

Sobre las condiciones de estabilidad de los diques verticales

Al amanecer del día 3 de febrero, un violento temporal de mar destruyó 400 metros del dique de Mustaphá, del puerto de Argel.

Por ser un dique muro, acerca de los cuales ha habido tantas discusiones y comentarios, sobre todo en el Mediterráneo, y por ser en él, el único ejemplar en la costa francesa de un dique de este tipo expuesto a un mar muy duro, la avería ha dado pie a estudios

y discusiones y ha sido motivo de preocupación para muchos ingenieros.

Uno de esos estudios, de un indudable valor, es el de Enrico Coen Cagli, titulado *Sulle condizioni di stabilità dei moli a parete verticale*. No debe quedar ese trabajo en una simple nota bibliográfica. Merece mucho más. A dar cuenta de él, a extractarlo y a subrayar la opinión del autor, se dedica este artículo.

Dice Coen Cagli:

Comienza con la descripción de la ensenada, que tiene 10 millas de cuerda y 4 de flecha, entre los cabos Caxine y Matifon, en la que se halla Argel. Es el N N E. que lleva de Génova, tras de un recorrido de 530 millas, el viento tempestuoso.

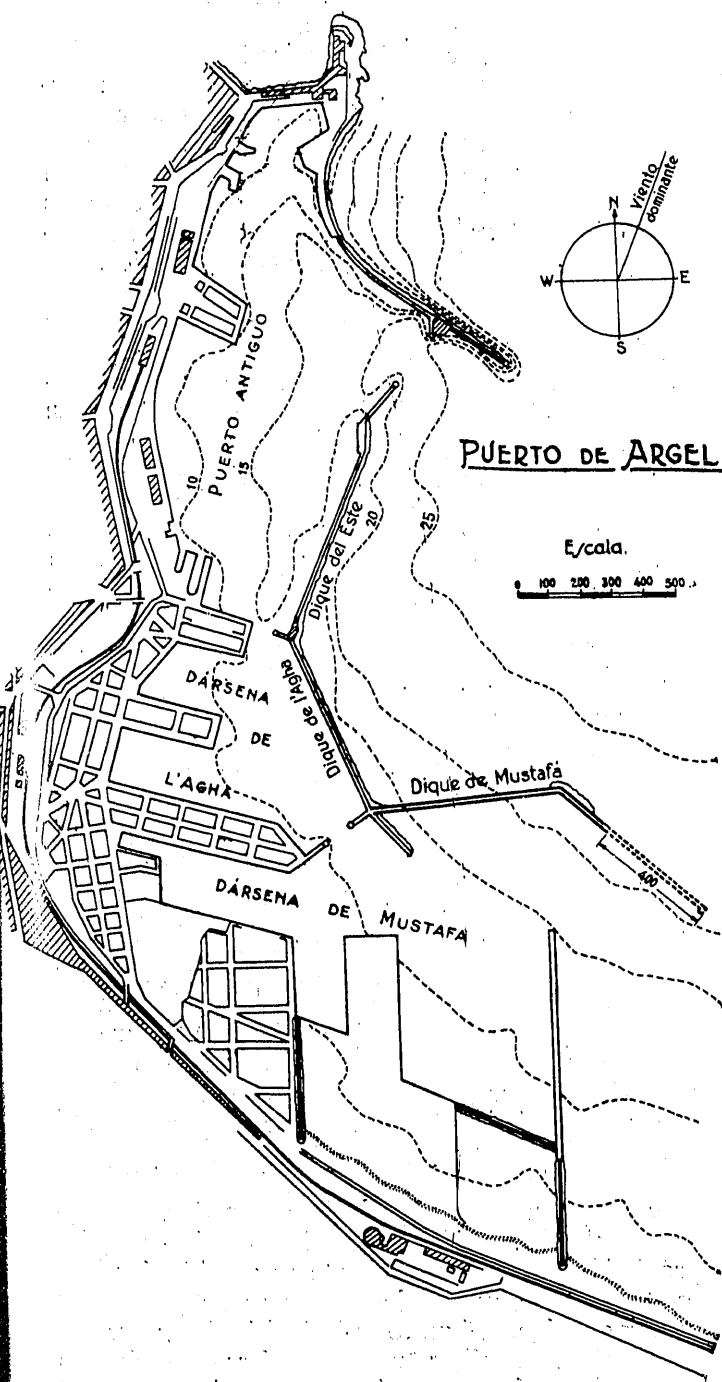
Entre Génova y Argel hay profundidades grandes, que pasan de los 2 500 metros, y los mayores fondos están hacia la costa africana. Las isobatas de 1 000 y 2 000 metros, están a 12 y 20 kilómetros de Argel, y a 24 y 47 de Génova, lo cual nos dice que la mar conserva más su energía cuando va hacia Argel que cuando el viento la lleva hacia la tierra italiana.

