

ENSAYOS EN MODELO REDUCIDO SOBRE EL PUERTO DE ARCILA

Por JOSE LUIS CANDAU PARIAS,
Ingeniero de Caminos.

El primer párrafo de este artículo señala acertadamente el especial interés del ensayo que en el mismo se describe, encaminado a dilucidar las causas del fenómeno del enarenamiento del puerto de Arcila.

La unidad que en esencia constituye las dos zonas de protectorado de Marruecos plantea a las Administraciones francesa y española problemas comunes, de los que las obras del Muluya y las mejoras de las redes de comunicaciones son, quizá, los exponentes más destacados. En este sentido de colaboración internacional, los ensayos en modelo reducido del puerto de Arcila es sólo el eslabón de una gran cadena civilizadora.

I. El lugar.

En la costa atlántica de nuestra Zona de Protectorado y a media distancia entre los puertos de Tánger y Larache se halla enclavada la población de Arcila. Arcila es un lugar pequeño y pintoresco, donde una holgada y reciente urbanización se ha desarrollado a las puertas de las decorativas murallas portuguesas, cinturón de la ciudadela indígena. Desde la altura del palacio del Raisuni, unos cañones antiguos y herrumbrosos contemplan la vasta extensión del mar.

Una larga playa arenosa se extiende desde las proximidades del Cabo Espartel hasta Arcila, punto en que cambian la naturaleza de la costa y del fondo, que se convierten en rocosos. Frente a la población y paralelo a la línea general de la costa, aflora un cordón de arrecifes (foto núm. 1), que termina soldándose en ella. La Naturaleza había fabricado así un pequeño puerto natural, usado desde hace siglos por los indígenas, y que puede verse en el croquis núm. 1.

II. La evolución del puerto.

Apoyándose en el arco formado por los arrecifes del fondeadero, se construyó un dique de defensa (dique de Poniente), que en sucesivos períodos fué creciendo hasta alcanzar su longitud actual. Casi paralelamente al desarrollo de este dique, comenzó a manifestarse el mal, que había de terminar asfixiando el pequeño puerto de Arcila. Sin saberse exactamente su procedencia, las arenas comenzaron su in-

vasión, con tal éxito, que en el año 1943, el Ingeniero de Caminos D. José Ochoa Benjumea, Asesor de Puertos de la Alta Comisaría, podía escribir: "El puerto de Arcila presenta en la marea baja un aspecto desolador: todo el aspecto abrigado por el dique de Poniente aparece aterrado. Con la marea alta se cubre en parte el arenal en que el puerto se ha convertido, pero aunque el espectáculo sea diferente, el resultado es el mismo; el puerto no existe como tal" (foto núm. 2).

El progresivo enarenamiento del puerto se atribuyó a una corriente litoral N.-S., y que había ya llevado, con bastante anterioridad, a la conveniencia de construir un dique-pantalla de defensa contra el mismo. Después de un primer fracaso, se llevó a cabo la construcción de un dique de escollera (dique de Levante). La acción del mar aplastó su extremo, dándole la curiosa forma que tiene en la actualidad. Agreguemos la construcción de un pequeño dique interior paralelo al de Levante (dique de la Almadraba), con fines comerciales.

