http://www.traianvs.net/

INGENIERÍA PORTUARIA EN LA ROMA CLÁSICA

Publicada en el I Congreso sobre las Obras Públicas Romanas. Mérida el 15/11/2002.

José Manuel de la Peña © 2002
Jose.M.Pena@cedex.es

TRAIANVS © 2003

Introducción

Ante un yacimiento arqueológico, los expertos intentan abrir una ventana al pasado partiendo, las mayoría de las veces, de un conjunto de escombros de los que procuran conocer, no solo cual fue su estado primitivo, sino todo lo relacionado con su existencia. Si el yacimiento corresponde a diferentes estructuras portuarias, su identificación y el estudio subsiguiente suelen ser difíciles, y si además se encuentran en el fondo del mar, esa dificultad se acrecienta de forma considerable.

Sobre las otras ramas de la ingeniería civil romana, vías de comunicación y transporte e hidráulica, hay mucho estudiado y escrito, no así de la que tenía su principal ocupación en realizar obras en el mar, pues a la dificultad para identificar los restos como estructuras pertenecientes a un puerto antiguo, hay que añadir la escasez de yacimientos que den una visión contrastada sobre su tipología y la ausencia de documentación escrita que nos hable sobre la capacidad técnica necesaria para acometerlas.

Si al afrontar el estudio de la ingeniería marítimo-civil romana nos conformáramos con comprender de que forma se construía en el mar entonces, sabríamos muy poco sobre ella. Por tanto, debemos ser ambiciosos e intentar conocer hasta donde llegó en el dominio de las ciencias y técnicas necesarias para la planificación, construcción y explotación de los puertos de aquella época. Para conocer cual fue el nivel técnico-científico de los ingenieros romanos se deben elaborar una serie de hipótesis basadas en la ingeniería portuaria actual y en el conocimiento que tenemos sobre la desarrollada sociedad romana, siendo los períodos tardo republicano y el Imperial, los más indicados para ello, pues tenemos a nuestra disposición la única referencia clásica escrita, *"Los diez libros de arquitectura"* de Vitruvio, que documenta parcialmente los métodos constructivos empleados en las obras de nueva planta y en las de remodelación de los puertos romanos. (1) Esta referencia, unida al registro arqueológico existente de este tipo de obra civil y a las escasísimas descripciones portuarias de autores clásicos, como la que hizo Flavio Josefo del puerto de Cesárea Marítima[1], permiten determinar por un lado, el nivel de conocimientos que sobre el mar tuvieron los

[1] Este puerto comenzó a construirse por orden de Herodes el Grande en honor a Julio César, en el año 21 a.C. y fue acabado en el 9 a.C. Estaba abrigado por el dique norte de 790 m. y el dique sur 385 m., que proporcionaban una superficie de 136.500 m^2 de aguas abrigadas. Según Flavio Josefo (*La guerra de los judíos*) el puerto disponía de dos diques que tenían 60 m. de ancho. Sobre ellos estaban situados los tinglados al abrigo de una muralla apoyada en

ingenieros civiles romanos que se dedicaron a la construcción portuaria, y por otro, la capacidad técnica que desarrollaron para resolver los problemas que este medio siempre plantea al intentar construir en él.

Nivel técnico de la ingeniería portuaria

La mayoría de los trabajos históricos no hacen referencia de los conocimientos técnico-científicos que desarrolló y tuvo la ingeniería portuaria romana. Si en alguna publicación encontramos referencias relacionadas con los puertos, habitualmente son simples descripciones de la ruina de una obra concreta, remarcando en ocasiones el interés en conservarla, y describiendo a veces, la importancia que tuvo en el desarrollo económico de la zona geográfica de influencia de puerto, pero rara vez hallamos algún análisis técnico sobre sus estructuras y sobre las formas constructivas utilizadas, ni sobre el conocimiento científico-técnico necesario para llevar a cabo tan importante empresa (2).

En los textos traducidos de los clásicos aparecen errores de bulto que no dejan de tener su importancia, así leemos muelle cuando el autor muy probablemente se este refiriendo a un dique (Herodoto), espolones en lugar de pilotes (Vitruvio), murallas (Flavio Josefo) sin hacer una referencia a su función como espaldones. En las interpretaciones arqueológicas de dibujos, grabados, etc., también se producen fallos, pudiendo confundir una sección de un pantalán sobre pilotes de madera de la época minoica con un altar.

El tratado escrito por Vitruvio, es el único compendio sobre construcción que ha llegado a nosotros. El capítulo 13 del libro V lo dedica a la construcción en el mar y en los capítulos 4º y 7º del libro I hay alguna referencia sobre puertos. El resto de las reseñas son de geógrafos como Estrabón, Mela, o Plinio el Viejo; o de historiadores como Herodoto, Polibio, Quinto C. Rufo, Flavio Josefo, o Tito Livio que dan pequeños retazos sobre puertos y actividades en la costa que pasan casi desapercibidos.

Sabemos por referencias de autores clásicos que existieron libros técnicos dedicados al mar y a los puertos. Vitruvio da noticia sobre la existencia de libros dedicados a describir las técnicas constructivas y menciona a varios escritores que dedicaron alguna de sus obras a esta rama del conocimiento: Agatarco, Anaxágoras, Demócrito, Piteo, Hermógenes, Teodoro de Focea, Cosuzio, Muzio, Fuficio, Terencio Varron. Así mismo nos cuenta, (V-12), que a finales del siglo III a.C., Filón de Bizancio escribió un libro titulado "*Construcción de Puertos*". Pero no fue el único que escribió sobre este tema, que sepamos también lo hizo Timostenes de Rodas.

¿Qué sabían los ingenieros civiles romanos sobre el clima marino? Gracias a la fortuna, hoy disponemos de dos escritos clásicos que nos dan una visión bastante aproximada del conocimiento que tenían sobre las mareas. El primero de ellos es de Mela (III-1), pero más precisa y con mayor rigor científico es la descripción que de ellas hace Estrabon (III-5,8),: *"...Es sabido que la duración de un día y de una noche corresponde a una revolución completa del Sol, y que durante ésta revolución se encuentra éste una vez debajo y otra encima de la Tierra. Ahora bien, dice* (Poseidónios) *que el movimiento del Océano es como el curso de los astros; es decir, que se halla sometido a una marcha periódica, y tiene, como la Luna y armónicamente con ella, un período diurno , un período mensual y otro anual; añade que cuando la Luna ha recorrido toda la extensión de un signo por encima del horizonte, la mar comienza a elevarse e invade las orillas, como puede comprobarse por los mismos sentidos, hasta el momento que el astro declinar, la mar se retira poco a poco hasta que la Luna no dista del ocaso sino un solo signo. El mar queda entonces estacionado todo el tiempo que tarda la Luna*

torres, que hacía las veces de espaldón.

http://www.traianvs.net/

no solo en alcanzar su ocaso, sino también en recorrer el espacio de un signo por debajo del horizonte; después el mar reanuda su subida hasta que la Luna toca el meridiano inferior, retirándose de nuevo hasta el momento en que la Luna -que avanza hacia Levante- se halle a la distancia de un signo del horizonte. Finalmente, la mar permanece estacionada hasta que el astro se ha elevado un signo por encima del horizonte, para comenzar de nuevo a subir. Tal es (según Poseidónios[2]) *el fenómeno de la marea en el período de un día. En cuanto al período mensual, las más fuertes mareas de una lunación coinciden con el momento de la conjunción, tras la cual disminuyen hasta que la Luna llega a su primer cuarto; luego aumentan de nuevo en intensidad hasta el plenilunio, y disminuyen durante el resto de su curso hasta el último cuarto, al cual sucede una nueva crecida hasta la conjunción siguiente, una crecida mayor, tanto en duración como en velocidad. En cuanto al fenómeno de las mareas en un período anual,* (Poseidónios) *dice que lo aprendido en Gadeira, donde le enseñaron que hacia el solsticio de verano las mareas altas y bajas eran más fuertes que durante el resto del año, y supo por sí mismo que a partir de este solsticio las mareas disminuían de altura hasta el equinoccio, para volver a aumentar hasta el solsticio de invierno y disminuir otra vez hasta el equinoccio de primavera, para volver a acrecer de nuevo hasta el solsticio de verano. Con estos movimientos periódicos de la mar, que se reproducen todos los días y noches, el mar sube dos veces y baja otras dos en intervalos regulares, tanto diurnos como nocturnos...".*

En esta cita de Estrabón comprobamos que las mareas y las leyes que las rigen se encuentran bastante bien explicadas, a pesar de que este fenómeno debería de ser extraño para los ingenieros portuarios romanos y en general para los habitantes del Mare Nostrum.

No tenemos la misma suerte cuando intentamos ratificar, utilizando la misma fuente, si tenían también conocimientos sobre la influencia del viento en la formación del oleaje y del oleaje como componente del clima marino a la hora del diseñar los puertos. Leyendo a Polibio(XI-12), y a Flavio Josefo (I-16), deducimos que se sabía que el origen de las olas era el viento. Ahora bien, todavía no hemos encontrado alguna cita clásica que nos indique cual fue el conocimiento que tenían del oleaje para el diseño de las obras de defensa de los puertos, aunque cabría suponer que alcanzó el mismo nivel que el de las mareas pues ambos son fruto de la observación perspicaz.

