

Los conocimientos de oleaje en las postrimerías del siglo XVIII y su aplicación a la muralla del vendaval en Cádiz

Juan José Muñoz Pérez
Begoña Tejedor

Aunque algunos autores han estudiado la formación científica de los ingenieros militares del siglo XVIII en España (Capel *et al.* 1988; Galindo 1996), todavía no se ha abordado el conocimiento que tenían de los fenómenos relacionados con el oleaje.

Sin intentar en modo alguno ser exhaustivos, con- vendría comentar lo que algunos de los tratados más utilizados en la época indicaban respecto a la construcción frente al mar.

En Vitrubio (libro V, capítulo XII) aparecen algunos consejos sobre la manera de hacer un muelle y/o espigón con puzolana (recordemos que fragua bajo el agua) mediante cajones vaciados en lugares relativamente abrigados por un cabo o promontorio: «Todo el espacio encaxonado se igualará y limpiará en el fondo . . . Iráse luego metiendo el material cementicio y el referido mortero hasta que se llene todo el espacio». Se indica también lo conveniente en caso de falta de abrigo: «donde por la violencia de las olas y refluxos de una playa libre y desamparada no pudieren asegurarse los caxones, entonces fuera del agua» Y, de suma utilidad es el siguiente método a base de tablestacas y agotamiento del interior para trabajar en seco bajo el nivel del mar, para cuando no se dispusiera de puzolana: «pero donde se careciere del referido polvo se procederá de esta manera. Méntanse dobles caxones bien travados con tablas . . . y luego en el vacío entre uno y otro caxón se irán metiendo esportones de enea llenos de greda, bien apisonados. En estando bien cal- cado y bien denso dicho material, se sacará el agua del caxón interno, agotándola con cocleas, ruedas o

tímpanos; y después se abrirán las zanjas en aquel espacio. Si el suelo fuere de tierra, se profundizarán hasta lo firme, y siempre más anchas de lo que ha de ser la fábrica fuera de la tierra. Luego vaciadas de la tierra y agua, se llenarán de estructura compuesta de piedra menuda y mortero de cal y arena». Véase en la figura 1 una construcción similar en *Los Veinte y Un libros de los Ingenios y las Maquinas* (Anónimo s. XVI). Manuscrito no publicado en su tiempo por considerarse secreto militar, en su capítulo diecinueve habla sobre edificios de mar y cómo se han de hacer y acomodar en diversas maneras.

Otro punto interesante es la opción de pilotajes de madera encepados (todavía muy utilizada hoy en día

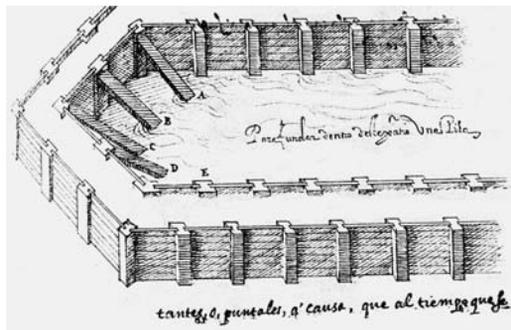


Figura 1
Recinto de tablestacas para fundar dentro del agua. (*Los Veinte y Un Libros de los Ingenios y Máquinas*)

en los fangos de la Bahía de Cádiz: «pero no hallando suelo firme, se hará empalizada de estacas chamuscadas de chopo, olivo o roble . . . Sobre este suelo se levantará en rededor una pared de piedras esquadras, lo más largas que se pueda, para que haya menos juntas, y traven mejor a las piedras de encima. El vacío que queda en medio se llenará de cascote, o bien de estructura: y en esta forma se podrá levantar aunque sea una torre encima».

Cristóbal de Rojas nada dice sobre obras marítimas en sus tratados publicados de 1598 y 1613. Sin embargo, en un manuscrito inédito fechado en 1607, aborda el tema de las cimentaciones mediante pilotes hincados y bloques de piedra agujereados en su centro y que se haría pasar por los mismos (fig. 2): «se

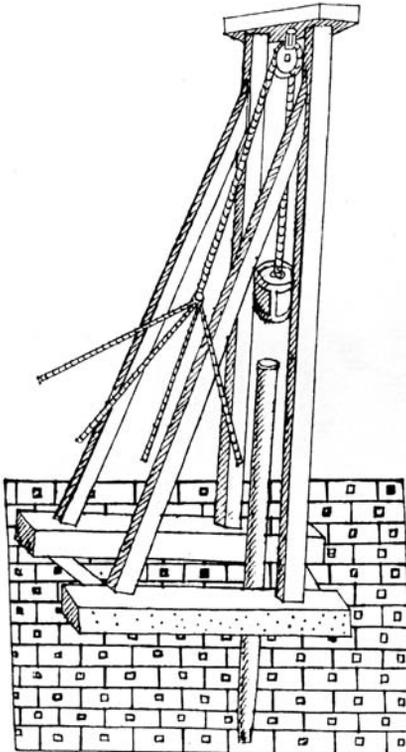


Figura 2
Máquina de hincado de pilotes y vista en planta de la disposición de sillares agujereados pasados a través de los mismos (Cristóbal de Rojas, Sumario de la Milicia Antigua y Moderna)

irán hincando una hilera de estacas del grueso de medio pie en cuadro, a dos pies una de otra, como aparece en la planta y monte a que me remito . . . y luego se irán poniendo piedras, hechos sus agujeros en cada piedra, para que vayan bajando por la estaca . . . y se irá colocando otra hilada de piedras al contrario sobre las primeras».

