moverá en un sentido y en el otro, pero la resultante de sus movimientos será nula; la línea que une todos los puntos del fondo que se encuentran en las mismas condiciones para olas de las mismas características, fué llamada *línea neutra* por Cornaglia; entre la línea neutra y la orilla predominará el efecto del movimiento hacia tierra, porque la diferencia con el de sentido contrario es cada vez más acentuada y los granos de arena serán arrastrados por las olas hacia a playa; desde la línea neutra hacia el mar, la diferencia entre los movimientos producidos por las olas va disminuyendo gradualmente y los granos de arena tienden a ser arrastrados hacia los abismos. Si en una misma costa cambian las características de las olas, lo que sucede en todas partes, la posición de la línea neutra cambiará, alejándose de la orilla a medida que aumentan el largo y la altura de las olas, es decir que la profundidad a la cual corresponde la línea neutra, aumentará a medida que las olas son más largas y más altas.

Si se tiene presente que las olas revientan en una profundidad un poco superior a su altura y que las olas que producen mayor movimiento de arena tendrán una altura de unos 2 metros para arriba, se llegará a la conclusión de que en tiempo ordinario el movimiento más importante de arena se efectuará en las profundidades interiores a 3 metros y durante las grandes tempestades ese movimiento alcanzará a los 8 metros o más; como el transporte de la arena en estos casos se refiere a la zona en que ya las olas han reventado, se verificará, como hemos dicho antes, hacia tierra. La línea neutra de que hemos hablado antes se encontrará naturalmente siempre en profundidades mayores que la línea en que revientan las olas, que limita la zona a que acabamos de referirnos.

Hemos visto más atrás que para que las corrientes puedan remover la arena que forma el fondo submarino, deben sobrepasar ciertas velocidades y es muy común que las corrientes que se miden en el mar no alcancen a tener el valor mínimo necesario para producir ese efecto, pero no por eso van a dejar de influir en el transporte de la arena, muy al contrario, pueden ser un factor importante de ese transporte, combinándose su efecto con el de las olas, que hemos examinado. En efecto, las olas ponen en suspensión, como hemos visto, los materiales que forman el fondo y las corrientes

los transportan a lo largo de la costa, de donde resultará modificado, aumentándolo o disminuyéndolo, el efecto que habrían producido las olas en ese sentido. Muchas veces sucederá que en una época determinada predominará una causa u otra y que el transporte de arena a lo largo de la costa tendrá lugar en uno u otro sentido, con mayor o con menor intensidad, pero, considerando un año entero, resultará que el movimiento se produce en definitiva en un sentido, que será el que domine y el que habrá que tener principalmente en vista al estudiar las obras de abrigo de los puertos; sin embargo, cuando el sentido del transporte se invierte en ciertas épocas del año, habrá que adoptar disposiciones que impidan la entrada al puerto de los materiales que entonces se muevan.

## II.—EFECTO DE LAS OBRAS EXTERIORES DE LOS PUERTOS EN EL TRANSPORTE DE ARENA.

Si en una parte de la costa se construye una obra que penetre en el mar, como un molo de abrigo, que supondremos de longitud limitada de manera que su extremo quede en la zona de mayor transporte de arena, es decir en profundidades menores que la de rompiente de las olas, Fig. 4, y si el movimiento de la arena a lo largo de la costa se efectúa en el sentido que indica la flecha *f*, la arena será detenida por el molo AB, y se irá acumulando en el rincón del lado que llamaremos aguas arriba, de tal manera que la línea del O, que antes era MN, habrá avanzado poco a poco hasta llegar a pasar cerca del extremo B de esa obra, como indica la línea M'B de la figura. Aparte de ese efecto sobre la arena en movimiento, se producirán otros, más o menos marcados en la región aguas abajo del molo: desde luego se forma una *revesa* detrás del molo, es decir un verdadero remolino, por efecto del cual la arena se mueve cerca de la playa en el sentido que indica la flecha *f'*, acumulándose en el ángulo de aguas abajo en forma parecida a lo que sucedió en el otro, pero en menor proporción cuando la obra se prolonga, se observan otros efectos producidos por ella; desde luego, el movimiento del agua, la corriente, si existe, se refuerza considerablemente cerca del extremo del molo, por la obligación de conservarse el movimiento en una sección estrechada, y se produce una socavación del fondo en E, los materiales que provienen de esa socavación, juntos con los que llegan de aguas arriba, pasan hacia la derecha del extremo del molo y se depositan en los puntos en que las velocidades son menores, formando los bancos C y D, cuya importancia relativa dependerá de las circunstancias.

Antes hemos dicho que las olas giran en los extremos de las obras artificiales; como consecuencia de esta rotación se observan ondas, verdaderas olas, que en el caso de la Fig. 5 se moverían de B hacia A; estas olas arrastran arena, como todas, pero como su energía es menor que la de las otras, la depositan mucho más luego, cerca del extremo mismo del molo, como se indica en F. Esos bancos o puntillas son muy característicos y su formación se observa siempre.

Durante la construcción de las obras de abrigo del puerto de Constitución, que se encuentran en una costa sometida a un movimiento de arena muy intenso, se pudieron hacer muchas observaciones interesantes en el sentido que en este momento nos ocupa. En la Fig. 6 se indica la forma general de la costa en la Caleta, antes de la iniciación de las obras de abrigo; las flechas marcadas F indican las direcciones ordinarias de las corrientes; las flechas ON y OS las direcciones de la propagación de las olas,



que en todo tiempo difieren muy poco de ser Oeste a Este y las líneas de segmento marcan las crestas de las olas a cierta distancia de la orilla, donde las pequeñas profundidades no han influido todavía sensiblemente en su forma. De los datos de esa figura es fácil deducir que el transporte de la arena se efectuará siempre de la izquierda hacia la derecha de la figura y que el acarreo producido por las olas será mayor al Oeste, porque las olas son más oblicuas que en la caleta misma; las corrientes ayudarán a ese acarreo, aunque con velocidades más bien pequeñas, que no pasan de unos 0,35 m. por segundo.

Desde que se inició la construcción del molo Sur, se pudieron observar los depósitos de arena indicados en las figuras 4 y 5, los que fueron haciéndose más notables a medida que avanzaba esa obra. La figura 7 reproduce la situación correspondiente al fin de septiembre de 1928, es decir, dos años y medio después de iniciadas las obras y permite ver la forma de la línea de profundidad cero, que corresponde a la baja marea, cuando el largo del molo Sur alcanzaba a 556 m. y el del molo Norte a 300 m.; en ella se ve perfectamente clara la acumulación de la arena en el ángulo aguas arriba del arranque del molo, además se ve cómo se han producido los depósitos en la parte aguas abajo, de acuerdo con las indicaciones de la figura esquemática 5, siendo perfectamente notable la formación de la puntilla D cerca del extremo del molo. Naturalmente la variación de la forma de la curva de profundidad cero no es sino la consecuencia de la variación general de la playa y todas las demás curvas de nivel deben ser afectadas hasta profundidades más o menos grandes, cercanas a la línea neutra de que hemos hablado antes. En la Fig. 7 se ha dibujado una parte de la curva de 8 m., y por ella se ve que se ha alejado de lo que eran primitivamente en la zona afectada por la construcción del molo.

La Fig. 8 indica la situación de las obras y la forma de la playa en enero de 1931, es decir dos años y medio después de la fecha de la Fig. 7; en ella se ve que por el lado de aguas arriba no ha habido cambio apreciable en la línea del O, y sólo han ido desviándose hacia mar adentro, casi paralelamente al molo, las distintas curvas de profundidad; por el lado interior del puerto ha seguido aumentando el depósito de arena, que penetra girando alrededor del extremo del molo, pero la puntilla D, no se ha formado, porque acaba de pasar la época en que las olas son más violentas. En marzo, es decir, sólo un mes más tarde, se ve que ya se ha formado esa puntilla, sin que por lo demás, se hubiera producido otro cambio apreciable.

Estos ejemplos bastan para que se vea cómo en la realidad las obras exteriores de los puertos ejercen en la marcha de los aluviones el efecto que se deduce del análisis de su movimiento. Se comprende fácilmente que la cantidad de materiales que se hayan acumulado en la playa, cuando una obra dada alcanza a cierta longitud, dependerá del tiempo empleado en la construcción, de la época del año en que esa construcción haya sido hecha y aun de si en ese tiempo la agitación del mar ha sido normal o extraordinaria; pero es indudable que, si se interrumpe la construcción en un momento dado y se la deja así durante un tiempo largo, tanto más cuanto más importancia tiene la obra hecha, llegará a establecerse en la playa una nueva situación de equilibrio relativo, muy distinta de la que había antes de iniciar la construcción.

Si una obra se termina sin que su extremo alcance a salir de la zona de gran movimiento de arena, es natural pensar que muy poco tiempo después principiarán a observarse los efectos ejercidos por la obra, de los cuales el más característico es la

formación de la puntilla D, que si la profundidad es relativamente grande, no alcanzará a salir del agua y constituirá un banco sumergido. Parece natural pensar que la manera de evitar ese efecto nocivo del rompeolas, será prolongarlo hasta que su extremo sobrepase la zona de gran transporte de arena, es decir, hasta que se sobrepase la línea neutra correspondiente a los mares más violentos ordinarios, que es en realidad la más interesante.