Esta suposición viene avalada por los estudios realizados a fin de comprobar si la disposición en planta de los puertos romanos y la de los diques de abrigo, estaba ajustada a la acción del clima marino de la zona o era fruto del azar. Como consecuencia de ellos, se puede afirmar que los ingenieros civiles que participaron en su diseño y construcción, tenían un amplio conocimiento sobre el clima marino, los temporales dominantes y su frecuencia de presentación en la zona elegida para construir este tipo de obra marítima. Esta afirmación se consolida gracias al texto de Vitruvio (V, 13), pues de su lectura se deduce que los ingenieros romanos sabían que tipo de dique podían construir, en función del oleaje que iba incidir sobre la obra mientras la construían y a lo largo de su vida útil.

Se desconoce también, desde el punto de vista técnico, el nivel de conocimiento que tenía la ingeniería portuaria romana sobre las corrientes marinas, pues se dispone de pocas referencias escritas que nos permitan saberlo documentalmente. Sin embargo sabemos a ciencia cierta que al igual que con los vientos, la situación, fuerza y trayectoria de las corrientes marinas generales y de las inducidas, eran bien conocidas y utilizadas desde siempre por los marinos de las diferentes culturas que surcaron las aguas del mar Mediterráneo, del mar Rojo, y las del océano Atlántico y las del océano Indico.

[2] Estrabon hace referencia al autor de la obra que le sirve de referencia para explicar un fenómeno que quizás él desconozca. Desgraciadamente el libro de Poseidónios no se ha conservado.

http://www.traianvs.net/

No cabe duda de que los ingenieros civiles romanos realizaban diferentes estudios previos para determinar racionalmente el lugar de la costa más adecuado donde ubicar el puerto y para decidir, de entre los diferentes tipos de estructuras marítimas que conocían, la que se debía construir en esa zona. Estos trabajos previos consistían en recopilar información del clima marino del lugar entre sus habitantes para complementar las observaciones propias, con el fin de decidir acertadamente la disposición en planta del puerto y el tipo de estructura de defensa a emplear en la construcción de sus diques (Vitruvio V-13), y para conseguir también, el máximo aprovechamiento de los vientos en la bocana que hicieran fácil las maniobras de entrada y salida de los barcos, (Flavio Josefo I-16).

También hacían estudios geotécnicos sobre la naturaleza de los fondos, mediante la realización de un extensa toma de muestras del lecho marino con sondas (Herodoto II-5) o utilizando a los *urinatores*[3]. Mediante esos trabajos de campo llegaban a conocer la calidad y capacidad portante de fondo, y en función de estos estudios, fijaban el mejor emplazamiento de la obra en la costa y elegían el tipo de cimentación mas adecuado para su construcción. En el caso de enfrentarse con terrenos de poca cohesión eran capaces de adoptar el tipo de saneamiento más adecuado de mejora de los fondos y evaluar de antemano la cantidad de material a eliminar antes de llegar al firme adecuado. Si los terrenos no tenían cohesión, como los fondos de limos, sabían aplicar métodos que daban al terreno la suficiente capacidad portante para soportar el peso de la estructura portuaria que se construiría sobre él (Vitruvio III-4 y V-13).

El bagaje tecnológico de la ingeniería portuaria romana era tal, que ponía a disposición de los ingenieros diferentes formas constructivas para un mismo tipo de estructura de acuerdo con los condicionantes de la obra, entre los que podemos destacar: las solicitaciones del oleaje de los temporales dominantes en la zona, la calidad geotécnica de los fondos, el tipo de materiales disponibles para llevar a realizar la construcción, etc. (Vitruvio V-13), y les permitía definir el mejor proyecto de construcción, delimitando sus diferentes fases para optimizar el tiempo necesario en la ejecución de una determinada estructura o de un puerto completo.

La ingeniería civil romana en general, pero sobre todo la rama que se dedicó a las obras en el mar, experimentó un gran avance en comparación con los logros alcanzados en este campo por las otras culturas del Mediterráneo debido al descubrimiento y utilización de morteros y hormigones hidráulicos utilizando tierra de las regiones de Cumas y de Bayas[4] con alto contenido de polvo puzolánico y que era conocida en su tiempo por *carbúnculo*.

El concepto de puerto de entonces es el mismo que el de hoy. Aquellos ingenieros conocían la importancia de una buena comunicación terrestre entre el puerto, la ciudad y su zona de influencia comercial (Vitruvio V-13)[5] y distinguían claramente entre un simple fondeadero y un puerto, natural o artificial, exigiendo al puerto una serie de servicios básicos (Polibio X-1, Vitruvio V-13). Entendían que la disposición en planta de un puerto se configuraba con una playa en la que a un lado de ella, o generalizando el concepto, a ambos, se disponían el o los diques exteriores que proporcionasen el suficiente espacio de aguas abrigadas a los barcos. Sabían

[3] Constituyeron un gremio y eran los buceadores que en los puertos se dedicaban a rescatar las mercancías que caían al agua durante los trabajos de carga y descarga.

[4] En el tratado de Vitruvio, en su libro 2 dedicado a los materiales de construcción, en el capítulo VI titulado "**Del polvo de Puzol**", podemos leer: "*Hay también una clase de polvo que por su propia naturaleza produce efectos maravillosos. Se halla en la región de Bayas y en los territorios que están en las cercanías del Vesubio. Este polvo, mezclado con cal y la piedra machacada, no solo consolida toda clase de edificaciones, sino que incluso las obras que se hacen bajo el agua del mar tienen solidez.*".

[5] Vitruvio recomienda la construcción de vías de comunicación entre el puerto y los mercados de la ciudad.

http://www.traianvs.net/

también que tipo de obras auxiliares; almacenes(*horreas*), pórticos, atarazanas, y estradas, debía tener todo puerto, natural o artificial (Vitruvio V-13).

Obras exteriores

Lo más apropiado para describir la tipología de obra exteriores que se utilizaron el periodo romano, es leer lo que dice Vitruvio sobre ellas en el capítulo de su libro (V, 13):

"...Pero si no hubiera un lugar naturalmente apropiado para proteger los navíos durante las borrascas, parece que debe procederse de este modo: si hubiese en aquel lugar un pico que constituyera un abrigo contra las tempestades, sino que sólo por una parte hubiera una playa apropiada, entonces es preciso levantar del otro lado, con ayuda de mampostería, espolones o escolleras que lleguen a formar un puerto cerrado... "

Al hablar de la construcción de un *«... puerto cerrado...», e*l Arquitecto hace mención a la *«...mampostería...»*, los *«...espolones...»* y a las *«...escolleras...»,* describiendo con tres palabras los materiales que se empleaban en la ejecución de las obras de abrigo y de las interiores.

Tanta simplicidad en la descripción, hace pensar desde el punto de vista técnico, que esta forma de escribir no solo hace referencia a los materiales que se utilizaban, sino que es una definición sobre el tipo de estructura que se puede construir empleando cada uno de esos elementos. De esta forma se puede asumir que el texto estaba dirigido a gente con formación técnica, y que al leerlo entendería, desde su experiencia, cual era la tipología de las estructuras a las que se refiere Vitruvio en este párrafo.

1.-*«...mampostería...»*. Con este material se hacían estructuras verticales empleando diferentes métodos constructivos.

2.-*«...espolones...»*. Se debe traducir aquí "espolón", por el término actual "pilote". Estas estructuras, formadas por entramados de pilotes clavados mediante maquinaria de hinca, constituían la infraestructura de todo tipo de obras portuarias.

3.-*«...escolleras...»*. Realizando vertidos de piedras de diferentes tamaños se construían estructuras de escollera en talud similares a los actuales.

A lo largo de la historia se han construido diques cuya tipología está reflejada en esta misma clasificación. Del año 2000 a.C., datan los diques verticales y en talud que defendían el *puerto de Faros*[6] (1) Las estructuras verticales fueron empleadas posteriormente por los fenicios, los griegos y, como nos dice Vitruvio, por los romanos. Una muestra de dique vertical fenicio se encuentra en el *puerto de Akko* (5) y, como ejemplos de este tipo de obra de defensa romana, están las ruinas del *puerto de Emporion*, Figura 1, y los restos sumergidos del dique vertical del *puerto romano de Murgi*[7] (6)

[6] Estaba situado en la margen occidental de la antigua isla del mismo nombre, en la actual Alejandría. Este puerto fue construido en distintas fases, una primera entre el 2000 y el 1800 a.C. durante el reinado de la XII dinastía, en pleno Imperio Medio, para cubrir las necesidades del comercio entre el pueblo cretense y el egipcio. Su máximo desarrollo lo alcanzó entre el 1550 y el 1400 a.C. cuando Egipto, bajo la XVIII dinastía, fue la nación más poderosa del Mediterráneo oriental, llegando a sus instalaciones las mercancías del Egeo, vía Creta, y las de Anatolia, Hatti, Mitanni y las costas sirio-palestinas, vía Biblos.

[7] Situado en la Laja del Palo (Roquetas de Mar, Almería ".

http://www.traianvs.net/

http://www.traianvs.net/

Figura 1: Dique romano del puerto de Emporion

Pero sin duda una de las representaciones que reflejan mejor los exponentes de la ingeniería de puertos romana, es el mosaico romano del siglo III d.C., descubierto en la Vega Baja de Toledo, que en la actualidad se encuentra en los depósitos del Museo de Santa Cruz de Toledo, Figura 2, aparecen representados un dique vertical de *«...mampostería...»* y otro de *«...escolleras...»* en talud, así como un tercero sobre arcadas, estructura de la que se hablara más adelante.

Figura 2: Mosaico romano (siglo III d.C.) hallado en la Vega Baja de Toledo (Museo de Santa Cruz de Toledo)-foto CEHOPU

http://www.traianvs.net/

En los diques verticales romanos, la superestructura formada por bloques alcanzaba una profundidad máxima de 4 ó 5 metros, colocándose en pequeñas profundidades, sobre una cama de escollera o directamente sobre el fondo. Para mayores calados se construía un dique de escollera en talud sumergido a modo de infraestructura, en el que la cota de coronación, que servía de cimiento a los bloques de la estructura vertical, se mantenía a esa misma profundidad de 4 ó 5 metros. Tanto para medianos como para grandes calados, terminada la superestructura, era frecuente verter un escollerado en lado hacia el mar para disipar la energía del oleaje de forma parecida a como lo hace una estructura de defensa de escollera en talud.