Es muy posible que Cristóbal de Rojas se basara en los tratados italianos de ese mismo siglo XVI. No obstante, lo mencionado en el párrafo anterior no aparece en ninguno de ellos. Únicamente en Maggi y Castriotto (1564) y en Marchi (1599) se habla muy someramente, sólo unas líneas, de las construcciones junto al mar (cap. 3 en el primer caso y 8 en el segundo).

No debemos dejar de citar en el siglo XVII a Marolois (1614) en cuyas ilustraciones 105 y 109 se representa la cimentación por pilotes, y en la 106 se aprecian claramente gaviones de escollera atados con cuerdas y estacas delante de una muralla expuesta a los ataques de mar. Solución excelente para cauces fluviales, pero totalmente ineficaz frente al mar.

Otro tanto acontece con los libros de texto usados en las academias de ingenieros del siglo XVIII. Plo y Camin (1767), sólo habla del agua en cauces o canales y de la pendiente que debe dárseles desde un punto de vista empírico. Bails (1796) plantea que las poblaciones a la orilla del mar tienen muchos contratiempos y recuerda el consejo de Platón de situarla cuatro leguas lejos de sus orillas pues: «Casos lastimosos tienen acreditado que el mar no tiene

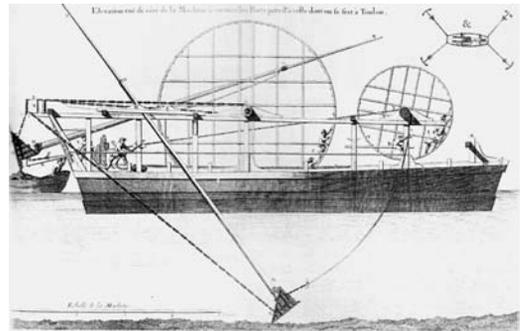


Figura 3
Draga para extracción de fangos en el puerto de Toulon (Architecture Hydraulique de Belidor)

invariables sus límites, pues ha sorbido muchas playas y tierra inmediatas, conforme se está viendo en Bretaña, Olanda, etc». En el famoso libro de Belidor (1737) se menciona algo sobre trabajos portuarios, como la draga usada en Toulon para la excavación de fondos fangosos (fig. 3), los gánguiles con apertura por fondo para vertido de hormigón sumergido, o recomendaciones para la construcción de diques secos (Strauss 1949). Sin embargo, su principal preocupación es la construcción de esclusas para salvar desniveles, y nada o muy poco dice sobre murallas frente al mar o los efectos del oleaje en sí.

LAS MURALLAS DE CÁDIZ

En 1596, una fuerza combinada anglo-holandesa de 15.000 hombres a las órdenes del conde de Essex, embarcados en más de 150 naves, ocupan e incendian la ciudad de Cádiz. Tales son los daños que Felipe II se plantea el abandonarla o el convertirla en presidio (de Castro 1858). Decidiendo finalmente el fortificarla, se desplazan hasta la villa el ingeniero Cristóbal de Rojas y el arquitecto Juan de Oviedo. La construcción de baluartes en Santa Catalina, San Sebastián, San Lorenzo del Puntal y Puertas de Tierra no acaba hasta 1639. Sin embargo, las obras comenzadas serán suficientes para desbaratar un nuevo ataque de los ingleses comandados por Robert Devereaux, nuevo conde de Essex, hijo del anterior, en 1625. A mediados del siglo XVII el recinto de la ciudad tenía algunas zonas sin amurallar todavía. Tras laboriosas gestiones, la ciudad de Cádiz obtenía en 1693 licencia para imponer distintos arbitrios para construcción de los lienzos que restaban. Esa preocupación estaba justificada pues Cádiz continuaba siendo objetivo británico. En 1702 se rechaza a la flota de sir George Rooke, excelente estratega que conquistará Gibraltar poco después en 1704.

La mayor parte de estas murallas no tuvo problemas de estabilidad pues se cimentaron sobre una roca arenisca típica de la zona que por las muchas conchas que contiene se conoce popularmente como piedra ostionera. No obstante, existe una porción del perímetro de Cádiz, denominada banda del Vendaval (fig. 4), que corre de oriente (desde Puertas de tierra) hasta Occidente (hasta el baluarte de Santa Catalina), de cara al mediodía (actualmente se le conoce como

el Campo del Sur), cuya cimentación nunca fue tan firme.

Por su orientación, está expuesta a los temporales del suroeste (de ahí su toponimia). Además existían unos bajos rocosos que la protegían de cualquier enemigo: «Desde esta ermita de Santa Catalina baña la mar unas barrancas de peñas altas y difíciles que sirven de muralla y defensa de la ciudad por aquella parte, llegan hasta la entrada de tierra tocando en la muralla que dijimos que tiene frente a la ciudad . . . Por esta parte y por estas causas es inexpugnable y está bien guardada y amparada la ciudad, demás que el mar que por allí combate aquellos promontorios es playa llena de escollos y bajíos por donde no pueden navegar ni llegar bajeles ningunos ni aún barcos pequeños» (Abreu 1866).

Nunca recelaron los vecinos de la ciudad un desembarco por ella, sino más bien el estrago causado por el castigo del océano. Temíase que las aguas del mar, una vez hubieran arruinado la costa, de más altura que el resto de la población, anegarían y sepultarían toda la ciudad (Fernández Cano 1973, 100).