En Italia hay numerosos puertos construídos en playas de arena en los cuales habían construído obras de abrigo limitadas en profundidades reducidas, del orden de 5 a 7 metros; en todos ellos se observó que la arena sobrepasaba los extremos de esas obras e invadía la parte interior del puerto. Esta situación desfavorable se ha remediado, prolongando los rompeolas hasta alcanzar profundidades suficientes y llegar a la zona en que no hay transporte de arena hacia la playa o en que éste es muy reducido. Merece recordarse, a este respecto, el caso de Porto Maurizio, Fig. 9, en el cual las arenas transportadas por el mar vienen del poniente, siendo del S. O. los vientos dominantes; el extremo del molo poniente se fundó en la curva de nivel de (-6 metros) y muy luego se observó en el interior del puerto la entrada de la arena que pasaba por delante del extremo del molo, formando el banco cerca del extremo del molo, que se ha hachurado en la figura. En repetidas ocasiones se dragó ese banco y se observó que volvía a formarse, lo que demostraba que su existencia se debía a causas de carácter permanente. Se acordó entonces prolongar el molo hasta llegar a la profundidad de 7,25 metros y se observó que después de algún tiempo no se había formado el banco, pero posteriormente volvió a formarse, lo que indicaba claramente que la cantidad de materiales que el mar transportaba a la nueva profundidad era mucho menor que la anterior, siendo, sin embargo, bastante apreciable todavía. Se prolongó nuevamente ese molo, hasta que su extremo alcanzó la profundidad de 8 metros, sin que la formación del banco haya cesado por completo, de donde se infiere que todavía hay transporte de arena hacia la costa a esa profundidad, es decir que la línea neutra se encuentra todavía más adentro que los 8 m. En la misma costa, 30 km. más hacia el Oeste, se encuentra el puerto de San Remo, en el cual el extremo del molo de abrigo ha sido fundado en 11 metros de hondura y no se ha producido la entrada de arena al puerto. La comparación de los resultados obtenidos en estos dos casos permite deducir que la línea neutra principal se encuentra entre las curvas de nivel de (-8 m.) y de (-11 m.) en esa región del Mediterráneo, sin que sea posible precisar una cifra intermedia, que probablemente quede en los alrededores de los (-10 m.).

Aparte de esos efectos, producidos directamente por la acción de las obras de abrigo en el movimiento de los aluviones de la costa, hay otros, indirectos, que se manifiestan a cierta distancia de las mismas obras, agua abajo de ellas, Fig. 10. En efecto, es fácil darse cuenta de que en el punto C, por ejemplo, las olas llegarán a la orilla en la misma dirección oblicua que tenían antes que se construyera la obra A B, es decir que ahí ya no se deja sentir el efecto de ésta; las olas removerán ahí la arena de la playa y la transportarán en el mismo sentido que antes, indicado por la flecha f, y como la obra A B, ha detenido la arena en movimiento, que antes iba a pasar por delante de C, conservando el equilibrio de la costa, ésta principiará a empobrecerse y la línea de playa se retirará hacia tierra hasta llegar a un punto D, en el cual se encontrará el equilibrio nuevamente, tomando la playa en esa parte la forma C E D. Un ejemplo notable de estos efectos se tiene en el puerto de Madras (Indostán)

sometido a un movimiento muy intenso de arena de S. a N., Fig. 11, a) y b). Cuando se iniciaron las obras de abrigo de este puerto. Fig. a, la línea del cero de la playa era prácticamente rectilínea; se pensó en que por efecto del rompeolas Sur se formaría una acumulación de arena en el ángulo a consecuencia de la cual la línea de la playa avanzaría y por consiguiente todas las curvas de nivel, pero se creyó que en las profundidades grandes, del orden de 14 metros, en que quedaban el extremo de los molos el movimiento de arena sería muy reducido y que sólo al cabo de 150 años sería molesta la disminución de profundidades en la entrada del puerto. El acarreo de arena fué en realidad mucho mayor que el previsto y al cabo de 30 años ya la forma de la costa era la que indica la Fig. b, en la cual se ve que la curva de nivel de 12 metros ocupaba la posición de la de 14 m. y que ésta había avanzado de 150 metros, como promedio; la línea del cero al Sur del puerto había avanzado 450 metros y al lado Norte se había producido el arrastre de la arena, socavando la playa de tal manera que la línea del cero había retrocedido hasta cerca de 200 metros. Las condiciones eran, pues, muy diferentes de las previstas y eso aconsejó modificar substancialmente la disposición general de las obras, cambiando de sistema, como se ve en esa misma figura. La entrada del puerto se cerró; hacia el Norte se construyó un molo sensiblemente paralelo a la costa, que permitió obtener un antepuerto abrigado, y se abrió una nueva entrada en el brazo Norte del molo primitivo, que comunica con el antepuerto.

### III.—DISPOSICION DE LAS OBRAS EXTERIORES

Los puertos en playas de arena se encuentran situados en condiciones bastante diferentes, condiciones que tienen siempre influencia favorable o desfavorable en la conservación de las profundidades, tanto en el interior del puerto como en los alrededores de su entrada, y que será preciso tomar siempre en cuenta al hacer un estudio comparativo para apreciar el resultado de la disposición de las obras exteriores.

Dejaremos a un lado los puertos establecidos en la desembocadura de los ríos, en los cuales el problema es más complejo, porque al movimiento de materiales arrastrados por el mar se añaden los que acarrea el río, y nos ocuparemos solamente de los otros.

En primer lugar hay numerosos puertos establecidos en lagunas, grandes o pequeñas, comunicadas con el mar por medio de canales; en esos canales se han construido diques paralelos, destinados a guiar las corrientes de marea, Fig. 12, hasta una profundidad superior a la que necesita la navegación; en algunos casos se han podido obtener resultados más o menos favorables, pero lo normal es que se haga necesario prolongar varias veces los diques y ayudar por medio de dragados a la conservación de las profundidades. En todo caso estos diques no son verdaderas obras de abrigo, porque el antepuerto y el puerto se encuentran hacia el interior, a veces lejos de los diques mismos.

En caso que sea necesario tener una superficie de agua abrigada, se recurre a la construcción de rompeolas convergentes, uno de los cuales sirve a veces para guiar las corrientes, Fig. 13.

Cuando no hay un canal por el que se verifique un movimiento notable de agua, la solución que primero se presenta es la que indica la Fig. 14, en que un rompeolas

principal arranca de tierra y se dobla en el sentido del movimiento de los aluviones, cuando se ha llegado a una profundidad conveniente; un rompeolas secundario, que a veces llega a tener una longitud considerable, protege el interior del puerto contra la entrada de la arena y mejora las condiciones de tranquilidad del agua, evitando la entrada de las olas que giran en torno del extremo del rompeolas principal.

En muchas ocasiones es necesario orientar la entrada del puerto en cierto sentido, para facilitar las operaciones de las naves, o bien es preciso oponerse a la entrada de arena por ambos lados, cuando el transporte de la arena no se efectúa solamente en un sentido, y esto exige una disposición más simétrica, Fig. 15, aunque siempre uno de los rompeolas llega a mayores profundidades que el otro.

Cualquiera de estas disposiciones que se adopte, se observa siempre que el rompeolas situado al lado de donde viene la arena, la detiene en gran cantidad, lo que provoca el avance de la playa en esa parte; si ese rompeolas llega hasta una profundidad suficiente, sobrepasando la línea neutra principal, la arena movida por las olas no penetra en cantidad considerable al interior, pero puede penetrar arrastrada por las corrientes de flujo y al salir después con las de refluo, puede depositarse en forma que constituya un obstáculo. En ese sentido, en caso que haya un canal cuyas corrientes hay que guiar, será preferible la solución indicada en la Fig. 13, que consulta dos diques convergentes, utilizando el principal para guiar las corrientes; ese dique deberá ser curvo, como se ha hecho en numerosas ocasiones para que las corrientes se mantengan junto a él y permitan conservar un canal sensiblemente invariable con profundidades suficientes.

En caso que no haya un canal, hemos visto que lo natural es adoptar la solución de la Fig. 14, si el movimiento de la arena se efectúa en un solo sentido. El rompeolas principal atajará la arena en la forma que hemos visto, la que, si las profundidades no son muy grandes, irá avanzando a lo largo del rompeolas hasta llegar a su extremo y penetrar en el puerto; siempre habrá corrientes, debidas al juego de la marea, pero esas corrientes moverán casi exclusivamente los materiales muy finos, que pueden mantenerse mucho tiempo en suspensión.

Con el objeto de evitar que el rompeolas ataje la arena que se mueve a lo largo de la playa, es decir, para evitar la modificación del régimen de la playa, se ha adoptado en varias ocasiones la disposición que se indica en la Fig. 16, que consiste en construir un rompeolas AB que proporcione el abrigo, situado en la parte en que las profundidades son suficientemente grandes para que el movimiento de la arena se efectúe casi en su totalidad por la parte AC, que estará cubierta por un viaducto; el atraque de los vapores se hace por el interior del rompeolas, aprovechando las profundidades naturales, si las hay, o dragando el espacio necesario, en caso contrario.