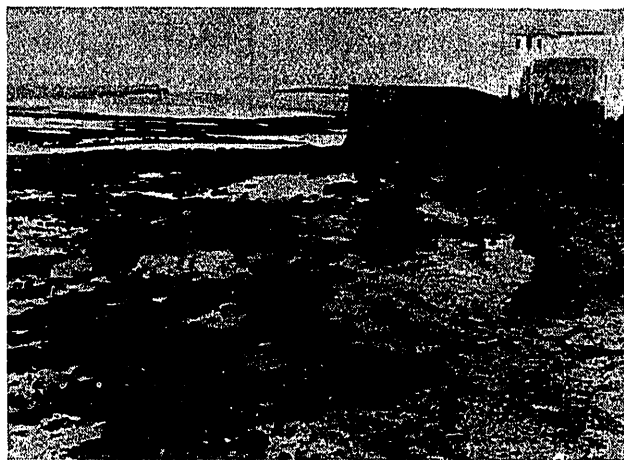
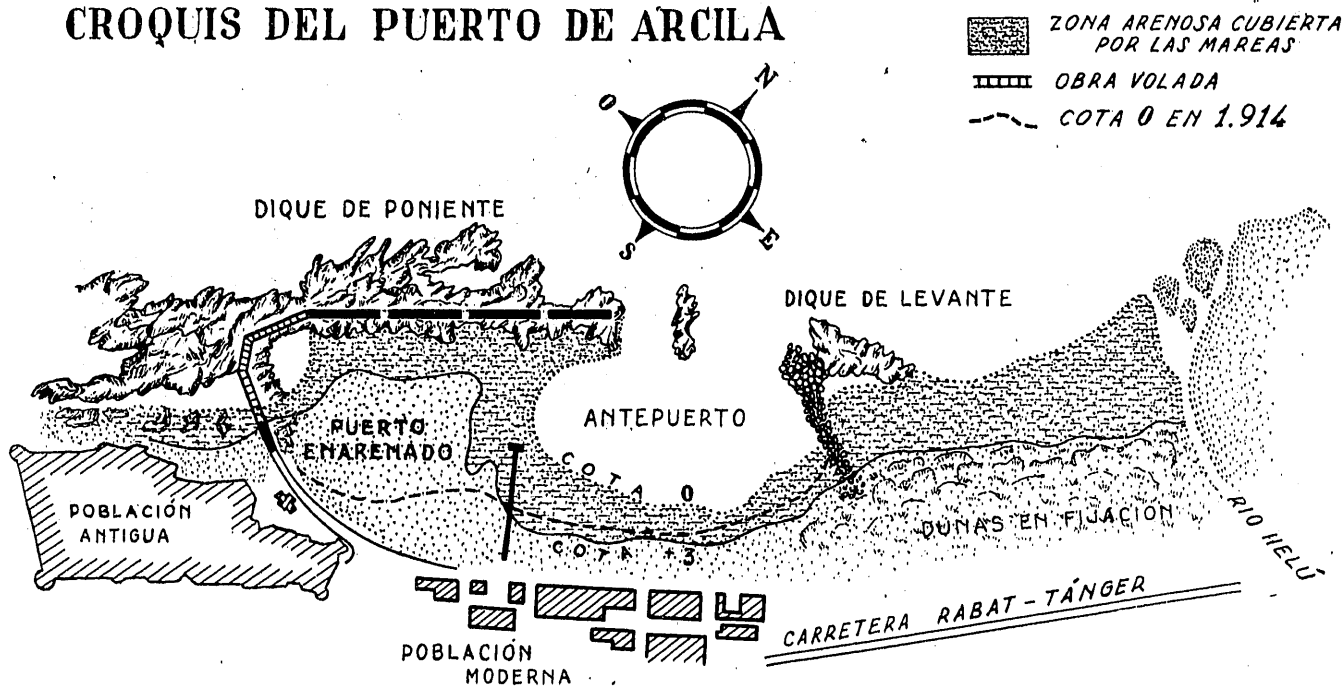


Foto núm. 1 (año 1949).—Arrecifes del SO. del puerto (marea baja). En primer término, las murallas y el Palacio del Raisuni. Al fondo y a la izquierda, los cuatro trozos que quedan del dique de Levante. Puede apreciarse la gran masa de arena en el interior del puerto.

CROQUIS DEL PUERTO DE ARCILA



Posteriormente (año 1933) se abrió una pequeña bocana en el dique de Poniente, cuyo efecto, aunque muy localizado, hizo concebir esperanzas, que condujeron a la voladura (foto núm. 3) de gran parte de dicho dique, y de la que después hablaremos.

III. El enarenamiento.

Tres causas podían atribuirse a la invasión de las arenas: los transportes aéreos desde unas dunas de arenas situadas al NO. del puerto y arrastradas por

el viento de Levante, la existencia de una corriente litoral N.-S., que acumula las arenas dentro del puerto, y la acción de la marejada al socavar la parte desabrigada del mismo y ejercer un transporte interno.

En el informe anteriormente citado del Sr. Ochoa, se proponía la fijación de las dunas mediante plantaciones adecuadas, la voladura del arranque del dique de Poniente y la posterior prolongación de éste hacia el Sur, para mantener una fuerte corriente de limpia N.S. sin que el puerto quedase desabrigado.