Al encontrarse la antigua catedral (la nueva se construyó también cerca del acantilado) en el centro de ese tramo del Vendaval la ciudad no cesó nunca de intentar conseguir la participación económica del cabildo eclesiástico por considerar que la muralla garantizaría la seguridad tanto de la catedral como de la residencia aneja del obispo. Tras ser condenado por el Consejo de Castilla al pago de 2.000 ducados, el obispo consideró muy seriamente el traslado de su residencia.

Tras los destrozos causados por el temporal de 1670 y siguientes, la ciudad elevó súplica a Su Majestad (Carlos II) que ordenó se le informara con todo detalle y que se propusieran arbitrios para sufragar los gastos de la futura muralla. En enero de 1675 se envió nuevo informe en que se indicaba que «las últimas ruinas habían reducido la anchura del paseo extendido a lo largo de la ermita de Santa Catalina a una anchura de veinte varas . . . el golpe de mar que llegare a superarla [la ermita] no ha de poder volver a salir por donde entró y ha de venir a parar a la bahía, atravesando y destruyendo todo el lugar, y si a esto no se le pone eficaz remedio, según el daño que por esta parte ha hecho la mar en unos años a esta parte, es segurísimo que no podrá

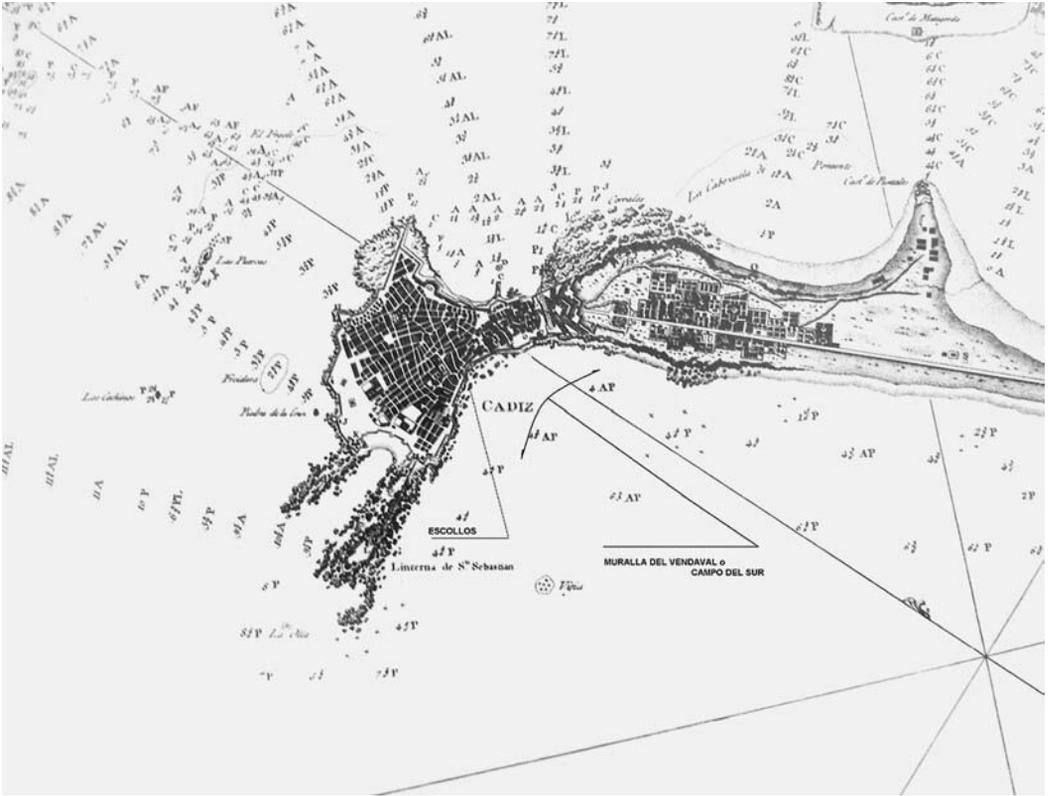


Figura 4

Vista de la ciudad de Cádiz donde se indica la zona del Vendaval. Carta de Vicente Tofiño 1789

durar Cádiz muchos años y anegado y perdido Cádiz, se pierde también la Bahía» (Fernández Cano 1973, 103).

Es obvia la exageración que el informe del concejo hace de los riesgos. En caso de temporal se produciría una socavación al pie del talud que induciría deslizamientos en su cabecera y un progresivo retroceso del frente de tierra. La elevada altura del acantilado (unos 15 metros sobre la bajamar máxima viva equinoccial —BMVE— en aquella zona) impide que el nivel del mar lo sobrepase. Calculos probabilísticos efectuados con el Atlas de Inundabilidad (GIOC 1999) nos proporcionan valores de unos 9 metros de elevación del nivel del mar para periodos de retorno de 50 años. La única agua que podía sobrepasar el cantil era la de los rocciones de las mayores olas. Molesto, sí, pero no peligroso y mucho menos catastró-

fico. Puesto que los ciudadanos de Cádiz sabían todo esto, ¿a qué el alarmismo del anterior informe? Otro sí. ¿Por qué diseñar una muralla tan apartada del frente del acantilado? En la figura 5, se aprecia, en el plano dibujado por Alberto Mienson en 1719, como en algunos puntos se avanza hacia el mar hasta 50 toesas (unos 100 metros). Ello supondría una superficie ganada al mar de unos 35.000 m² siempre y cuando se rellenara el trasdós, un volumen superior a los 350.000 m³.