Examinaremos con alguna detención las diferentes soluciones a que nos hemos referido.

En primer lugar, respecto a los rompeolas rectilíneos, del tipo Fig 12, en caso que no estén aplicados a la entrada de canales, se puede ver claramente su efecto en el ejemplo de Porto Maurizio, ya citado al ocuparnos de la influencia de las obras exteriores sobre el movimiento de los aluviones.

En caso que haya una corriente a lo largo de la costa, vimos que se producía una desviación de ella por el rompeolas y un refuerzo de ella frente al extremo de éste;

para evitar la pérdida de energía que resulta del encuentro de ambas corrientes, es conveniente cambiar paulatinamente la dirección del rompeolas, de manera que su parte extrema sea paralela a la corriente principal y el enlace de las corrientes se verifique de una manera gradual, lo que puede hacerse particularmente bien en el caso de la Fig. 14. En el último Congreso Internacional de Navegación, que tuvo lugar en Bruselas en 1935, se estudió esta cuestión y se llegó a conclusiones de acuerdo con las ideas expresadas más atrás. El párrafo relativo al trazado de las obras exteriores dice:

«El trazado de esas obras debe ser exento de cambios bruscos de dirección, deben prolongarse, si es posible, hasta llegar a la línea neutra o más allá, y, si se trata de molos, termina por un elemento sensiblemente paralelo a la dirección de las corrientes principales».

Según estas indicaciones, sería fácil establecer el proyecto de las obras exteriores de los puertos en playas de arena; pero la gran incertidumbre que hay sobre la cantidad de arena que realmente se mueve en la costa, de la cual una gran parte debe quedar detenida por las obras que se construyan, modificando en forma importante el fondo submarino, es causa de que la solución del problema resulte muy difícil. Por otra parte, la determinación de la línea neutra es muy incierta y sólo se puede tener un conocimiento de ella una vez construídas las obras exteriores. Por eso es muy posible que el trazado primitivamente adoptado resulte defectuoso y que sea necesario llegar con el extremo del rompeolas a profundidades mayores que las previstas. Si acaso el trazado que se hubiera adoptado fuera del tipo indicado en la Fig. 14, no sería posible modificarlo después de terminado el rompeolas; es por eso necesario hacer sondajes frecuentes durante la construcción de la obra, para formarse idea de las modificaciones que puede experimentar el fondo submarino, de las cuales se puede deducir la situación probable de la línea neutra después de terminada la obra y la que por consiguiente debe ocupar el extremo de ella. En ese sentido es ventajoso el trazado rectilíneo para la primera parte del rompeolas y su continuación con una curva de radio grande, de manera que sea posible llegar a la profundidad conveniente sin necesidad de dejar ángulos entrantes, como se ve en la Fig. 17, en la cual se supone que la profundidad necesaria se encontraba primitivamente en C. Si se siguiera el trazado ABC y al llegar a B se reconociera que iba a ser necesario situar el extremo de la obra en D, para que quedara situado en la profundidad prevista, sería necesario modificar la obra siguiendo el trazado BD, que sería defectuoso. En cambio, si se hubiera seguido en línea recta la primera parte, desde A hasta B', al reconocer la modificación de las curvas de nivel y la necesidad de colocar el extremo del rompeolas en D, sería fácil enlazar de una manera satisfactoria la primera parte con ese punto.

#### IV.—ALGUNOS EJEMPLOS

En los tratados de Obras Marítimas se citan numerosos ejemplos de puertos construídos en playas de arena, en los cuales pueden verse aplicadas las diversas disposiciones que hemos visto más atrás, y es fácil ver que siempre se llega, de una manera o de otra, a las líneas generales de la Fig. 14. Así, por ejemplo, refiriéndonos a uno de los puertos que hemos citado, el de Madras, el principio a que obedecía el trazado primitivo era el de la Fig. 15, aproximadamente, y el avance de la arena obligó a transfor-

marlo, quedando formado por un molo principal que se interna rápidamente en profundidades grandes, doblando en dirección sensiblemente paralela al movimiento de la arena, es decir, de acuerdo con el espíritu de la Fig. 14.

En la República Argentina se encuentra un ejemplo de puerto construido en playa de arena que es interesante: me refiero a Mar del Plata, representando en las figuras 18 y 19. Este puerto se encuentra en una región en que la playa es extendida y formada por arena fina, de granos redondeados, sujeta a constantes modificaciones. La marea, cuya amplitud máxima es de 4,40 metros aproximadamente, siendo de 1,60 metro su amplitud media, origina corrientes dirigidas hacia el NNO durante el flujo y en sentido contrario en el reflujó, cuya velocidad alcanza a unos 1,50 metro por segundo. Los vientos dominantes son del SE. y levantan oleaje muy fuerte, habiéndose observado olas hasta de 7 metros de altura. La figura 18 corresponde al año 1909 y la figura 19 al 1930; la comparación entre las curvas de nivel de esos dos planos permite ver que el transporte de arena se verifica en los dos sentidos, como era lógico suponer, en vista de la velocidad que alcanzan las corrientes de marea; pero se ve que el transporte de Sur a Norte es mucho más importante, por el efecto de las tempestades más fuertes, llegando a producir un avance de la playa de 500 a 600 metros. El trazado del rompeolas Sur de este puerto, que es el más importante, difiere fundamentalmente del esquema general de la figura 15, que sería el que corresponde a este caso, porque en vista de la incertidumbre que siempre hay acerca de la manera cómo van a modificarse las profundidades por el efecto debido al rompeolas mismo, se quiso dejar la posibilidad de alcanzar más tarde profundidades mayores. Por efecto de la forma de la parte extrema de este rompeolas, hace la impresión de que puede producirse un depósito de arena frente a la entrada del puerto, análogo al que se ha indicado en la figura esquemática 5, que podría llegar a ser molesto para el servicio del puerto. No tengo conocimiento de las modificaciones de fondo después de 1930, de modo que no puedo saber si hay o no peligro de que ese embanque se produzca.

En Chile tenemos dos ejemplos interesantes de obras de abrigo construidas en playa de arena, que corresponden a los puertos de San Antonio y Constitución.

El puerto de San Antonio se encuentra en una playa de arena y guijarros, a unos 2 500 metros al Norte de la desembocadura del río Maipo. La cantidad de materiales que el río arrastra hasta el mar es siempre considerable y su naturaleza varía con las épocas del año, desde la arena fina, arcillosa, hasta los guijarros, y esos materiales son siempre transportados hacia el Norte, sea por la corriente litoral, cuya velocidad llega a 1 metro por segundo, sea por las olas, que llegan oblicuamente a la playa, viniendo del SO y que son siempre violentas. Esta circunstancia hacía prever la necesidad de situar el extremo Norte del rompeolas a una profundidad suficiente para evitar la invasión del interior del puerto por la arena; por otro lado, era necesario abrigar la entrada del puerto contra las tempestades del Norte, que son bastante violentas en esta región, lo que recomendaba prolongar el rompeolas hasta llegar a la zona naturalmente abrigada por la punta montañosa situada al Norte de San Antonio como consecuencia de lo anterior, se acordó fijar el extremo del rompeolas en la profundidad de 15 metros, como puede verse en la figura 20. En esta figura se ve que la zona que desempeña el papel de antepuerto es bastante profunda, pues la curva de 60 metros penetra bastante y hay profundidad natural de más de 10 metros en casi todo el antepuerto.

Desde que se inició la construcción del rompeolas, principió a detenerse la arena hacia el Sur de él, como era natural preverlo; pero la arena pasaba siempre en bastante cantidad hacia el Norte, circunstancia que fué aprovechada para detenerla con una obra secundaria y hacer en gran parte los rellenos necesarios.

El rompeolas fué iniciado en 1912 y terminado en 1918 y el efecto que ha producido sobre el acarreo de arena en la playa ha continuado manifestándose como al principio, de tal modo que la playa se ha modificado notablemente hasta llegar al río Maipo, como puede verse en la Fig. 21, que corresponde a sondeos hechos en 1934, es decir, 22 años después de iniciada la construcción.

En esta figura se ven las modificaciones producidas por el rompeolas en las distintas curvas de nivel, echándolas mar adentro a medida que ha ido avanzando la playa, de manera que la curva de 10 metros, por ejemplo, que antes pasaba antes del origen de la curva del rompeolas, ahora lo corta a 150 metros de su extremo; en cambio, la curva de 15 metros que antes contorneaba el extremo del rompeolas, pasando por fuera de él, ahora lo corta, de donde se deduce que en el extremo del rompeolas no hay embancamiento, sino socavación, lo que por otra parte ha sido demostrado por la necesidad de reforzar ese extremo, agregando enrocados y bloques artificiales. En la misma figura se han indicado las curvas de alta marea en 1934 y 1932, que casi se confunden, salvo al lado del río Maipo, donde se nota una socavación; esta semejanza en esas curvas hace pensar que está casi establecido el régimen de equilibrio en la zona de la playa cercana a San Antonio.