Así pues, se inició la fijación de las dunas situadas

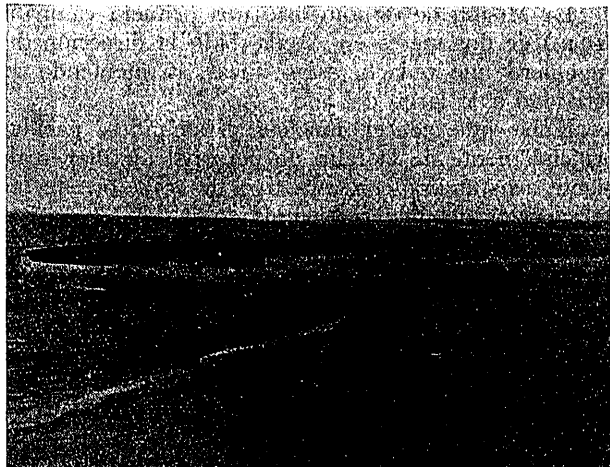


Foto núm. 2 (año 1934).—Dique de Poniente, mostrando la pequeña bocana abierta en 1933. Corresponde a marea baja mediana, y ya puede observarse la invasión de las arenas. Fotografía tomada probablemente desde el Torreón que se ve en la anterior.



Foto núm. 3 (año 1943).—Primeras voladuras del dique de Poniente. Obsérvase la altura alcanzada por las arenas por encima de la cota +4.

al NO., y en 1943 se voló el arranque del dique de Poniente, quedando de éste solamente la parte paralela a la costa, donde más tarde se abrieron tres nuevas bocanas.

El efecto de las voladuras (quizá por la ausencia de grandes temporales) no fué el previsto, aunque, desde luego, se evacuara considerable cantidad de arena. A lo largo del dique de Poniente corre un canal de unos 50 m. de ancho, que queda en seco en todas las bajamareas un poco fuertes, y hay una balsa de agua permanentemente adosada a la parte volada. Se regularizó el relieve de casi la totalidad de la gran masa de arena o tómbolo situada al Sur del dique de la Almadraba, con cota media de 3 a 3,60 metros (fotografía núm. 4).

Alcanzado este punto, se estabilizó el puerto de Arcila, y en el año 1949 dieron punto las gestiones, iniciadas ya en el año 1948 para el estudio en modelo reducido del problema del puerto de Arcila.

IV. El problema.

Estabilizado el puerto en estas condiciones, no queda de él como tal más que el antepuerto propiamente dicho, con escasa protección contra los temporales y sin la posibilidad de operaciones directas de descarga.

Entramos así (1949) en la última fase del estudio del problema.

La incógnita principal que había de resolver era el origen y la causa del aterramiento producido en el puerto. Aclarado éste, procedería determinar la forma eficaz y económica de hacer frente a ella, y por último, un plan destinado a facilitar el dragado del interior del puerto.

Según los planos anteriores al enarenamiento, el calado general del puerto era modesto. Si añadimos la escasa importancia económica de Arcila y su falta de zona de servicios, cualquier remedio, eficaz pero costoso, resultaría prohibitivo. En problema de este tipo, desgraciadamente la Naturaleza no tiene en cuenta factores económicos y plantea a los puertos modestos las mismas dificultades que a los importantes.

No concluido el Laboratorio de Puertos de la Escuela Especial de Ingenieros de Caminos de Madrid en la época (1948) en que se iniciaron los estudios tendentes a la habilitación del puerto de Arcila, la Administración española entró en relación con el Laboratoire Central d'Hydraulique de París por medio de su filial en Casablanca (Société d'Etude Hydrographique et Oceanographique du Maroc), que en aquella época tenía en curso ensayos en modelo reducido de los puertos de Safí, Agadir y Casablanca, con lo que podría beneficiarse el puerto de Arcila del conocimiento general de la costa atlántica adquirido por dicha organización (posteriormente ampliado con el estudio del puerto de Tánger). Se con-

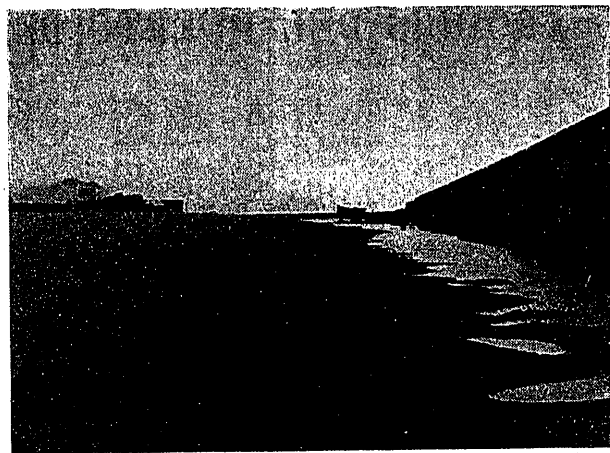


Foto núm. 4 (año 1949). — El puerto en bajamar ordinaria. A la derecha, el dique de Poniente, y al fondo, el Palacio del Raisuni. Obsérvese el puerto, inutilizado por completo por las arenas.

vino que por el L. C. d'H. se realizaría en París la maqueta del puerto de Arcila, el estudio del problema del enarenamiento y de su solución económica, bajo la dirección de su Director, M. Jean Laurent. Los datos precisos para ello serían recogidos por una Misión de estudios española, que durante el período de ejecución de los ensayos estaría en contacto con el Laboratoire a través de la SEHOM. Se seguiría un régimen solapado en la toma de datos, ensayos en la maqueta, comprobación en la Naturaleza, corrección en la maqueta..., hasta efectuar el tarado completo de la misma, es decir, la reproducción fiel de determinados fenómenos reales.