Sólo dos años después, en 1721, tras ímprobos esfuerzos, se decide retranquear el proyecto original «a vista de ser imposible seguir el de Mienson por ir por paraje que nunca escora la mar aun en mareas vivas, y haver de sacar tres varas de arena para buscar el cimiento firme, no siendo terreno capaz de Pilotaje ni Cajones para fundar sobre ellos» (fig. 6).

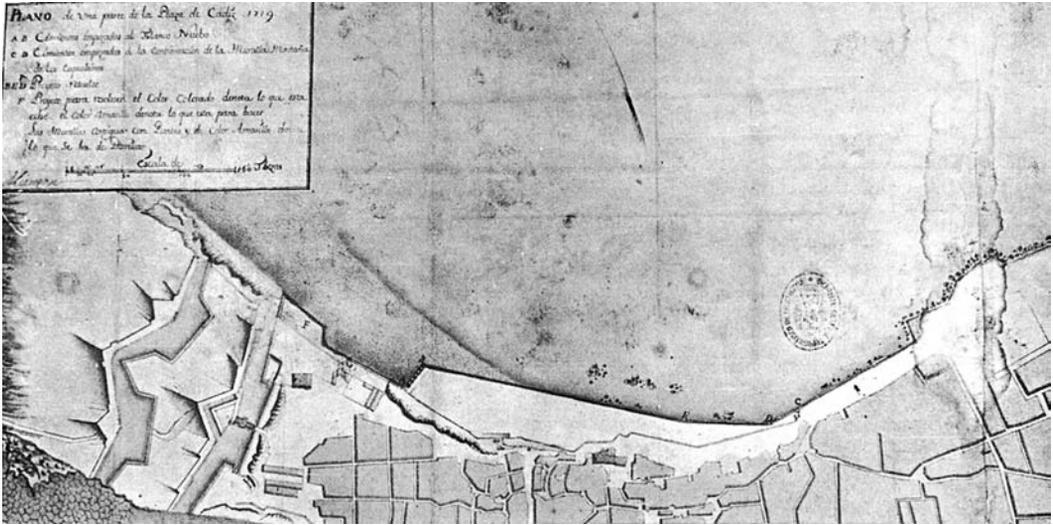


Figura 5
Plano de la muralla del Vendaval de Cádiz, por Alberto Mienson en 1719. (Servicio Histórico de la Marina, N.M.10-5: 11ª extraído de Calderón Quijano 1978, figura 455)



Figura 6
Plano de la muralla del Vendaval de Cádiz, por Bartolomé Joaquín de Mendiola en 1721. (Servicio Histórico de la Marina, N.M.10-5: 13ª extraído de Calderón Quijano 1978, figura 456)

DIFERENTES DISEÑOS DE LA MURALLA DEL VENDAVAL

Ya en 1608, Cristóbal de Rojas indicaba en la leyenda de un plano (Archivo antiguo de la Catedral de Cádiz, sig. 19, nº 1) que «después de hecha esta muralla . . . se le pondrá delante contra El agua estos peñascos de piedra dura que tenga cada uno ciento y cincuenta aRouas por lo menos, puestos y encaxados con concierto y en los guecos o bacios que ubiere se encaxaran piedras medianas para que todo esté trabado da manera que quiebre allí la furia de las olas del agua y no hagan daño a la muralla nueva».

A continuación, se van a presentar una serie de planos de perfiles levantados a lo largo del siglo XVIII que nos permitirán observar la evolución, en su caso, de las distintas soluciones planteadas. Debe insistirse en que no están todos los intentos, se trata sólo de una selección. La figura 7 consiste en cuatro perfiles dibujados por el ingeniero Ignacio Sala en 1728. Los muros, a base de sillares de piedra concertada, tienen una inclinación media de unos 11°. La altura del terreno natural sobre la bajamar es de unos doce metros, levantándose la muralla otros cuatro metros por sobre el terreno a manera de espaldón que evite el paso del roción de las olas. La profundidad

En el siguiente apartado se comentará la evolución de las diferentes soluciones constructivas contempladas y más especialmente la del Brigadier Tomás Muñoz que consiguió finalizar la muralla tras dos siglos de empeños infructuosos.