La cantidad de arena que ha necesitado ser retenida para producir los cambios observados en la playa y en las curvas de profundidad representan aproximadamente de 30 000 000 de metros cúbicos, y como corresponde a un período de unos veinte años, resulta un promedio de 1 500 000 metros cúbicos retenidos por año. Se ve, por estas cifras, que el transporte de materiales es considerable; pero a pesar de eso, parece que no hay temor de que pueda verse comprometida la conservación de las profundidades dentro del puerto y a su entrada.

La existencia de una fosa profunda, al bordo de la cual se encuentra el extremo del rompeolas, es, sin duda, una circunstancia favorable que influye en impedir que la arena dé la vuelta por delante de ese extremo y penetre al interior del puerto. Esta fosa ha existido siempre y se ha mantenido desde tiempo inmemorial; se ha hecho toda clase de suposiciones para explicarse su existencia, incluso la de una corriente de agua dulce subterránea, que desembocaría en el fondo de la ensenada. A mi juicio, no sería necesario ir tan lejos para buscar la explicación de su existencia, pues la masa de arena en movimiento, encontraba en su camino al Norte de San Antonio una punta montañosa muy escarpada, al pie de la cual revientan las olas con mucha violencia; las olas llegan durante todo el año del SO., es decir, de frente a la pequeña rada natural; son siempre muy fuertes y al llegar al pie de la montaña arrastran los materiales hacia el fondo de la ensenada, lo que se observó claramente durante la construcción del puerto; las olas que vienen del Sur los remueven después hasta terminar por desgastarlos muy rápidamente.

El otro ejemplo del puerto en playa de arena que tenemos en Chile, es el de Constitución, Fig. 22, en el cual el resultado desfavorable producido por la gran cantidad de arena en movimiento, detenida por las obras de abrigo, es interesante conocer.

El puerto de Constitución, que es muy antiguo y que en un tiempo tuvo cierta importancia, se encuentra en la desembocadura del río Maule, a unos dos kilómetros de la línea en que el río se pierde en el mar. Una barra se ha formado en la desembocadura, dificultando considerablemente la navegación, no sólo por la falta de profundidad, sino porque el canal navegable está sujeto a constantes cambios en su situación, debido a las variaciones del gasto del río, que son muy grandes, y al transporte de la arena por el mar, que es constantemente agitado. Se ha pensado muchas veces en mejorar la desembocadura del río y aún el gobierno, en 1891, contrató con el ingeniero francés don Camilo J. de Cordemoy, la confección de estudios y un proyecto con ese objeto; más tarde, en 1906, el ingeniero don Gustavo Quezada, basándose en los mismos estudios y completándolos, elaboró un nuevo proyecto con el mismo objeto. A mi juicio, el mejoramiento de la desembocadura del río presenta dificultades prácticamente insuperables, debidas a que para llevar la desembocadura a profundidades aceptables, que tendrían que ser superiores a 8 metros, sería necesario orientar la desembocadura hacia el Oeste, es decir, directamente contra la dirección de las olas, exponiéndolas a ser invadida por la arena.

La Comisión de Puertos, en 1912-13, en vista de las dificultades que presentaba el mejoramiento de la desembocadura del río, confeccionó un proyecto de obras de abrigo en la Caleta, que se encuentra al Sur de la desembocadura, que comprendía dos rompeolas, uno al Sur, de 650 metros de largo y otro al norte, de 535 metros. En el proyecto que hemos visto ya en la Fig. 7, el molo Sur llegaba a profundidades de 10 metros y en el interior del puerto se debía dragar hasta 8 metros el espacio abrigado que indica la Fig. 22. Las longitudes de estos rompeolas, particularmente la del molo Sur, que es el principal, eran las mínimas, que podían considerarse indispensables y que la experiencia podía aconsejar aumentar, según fuera necesario, tanto desde el punto de vista de la entrada al puerto como del movimiento de la arena a lo largo de la costa. Naturalmente había el mayor interés en que la construcción del rompeolas Sur avanzara lo más rápidamente posible, por lo menos hasta alcanzar la profundidad de 8 metros, a fin de reducir en lo posible las perturbaciones que esa construcción debía producir en el régimen de la playa, pues los diferentes sondeos efectuados habían indicado que la mayor parte del movimiento de la arena se efectuaba en profundidades inferiores a 5 metros, pero el rendimiento de la explotación de las canteras resultó muy inferior a todas las previsiones, a pesar de que no había sido estimado con criterio optimista, y desde el primer momento se vió que hacían falta los enrocados de gran tamaño, que eran indispensables para atravesar la zona de la rompiente. Por otra parte, la construcción del rompeolas vino a llamar la atención sobre otro punto, que pasaba prácticamente desapercibido, y es que en todas las épocas del año hay días en los cuales el oleaje es muy fuerte, capaz de producir perjuicios considerables, oleaje cuyo efecto fué casi duplicar el tiempo empleado en la construcción de la obra. La consecuencia de estas dos circunstancias desfavorables reunidas fué que, a medida que avanzaba la construcción del molo Sur, se producía el avance de la playa al sur de él, de tal manera que en enero de 1928, cuando ese rompeolas había alcanzado la longitud de 430 metros, la profundidad en su extremo era solamente de 4 metros, mientras, según el proyecto, debía ser de 9,50 metros. A fin de acelerar la construcción, retardada como hemos dicho por la falta de enrocados grandes, se decidió entonces reemplazar la mitad de esos enrocados por bloques artificiales de 15



a 30 toneladas de peso unitario, que se incorporaban en la masa de la obra; esta medida que naturalmente aumentó el costo de la obra, permitió obtener un avance más rápido, de tal manera que durante ese año mismo se llegó casi a la longitud total del rompeolas.

Durante la ejecución de los trabajos, la arena continuó pasando por delante del extremo del rompeolas Sur en gran cantidad y depositándose en el espacio destinado al antepuerto; al mismo tiempo la barra del río, falta de alimentación, porque la arena era retenida en la Caleta y al Sur de ella, había desaparecido por completo y se podía observar en la desembocadura del río la existencia de un canal navegable de ocho metros de profundidad. Los habitantes de Constitución, creyendo que la forma de las obras de abrigo que se construían en la Caleta había tenido como consecuencia una modificación de carácter permanente en el régimen de la desembocadura del río, error en que fueron acompañados por algunos ingenieros, que no conocían bien el problema, pidieron al Gobierno que suspendiera la ejecución de las obras de la Caleta y construyera obras para el atraque de buques en el río. Esta petición fué acogida favorablemente por el Gobierno y se suspendieron los trabajos, cuando el molo Sur había alcanzado la longitud de 664 metros y el molo Norte la de 535 metros, es decir, aproximadamente las del proyecto.

Una vez detenido el avance del rompeolas Sur, principió a establecerse un nuevo estado de equilibrio en el régimen de la playa, de acuerdo con las condiciones existentes; la entrada de arena al espacio destinado al antepuerto continuó, como era de preverse, así como el avance de la playa, de tal manera que el extremo del rompeolas llegó a quedar más o menos en la curva de los 4 metros, es decir en la zona en que el transporte de arena es más activo; pero la cantidad de arena que era retenida en la caleta fué disminuyendo a medida que ella se rellenaba y principió a seguir hacia el Norte, volviendo a formar paulatinamente la antigua barra en la desembocadura del río. La Fig. 23 es interesante, para ver la forma cómo ha ido progresando el relleno en el interior del antepuerto.

El caso del puerto de Constitución indica de una manera bien clara la influencia que las obras que se internan en el mar ejercen en las masas de arena en movimiento y la necesidad de que alcancen a llegar a profundidades considerables. La paralización de los trabajos en el momento inoportuno en que fué ordenada, impidió conocer la profundidad que habría sido necesario alcanzar para que la arena no pasara por delante del rompeolas hacia el interior del puerto. El ejemplo de San Antonio hace pensar que por lo menos debería llegarse a los 10 metros y mejor aún pasar de esa profundidad, lo que exigiría la prolongación del molo Sur en unos 400 metros, con lo cual, aún supuesto el caso de que algo de arena pudiera dar la vuelta por el extremo del molo y penetrar al antepuerto, es decir, si no se hubiera alcanzado a llegar a la línea neutra, sería fácil dragar al abrigo del molo y limpiar el antepuerto. Es indudable que lo mejor habría sido situar el molo Sur de manera que su extremo hubiera podido llegar a profundidades del orden de los 12 metros, con lo cual no habría temor de embancamientos; esto habría exigido que el rompeolas Sur hubiera partido de la roca llamada Piedra de la Iglesia, lo que naturalmente habría llevado a un gasto desproporcionado con la importancia del puerto.

Al hablar de las disposiciones que pueden adoptarse al trazar las obras de abrigo de los puertos situados en playas de arena, hemos visto en la Fig. 16, que se ha pen-

sado en construir un dique aislado, unido a tierra por un viaducto, por debajo del cual se efectuaría libremente el movimiento de la arena. Esta idea fué adoptada con éxito en Roslare, probablemente porque el movimiento de arena es de escasa importancia, y no dió los mismos resultados en los puertos de Ceara, en Brasil, y Zeebrugges, en Bélgica.