V. La Misión de estudio española.

La Misión de estudio hizo una primera campaña (1949) de dos meses en Arcila, bajo la dirección del Ingeniero que redacta estas líneas, manteniendo su actividad a lo largo del año 1950.

Hubo que vencer muchas dificultades, nacidas principalmente de la falta de personal auxiliar realmente acostumbrado a este tipo de trabajos, de las deficiencias del material empleado y del estado habitual de agitación del mar en Arcila.

El papel asignado a nuestra misión comprendía la obtención de datos sobre los siguientes puntos: Mareas, Condiciones meteorológicas, Planos de sonda hasta la batimétrica — 20, Corrientes, Olas, Toma de muestras de los fondos, Evolución del enarenamiento y, en general, de cuanto permitiese formar criterio sobre el complejo problema de Arcila. Algunos de estos extremos (sondeos del largo y toma de muestras de los fondos) hubieron de aplazarse hasta la segunda campaña, en espera de recibir los instrumentos auxiliares necesarios (círculos hidrográficos, cuchara Lager, etc.).

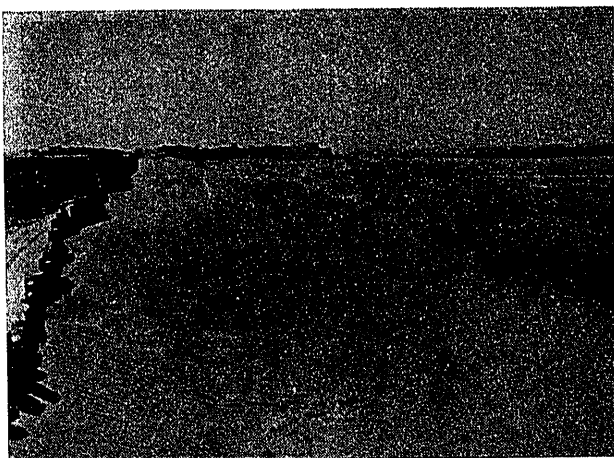


Foto núm. 5. — Empalizada longitudinal de la fijación de las dunas al NE. del puerto.

Las principales conclusiones a que se llegaron, independientemente de los datos necesarios para la construcción del modelo, fueron las siguientes:

- El papel preponderante del viento del Este por aportación directa de las arenas y posible refuerzo de una corriente litoral NE.-SO. (fotografía núm. 5).
- La existencia en el antepuerto de una corriente circular que, socavando las partes desabrigadas del mismo, aportaba arena al puerto.
- La existencia de una corriente S.-N. contraria al enarenamiento.

Comunicados al Laboratorio los datos precisos, pudo iniciarse por éste (principios de 1950) la construcción de la maqueta.

VI. Aplicación de la teoría de los planos de oleaje al puerto de Arcila.

Las distintas observaciones realizadas en Arcila nos llevaron al convencimiento de que la dirección de propagación de las olas era constante y normalmente independiente del viento local (salvo temporales de Levante).

Aplicando la teoría de los planos de oleaje para un viento Oeste y *fetch* máximo, encontramos que la plataforma costera producía un giro en el avance de las olas hasta convertirlo en sensiblemente normal a la costa, coincidiendo en esto con los datos obtenidos de fotografías aéreas. Los cuadriláteros de avance del Sur, siendo menores que los del Norte, provocarían una sobreelevación media que daría origen a una corriente SO.-NE. Esta corriente era contraria a la hipótesis normalmente admitida, que atribuía el enarenamiento a una corriente N.-S., pero su existencia, comprobada en la realidad y posteriormente en

la maqueta, concuerda con el hecho de que los temporales de Poniente ejercían una intensa limpieza de las arenas.