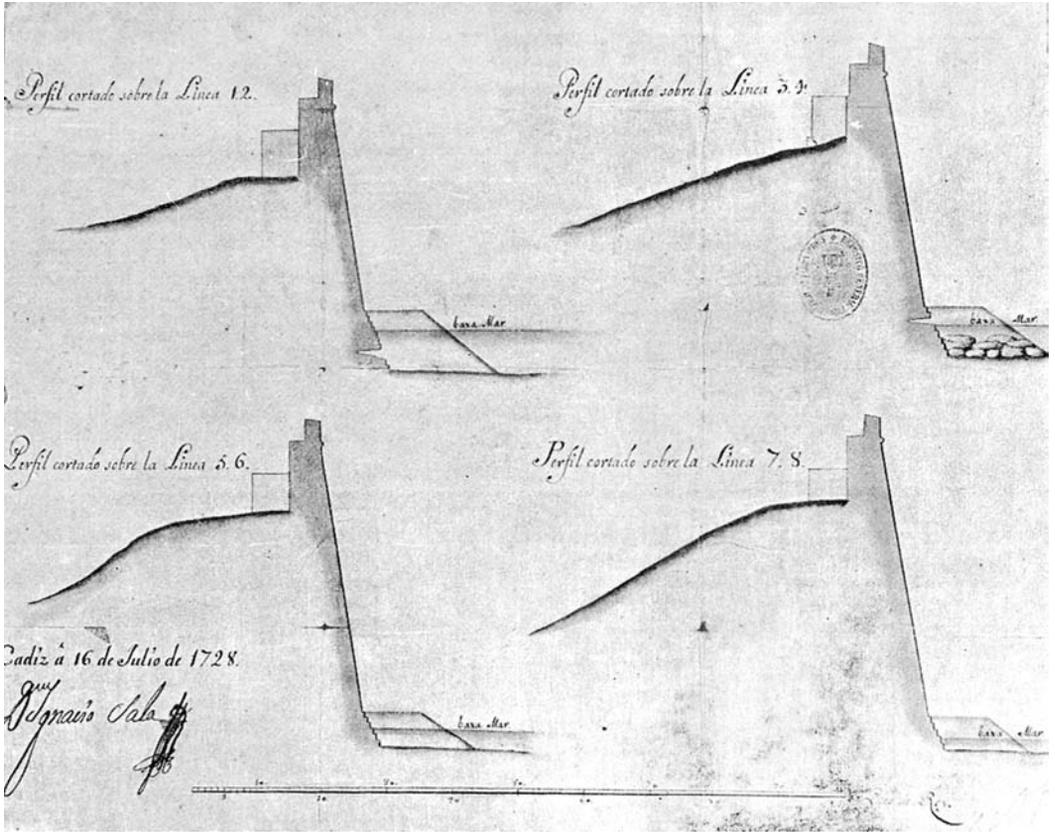


Figura 7
Perfiles de la muralla del Vendaval por Ignacio Sala en 1728 (S.H.M., N.M. 10-5-15ª, figura 460 de Calderón Quijano 1978)

de la cimentación sí que varía: entre uno y tres metros por debajo del nivel de la bajamar. Tanto en el 1-2 como en el 3-4 se aprecian sendas grietas horizontales de unos dos metros de profundidad que afectan al muro al nivel de la bajamar o algo inferior. La solución consistió en la aportación de escollera en su frente, formando un dique de protección cuya coronación estaría a media carrera de marea y el talud sería de unos 45°. Las piedras dibujadas tienen una forma más lajosa que cúbica (propia de los estratos de la arenisca calcárea de la zona). Las mayores tienen un tamaño de 1,5 m de largo por unos 60 cm de alto, lo que podría suponer unas 3 toneladas de peso.

La figura 8, de Juan Cavallero, es de mediados del siglo XVIII (ya aparece la plaza de toros de planta

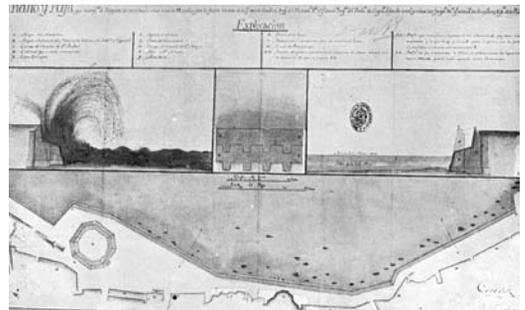


Figura 8
Planta y perfiles de la muralla del Vendaval por Juan Cavallero hacia 1772 (S.H.M., N.M. 9-18, figura 448 de Calderón Quijano 1978)

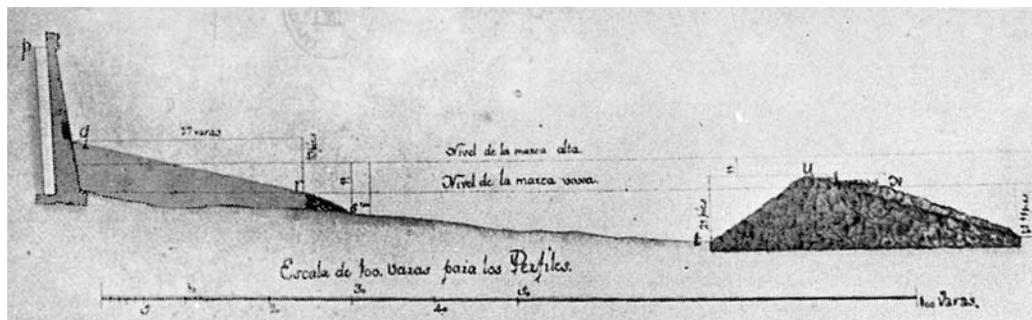


Figura 9

Perfil de la muralla del Vendaval con dos soluciones a base de rampa y dique de escollera, sin firma, s. XVIII (S.H.M., N.M. 9-23-2ª, figura 449 de Calderón Quijano 1978)

octogonal). En este plano, se apunta una solución de retranqueo de la parte superior de la muralla (q) mediante la dismantelación del muro existente (r) y aprovechamiento tanto de los sillares como de la cimentación (p). En el gráfico de la izquierda se expone el efecto buscado de redireccionamiento del rociación de la ola de vuelta hacia el mar (nuestros actuales botaolas).

El siguiente plano (fig. 9), sin firma, es también de la segunda mitad del XVIII. Muestra un plano inclinado ante la muralla (OMNG). Se desestima su construcción y se recomienda la de un dique de escollera (OIKLM). Obsérvese que el talud exterior, más expuesto, es de un 2/1 (unos 27°) mientras que el interior, más protegido, es un 1/1 (45°). No obstante, esta inteligente disposición para romper el oleaje y provocar la disipación de su energía, falla al colocar el dique a una profundidad de 18 pies (unos 5.5 metros) respecto a la bajamar, lo que supone que las olas incidentes pueden ser de más de cuatro metros y el primer temporal lo destrozaría.