La Fig. 24, indica la disposición general del proyecto de obras exteriores de Ceara, delante de la ciudad de Fortaleza, que fué elaborado por el ingeniero inglés señor Hawksshaw. Las obras comprenden un rompeolas aislado, situado en profundidades de 3 a poco más de 6 metros, unido a tierra con un viaducto, que se encontraría situado en profundidades hasta de 3 metros. El principal defecto de este proyecto está en que toda la primera parte del rompeolas se encuentra en la zona en que se efectúa el movimiento intenso de arena, de manera que la detenia por el Este y permitía que la arena pasara por su extremo poniente y entrara al recinto destinado al puerto. El resultado de estas obras fué análogo al de Constitución; pero es más difícil corregirlo, porque será necesario construir el rompeolas en profundidades del orden de 6 metros o más, como ha sido proyectado, Fig. 25, y es posible que la conservación del viaducto en esa profundidad sea muy difícil, pues las olas de tempestad lo golpearán con gran violencia.

En un interesante estudio sobre el puerto de Ceara, el Ingeniero brasilero don Mauricio Joppert, se manifiesta partidario de otra solución, que consiste en trasladar el puerto unos 5 kilómetros hacia el Este y aprovechar el abrigo natural de la punta de Mocuripe para establecer un puerto amplio, construyendo un rompeolas de unos 2,000 metros de largo, cuyo extremo quedaría en profundidades del orden de los 10 metros. Esta solución es también, a mi juicio, preferible a la que se ha adoptado, porque el abrigo del interior del puerto será más completo; además en la otra solución es probable que el abrigo parcial creado por el rompeolas ejerza influencia desfavorable en el movimiento de la arena que haya pasado por debajo del viaducto y provoque su depósito, contribuyendo a embancar el puerto.

El otro ejemplo de obras de abrigo construídas de acuerdo con la idea del esquema Fig. 16, lo presenta el puerto de Zeebrugges, del cual la Fig. 28 representa las líneas generales, según el proyecto. Como puede verse en esa figura, frente a la costa de Heyst, había un foso con profundidades mayores que 8 metros, llamado Appelzaak, foso que fué aprovechado para situar en él la parte extrema de las obras de abrigo. Estas obras debían ser formadas por un dique aislado, de forma curva, que principiaba en profundidades de 7 metros, en el punto en que terminaba un viaducto de unión con la costa; la longitud de este viaducto, que es de 300 metros, se consideró suficiente para que el movimiento de los materiales a lo largo de la playa se efectuara libremente, pues es debido principalmente a la propagación de las corrientes de marea, que alcanzan velocidades considerables; en aguas vivas, con mar tranquilo, las corrientes de flujo son de 1,25 a 1,50 metros por segundo y las de reflujó, de 1,10 a 1,25; en aguas muertas esas corrientes no pasan de 0,80 a 0,90 metro por segundo.

Durante la construcción del rompeolas, la reflexión de las olas contra el paramento vertical del muro provocó una socavación muy intensa, por efecto de la cual se formó una enorme fosa, que recibió el nombre de *fosse du musoir*, que fué avanzando hacia el Este junto con el rompeolas; como consecuencia de esta socavación, los materiales que las olas arrancaban del fondo del mar fueron arrastrados hacia el Este,

pues el efecto de las corrientes de flujo es dominante, rellenando paulatinamente el Appelzaak, que prácticamente ha desaparecido frente a la costa de Heyst. Cuando en 1908 se efectuó la recepción de las obras, terminadas, las curvas de 6 y de 8 metros de profundidad tenían la forma que se ve en la Fig. 29. La fosa formada delante del rompeolas se mantiene, lo que es natural, puesto que subsiste la causa que la produce, y los materiales arrastrados por las corrientes y las olas, que pasan hacia el Este del extremo del molo, contorneándolo, se depositan en diversas partes, según sea su peso: la arena, que es más pesada, se deposita inmediatamente al Este del puerto, y los materiales más tenues, llevados por las corrientes derivadas, llegan hasta el interior del puerto. Durante la guerra europea, los materiales que se dragaban para conservar las profundidades, fueron vaciados en la fosa formada frente al rompeolas, de donde eran sacados nuevamente por las olas y llevados al puerto y a la playa situada hacia el Este.

El embancamiento en el interior del puerto se ha combatido por medio de dragados, cuya intensidad ha sido de 1 300 000 metros cúbicos al año, como término medio, para poder mantener las profundidades junto al malecón de la explanada construída a lo largo del molo.

El estudio de las corrientes marinas dentro y fuera del puerto y de su influencia determinante en los embancamientos producidos en el interior del puerto, aconsejó cerrar la pasada que dejaba el viaducto de unión del rompeolas, transformándolo en un tipo análogo al de la Fig. 14, en que el abrigo se obtiene por medio de un rompeolas macizo, arraigado en tierra y que al llegar a la profundidad conveniente, toma una dirección sensiblemente paralela a las corrientes principales.

En el caso de Zeebrugges, el transporte de los materiales es efectuado, como hemos visto, por las corrientes y el volumen de ellos es muy grande; no se ha podido mantener las profundidades en toda la zona abrigada, debiendo contentarse con hacerlo en la zona adyacente al malecón del puerto de escala y en el acceso del canal marítimo a Bruges. El resultado de la disposición general adoptada para las obras de abrigo no correspondió a las esperanzas que se habían cifrado en ella, lo que se debe, probablemente, según informó el señor Vershoore al Congreso de Navegación de 1935, a que el régimen de los depósitos de materiales en la rada de Zeebrugges es el efecto de remolinos derivados de las corrientes que pasan al exterior de la rada, que se superpone a las corrientes que resultan de la llenadura y la vaciatura de la rada, originada por las diferencias de nivel debidas a la marea. El mejoramiento de esta situación debe buscarse, tratando de impedir la formación de esos remolinos dentro de la rada. Lo que sólo es posible de estudiar experimentalmente, sirviéndose de modelos a escala reducida, ya que el cálculo no permite abordar un problema de esta naturaleza.

Los ejemplos citados en los párrafos anteriores nos muestran que, como decía al principio, el problema de la disposición de las obras exteriores de los puertos situados en playas de arena, sujetas a un movimiento intenso de materiales, es de solución muy difícil y que casi nunca se puede alcanzar sin recurrir al auxilio de dragados de mucha importancia. Son numerosos los fracasos, más o menos completos, observados; pero cada uno de ellos ha venido a dar alguna nueva luz sobre esta materia, que puede aprovecharse en el futuro.

## V.—EXPERIENCIAS EN MODELOS

La imposibilidad de someter al cálculo los fenómenos relacionados con las corrientes secundarias, la modificación de la propagación de las olas y el depósito de los materiales que de ellas se derivan, ha inducido a los ingenieros a buscar experimentalmente la solución de estos problemas, construyendo modelos a escala reducida, en los cuales se trata de reproducir los fenómenos naturales observados y de estudiar las modificaciones que pueden introducir las obras que se construyan.

Esta idea es indudablemente seductora; pero basta pensar un poco en la complejidad de los elementos que intervienen en los fenómenos que se trata de estudiar para ver que su realización tiene que presentar dificultades de todo género. En general, no es difícil reproducir las corrientes simples, pero en cambio no sucede lo mismo con las olas, las modificaciones que la propagación de la marea introduce en las corrientes, principalmente cerca de la desembocadura de los ríos, complican generalmente mucho el estudio, y si a ésto se agregan los efectos de las variaciones del gasto de los ríos, que a veces cambian por completo las condiciones del problema en la región afectada por ellos, es fácil darse cuenta de que las cosas se complican de tal manera que va a resultar prácticamente imposible reproducir de una manera suficientemente completa las condiciones de la naturaleza.

Hace algunos años, el Gobierno de Chile encomendó al laboratorio de Hidráulica de Karlsruhe, dirigido por el señor Rebock, el estudio experimental del problema relacionado con el puerto de Constitución; se hizo ahí un trabajo muy prolijo y cuidadoso, pero, a mi juicio, los resultados no han correspondido a las esperanzas, porque no hubo bastante concordancia entre los fenómenos observados y su reproducción en el modelo, pues en éste se han manifestado algunas corrientes transversales en la Caleta, que no se han constatado nunca en la realidad. Habría sido interesante buscar la causa de esas diferencias para haber tratado de eliminarla; no he visto las experiencias hechas en Karlsruhe, pero me imagino que puede influir en el sentido que interesa la diferencia considerable entre las escalas horizontal y vertical del modelo, por efecto de la cual las pendientes del fondo resultan muy exageradas; si se hubiera hecho un modelo con una misma escala, es probable que se hubiera obtenido una mayor concordancia entre las observaciones en el terreno y en el modelo. Es cierto que la adopción de una escala única en el modelo puede introducir dificultades derivadas de la pequeñez de las profundidades al lado de las dimensiones horizontales, lo que haría muy difícil medir las pequeñas diferencias que pueden observarse en la forma del fondo; pero, a mi juicio, es mejor buscar un material que sea removido muy fácilmente por el agua y que exagere la importancia de los depósitos y de las socavaciones, y no exagerar las pendientes del fondo, que pueden modificar las corrientes mismas y producir variaciones en la formación de esos depósitos o socavaciones.

En el Congreso Internacional de Navegación de 1935, que tuvo lugar en Bruselas, se trató especialmente el punto que nos ocupa; varios de los ingenieros que presentaron informe sobre la construcción de Puertos en playas de Arena, se ocuparon con algún detalle de los estudios hechos en modelos a escala reducida y algunos han dado a conocer detalles que pueden ser de utilidad para los ingenieros que deseen emprender trabajos parecidos.