Igualmente aplicamos la teoría a la inversa. Es decir, partiendo de una fotografía aérea del estado habitual del mar, completamos la red de cuadriláteros de avance conforme a la longitud de onda medida en la fotografía en la parte más alejada y, por tanto, menos deformada por la influencia del fondo. Los resultados obtenidos indicaban la posibilidad de una corriente S.-N. que se veía reforzada en un 50 por 100 dentro del puerto, donde, dando origen a una corriente circular en el sentido de las agujas de un reloj, provocaría socavaciones en el antepuerto. Esta corriente circular fué también comprobada en la Naturaleza y maqueta. La exterior no fué posible medirla, pero los resultados obtenidos no nos han permitido descartarla, principalmente si se combinaba con vientos de Levante. Si tenemos en cuenta que el viento normal con el buen tiempo marítimo es el de Levante, explicaría también el hecho de que el enarenamiento se acentúa en el buen tiempo.

VII. La maqueta.

La maqueta construída ocupaba un emplazamiento de unos 15×15 m.² y estaba limitada por un canal, comunicando con ella mediante orificios para la reproducción de las mareas.

Los datos más característicos se encuentran en los siguientes cuadros:

Escala de semejanza.

Planta	1/250
Altura	1/125
Superficie	1/62 500
Volúmenes	1/7 812 500
Velocidad	1/11,2
Tiempo	1/22,3
Caudales	1/350 000

Elementos característicos.

	Real	Maqueta
Período de olas	6 s.	0,27
	11 s.	0,49
	16 s.	0,72
Altura de marea media	3 m.	2,40 cm.
Dirección de una marea	12 h.	32 m. 16 s.
Velocidad	1 nudo	4,55 cm./ség.

(La disposición de conjunto puede verse en la fotografía núm. 6).

Para hacer los fondos se materializaron las batimétricas con ladrillos, rellenándose después (fotografía núm. 7). En las zonas que en la Naturaleza se

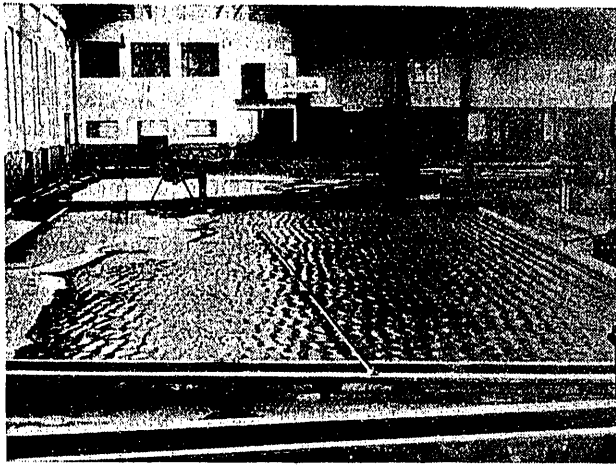


Foto núm. 6 (año 1950).—Aspecto general de la maqueta del puerto de Arcila. La costa y las obras se encuentran representadas a la izquierda. A la derecha puede verse el generador de olas.

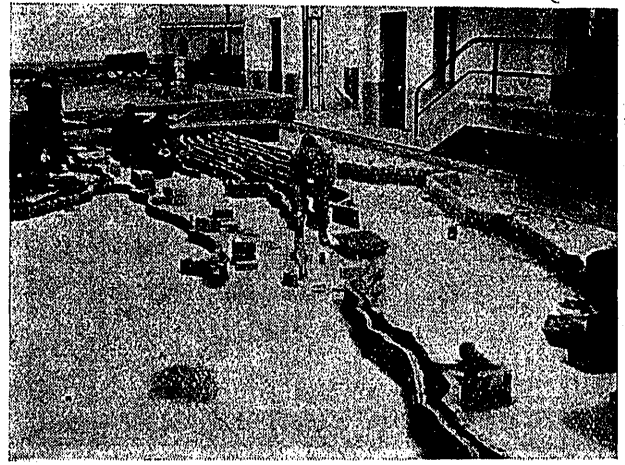


Foto núm. 7 (año 1950).—Ejecución de las batimétricas

producía movimiento de material se dejaron fosas rellenas de arena comprimida y modelada según la topografía de los fondos a representar, formando así la base para los fondos erosionables propiamente dichos (serrín, polvo de baquelita, etc.). Los arrecifes y las obras se hicieron de cemento.