ANÁLISIS DEL DISEÑO DE TOMÁS MUÑOZ

En menos de 4 años, de 1787 a 1791, el ingeniero Tomás Muñoz finaliza la muralla del Vendaval. El trabajo efectuado a lo largo de 1050 varas se muestra en la figura 10. Sólo se realizaba de mayo a septiembre y durante las horas de bajamar. Se allanó el terreno librándolo de los abundantes escollos por medio de barrenos. Los fragmentos de la piedra así desme-

nuzada eran extraídos del fondo por buzos. Al pie del muro se hincaron una serie de pilotes de madera atados en cabeza con otros tablones. En los huecos existentes se ubicó piedra de un pie de diámetro como mucho. Sobre ella se acomodó una rampa de madera de unas 24 varas de largo, que empezaba a una cota de 6 varas (unos 5 metros) por encima de la bajamar y acababa a dicho nivel. Eso suponía una pendiente de 15° y no de 8° como dice Calderón Quijano (1978, 446). Delante del susodicho maderamen se colocó escollera de una vara cúbica (aprox. 1,5 toneladas) con la misma inclinación.

Se había cumplido un viejo empeño, desde 1600, del pueblo gaditano. Los contemporáneos no regatearon elogios. Lamentablemente el éxito fue efímero. El mismo invierno de 1792 se abrió una brecha frente al Palacio Episcopal. Según Fernández Cano (1973, 192), el conde de Maule, en 1813, expone: «ya comenzó a resentirse el entablado, y en los siguientes [años], no sólo se destruyó, sino que rompió la mar el muro de piedra por algunos de los mismos puntos que había hecho antes. Por último, en los años que han corrido, casi todo aquel trabajo ha desaparecido, y solo queda una triste memoria de las inmensas sumas expedidas inútilmente . . . Tal vez colocando grandes piedras a manera de escolleras, formando con ellas diversos grupos en los puntos más acometidos porque reventarían ellos las olas y llegarían sin fuerza al muro: en esto se procuraría imitar la naturaleza».

En la figura 11 se ofrece una panorámica de las obras de la muralla del Sur. Apréciense las bateas que

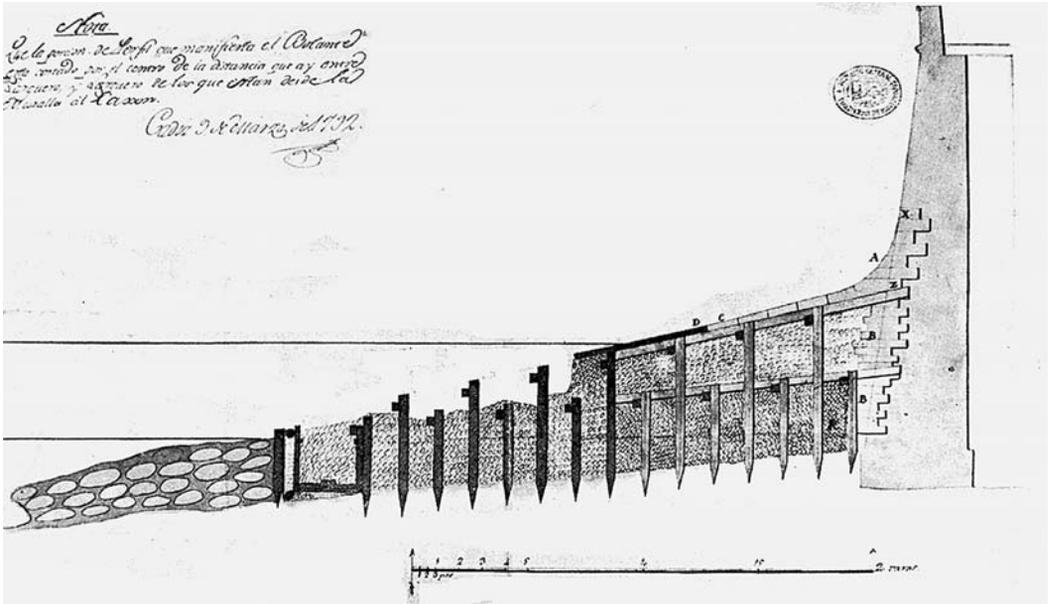


Figura 10

Perfil de la muralla del Vendaval en 1792 ejecutado por Tomás Muñoz (S.H.M., N.M. 13-14-1ª, figura 469 de Calderón Quijano 1978)