Entre los informes que trataron esta cuestión, es particularmente interesante el de los ingenieros franceses, señores Broquaire, Etienne y Blosset, que hicieron ejecutar experiencias sobre modelos para estudiar las obras de los puertos de Abidjan y Pointe Noire, en el Africa francesa. Esas experiencias se llevaron a cabo en el Laboratorio de Hidráulica de Delft, en un pequeño estanque de  $8 \times 3$  metros.

Uno de los puntos de detalle que exige un estudio especial en esta clase de trabajos, es la elección del material que debe emplearse para reemplazar la arena, material que debe ser estudiado de manera que se pueda determinar primero la velocidad necesaria para producir su movimiento, produciendo arrugas (riplemarks) y en seguida la velocidad necesaria para que principien a borrarse esas arrugas y a producirse el movimiento en masa: por comparación con las mismas velocidades en la arena que se encuentra en el lugar de la costa que se trata de estudiar, se determinan las escalas de velocidades para las experiencias.

El movimiento de las olas es otro punto que siempre necesita un estudio detenido y que ha obligado siempre a ensayar varias disposiciones y a modificarlas repetidas veces. En Delft se le obtenía por medio de diafragmas verticales, articulados en su parte inferior y animados de un movimiento alternativo, simultáneo en todos ellos, por medio de excéntricos movidos por un pequeño motor eléctrico.

Aparte de las experiencias relativas a las obras particulares que fueron el origen de estos trabajos, se hicieron estudios bajo la dirección del ingeniero señor Pelenard-Considère, con el objeto de completar el conocimiento que se tenía del movimiento de la arena en las costas, bajo la acción de las olas y de las corrientes. Los principales resultados de esos estudios fueron muy interesantes y pueden resumirse como sigue.

Desde el punto de vista del perfil transversal del fondo del mar, se le puede dividir, para un material dado, en tres zonas: en la primera de ellas, AB, Fig. 32, la arena se encuentra en suspensión en el agua; esta zona se extiende entre el punto más alto alcanzado por las olas hasta llegar a una profundidad un poco mayor que la de reventazón de las olas; en la segunda zona, B C, tiene lugar el movimiento de la arena sobre el fondo, su pendiente es más suave que en la anterior y llega a ser muy pequeña cerca de C; la tercera zona que se extiende hacia la derecha de C, corresponde a la parte en que el movimiento del agua no es suficiente para mover el fondo: la pendiente en esta zona es la del talud natural de la arena.

Respecto al transporte de la arena a lo largo de la playa, bajo la acción de las olas oblicuas, se observó que la casi totalidad de ese transporte se efectúa en la primera zona, según el mecanismo que hemos visto en el primer capítulo. En la segunda zona, el transporte longitudinal es insignificante: la arena está en realidad animada de un movimiento alternativo bajo el efecto de las olas, pero la componente de ese movimiento paralela a la costa produce un ligero avance longitudinal de la arena. En caso que haya una corriente costanera, sin embargo, este transporte longitudinal de la arena puede ser muy importante, como hemos visto más atrás, pues las olas entregan a la corriente la arena desgregada, lo que aumenta mucho el efecto producido por ella.

También fueron interesantes las experiencias relativas a la influencia de un dique oblicuo en el transporte de la arena. La Fig. 33, indica esquemáticamente ese efecto: primero la arena se acumula en el rincón formado por el dique, mientras en la parte situada detrás de éste principia a producirse la erosión de la playa, porque no llega arena hasta ahí; después la arena sobrepasa el extremo del dique y se forma una

puntilla detrás del dique, que es empujada por las olas, que giran en torno del extremo de ese dique, y por efecto de ellas esa puntilla arenosa toma una dirección que forma un ángulo de  $65^\circ$  con el dique, prolongándose hasta llegar a la orilla del mar y formando una laguna detrás de ella. Estos efectos se ven claramente en las figuras 34 y 35, que reproducen dos estados diferentes de la playa en las experiencias hechas para el estudio de la Pointe Noire. En el capítulo II hemos visto la formación de una punta de esa clase en la caleta de Constitución, durante la construcción del molo Sur, de manera que las experiencias sobre modelo no han hecho a este respecto sino confirmar y explicar las observaciones a que antes nos hemos referido.

Otros Ingenieros, como el señor Timonoff, profesor en el Instituto de Transportes de Leningrado; el señor Verschoore, Director del Servicio de la costa de Ostende; el señor Schonweller, profesor en la Universidad Técnica de Copenhague, dieron cuenta al Congreso de Navegación de 1935 de experiencias hechas en laboratorios sobre modelos a escala reducida; pero desgraciadamente la falta de espacio no les permitió consignar detalles acerca de las diferentes soluciones adoptadas, lo que es sensible pues su conocimiento permitiría ahorrar tanteos, que siempre cuestan caro y toman mucho tiempo.

El Ingeniero don Francisco J. Domínguez, del Departamento de Obras Marítimas de Chile, ha efectuado estudios sobre un modelo de la desembocadura del Río Bueno y la playa de sus alrededores; en esos estudios, que no han sido terminados todavía, pudo formarse idea cabal de la formación de la barra que dificulta la entrada y la salida del río, que es debida únicamente al transporte de la arena por medio de las olas.

A pesar de que, como lo he manifestado más atrás, la complejidad de los elementos que intervienen en los problemas relativos a los puertos construídos en playas de arena, y con mucho mayor razón, cuando la desembocadura de un río viene a complicarlos, las experiencias sobre modelos a escala reducida pueden dar indicaciones muy útiles. No creo que esas experiencias sean susceptibles de proporcionar resultados cuantitativos, como parecen haber pensado muchos ingenieros, pero sí pueden orientar en el sentido de la solución más ventajosa del problema. En las discusiones que sobre este tema se desarrollaron en el Congreso de Navegación de Bruselas, a que he hecho referencia en repetidas ocasiones, se hicieron ver las dificultades serias que siempre se encuentran al efectuar estudios de esta clase.

Durante la discusión de este tema en el Congreso de Navegación de 1935, se hicieron observaciones muy interesantes acerca de los diversos puntos que a él se refieren. Casi todos los ingenieros que intervinieron en la discusión, manifestaron cierta desconfianza en los resultados que pueden obtenerse, no sólo por las escalas de los distintos elementos, sino también por la ecuación personal del ingeniero que ejecuta las experiencias. Por esas razones todos ellos estuvieron de acuerdo en la conveniencia de que, si es posible, las experiencias deben llevarse a cabo en modelos hechos a escalas diferentes y por personas también diferentes: la confrontación de los resultados es delicada y puede proporcionar conclusiones muy interesantes, pues si son concordantes, ello indica que los resultados son verdaderos, y, si no concuerdan, su discusión podrá dar luces sobre las causas de las diferencias y hará modificar las condiciones del modelo que resulte defectuoso.

Las conclusiones adoptadas por el Congreso estuvieron de acuerdo con las ideas enunciadas más atrás, y fueron redactadas en la forma siguiente:

«Las investigaciones de laboratorio en materia de movimiento de aluviones son de encarecer. Sin embargo sus indicaciones no pueden ser interpretadas sino con circunspección, mientras las leyes de semejanza no hayan sido puestas en evidencia por observaciones hechas en la naturaleza.

«Es recomendable que se realicen experiencias sobre modelos y en condiciones diferentes, sobre todo en lo relativo a las escalas. La concordancia eventual de las observaciones hará tener mayor confianza en ellas».

Desde la fecha del último Congreso de Navegación hasta ahora, se han seguido multiplicando las experiencias en modelos y las opiniones de todos los ingenieros que se han ocupado de ellas concuerdan con las opiniones vertidas en ese Congreso; estiman que pueden obtenerse resultados muy interesantes, que contribuyen a elegir la solución por adoptar, pero no consideran esos resultados como numéricamente exactos.

Seguramente la repetición y la generalización de esos estudios permitirá obtener en el futuro indicaciones más precisas y por lo tanto más provechosas.

---

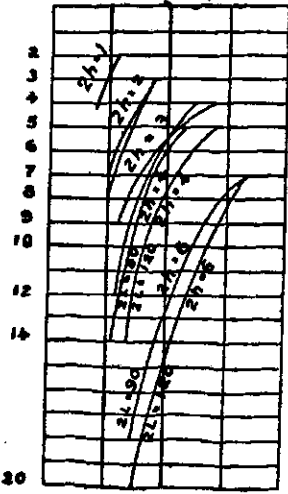


Fig. 1

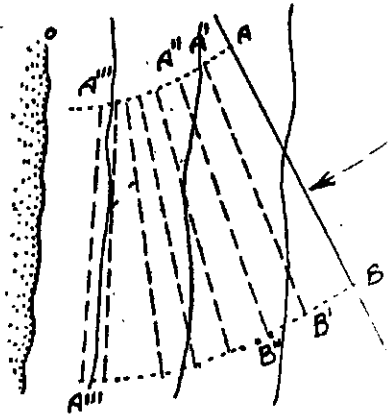


Fig. 2

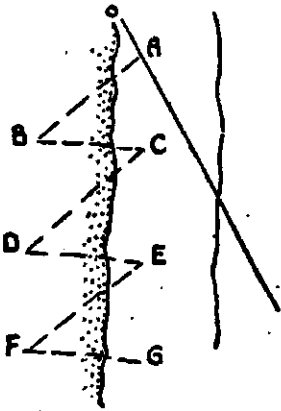


Fig. 3.