Vitruvio describe los diferentes métodos constructivos de diques verticales empleados en su tiempo y de forma indirecta da algunas indicaciones sobre construcción de las estructuras en talud. Sin embargo, nada cuenta de las estructuras sobre *«... espolones... »*, que rara vez se emplearon como obras aligeradas de abrigo, aunque si se utilizaron para pantalanes, cimentación de muelles, de estatuas, de torres de defensa y de señalización en el mar. En el famoso sextercio de Nerón[8], se aprecia que la plataforma que sostenía la estatua de Claudio, a la entrada del puerto de Ostia, estaba pilotada.

Después de morir Vitruvio, se construyeron diques aligerados de arcadas sobre pilas. El ejemplo más célebre y clásico de este tipo de estructuras, está representado en el famoso fresco encontrado en Stabia, cerca de Pompeya, que reproduce el puerto de Puteoli.

Figura 3: Puteoli (Puzzoli). Pintura mural que se encontró en muy buen estado de conservación en Stabía, cerca de Pompeya (Museo Nacional de Nápoles)

[8] Museo Británico nº 132.

Este puerto estaba defendido por un dique (7) de 372 metros de largo, sustentado por 15 pilas de bloques de piedra volcánica de planta rectangular de 16 m^2, colocados sobre cimentaciones de hormigón puzolánico. Los arcos de unión entre ellas estaban construidos con ladrillos y bloques de arenisca unidos con mortero puzolánico. Observando el fresco, se pueden distinguir otras estructuras portuarias, tales como el pantalán situado al fondo del puerto sobre peines de tres pilotes y un faro o baliza sobre la estructura de defensa. Los restos del dique aún se podían ver en el siglo XVIII.
De todas las formas constructivas de diques empleadas por los ingenieros romanos cuya utilización estaba en función de la capacidad portante del terreno, del clima marino y del tipo de materiales disponibles para realizar la obra, podemos enumerar las que conocemos a través de Vitruvio (V-13):

a) Dique vertical de hormigón en masa:
Los condicionantes que indicaban a los ingenieros romanos que debían construir este tipo de estructura marítima eran los siguientes: la existencia de una playa apropiada, la calidad de los fondos aceptable, la posibilidad de utilizar en obra el polvo de Puzol y que el oleaje fuese de pequeña entidad.
La construcción comenzaba con la hinca de un recinto de tablestacas de madera de roble que se clavaban una a una, hasta penetrar sólidamente en el fondo. El recinto tenía las esquinas reforzadas por piezas en forma de L, de hierro o bronce, para evitar dañarlas al rigidizar el conjunto mediante unas cadenas que se colocaban alrededor de su perímetro y que eran traccionadas por tensores, Figura 4a
Rigidizado el recinto de tablestacas, cuando la capacidad portante del fondo era óptima, se procedía a sanear sus capas superficiales dragando al mismo tiempo que se realizaba el perfilado de la cimentación, o bien, mediante esta misma técnica, cuando la calidad de la primera capa del lecho marino no era del todo aceptable, se alcanzaba el firme próximo dejando un vaciado de cimentación más profundo. El dragado del fondo se realizaba con dragas manuales iguales a las que se han utilizado, sin grandes variaciones técnicas, hasta principios del siglo pasado, Figura 4b. Posteriormente, se procedía a hormigonar bajo el agua, llenando el recinto con el conglomerado hidráulico, Figura 4c. Transcurrido el tiempo de fraguado, se desencofraba retirando las tablestacas y se procedía a un nuevo avance de la obra, repitiendo todos los pasos descritos.

http://www.traianvs.net/

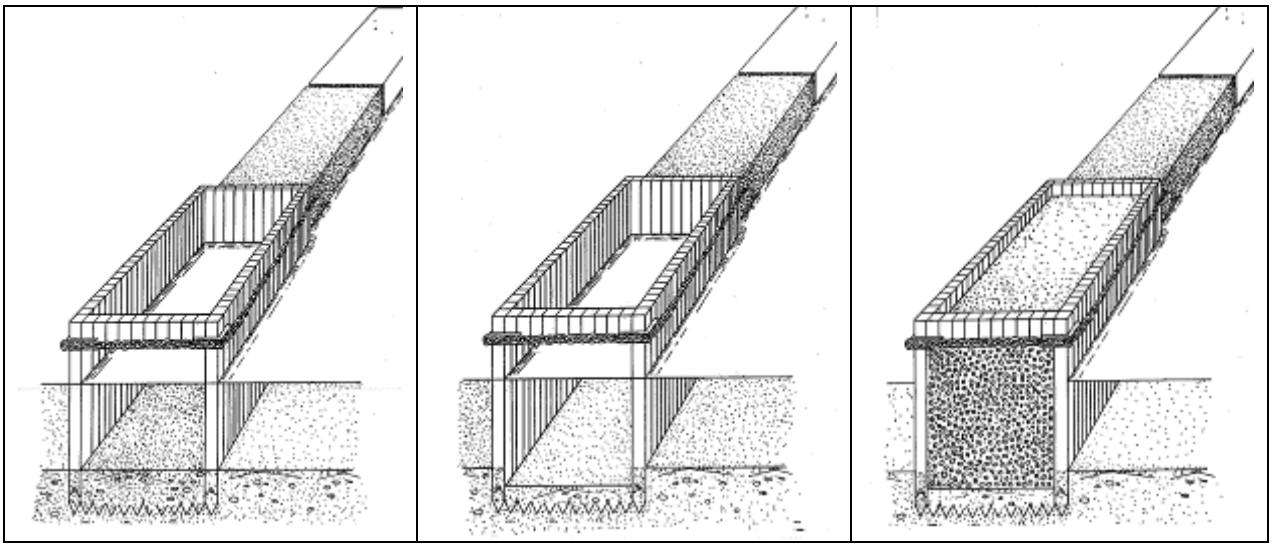
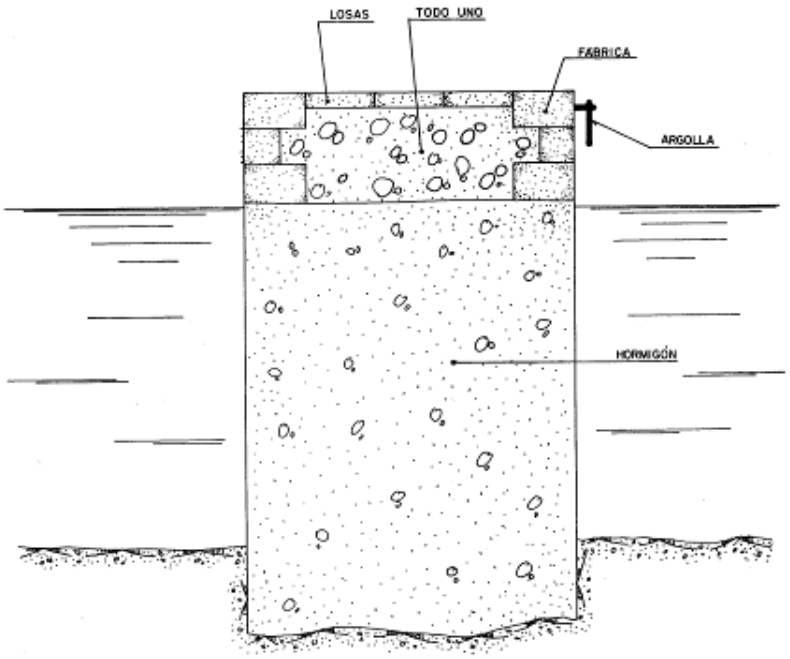


Figura 4: Fases constructivas de un dique/muelle de hormigón en masa
a): Recinto tablestacado con cuartones de madera y rigidizado con cadenas-visión interior
b): Dragado del fondo hasta alcanzar firme
c): Hormigonado

Finalizada en toda su extensión la estructura, se solía coronar el dique con un cabecero realizado mediante muros perimetrales de ladrillo o sillería en los que se colocaban los dispositivos de amarre; doctyliums y argollas. El hueco dejado entre ellos se rellenaba de "todo uno" y sobre este material disgregado, compactándolo, se construía una calzada. Otras veces este remate se hacía con un enlosado colocado sobre el material de relleno, Figura 5. Su anchura, solía ser como mínimo de unos 6 m.



SECCIÓN DE DIQUE VERTICAL O MUELLE ROMANO
DE HORMIGÓN EN MASA PARA ZONAS POCO AGITADAS
(reconstrucción de la Peña, Prada & Redondo'95, según descripción de Vitruvio (5,13))

Figura 5: Sección de dique-muelle romano de hormigón en masa

http://www.traianvs.net/

http://www.traianvs.net/

b) Dique vertical de bloques de hormigón:

La construcción de este tipo de estructura marítima se decidía cuando las condiciones de partida eran las siguientes: la existencia de una playa apropiada, la calidad de los fondos aceptable, la disposición de pequeños y medianos calados, la posibilidad de utilizar en obra el polvo de Puzol y las solicitaciones de fuertes oleajes o cuando la obra se iba a asentar en mar abierto.