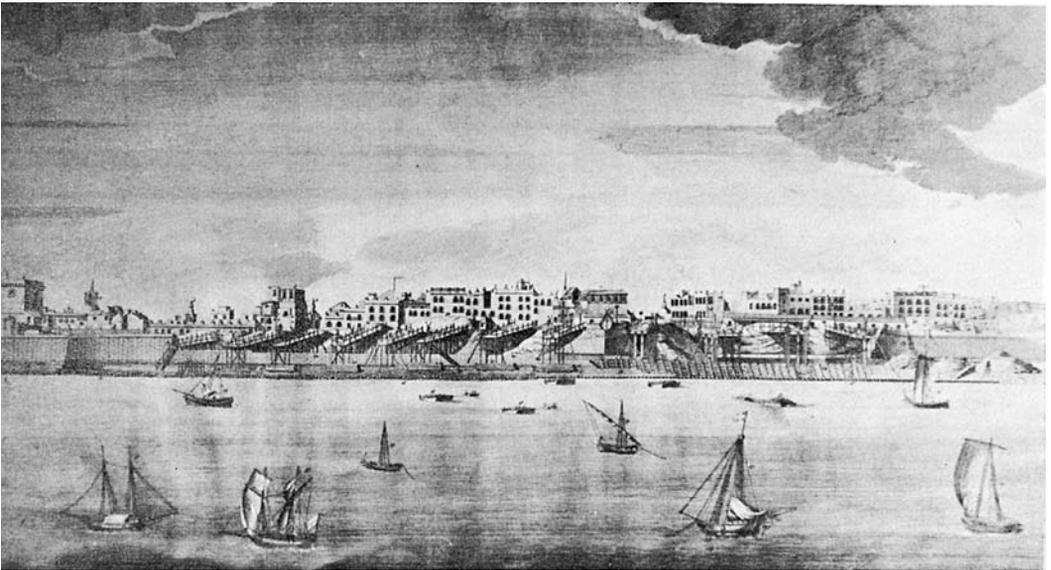


Figura 11

Vista de la plaza de Cádiz por la parte del Sur y construcción de su muralla y una playa artificial para protegerla ejecutado por Tomás Muñoz (S.H.M., N.M. 13-14-1ª, figura 128 de Calderón Quijano 1978)

llevan escollera desde los barcos fondeados y los distintos frentes de la obra: completamente acabada a la izquierda, construcción de lienzo de muralla, ídem de playa artificial, y materiales acopiados a la derecha.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Analizando todo lo antes mencionado, podemos llegar a las siguientes reflexiones:

- Anotar antes que nada que el público en general al que se dirigen estas reflexiones, aconseja la introducción de fórmulas sencillas que serán suficientemente aproximadas para justificar nuestros comentarios pero que pudieran llamar la atención por su aparente falta de rigor a los especialistas en Ingeniería de Costas.
- Los ingenieros del s. XVIII sabían que cuanto más grande fuera la piedra mejor resistiría los embates del oleaje. No tenían una formulación como la desarrollada por Iribarren (1938) o la más conocida de Hudson (1953).

$$W = [\rho_s H^3] / [Kd \cotg \theta (\rho_s / \rho_w - 1)^3]$$

Donde

W es el peso de cada pieza de escollera

ρ_s y ρ_w son las densidades de la piedra y del agua de mar

H es la altura de ola

Kd es un coeficiente de trabazón de valor 3,5 aprox. para escollera

$\cotg \theta$ es el talud del dique.

El tamaño se diseñaba en base a la experiencia. Tanto Cristóbal de Rojas como Tomás Muñoz hablan de pesos similares: 150 arrobas (aprox. 1.700 kg) el primero y piedras de una vara cúbica (aprox. 0,6 m³ ó 1,5 toneladas) el segundo.

Sin embargo, a pesar de tratarse del mismo lugar, las circunstancias no eran las mismas. Al volar con barrenos los bajos rocosos, no sólo se eliminó una defensa natural, sino que la profundidad aumentó. Actualmente sabemos gracias a la teoría de rotura por fondo de onda solitaria de Mc Cowan (1894) que hay una relación entre la altura de ola en rotura (H_b) y la profundidad (h_b) en ese punto: $H_b = 0,78 h_b$.

Con que sólo excavaran dos metros más (es la profundidad de las cartas actualmente y dicen que las piedras se sacaban con buzos), eso supondría pasar de una H de 3,20 m en pleamar a 4,80 m; es decir, un incremento del 50%. Más aún, de acuerdo a la formulación de Hudson, el peso necesario para que un bloque soporte una ola determinada es inversamente proporcional a la pendiente y a la densidad pero directamente proporcional al cubo de la altura de ola. Esto es: $4,8^3 / 3,2^3 = 3,38$, el peso debería ser un 338% superior. O sea, que si se fijaron en experiencias anteriores o en piedras allí existentes, resulta que se quedaron cortos al modificar ellos mismos las condiciones de contorno. No sólo las piedras que colocaron eran de escaso tamaño, sino que las existentes dejaron de ser estables.

- El comentario anterior es de aplicación también a la solución del dique de la figura 9. Tanto el tamaño de la piedra como el talud del 2/1 serían adecuados siempre que la profundidad a la que se hubiera dispuesto hubiera sido inferior a los 18 pies a la que se diseñó.
- Cristóbal de Rojas afirmaba que las rocas deberían estar trabadas, encajando piedras más pequeñas en los huecos que dejaran las grandes. Algunos autores piensan que esta disposición vuelve al dique más reflejante y evita una rotura más completa de las olas. Sin embargo, Moreno *et al.* (2001) han demostrado que se trata de una solución no sólo viable sino sumamente económica y que minimiza el impacto visual.
- Los textos no dicen nada sobre hasta qué cota debería colocarse la protección de escollera. En la actualidad, el francobordo mínimo usual es de 1,5 H por sobre el nivel de la máxima pleamar (PMVE). Si nos fijamos en los perfiles de las figuras anteriores veremos que llegaban hasta unos dos metros por encima de dicha PMVE, una constante que no tenía en cuenta la altura de la ola.
- Por otra parte, tampoco había preocupación alguna por la medición de dicha altura de ola ni hemos encontrado cita alguna sobre los fenómenos de elevación del nivel del mar por marea meteorológica, set-up o run-up.
- Algunos de los ingenieros sí muestran en sus dibujos una observación de la rotura del oleaje. Por ejemplo, Juan Cavallero (fig. 8) dibuja un

croquis de una ola rompiendo sobre el paramento vertical de la muralla en el que el roción se desvía de vuelta al mar en vez de progresar hacia el interior de la ciudad, persiguiendo un efecto similar al de los botaolas de nuestros actuales espaldones.