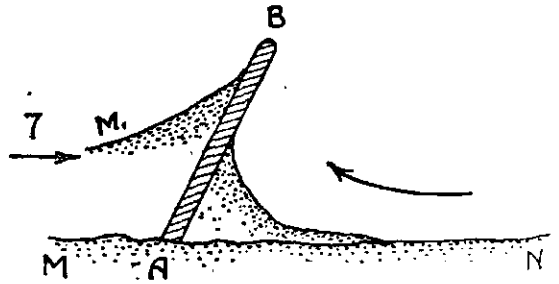


Fig. 4.

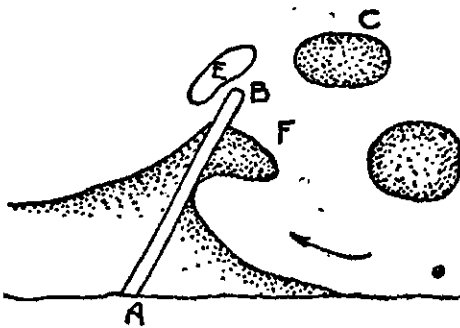
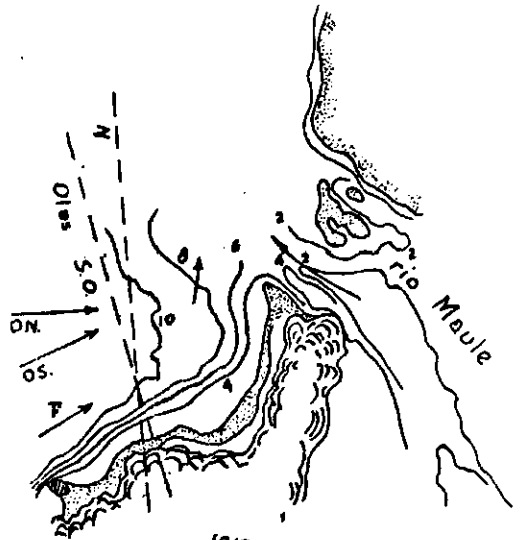


Fig. 5.



1912

Fig. 6.





fig. 7

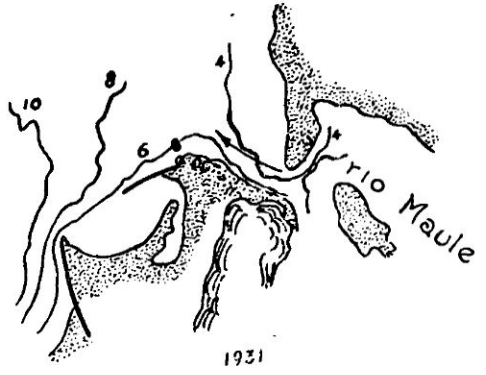
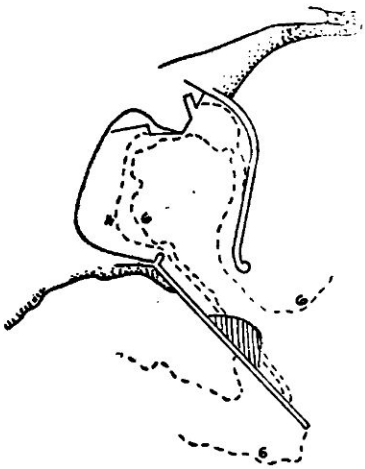


fig. 8



Puerto Maurizio

fig. 9

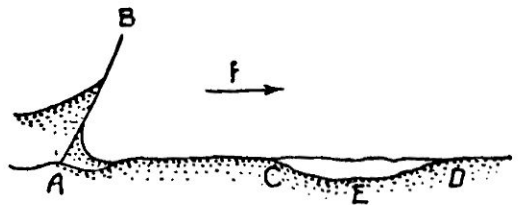


fig. 10

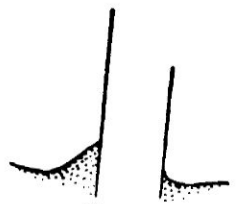


fig. 12

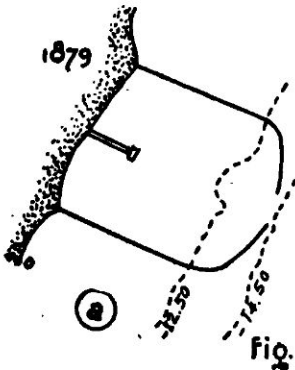


fig. 11

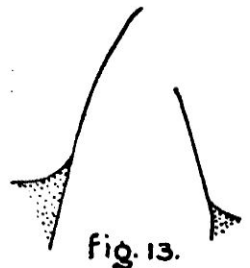
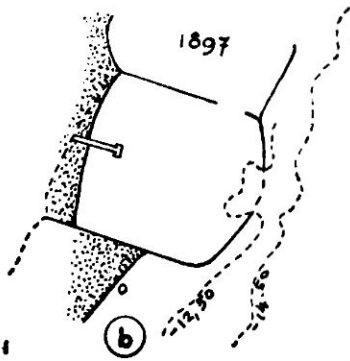


fig. 13

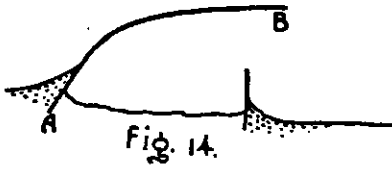


Fig. 14.



Fig. 15.



Fig. 16.

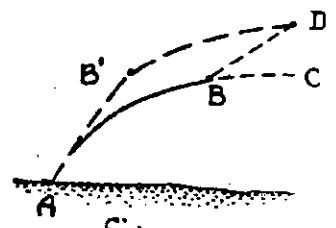


Fig. 17.

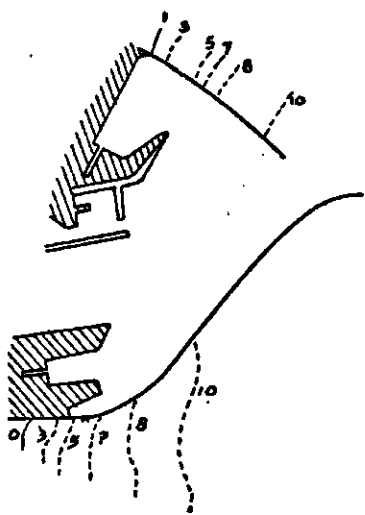


Fig. 18.

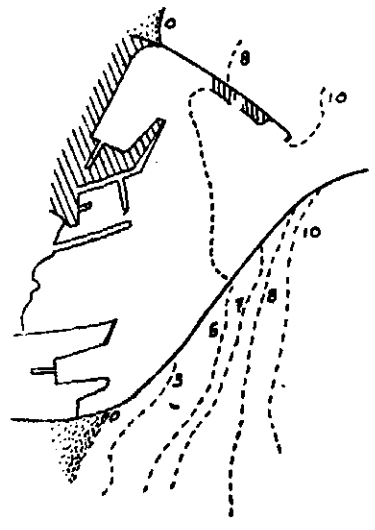


Fig. 19.