La primera fase comenzaba vertiendo desde tierra un primer tramo de banqueta de escollera de regularización, siguiendo el talud natural del terreno si este no era muy escarpado, o con un nuevo talud más suave si el natural tenía mucha pendiente. La banqueta se prolongaba hasta alcanzar una profundidad máxima en su coronación de 2,5 m, dependiendo esa cota del tamaño del bloque que se colocaría encima de ella, Figura 6. Se continuaba con el vertido de escollera, siempre a esa cota, hasta que el calado permitía realizar un escalón, ganando así profundidad para colocar dos bloques sobre ella.

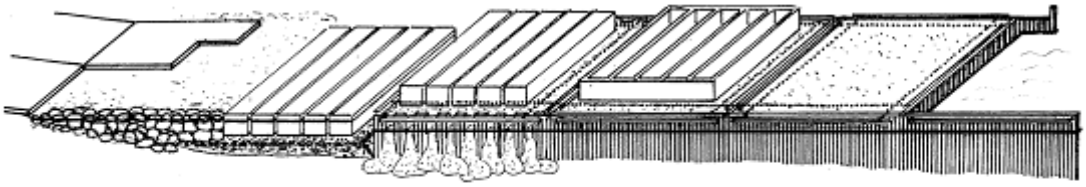


Figura 6: Fase constructiva para pequeñas profundidades de un dique de bloques de hormigón usando banqueta de escollera y recintos tablestacados (de la Peña y Prada, 1995)

Una vez construida la banqueta de asiento, en su perímetro se hincaba un recinto de tablestacas contrapeadas de píe y medio de espesor (46 cm), y con una longitud de acuerdo al número de bloques que se fueran a hormigonar "in situ". Las cabezas de las tablestacas alcanzarían un nivel superior al del mar. El interior del recinto se rellenaba de arena limpia, de playa o de río, y se enrasaba al nivel de las cabezas de las tablestacas. Sobre esta plataforma de arena se construían los encofrados de madera para el hormigonado de los bloques.

El tamaño de los bloques así hormigonados podía alcanzar un máximo de 15 metros de longitud y 3 metros de alto y de ancho. Es lógico suponer que la máxima longitud de estos bloques vendría dada por la experiencia que los ingenieros romanos tendrían sobre las consecuencias de sobredimensionarlos, pues sabrían que en función de la dilatación del hormigón que empleaban, de la esbeltez de la pieza y del propio peso, aparecerían fracturas de tal importancia que darían en ruina la obra.

Fraguados los bloques y desmontado el encofrado, se abrían a ambos lados del recinto de tablestacas unas zapas, previamente construidas, por las que la arena fluía hacia el lecho marino bajo la presión del peso de los bloques y por la socavación producida por el agua del mar, permitiendo que los bloques se asentasen lentamente en su emplazamiento sobre la banqueta de escollera, Figura 6.

En la zona que llevaba dos bloques, profundidades de hasta 5 m, una vez situado el primero de ellos sobre la escollera, se reparaban las zapas del recinto y se volvían a repetir el método.

A medida que el calado aumentaba la banqueta se transformaba en un verdadero dique sumergido de escollera en talud ya que con esta estructura se podían alcanzar grandes profundidades. Cuando la obra alcanzaba calados grandes, se abandonaba la forma constructiva anterior y se continuaba la estructura utilizando otro método. Consistía este en aumentar la

profundidad de la cota de coronación de la banqueta de regularización hasta los 6 o 7 metros de profundidad[9], Figura 7.

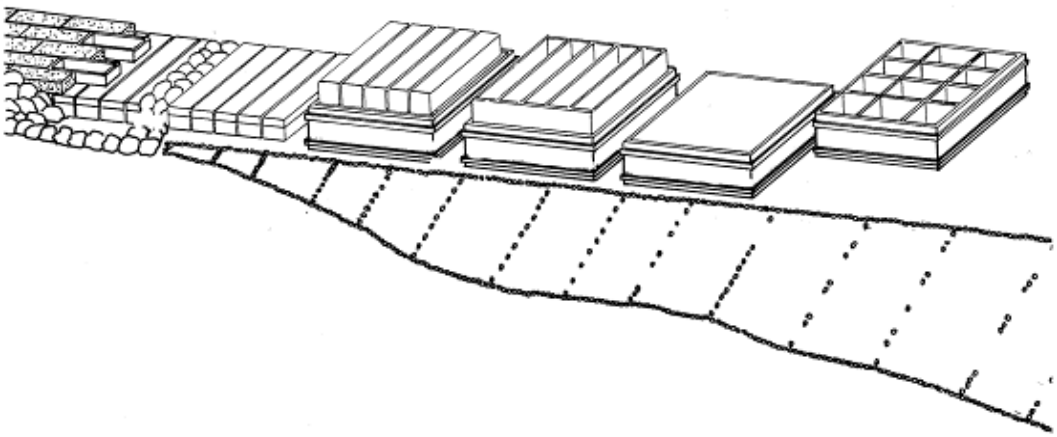


Figura 7: Fase constructiva para grandes profundidades de un dique de bloques de hormigón usando cajones flotantes (de la Peña y Prada, 1995)

Para hormigonar los bloques que constituían la estructura vertical, se fondeaban cajones de madera sobre el dique sumergido, utilizándolos como encofrado perdido,. El ejemplo más importante de esta forma constructiva para grandes calados se utilizó en el puerto de Cesárea Marítima, descrito más adelante (Figura 7). En la Figura 8 se presenta el aspecto que finalmente tendría la estructura antes de construir la superestructura del dique.

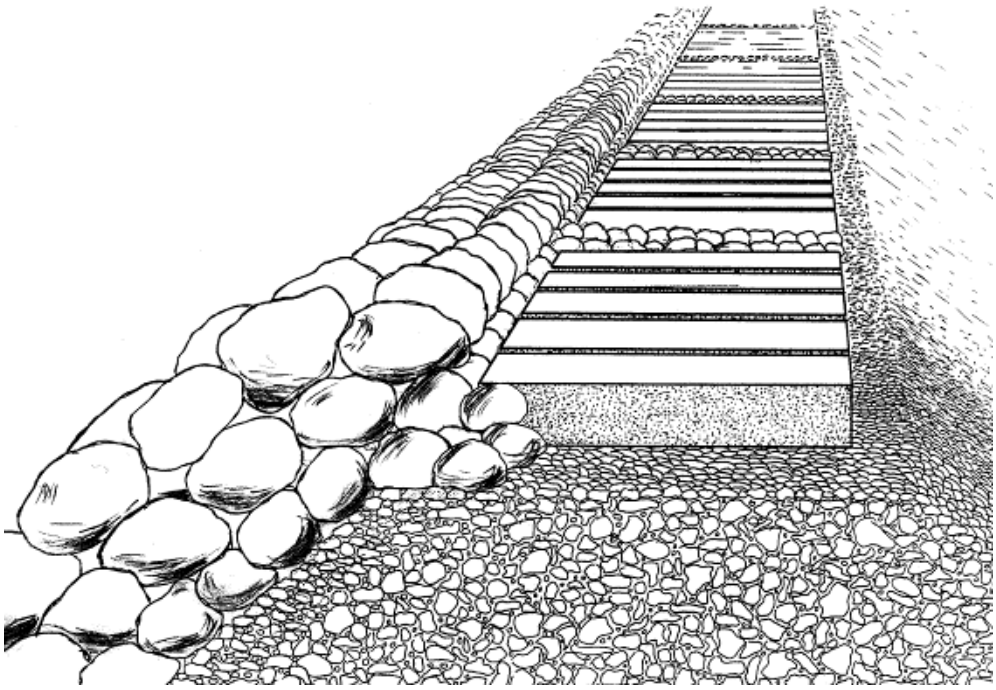


Figura 8: Aspecto final de un dique de bloques de hormigón con manto de escollera, a falta del enlosado y superestructura (de la Peña y Prada, 1995)

[9] En excavaciones arqueológicas se ha comprobado que para grandes calados las estructuras verticales alcanzaban profundidades de hasta 6 o 7 metros y estaban constituidas por dos o más bloques superpuestos.

http://www.traianvs.net/

http://www.traianvs.net/

c) Dique vertical de paredes de sillería:

Los condicionantes de esta estructura son los siguientes: la existencia de una playa apropiada, la calidad de los fondos que podía variar entre buena y mala, la disposición de pequeños y medianos calados, la imposibilidad de utilizar el polvo de Puzol, las solicitaciones de fuerte oleaje o cuando la obra se iba a asentar en mar abierto.

La obra partía de tierra creando ataguías de entibaciones dobles, similares a las empleadas por los ingenieros romanos en la cimentación de grandes puentes. Las ataguías, Figura 9 y 10, estaban constituidas por dos entibaciones de cuartones verticales de roble hincados en el lecho marino. En la parte superior de la cara que quedaba expuesta al mar se disponían dos cuartones horizontales en doble vía para que entre ellos se alojasen las cadenas que rigidizaban el conjunto. Para que el recinto una vez desecado aguantara la presión hidrostática, en la parte superior de la cara que quedaba en seco se colocaba una sola vía de cuartones horizontales para arriostrarla con contrafuertes. Ambas entibaciones, la exterior y la interior, se unían superiormente clavando cada cierta distancia cuartones transversales para soportar los esfuerzos horizontales. Entre las dos entibaciones se colocaban sacos de enea llenos de arcilla que una vez compactados dejaban el recinto aislado e impermeabilizado.