El año 1922 se hizo el proyecto del dique de Argel, y se contó con que las olas no pasarían de cinco metros. Ya se sabía en Génova que llegaban a seis y siete; y que en Argel se ha pasado de esta cifra, se ha comprobado en los temporales del 17 de diciembre del 30, y en el del 12 de diciembre del 31. El hecho no debe parecer anómalo, después de la marejada del 26 de marzo del 33, que produjo daños en Catania.

La marejada que causó la avería, y que ha sido, por lo visto, algo excepcional, provenía de una tempestad entre Cerdeña y Baleares, que adquirió con rapidez extraordinaria violencia.

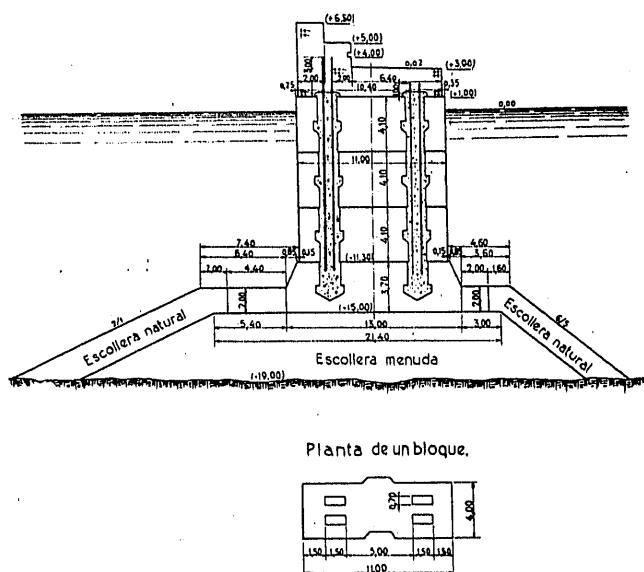
El temporal (que al principio se atribuyó a un sismo) no iba acompañado de viento: las olas eran completamente normales. Pronto alcanzaron alturas de 4,5 metros, con un período de 9'5, que corresponde a una longitud de 140 metros al largo y de 125 en las proximidades del dique. En la madrugada del día 3, las olas tenían 8 a 9 metros y períodos de 13'75, que corresponde a longitudes de 300 metros al largo y de 185 en el extremo del dique, donde están los fondos de 21 metros. De cuando en cuando, como siempre ocurre, sea por una resonancia, o sea, como es lo más frecuente, por superposición de ondas de distinta dirección y velocidad, había otras olas mayores, para las que, según las observaciones hechas, había que multiplicar la altura por 1,41.

Hacia las 16 del día 2, una ola se elevó metro y medio sobre el parapeto, que está a 6,5 sobre el nivel del mar, y arrastró a cinco obreros; y hacia las 6,45 de la mañana del día 3, entre varias olas de 8 y 9 metros, hubo una que parece que alcanzó los 10 metros de altura.



De los dos trozos del dique de Mustaphá, uno está dirigido al Este, media cuarta al Nordeste, y se halla en fondos de 15 a 20 m. El otro, dirigido al Sureste, media cuarta al Este, está en fondos de 21, y está mucho más expuesto a las olas.

La obra es del tipo vertical, o mejor dicho, mixto; el muro debe reflejar la ola, y tiene las tres conocidas ventajas: del menor coste, de la mayor rapidez de ejecución y la de tener una conservación mucho más barata que las escolleras, que es sabido que hay que reconstruir dos o más veces en el espacio de un siglo.



SECCIÓN TIPO DEL DIQUE DE MUSTAFÁ.

Pero el tipo vertical, para ser estable, exige varias condiciones:

1.^a Si el fondo es de roca, es necesario que el material que en él se eche sea inatacable por el mar, como el hormigón plástico en sacos, empleado en Bengasi.

2.^a Si la mucha profundidad o la naturaleza suelta del fondo aconsejan un cimientado de escollera, ésta no ha de moverse por las olas ni por las corrientes. Para ello se debe acudir al empleo de varios tamaños, a los revestimientos y a dejarla el tiempo necesario para que asiente.

3.^a Dentro de los límites de profundidad impuestos por la práctica, el pie de la pared exterior debe bajar lo más posible para que las olas se mantengan en estado oscilatorio.