VIII. Reproducción de los fenómenos naturales y métodos seguidos.

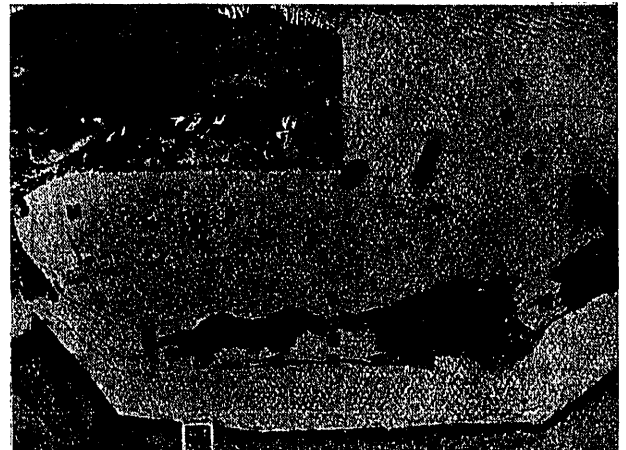
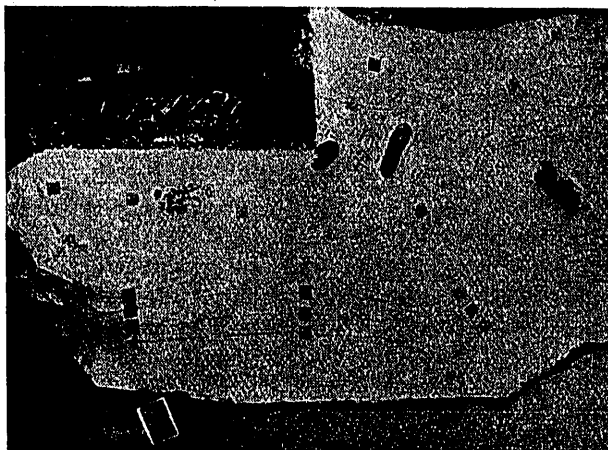
Para la reproducción de los fenómenos naturales que habían de ensayarse sobre la maqueta, se procedió de la forma siguiente:

Mareas.—Determinada la ley homóloga de las mareas, la alimentación y desagüe se hace a través

de orificios más o menos obturados por válvulas de eje vertical y forma especial, para que el caudal admitido vacie linealmente, ajustando su movimiento a la ley determinada de la marea.

Generadores de olas.—Se utilizaba un bastidor de chapa de aluminio oscilante sobre dos semipalieres especiales y movido en su punto medio por una biela animada de un movimiento alternativo sinusoidal, con una manivela de excentricidad variada acoplada, mediante las reducciones oportunas, a un motor.

Vientos.—Se conseguían mediante unos ventiladores acoplados a motores eléctricos. Obrando sobre la inclinación de su eje, su altura y el peso de las hélices, se consigue la elasticidad suficiente para reproducir los vientos precisos.



Fotos núms. 8 y 9 (año 1949).—Evolución de los fondos. Las dos fotografías corresponden a un ensayo realizado con el puerto en las condiciones de 1914; esto es, sin obras. En la foto número 9 puede observarse de negro intenso la arena introducida para un determinado ciclo y dirección de ola.

Evolución de los fondos. — Para seguir la evolución de los fondos se hace preciso conocerlos antes y después de cada ensayo. Para ello se materializaban con hilos de lana las diferentes isobáticas, que se fotografiaban a continuación (ver fotografías 8 y 9).

Estudios de las corrientes. — Se materializaba su trayectoria con permanganato potásico o fluorescencia; su velocidad se obtenía mediante flotadores, lastrados o no, según fuesen superficial o de fondo.

Medida de la agitación. — Mediante un limnómetro de contacto eléctrico.

Análisis del perfil de la ola. — Mediante un registrador electrónico de nivel.

Registro de las curvas de marea. — Con mareógrafo registrador, de flotador.

IX. Tarado hidráulico del modelo y ensayos diversos.

Una vez ajustados los aparatos de reproducción de marea y los generadores de ola, se comprobó que el modelo reproducía los planos de refracción de las olas, así como las corrientes correspondientes para un estado determinado de los fondos.

Se escogió un ciclo de varias mareas sucesivas de 3 m., durante las cuales se hacían alternar olas del W. pequeñas, cortas, medias y largas o grandes, a fin de obtener el esquema de una tempestad. Aplicadas a los distintos estados de construcción del puerto, se comprobó que las olas del O. no explicaban por sí solas el enarenamiento del puerto.

Así pues, se repitieron los ensayos con olas provenientes del N., obteniéndose un enarenamiento perceptible. Se modificó el ciclo, consiguiéndose ya uno comparable a la realidad, pero con algunas discrepancias.