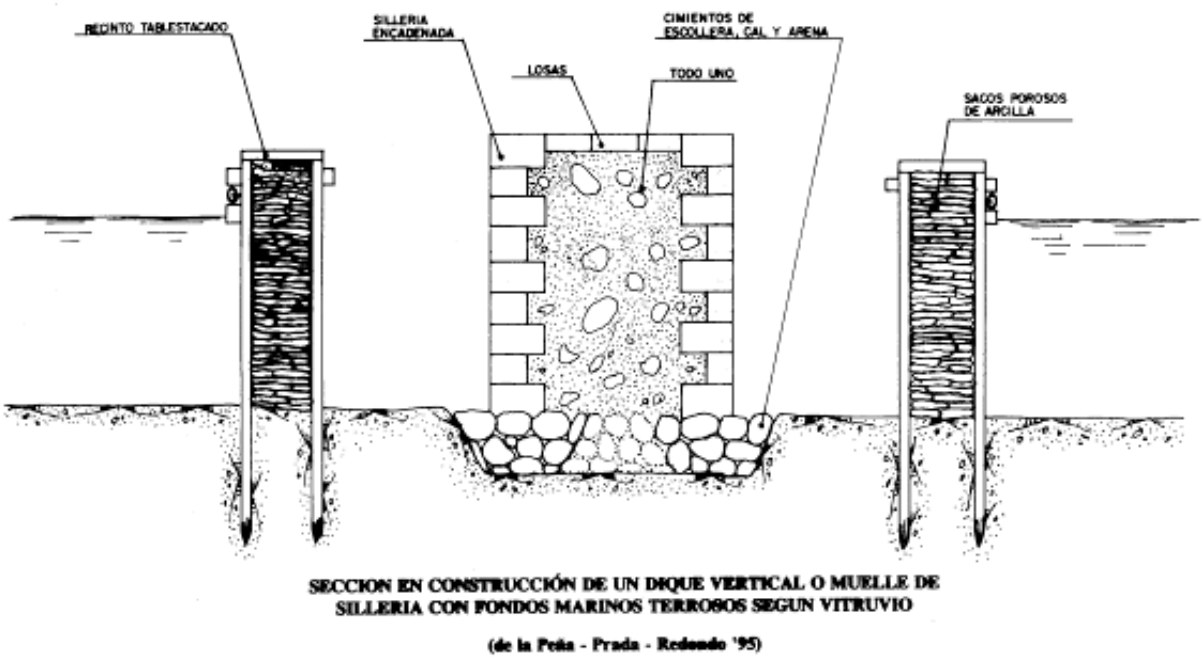


Figura 9: Sección en construcción de un dique vertical o muelle de sillería con fondos marinos terrosos, según descripciones de Vitruvio (de la Peña, Prada y Redondo, 1995)

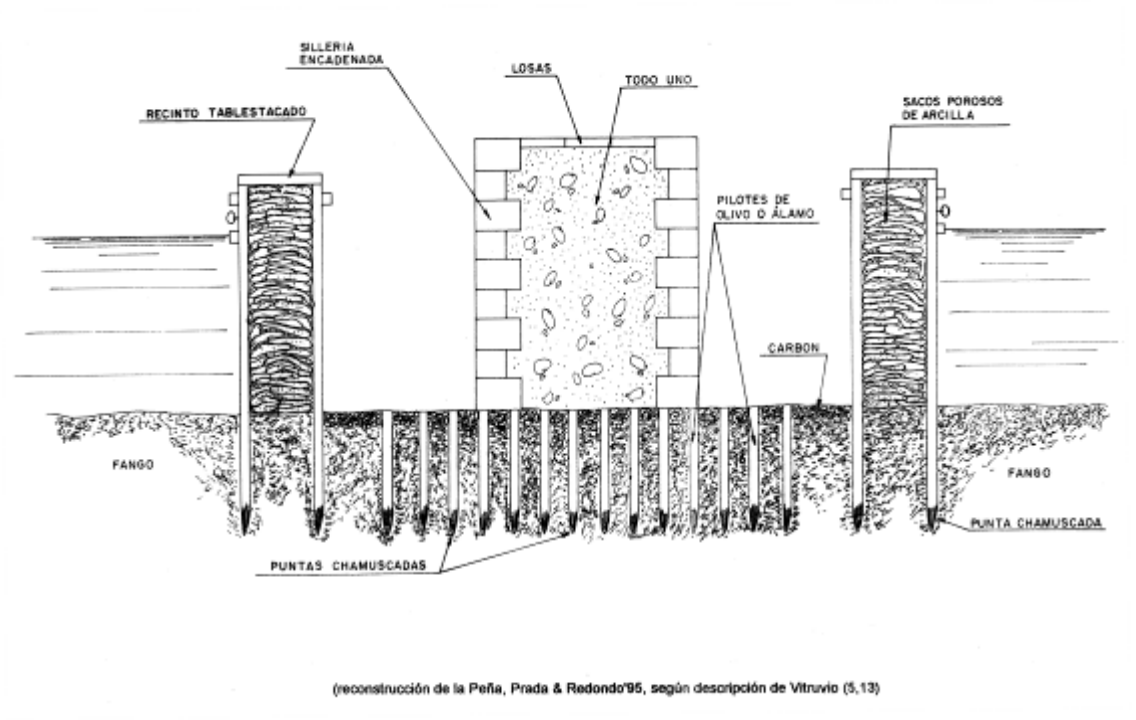
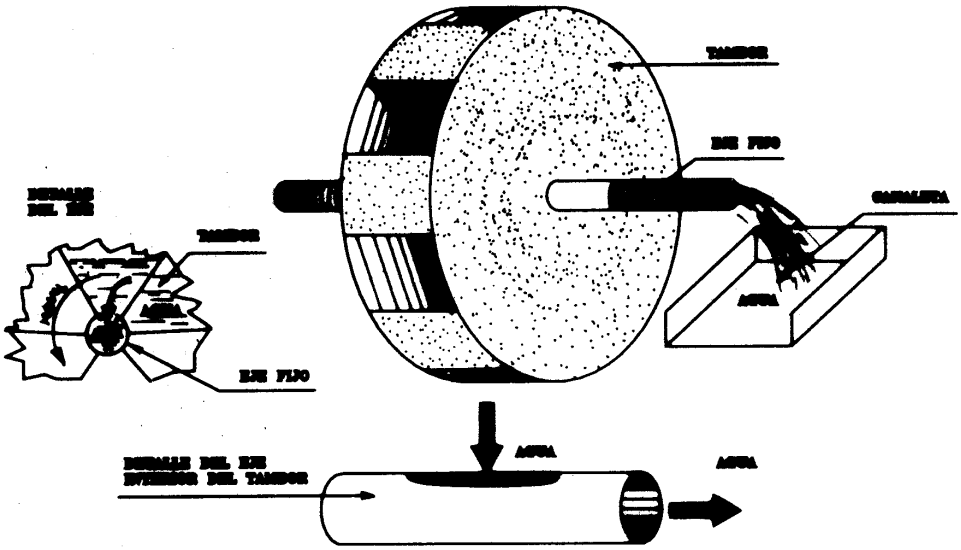


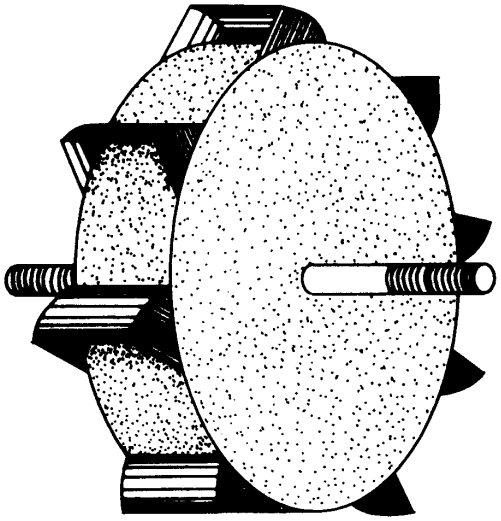
Figura 10: Sección en construcción de un dique vertical o muelle de sillería sobre fondos marinos fangosos, según descripciones de Vitruvio (de la Peña, Prada y Redondo, 1995)

La siguiente operación, el achique del agua del interior de la ataguía, se hacía básicamente con tornillos de Arquímedes o cocleas.(Figura 11) Artilugios a los que se les adosaba tambores en su parte superior e inferior, con la doble finalidad de mejorar la captación del agua y de facilitar el giro del tornillo. También utilizaban ruedas de cangilones pero estas máquinas daban un menor rendimiento de achique o bien bombas de agua o de Ctesibio (Figura 12). Desecado el recinto defendido por la ataguía, se aseguraban los contrafuertes en la entibación interior y comenzaban los trabajos de cimentación.

http://www.traianvs.net/



TAMBOR SIMPLE ROMANO



TAMBOR DE CANGILONES

TAMBORES DE ELEVACIÓN DE AGUA ROMANOS (Vitruvio X,9) (de la Peña, 1.997)

Figura 11: Reconstrucción de una cocléa, o tornillo de Arquímedes, siguiendo la descripción de Vitruvio (de la Peña, Prada y Redondo, 1997)

http://www.traianvs.net/

http://www.traianvs.net/

Figura 12: Fotografía de una bomba de pistones de Ctesibio (Museo Arqueológico de Madrid-Foto CEHOPU)

Para buenas capacidades portantes del terreno estos trabajos consistían en la excavación de dos zanjas corridas de una anchura superior al muro que iban a soportar, normalmente el doble de su grosor, Figura 9. A continuación se rellenaba las zanjas con mampostería de piedra ligada con mortero de cal y arena, hasta enrasar con el terreno natural.

Cuando no resultaba factible realizar un saneamiento de los fondos debido a la presencia de estratos constituidos por terrenos poco cohesivos, se creaba un campo de micropilotes de maderas resistentes al agua y a las corrosiones, utilizando la técnica del chamuscado de las puntas para facilitar su penetración en el lecho marino, Figura 10. Concluida esta fase se procedía a retacar con carbón los huecos existentes entre las cabezas de los micropilotes, extendiéndose este relleno a los límites de la ataguía para evitar en lo posible la erosión en el pie del dique-muelle que pudiera producirse al poner la obra en servicio.