- La solución actual (última actuación en 1990) no difiere de la presentada por el conde de Maule (1813) tras el fracaso de Tomás Muñoz (1792). Un rompeolas adosado al pie de la muralla a base de bloques de hormigón. Tras la guerra civil se colocaron bloques de 1 m de lado (2,3 ton) que con el tiempo han aumentado hasta 1.5 m de lado (7,8 ton) y un talud de un 3/2 (aprox. 34°).
- No pensaron en los efectos dinámicos del oleaje sobre los pilotes de madera. Una estructura puede ser capaz de resistir un empuje determinado de una manera estática en una ocasión. Pero la repetición dinámica de una misma fuerza (como ocurre con el oleaje que se repite cada periodo de entre 5 a 12 segundos) puede agotar la resistencia de cualquier material al cabo de un cierto tiempo. Eso fue lo que les pasó a los pilotes. Bien anclados en un primer momento, acabaron soltándose y dando al traste con todo el diseño resistente de la rampa.
- Los conocimientos técnico-matemáticos de los ingenieros tuvieron escasa influencia en la aplicación a casos reales. Incluso en textos de elevado nivel como el de Belidor (1737), el diseño se basa exclusivamente en experiencias personales y una buena práctica. Así pues, parece deducirse que los adelantos teóricos son condición necesaria pero no suficiente para su aplicación práctica. Hasta Iribarren (1938) no se conocerá una formulación que relacione el peso de la escollera con el cubo de la altura de ola.
- Finalmente, se demuestra factible la utilización de grabados para, mediante su interpretación por técnicos especializados, deducir metodologías de diseño y construcción así como acotar los conocimientos teóricos del momento.

LISTA DE REFERENCIAS

Abreu, P. 1866. *Historia del saqueo de Cádiz por los ingleses en 1596*. Cádiz: 20–21.

- Anónimo. s. XVI. *Los veinte y un libros de los ingenios y máquinas*. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Fundación Juanelo Turriano. Edición facsímil.
- Bails, B. 1796. *Elementos de Matemática. Tomo IX, parte I, que trata de la Arquitectura Civil*. Madrid.
- Belidor, B. F. 1737. *Architecture Hydraulique*. Cuatro volúmenes. Paris.
- Calderón Quijano, J. A. 1978. *Cartografía militar y marítima de Cádiz 1513–1878*. Sevilla: Escuela de estudios hispanoamericanos, CSIC.
- Capel, H.; J. E. Sánchez y O. Moncada. 1988. *De Palas a Minerva. La formación científica y la estructura institucional de los ingenieros militares del siglo XVIII*. Barcelona: Serbal-CSIC.
- De Castro, A. 1858. *Historia de Cádiz y su provincia desde los remotos tiempos hasta 1814*. Cádiz: Imprenta de la Revista Médica.
- Fernández Cano, V. 1973. *Las defensas de Cádiz en la Edad Moderna*. Sevilla: CSIC.
- Galindo, J. A. 1996. *El conocimiento constructivo de los ingenieros militares del siglo XVIII. Un estudio sobre la formalización del saber técnico a través de los tratados de arquitectura militar*. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya. Tesis doctoral.
- GIOC. 1999. *Atlas de Inundabilidad del litoral español*. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente.
- Hudson, R.Y. 1953. *Wave forces on breakwaters*. Trans. of ASCE, vol 118, 546 p.
- Iribarren, R. 1938. «Una fórmula para el cálculo de los diques de escollera naturales o artificiales». En *Revista de Obras Públicas* (septiembre de 1938).
- Mac Cowan, J. 1894. «On the highest waves of a permanent type». En *Philosophical Magazine*. Edinburgh. Ser. 5, 38: 351–358.
- Maggi y Castriotto. 1564. *Della fortificatione delle citta, libri tre*.
- Marchi. 1599. *Della Architettura militare*. Brescia.
- Marolois. 1614. *Opera matematica, ou Oeuvres mathématiques de geometrie, perspective, architecture et fortification*.
- Moreno, L., J. J. Muñoz, A. Bernabeu, L. Fages y A. de la Casa. 2001. «Espigones de bajo coste: Diseño y coste de mantenimiento». En *VI Jornadas españolas de Ingeniería de Costas y Puertos*. Mallorca.
- Plo y Camín, A. 1767. *El arquitecto práctico, civil, militar y agrimensor, dividido en tres libros*. Madrid.
- Rojas, Cristóbal de. [1598–1607–1613] 1985. *Tres tratados sobre Fortificación y Milicia*. Madrid: CEHOPU. Facsímil y recopilación.
- Strauss, H. 1949. *Die Geschichte der Bauingenieurkunst*. Basle: Verlag Birkhauser.
- Vitrubio, M. [23–27 a.C.] 1787. *Los diez libros de Arquitectura. Traducidos del latín y comentados por D. Joseph Ortiz*. Madrid: Imprenta Real.