Foto núm. 10 (año 1950). — Ensayo para tratar de obtener un autodragado del puerto, a base de la apertura de canales en la masa de arenas. No dió resultados satisfactorios económicamente.

En el mes de junio se ensayan diversas soluciones para combatir el enarenamiento, partiendo de su procedencia hidráulica. Se estudia primeramente la posibilidad de facilitar el autodragado del puerto mediante la apertura de canales (fotografía 10), construcción de diques, etc., comprobándose que cualquier solución eficaz era más costosa que el dragado directo. A continuación se ensayan diversas obras de protección, y principalmente:

- La prolongación del dique de Poniente.
- La prolongación del de Levante
- La construcción de un dique sumergible cercano al anterior.

Esta última, que parece revelarse como la mejor, se muestra posteriormente ineficaz para determinados estados del mar.

Mientras tanto, proseguían en Arcila la toma de muestra de fondo y experiencias con polvo de ladrillo, buscando la confirmación de un posible contorneo del dique de Levante por las mareas, con resultado negativo.

X. La influencia del viento.

Las discrepancias encontradas en el tarado del modelo al reproducir el enarenamiento del puerto, los informes recibidos, tanto de nuestra Misión de estudios como los derivados del realizado en el puerto de Tánger por la SEHOM, así como los resultados del análisis de las tomas de muestras del fondo, llevaron al Laboratoire Central d'Hydraulique a la conclusión de que la sola acción marítima no bastaba para explicar el problema del enarenamiento, y que, por consiguiente, los transportes eólicos tenían en él una influencia considerable.

Para ello hubo que dar una nueva orientación a los ensayos, abordando un aspecto nuevo en la técnica de los modelos reducidos.

Se comprobó que no existía dificultad en reproducir cualquier viento ni los transportes debidos a corrientes originadas por ellos. En cambio, sí existían complicaciones en el transporte aéreo propiamente dicho, ya que mientras en la Naturaleza la acción del viento se ejerce sobre materiales bien secos, en el modelo, las zonas homólogas, están humedecidas por capilaridad. Para evitar esto, se recurrió al artificio de sobreelevar ligeramente de vez en cuando el nivel del agua en la maqueta, de forma que las regiones afectadas por la deflación eólica fuese inundada y recorrida por la corriente debida al viento engendrado por los ventiladores.

Después de numerosos ensayos, en los que fué afinándose progresivamente las características del ciclo a elegir, se llegó a una reproducción bastante satisfactoria del enarenamiento, aunque algunas diferencias no permitían descartar la influencia marítima propiamente dicha.

XI. La protección del puerto contra el enarenamiento.

Comprobada la influencia preponderante de la acción eólica, pasó a considerarse las medidas adecuadas para combatirla.

Estas eran, fundamentalmente, tres:

- La fijación de las dunas y zona costera del Norte (fotografía 5).
- Desviación de las arenas mediante un dique al Norte del de Levante (fotografía 11).
- Captación de las arenas en el interior del puerto (fotografía 12).

Siendo indudable la eficacia de la primera medida, el L. C. d'H. se limitó a dar algunas indicaciones complementarias al proyecto en realización por el Servicio de Montes de la Administración española,



Foto núm. 11. — Construcción de un dique-guía para encauzar las arenas hacia el largo.

recogiendo las experiencias obtenidas por la SEHOM en sus estudios de Tánger.

La segunda medida se reveló como excesivamente costosa para los resultados que se obtenían con ella.

La captación de las arenas en el puerto cumple el doble papel de interceptar tanto la arena en tránsito bajo la influencia del viento como la arrastrada por la corriente circular del antepuerto. En esencia, se realiza mediante una empalizada guía tangente a la playa y al dique interior de la Almadraba, que termina en un foso al extremo de dicho dique, lugar donde se instalaría una draga fija.

Otro punto interesante preciso de aclaración era la zona en que habrían de depositarse los productos del dragado. Tras distintas experiencias se encontró como sitio óptimo el exterior del dique de Poniente.

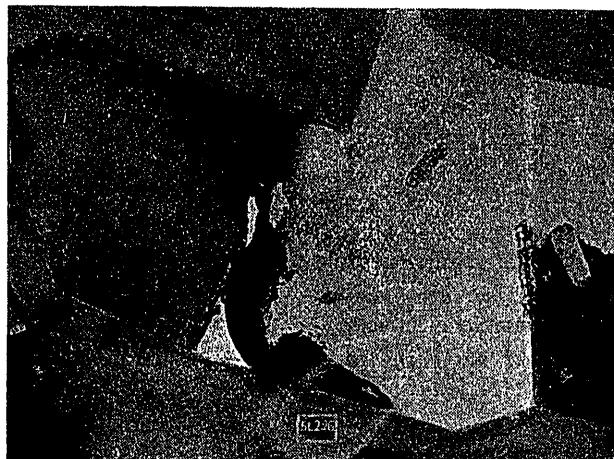


Foto núm. 12 (año 1951). — Captación de las arenas en el interior del puerto con una empalizada-guía que termina en un foso como punto fijo de dragado.