Rematada la cimentación por cualquiera de los métodos descritos, se construían sobre ella los muros perimetrales de la estructura utilizando el aparejo de sillería encadenada. Los sillares tenían la mayor longitud posible para reducir al máximo el número de juntas y dar así una buena estabilidad a los muros que formaban la parte exterior de la estructura, colocándose en su parte superior los dispositivos de amarre; doctyliums y argollas. El espacio vacío existente dentro de la

misma se rellenaba con "todo uno" apisonado y la obra se remataba en su parte superior haciendo un camino de rodadura, utilizando losas, embutiendo piedras, etc.
Estos tres tipos de estructura de defensa portuaria eran elementos básicos que podían combinarse convenientemente para construir diques mucho más robustos. Tal es ejemplo de la sección tipo del dique de defensa del puerto de Cesarea Marítima, mandado construir por Herodes el Grande, Figura 13. Su descripción nos ha llegado por Flavio Josefo (I-16) y sus restos se han estudiado minuciosamente, especialmente por Raban (8). La estructura base del dique está formada por dos diques de bloques de hormigón, antes descritos, de 6 y 12 m de ancho aproximadamente y por un dique vertical de sillería. Tras construir estos tres diques paralelos, el espacio intermedio se rellenó de todo uno, utilizando la misma técnica que 2000 años antes habían utilizado los ingenieros portuarios minoicos en la construcción del puerto Antiguo de Faros (1). El resultado fue un dique de 61 m de anchura al que se le adosó un manto exterior de escollera. La mitad de su ancho, 30'5 m, se la dejó libre para que funcionase como cuenco amortiguador del oleaje, llamado por los romanos «procimia». En ese cuenco se dispuso de una serie de canaletas hechas en el hormigón que funcionaban como red de drenaje del agua de rebase de la ola. En la mitad del dique se dispuso de un muro o espaldón que aislaba el cuenco amortiguador de la zona de muelles. Este espaldón se reforzó construyendo cada cierta distancia torres de sujeción del muro.

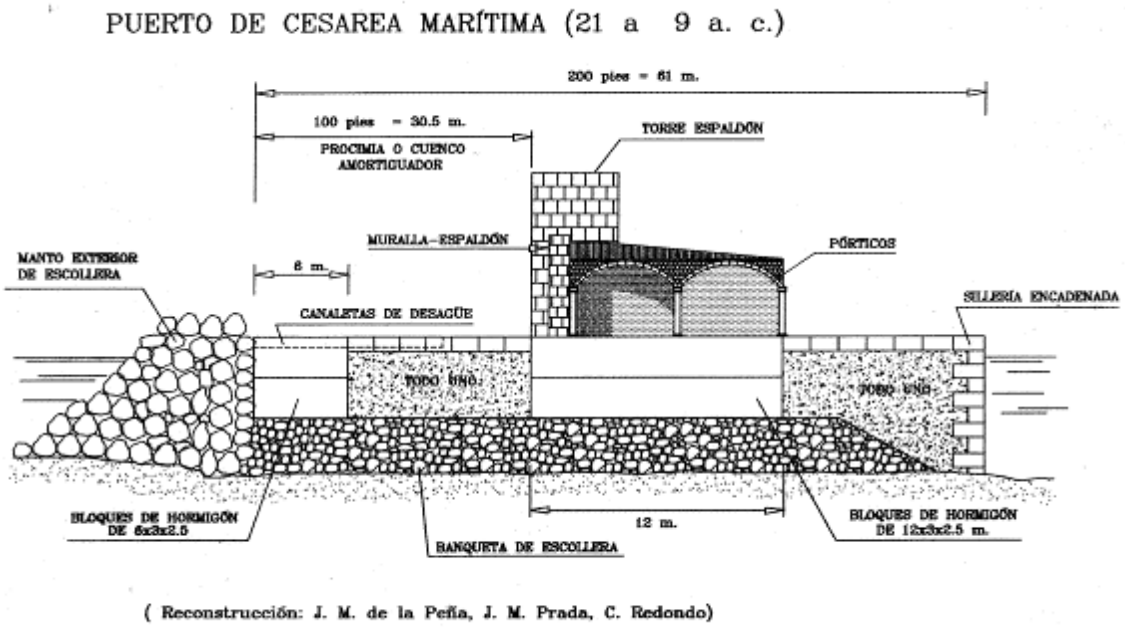


Figura 13: Reconstrucción de la sección tipo del dique exterior de Cesaréa Marítima

Obras interiores y auxiliares

Las obras interiores y auxiliares de los puertos antiguos y las del periodo romano se pueden enumerar siguiendo a Vitruvio (V, 13*):"...Bastará entonces construir en torno suyo pórticos, atarazanas, almacenes y estradas para las mercancías, y desde allí calles hasta los mercados....".* Se debe añadir que también se disponía en los puertos de sistemas de aguada, de señalización y de maquinaria específica para las distintas maniobras portuarias.

http://www.traianvs.net/

http://www.traianvs.net/

a) Los pórticos:
Formaban el recinto dónde se establecían las "*horreas*" (tinglados, almacenes), las oficinas y otras dependencias portuarias. Frecuentemente se construían alrededor de las zonas de carga y descarga de mercancías. Cuando el trasdós del dique se utilizaba como muelle, los pórticos se empleaban también como contrafuerte o refuerzo de la muralla que se construía sobre él. Esta muralla, además de realizar su función tradicional, servía de espaldón, Figura 13.

b) Las Atarazanas:
O arsenales, se construían en la zona más al interior del puerto, frente a las estradas o varaderos, y su estilo no distaba mucho de las construidas por los griegos (Figura 14), si bien se adaptaban a las necesidades volumétricas de la construcción naval romana. En esencia constaban de arcadas o columnatas alineadas rematadas con cimbras y techos de madera o de fábrica. En astilleros importantes los techados se sustentaban sobre arcos o su peso se descargaba mediante bóvedas. En los puertos de cierta importancia habría diques secos, al igual que el existente en el puerto de Motya (9)

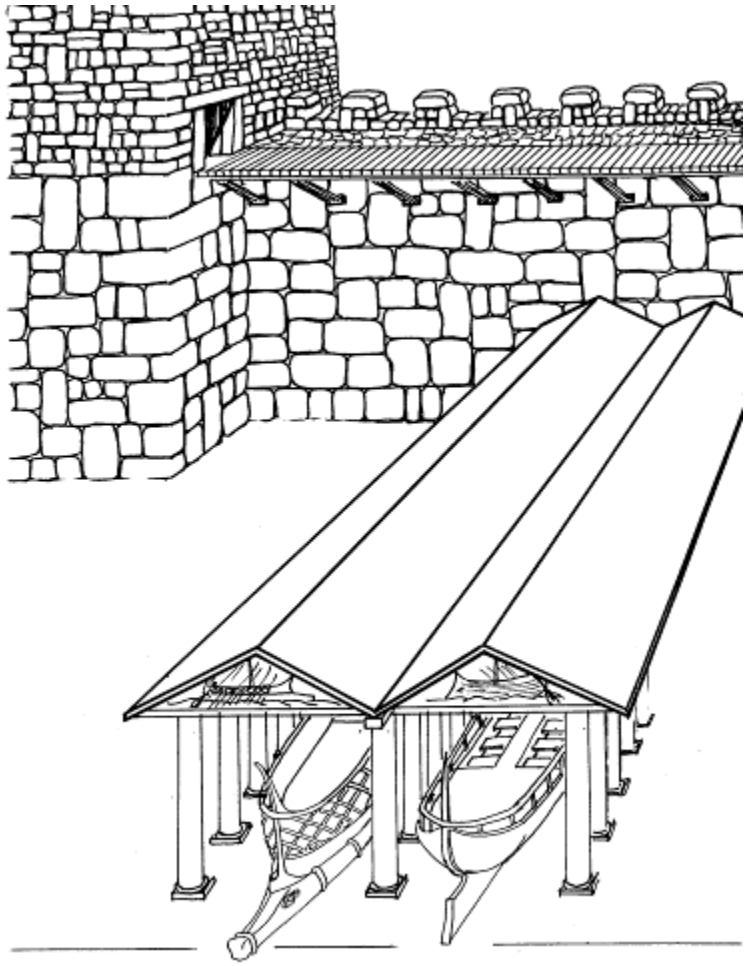


Figura 14: Atarazana griega, vista parcial

c) Los almacenes:
Se construían en la ciudad y en el puerto, y servían de depósito para las mercancías que esperaban su redistribución por la zona de influencia comercial, o su estiba en los barcos. Los almacenes

dedicados a los productos básicos de alimentación y los militares, tenían una importancia especial, normalmente estratégica, y su control lo monopolizaba el estado (10).