4.^a La anchura de la base debe ayudar a este efecto. Respecto a esta berma, debe tenerse presente lo siguiente:

a) Deben evitarse los resaltos; las olas se acomodan bien a las pendientes suaves del fondo y mal a los perfiles bruscos.

b) La berma ha de ser ancha y terminar en pendiente dulce.

c) Mejor que proteger el pie con escollera grande es encerrar la base.

5.^a Debe tener el muro el espesor debido, sin olvidar lo que hay que dejar a lo imprevisto, y teniendo presente que la ola puede romper.

El esfuerzo $F = Kvd \frac{V^2}{2g}$ ejercido por la rompiente puede calcularse, una vez conocida la celeridad de la ola; al coeficiente k puede dársele el valor medio 1,50.

Aplicado esto al caso de Argel, y contando con que las olas tuvieran 1/4 de su altura bajo el nivel normal y 3/4 sobre él, se deduce un esfuerzo unitario de 21 a 22 ton por metro cuadrado.

Mientras que en los parajes poco expuestos, como en Savona y Castellamare, no hay que tomar precauciones especiales, cuando hay mucha mar hay que acudir a elementos ciclópeos o a monolitos no demasiado largos rellenos de hormigón. Estos monolitos suelen ser la mejor solución, y más hoy que se cuenta con los conglomerados puzolánicos, que tienen bastante resistencia y que presentan una garantía a la destrucción química del agua del mar no inferior a la de los morteros de cal y puzolana.

En el estado actual de la técnica hay que acudir a las estructuras ciclópeas, cuyos elementos resisten aisladamente; para ello sirven los pozos que atraviesan el macizo y que se rellenan de hormigón.

Debe advertirse respecto a esto que mientras en las primeras aplicaciones el hormigón dentro de los pozos no era bueno y de cada 700 macizos se rompían 30, hoy, en cambio, se hace esto muy bien.

La avería de Argel no se debe achacar al tipo ni a nada excepcional, sino a que no se han seguido las buenas normas. Esto lo vemos también en las averías de varios puertos rusos del mar Negro (Odessa, Teodossia, Poti, etc.); en Ymuiden y en Tinnuemouth, en el mar del Norte; en Valencia y en Bizerta, en el Mediterráneo; en Madras y en Colombo, en la India, y en Antofagasta, en Chile. En todos ellos hay poca profundidad en la base del muro, agravada a veces por un fondo de fango y por un perfil deficiente. Así ocurrió en Catania el 26 de marzo de 1933, y lo mismo ha ocurrido en Argel.

En Argel no se empleó el tipo de escollera, porque no había cantera. Se sabía que el fondo era de arena finísima y que no se socavaba a los 20 m. de profundidad. Se partió de olas de 5 m., que han llegado a 10.

Los pozos que servían para la suspensión se rellenan de hormigón armado: al principio sólo con piedra por temor a las vibraciones. La eficacia de hacer el relleno con hormigón armado se demostró en el temporal de diciembre del 33. Después de la avería de Catania se dió una gran importancia al monolitismo, y se hicieron inyecciones y se taparon las juntas.

Estaban estos trabajos muy adelantados cuando sobrevino el temporal que causó la avería. Al amanecer del día 3 se observó un asiento de unos decímetros a un metro. De repente, tras de una ola que lo envolvió todo, desapareció un trozo de 350 metros. En lo que quedó había una inclinación hacia afuera que fué aumentando, hasta llegar a 30°.

Los estudios hechos después de la avería enseñan que, en general, todo cayó hacia el exterior. En ningún momento se vió que las olas rompieran en las proximidades del dique, excepto en un sitio donde la escollera estaba muy reforzada, y en donde las olas rompían, y donde el muro se inclinó hacia dentro.

La capa de escollera tuvo que ceder: el fondo, con una profunda fosa, lo ponía todo en peligro.

Los sondeos posteriores, que enseñan que la piedra menuda mezclada con arena estaba a distancias grandes del muro, demuestran que la escollera resbaló hacia afuera, y por eso las pilas están acostadas sobre su cara de dentro.