XII. Plan para la habilitación del puerto.

Una vez impedida la progresión del enarenamiento, se plantea el problema de la habilitación del puerto.

Ya indicamos en otro apartado la conclusión obtenida de que no era posible lograr, mediante obras económicamente satisfactorias, un autdragado de la parte invadida por las arenas.

La habilitación del puerto tendría dos etapas.

En la primera (fotografía 13), coincidente o posterior a las medidas de fijación de las dunas y captación de las arenas en el puerto, se prevé el dragado de parte de la actual masa de arena, dejando una banda angular de unos 75 m. de ancho sin dragar, sus-



Foto núm. 13 (año 1951). — Zona a dragar en la primera fase de habilitación del puerto. El codo volado del dique de Poniente se encuentra sustituido por la protección prestada por la misma masa de arenas.

tituyendo a la parte derruida del dique de Poniente, protegiendo el vaso dragado, que constituiría así el puerto propiamente dicho, de la acción de los temporales.

Durante esta etapa se comprobaría la eficacia de las medidas de protección contra el enarenamiento.

En la segunda fase podría reconstruirse el dique de Poniente y terminar el dragado del tómbolo interior del puerto. Los ensayos en la maqueta mostraron que una vez reconstruido el dique de Poniente los productos del dragado deben verterse con preferencia al SO. del puerto.

También se comprobó la conveniencia de prolongar dicho dique hacia el NO., paralelamente al frente de ataque de las olas del W., hasta alcanzar la laja

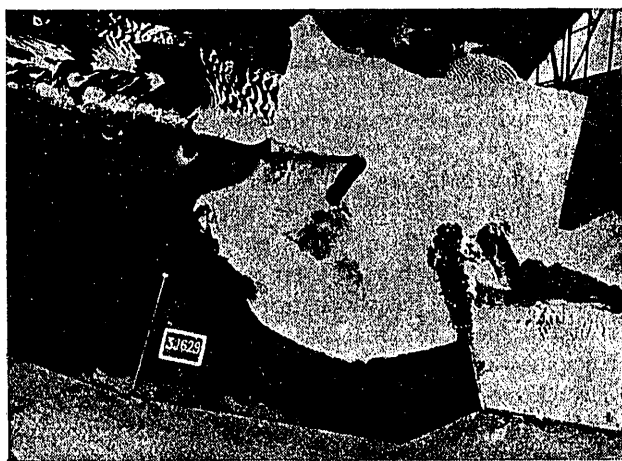


Foto núm. 14. — Prolongación aconsejable del dique de Poniente, una vez reconstruido.

del centro de la bocana, de acuerdo con lo indicado en el informe de nuestra Misión de estudios (fotografía 14).

XIII. Conclusiones.

Hemos pasado revista al proceso seguido por el estudio de la invasión de arenas sufrido por el puerto de Arcila.

Los ensayos en modelo reducido, combinados con las observaciones en la Naturaleza y el estudio metódico del problema, han conseguido, después de una primera fase de titubeos, revelar la verdadera esencia de éste. No podemos pedirles, en rigor, a estos ensayos el parto de un mágico procedimiento de esquivar la fuerza de la Naturaleza. En el caso de Arcila, ni la hay ni podía haberla, una vez vista la causa original de todo. Ellos han servido principalmente para confirmar ésta y darnos un camino económicamente fácil para conseguir la habilitación del puerto de Arcila.

Ha sido, por último, un bello ejemplo de colaboración técnica entre el "Laboratoire Central d'Hydraulique" y la "Société d'Etudes Hydrographique et Oceanographique du Maroc" de una parte, y el Servicio de Puertos de la Delegación de Obras Públicas de la Alta Comisaría, por otra, solamente posibles gracias al interés y entusiasmo desplegado por M. Jean Laurent, Director del L. C. d'H., y sus colaboradores de la SEHOM, comandantes Vennin y Martin, así como al apoyo que en todo momento prestó a estos estudios D. Vicente Martorell, Delegado de Obras Públicas, a todos los cuales hacemos presente nuestra más viva gratitud.