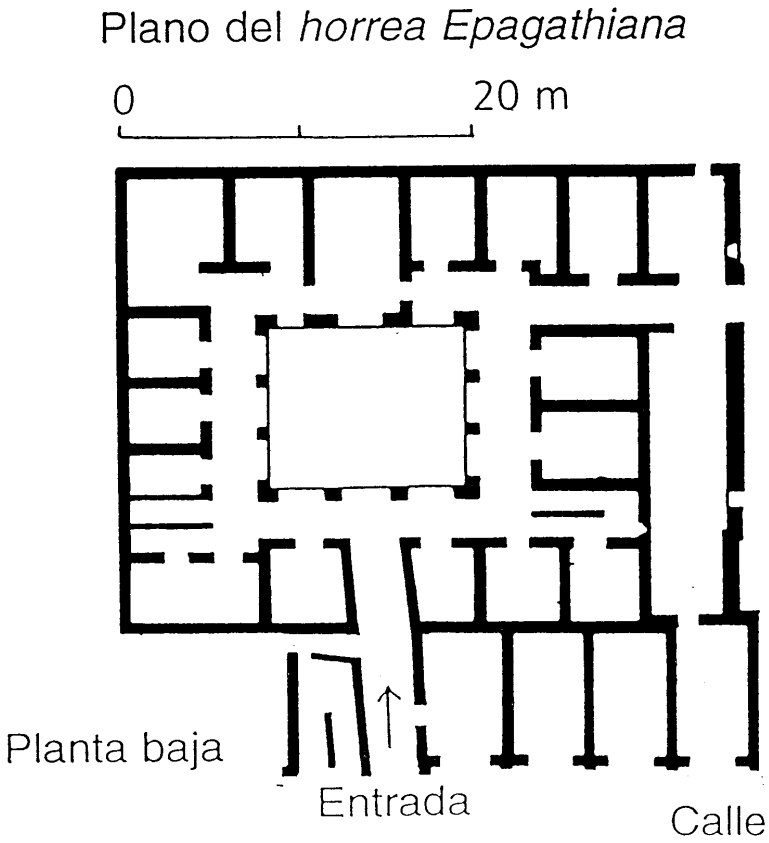


Figura 15: Plano de la horrea Epagathiana en el puerto de Ostia (E. Morin, 1995)

http://www.traianvs.net/

http://www.traianvs.net/

d) Las estradas:
O varaderos, rampas de pequeña pendiente por las que se elevaba el barco a tierra desde el mar, o se botaba hacia el agua desde tierra. Se construían colocando dos vigas de madera, paralelas entre sí y dispuestas transversalmente a la línea de costa sobre travesaños apoyados en la arena de la playa, o revistiendo la pendiente con losas de piedra o de mortero hidráulico. La disposición de los varaderos al fondo de la dársena, junto al arranque del dique del puerto, se repite en otros hallazgos portuarios como en Murgi (6) o en el Pireo (7). La pendiente de la rampa variaba, pudiendo alcanzar valores de 1/14 (9).

e) Sistemas de aguada:
El servicio de aguada era esencial en los puertos desde siempre, en algunos, como el antiguo de Ostia, el agua potable se traía mediante acueductos (9). y solían disponer de depósito de regulación de caudal como el hallado en Leptis Magna (9). En la Figura 16 se muestra el sistema de aguada del puerto de Bares (11), que consistía en:

- Un punto de captación de agua.
- Una conducción para el transporte de agua: una tubería formada por piezas de barro cocido.
- Un punto de salida de agua, regulado por un depósito.

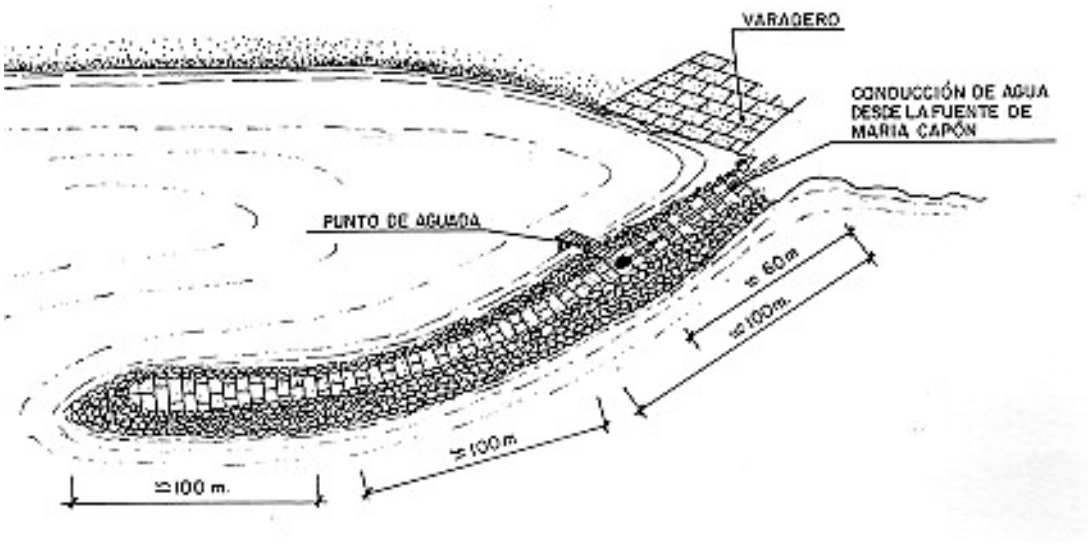


Figura 16: Sistema de aguada en el puerto de Bares

f) Maquinaría:
Para el izado de los barcos a tierra se disponía de la maquinaria auxiliar del varadero, cuya existencia y utilización se menciona en los clásicos: Homero (Iliada II, 153), Heródoto (II, 154) y (II, 159) , Tucidides (III, 15), y según Vitruvio (X, 5), también se emplearon grúas en este tipo de operaciones.
El libro décimo del tratado de Vitruvio, fundamental para saber que tipo de maquinaria utilizaba la ingeniería civil romana, tras describir una serie de grúas diferentes, entre las que se encuentran las de utilización común en los puertos, Figuras 17 y 18, , indica:*«…Todos estos tipos de máquinas que se han descrito hasta ahora sirven no solo para lo que hemos dicho, sino también para cargar y*

descargar naves, colocándolas unas derechas y otras echadas sobre soportes de rotación. Igualmente sin aparejos de maderos, sino disponiéndolas en tierra, siguiendo las mismas reglas y sirviéndose únicamente de cordajes y un sistema de poleas se pueden sacar las naves del agua...»

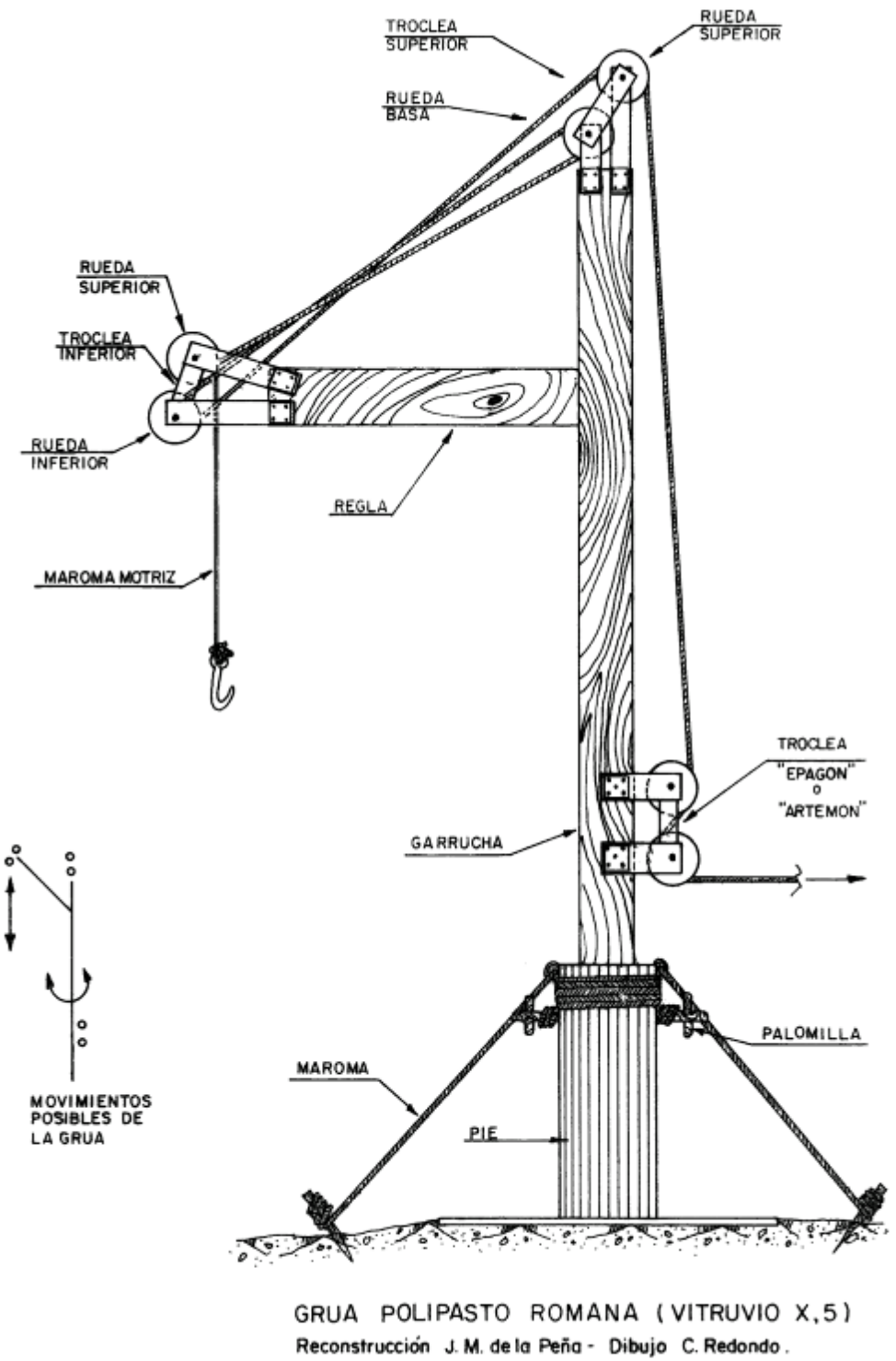


Figura 17: Grúa vertical romana según Vitruvio (de la Peña, Prada y Redondo, 1995