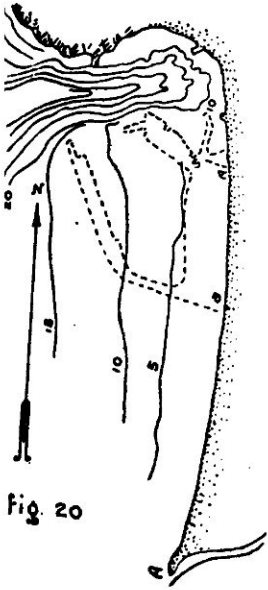


fig. 20

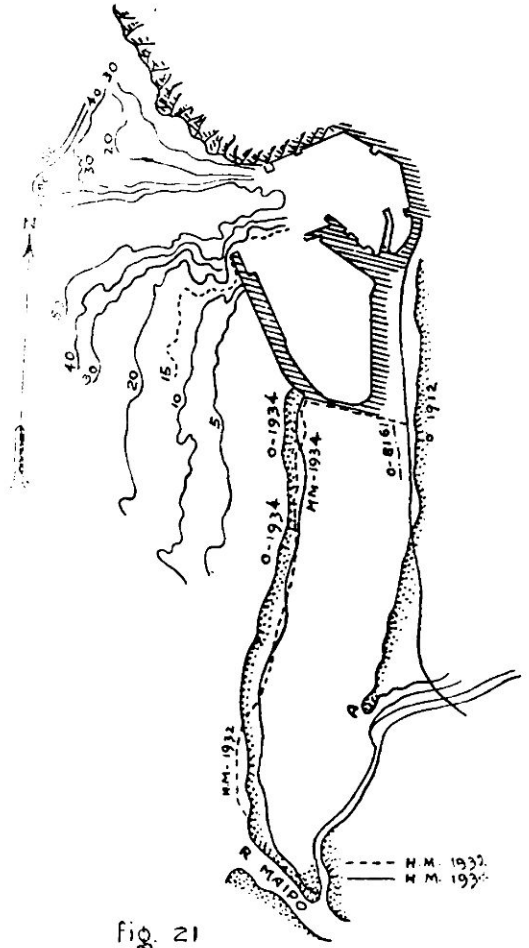


fig. 21

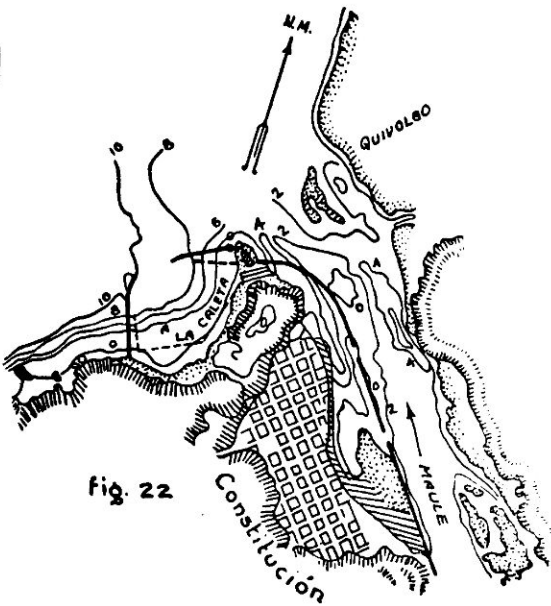


fig. 22

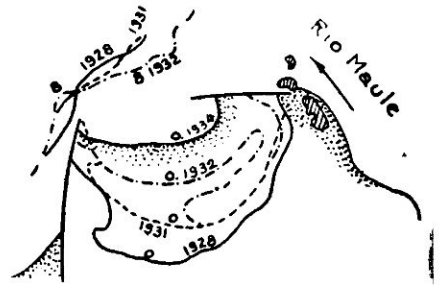


fig. 23.

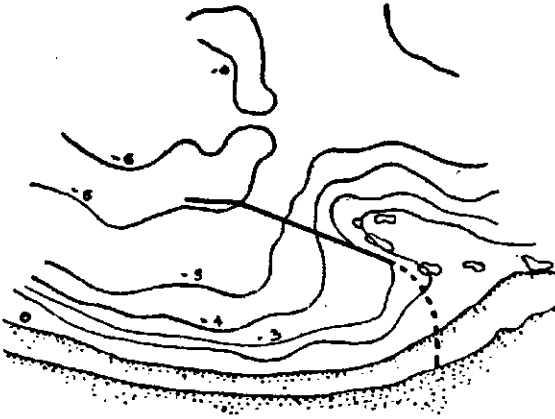


fig. 24

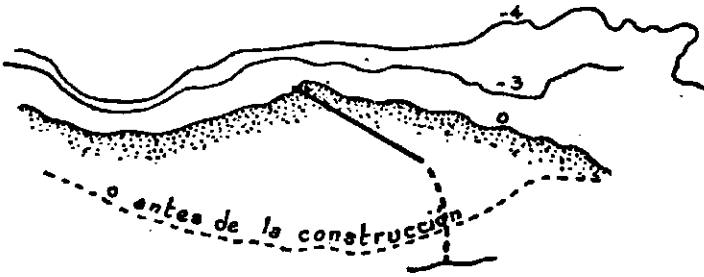


fig. 25

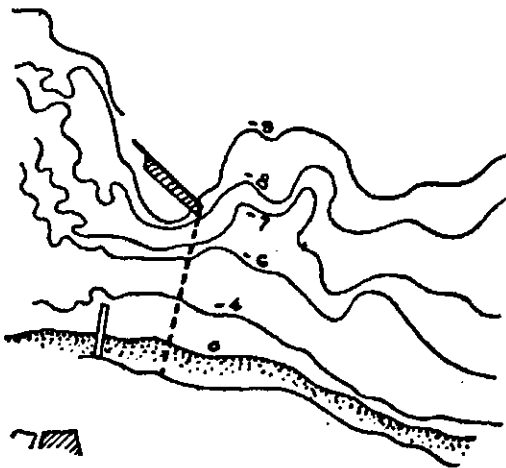


fig. 26

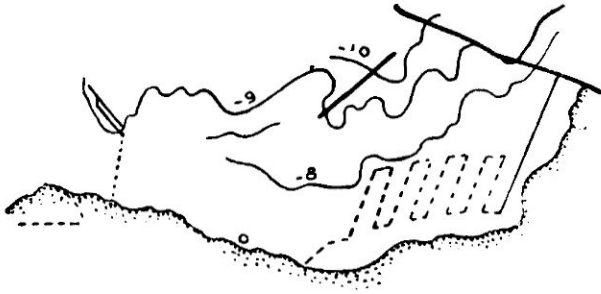


fig. 27

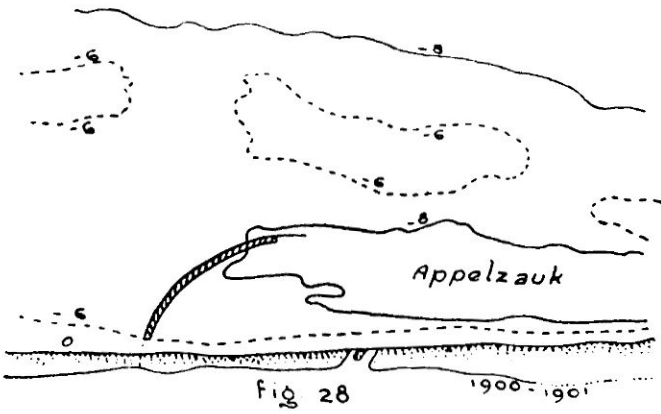


fig. 28

1900-1901

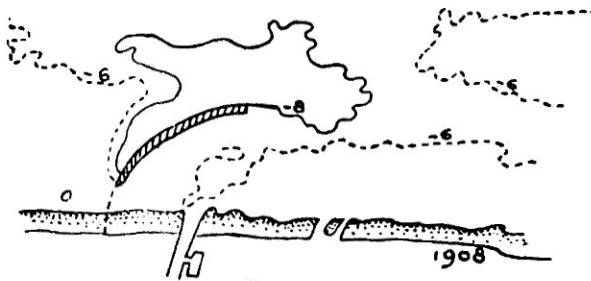


fig. 29

1908

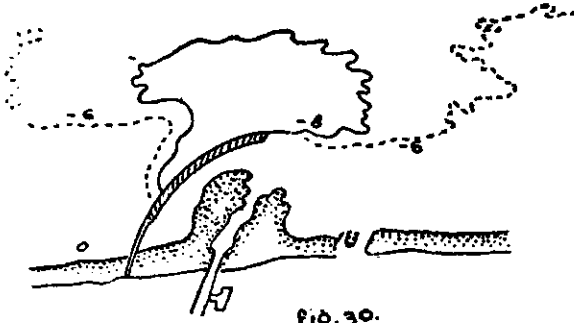
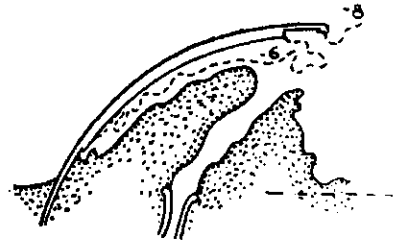


Fig. 30.



1929

Fig. 31

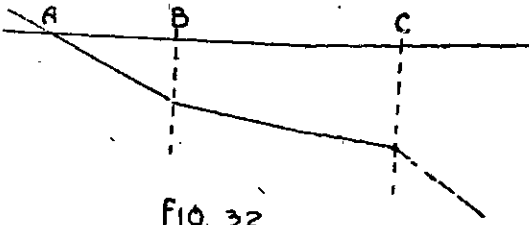


Fig. 32

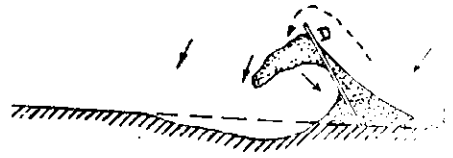


Fig. 33

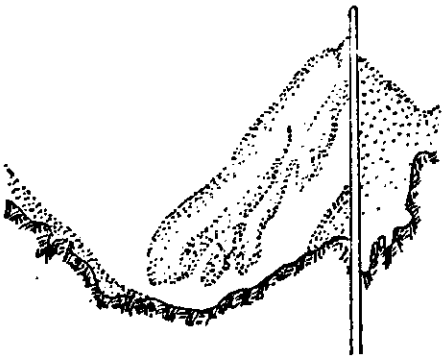


Fig. 34

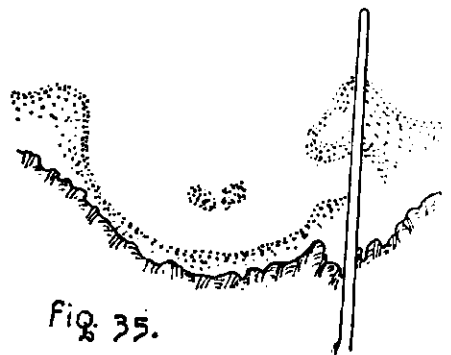


Fig. 35.