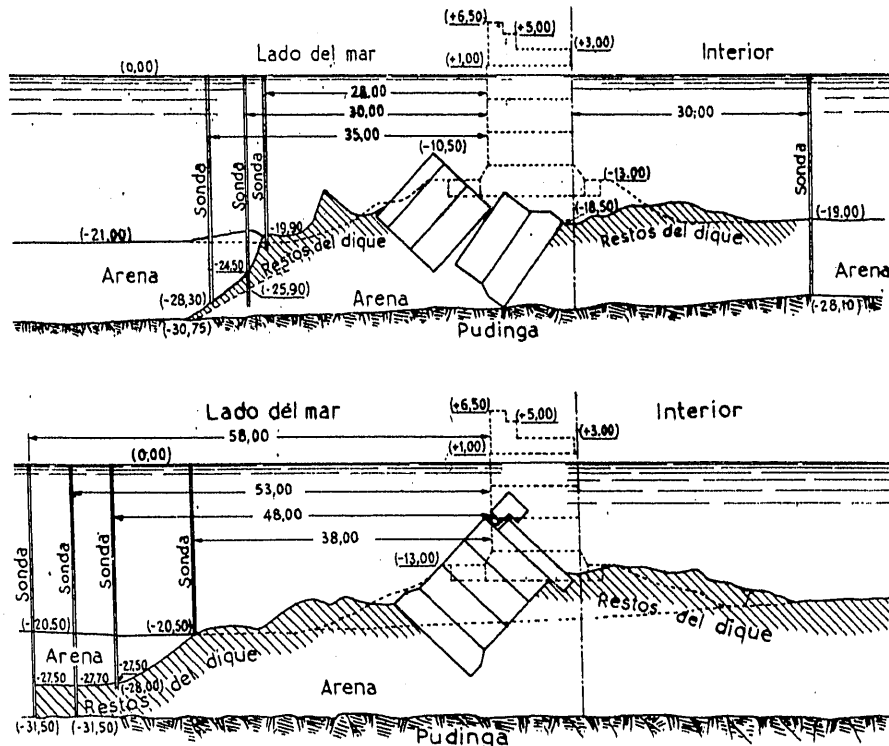
Si la base hubiera sido estable, no habría pasado nada.

Del estudio de la avería deduce el autor cómo los esfuerzos horizontales alcanzan un valor máximo en la proximidad del nivel del mar en reposo, y disminuyen rápidamente hacia arriba, y tanto más lentamente hacia abajo, cuanto menor es la relación entre

ces la mayor intensidad, porque ésta llega al máximo en el momento de romper, cuando la ola conserva intacta toda su energía, de la que nada se ha gastado todavía con los choques de la rompiente.

Hay que señalar muchas coincidencias entre lo que se deduce del cálculo y lo que dice la realidad; las olas no rompieron, y algunas envolvieron completamente al dique.

El macizo monolítico no fué el que cedió, sino el fondo. Lejos del muro se encuentra parte de la escollera, cubierta por arena; esa escollera no fué arrasada hacia afuera, sino que cayó en una zanja pa-



Secciones características de los restos del segundo trozo, del dique de Mustafá, destruido por la marejada del 3 de febrero de 1934.

la profundidad del agua y la longitud de la ola; comprueba la influencia del calado y de la longitud de la ola, y deduce, por último, los esfuerzos resistidos por el muro.

Llega al fin a la conclusión de que el empuje de 125 toneladas por metro lineal de dique no puede explicar lo ocurrido, cuya causa se encuentra en la falta de berma y en el fondo socavable.

* * *

Hasta aquí, Enrico Coen Cagli. Con toda su autoridad explica las causas de la avería de Argel.

No hace mucho escribí yo algo sobre el mismo asunto.

Da Coen Cagli, y en ello está acertado, gran importancia al resalto brusco de la escollera. Las olas, que se amoldan bien a las curvas suaves del fondo, no aguantan esos obstáculos violentos; cambian su estado oscilatorio por el de olas rotas, y tiene enton-

ralela al muro, cuya existencia está demostrada por los sondeos y está explicada por el cálculo; es lógico, además, que se formase, pues mucho antes de que las corrientes del fondo movieran la escollera habrían revuelto la arena.

La posición del muro después de haber caído, y el que haya restos de la escollera entre dos capas de arena, aclaran la causa de la avería y nos sirven de gran enseñanza.

Para la teoría de las obras marítimas que hoy se está formando, el estudio de averías bien estudiadas, como la de Argel, proporciona datos de innegable valor. Debe hoy confiarse en que las obras marítimas van a salir pronto de la nebulosa que hasta hace poco las envolvía, y que no tendrán que avergonzarse ante otras obras de la ingeniería de esa imprecisión que siempre ha sido la característica de los movimientos y de la fuerza de las olas.

Eduardo J. DE CASTRO
Profesor de Puertos de la Escuela de Caminos.