http://www.traianvs.net/

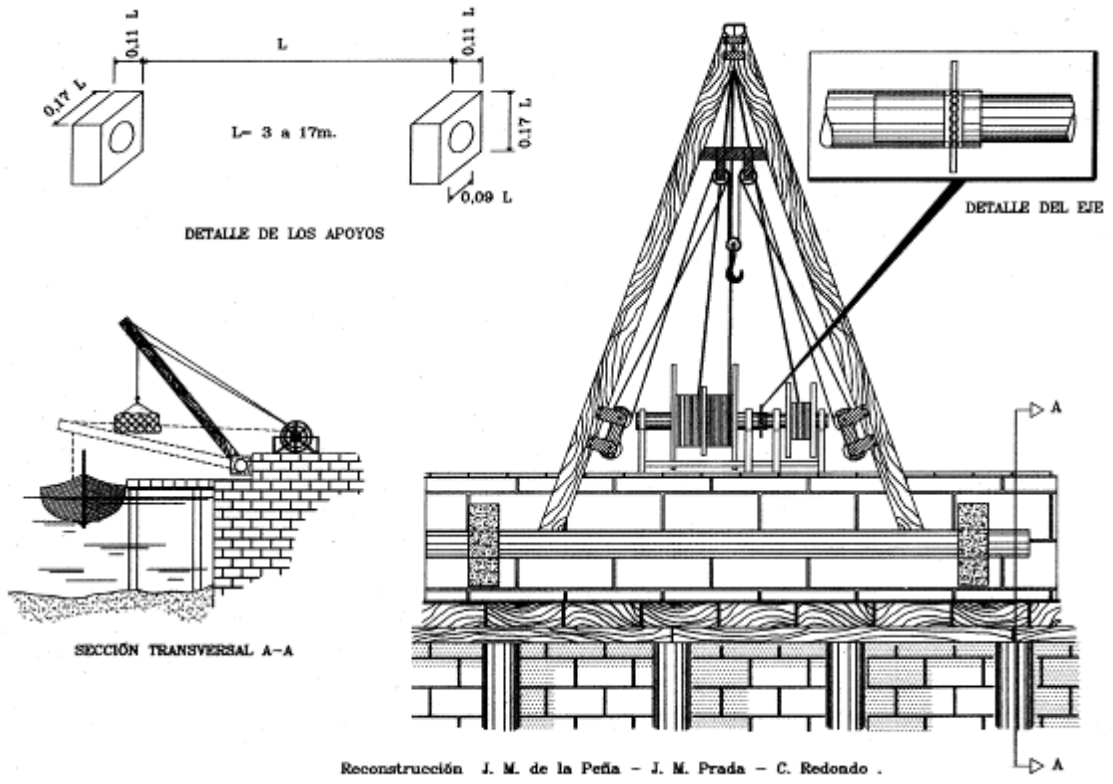


Figura 18: Grúa de eje horizontal romana según Vitruvio (de la Peña, Prada y Redondo, 1995

g) Señalización:

Se sabe que desde muy antiguo se distinguía entre baliza portuaria y faro. La primera indicaba la situación de la bocana del puerto y se ubicaba a la derecha de la entrada en la ruta de acceso a él, y solía constituir una seña de identidad que lo diferenciaba de cualquier otro puerto. Al otro lado de la bocana se construía, si bien no siempre, un monumento que daba carácter de identidad, no solo al puerto, sino también a la ciudad (13), ejemplo de ello lo tenemos en el famoso Coloso de Rodas (Polibio, V, 23) o en la bocana del puerto de Cesarea Marítima, Flavio Josefo (I, 16).

Los faros son estructuras que señalan la situación de la costa a los navegantes. Aún hoy quedan restos del antiguo faro fenicio de Akko, Acre (5). Existen referencias del faro cartaginés del puerto de Lilibeo en Sicilia (Polibio, I, 13). Sabemos del famoso faro de Alejandría (12). Y de los construidos por Roma conocemos de la existencia de bastantes estruturas, entre los que se puede citar: la Torre de Hércules, en la Coruña (Figura 19), el faro de Cádiz (12), el faro de Chipiona (Estrabón, III, 1, 9; Mela III, 4), el faro de Narbona (13), el de Leptis Magna (14), el de Ostia y el de Puteoli (13).

http://www.traianvs.net/

http://www.traianvs.net/

Figura 19: Torre de Hércules, antiguo faro romano construido en el gobierno de Trajano y con el as que quedó tras las reformas del siglo XVIII

Organización y explotación portuaria

La dominación romana del Orbe supuso la hegemonía sobre los puertos y las rutas comerciales marinas y terrestres que confluían en ellos. Fue tan importante el tráfico comercial a través del mar que forzó la mejora y ampliación de las rutas terrestres ya existentes, creando así una basta red viaria que ha estado en servicio hasta el siglo XVIII, que permitió desarrollar y afianzar las zonas de influencia comercial de algunos puertos hasta transformarlos en puertos muy importantes, -Ostia, Puteoli, Gades, Alejandría, etc. Su tráfico comercial se vio favorecido por la existencia de una red de puertos de segundo orden y por la de puertos locales y fondeaderos. Estos grandes puertos, en ocasiones eran estructuras administrativas que agrupaban diferentes instalaciones portuarias, como el puerto de Gades, conocido como el Portus Gaditanus, al que pertenecía el propio puerto de la ciudad, los astilleros situados en el actual Puerto Real, etc.(15), o el puerto de Puteoli que englobaba diversos puertos ubicados en golfo de Nápoles, como el propio puerto de Puteoli, el de Miseno, el de Nápoles... .

http://www.traianvs.net/

Figura 20: Puerto de Puteoli, o Puteolos (hoy Puzoli) en el golfo de Nápoles, según un grabado del siglo XVIII

Es difícil, por no decir imposible, conocer cual era la organización portuaria que regía cada una de las grandes áreas portuarias, solo se conocen datos aislados que permiten deducir ciertas hipótesis. De forma análoga a Cartago, habría en cada puerto una institución administrativa que podemos asimilarla a una capitanía, Apiano sobre el puerto de Cartago (16). En el mosaico de Toledo (Figura 2), se puede apreciar una edificación de estructura circular con una serie de mástiles en su zona alta y a su lado otra estructura (Figura 21), podría tratarse del edificio de "capitanía" del puerto, con sus mástiles para las banderas de órdenes y con la baliza a su lado.

Figura 21: Detalle del mosaico romano de Toledo (Figura 2) en el que se aprecia de derecha a izquierda; una figura humana, un templo, el edificio de "capitanía "portuario y la baliza del puerto.

http://www.traianvs.net/

El mosaico romano de Toledo ofrece grandes posibilidades para el estudio de la ingeniería portuaria y naval romana, y solamente su análisis y la explicación de cada una de las figuras representadas en él formarían un compendio del saber romano en esas materias.

Referencias bibliográficas

[1] Peña Olivas, José M. de la (2001), *Tecnología portuaria romana*; Revista OP Ingeniería y Territorio (nº 56, pp. 16 a 23)

[2] Kovaliov, Seguei Ivanovich (1985). *Historia de Roma*; Editorial Sarpe

[3] García Bellido, Antonio (1993), *España y los españoles hace dos mil años (según la Geografía de Strábon;* Espasa Calpe (Colección Austral, A 203).

[4] Rambaud, Fernando, José M. de la Peña y Juan M. Prada (2001), Estudio de la evolución de la línea de costa en los últimos 2500 años y su afección a los puertos de Cádiz, Cartagena y Ampurias; VI Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos.

[5] Inman, Douglas L. (1974) *Ancient ant modern Harbors: a repeating phylogeny*. Proceedings of the 14th I.C.C.E. (Vol. III, págs. 2049-2067).

[6] Peña Olivas, José Ml de la y Juan M. Prada Espada (1995.), *Murgi: un antiguo puerto romano en Almería*. Revista de Arqueología (nº 168, pags. 36-43)

[7] Blackmann, D.J. (1982) *Ancient Harbours in the Mediterranean. Part1*. The International Journal of Nautical Archaeology and Underwater Exploration (11.2, pag.79-104).

[8] Raban, Arner (1989). *The Harbour of Caesarea* Maritima. BAR. International, serie 491.

[9] Blackmann, D.J. (1982). *Ancient Harbours in the Mediterranean. Part2*. The International Journal of Nautical Archaeology and Underwater Exploration (11.3, pag.185-211).

[10] Morin, Étienne (1995). El puerto de Roma en el siglo II de nuestra era. Ostia; Ediciones Mensajero.

[11] Prada, J.M., Maciñeira E. y Peña, J.M (1999)., *Bares: el Puerto más antiguo de la península;* V Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos. (Vol. 1, pp. 317-330)

[12] Sanchez Terry, M. A. (1991), *Los faros españoles: historia y evolución*, Ministerio de Obras Públicas y Transporte.

[13] Prada Espada, J. M. y J. M. de la Peña Olivas (1995).*Maritime Engineering during the Roma Republic and the Early Empire*; Tarragona Medcoast'95.

[14] Bartoccini R. (1958) *Il Porto Romano di Leptis Magna*, Balletino del Centro Studi per Storia dell'Architettura (Roma).

[15] Peña o, J. M. de la, F. Rambaud y J. M. Prada (2002). *Metodología para el estudio de la evolución de la costa a largo plazo*; Revista de Ingeniería Civil (nº 126, págs. 125 a 135).

[16] Peña Olivas, J M de la, J M. Prada Espada y C Redondo Morejón-Girón (1993). *Obras portuarias en la antigüedad*, Gijon: II Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos.