

Rompeolas verticales

(Conclusión)

CAPITULO III

CONSTRUCCION

En la construcción de los rompeolas verticales hay que distinguir tres elementos diferentes, que son: la infraestructura de enrocados, que forma la base de la obra; el muro propiamente hablando, que descansa sobre la base de enrocados o excepcionalmente sobre el fondo mismo, y que se eleva hasta cierta altura encima de la baja marea, y el macizo de coronamiento, que actualmente se hace siempre de hormigón, limitándolo a una altura que varía entre 2.50 m. y 4 ó 5 m. sobre el nivel de la baja marea en los mares en que la amplitud de la marea es pequeña, y que en todo caso será de 2 ó 4 m. encima de la alta marea, llegando entonces este macizo a tener una importancia muy grande; un muro parapeto, que se construye igualmente con hormigón, limitándolo a la cota (+ 7.50) o (+ 8.00), ya sea simultáneamente con el macizo de coronamiento, ya sea después que éste, completa el macizo de coronamiento, impidiendo que las olas invadan la plataforma superior.

Respecto a la infraestructura de enrocados, hemos visto ya con qué criterio se determinan sus disposiciones principales: cota de la plataforma superior, ancho de las bermas y, por consiguiente, de la plataforma y taludes exterior e interior; hemos visto también que los enrocados que componen esa parte de la obra se disponen de manera que los que se encuentran más expuestos a los efectos de las olas sean suficientemente pesados para que no sean removidos. Por esa razón, las piedras que compondrán la capa superior y las que cubrirán el paramento exterior serán de peso unitario considerable, de 1,000 a 1,500 k. para arriba, con un peso medio de cerca de 3 toneladas, empleando todo el resto del material que produzca la cantera en el núcleo, con el objeto de que sea lo más compacto posible.

Al construir una obra de enrocados de esta clase, habrá que adoptar la precaución de peraltar el nivel de la plataforma de fundación del muro para tomar en cuenta los asentamientos de los enrocados y su penetración en el suelo; pero hay que tener presente que las grandes piedras que forman la parte superior dejan entre sí huecos considerables y presentan una superficie muy irregular, lo que exigirá un emparejamiento, que se hará primero con materiales más o menos grandes y sólo al fin y en la parte en que va a descansar el muro, con piedras chicas. Algunas veces,

como en el puerto de Bengasi, en el cual el rompeolas está fundado sobre un fondo rocoso, ese emparejamiento se hizo con pequeños sacos de hormigón; sin duda, el resultado de este trabajo es bueno, pero seguramente se podría haber hecho ese trabajo con piedras y su costo habría sido mucho menor.

En caso que la profundidad sea muy grande, francamente superior tal vez a 40 m., como sucede en la segunda parte del rompeolas de Valparaíso, fig. 55, se puede hacer una parte más o menos grande de la infraestructura con arena, lo que permitirá reducir considerablemente el costo; naturalmente es necesario que la arena se

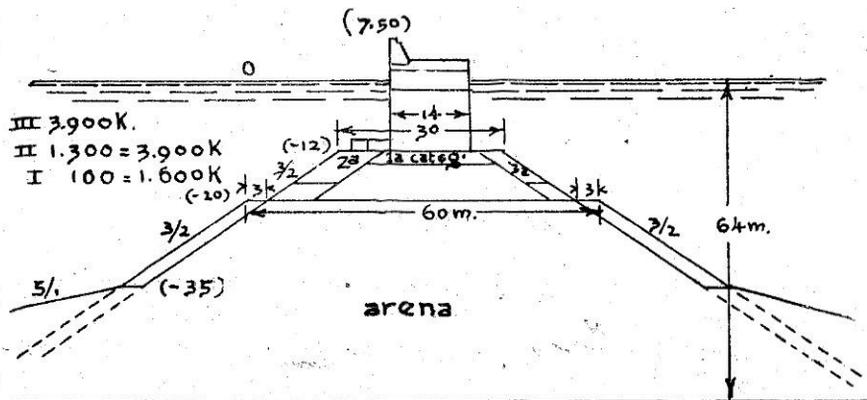


Fig. 55.

encuentre colocada de manera que no pueda ser removida por las olas, protegiéndola con piedras de tamaño suficiente y convenientemente dispuestas. En el caso citado, por ejemplo, en que la profundidad del mar en el sitio de ubicación de la obra varía entre 45 y cerca de 60 m., la base de arena se elevó prácticamente hasta la cota (-20); desde ahí para arriba hasta la cota (-12), que corresponde a la base del muro vertical, se emplearon exclusivamente los enrocados, disponiéndolos por categorías; desde la cota (-20) hasta llegar a (-35) se protegió la arena, que tiene su talud natural en reposo de 3/2, con una capa de bolones, tanto por el exterior como por el interior; en la parte inferior se depositó la arena con un talud muy tendido, de 5/1, y se la dejó sin protección.

Un punto de gran interés en la construcción de estas obras, cualquiera que sea el sistema que se emplee, es la del muro mismo, es el relativo a los asentamientos que necesariamente deben producirse en la infraestructura, ya sea a causa de la penetración de los enrocados entre sí, ya sea a la de ellos en el terreno o ya a la compresión del terreno, si es compresible; estos asentamientos se producen durante un tiempo bastante largo, pero mucho más rápidamente en los primeros meses. Al fijar un plazo para ellos conviene ser prudente y procurar que los que se produzcan después de construido el muro sean ya de poca importancia, teniendo presente que el sistema que se adopte en la construcción del muro debe prestarse a seguir sin inconveniente los que todavía tendrán que producirse bajo el efecto de la carga que representará el muro.

En el caso del segundo trozo del rompeolas de Valparaíso, que está construido

sobre un terreno fangoso, que tiene un espesor muy grande, desconocido hasta ahora, con el objeto de evitar los asentamientos desiguales, se construyó la base de arena por capas horizontales de 200 metros de largo y se elevaba el terraplén así formado hasta sobrepasar la cota teórica de (-20) , dejando asentar en seguida y sobrecargando con arena a medida que se producían los hundimientos. En esta obra se observó que, cuando la altura de la arena alcanzaba a unos 30 metros sobre el fondo primitivo, se rompía el equilibrio y se producía bruscamente un fuerte descenso de la arena, por penetración en el suelo fangoso y por deslizamiento de éste. Cuando ya se había estabilizado la base de arena, se la cubría con una capa de bolones, que llegaba hasta la profundidad de 35 metros, según hemos visto, y se procedía a la colocación de los enrocados, que se dejaban con un peralte suficiente respecto a la cota teórica de (-12 m.) . La construcción del muro de bloques se iniciaba un año después de terminada la infraestructura.

Este plazo de asentamiento debe ser determinado en cada caso, según sean las condiciones del terreno y la altura de la base de enrocados: si el terreno es poco compresible y la infraestructura no es muy alta, puede bastar con seis meses y aun menos; en cambio, si el terreno es compresible y la altura de la base es muy considerable, hay que contar con que los asentamientos serán todavía de importancia mucho tiempo después de terminada la infraestructura, porque la carga que obra sobre el suelo es relativamente importante, y no será prudente iniciar la construcción del muro antes de haber dejado pasar un año. En todo caso, la observación periódica de los asentamientos permitirá modificar los plazos en el sentido que se reconozca conveniente o necesario.

La parte más importante de la construcción de un rompeolas de muro es, sin duda alguna, el muro propiamente dicho, que representará cientos de miles de metros cúbicos de un material que será siempre costoso, cualquiera que sea el sistema que se emplee en su construcción; es por eso que me detendré particularmente en este punto. Como veremos luego, la construcción de estos muros ha evolucionado bastante en los años corridos de este siglo, en los cuales se han hecho aplicaciones muy numerosas de este tipo de obra; pero siempre habrá unos cuantos sistemas de construcción que poner enfrente unos de otros en cada caso y entre los cuales puede haber alguna incertidumbre; es entonces cuando alguna circunstancia local favorable a un sistema hará que la balanza se incline en ese sentido o cuando obrarán simplemente las consideraciones técnicas; que harán que se otorgue la preferencia al que presente mayores seguridades, ya sea durante la construcción o en la obra terminada.

Todos los sistemas empleados en la construcción de los muros, que son bastante numerosos, pueden dividirse en dos grupos, a saber: aquéllos en los cuales el muro constituye una verdadera mampostería continua, formada por elementos más o menos grandes, convenientemente dispuestos, de manera que sus juntas se crucen en todos sentidos y aquéllos en que el muro está formado por la yuxtaposición de una serie de elementos aislados, de tamaño considerable. En el primer grupo, la trabazón de los elementos que forman el muro hace que éste forme un conjunto: el macizo de coronamiento aumenta la solidaridad entre estos elementos e impide que las olas arranquen algunos de ellos, abriendo una brecha más o menos importante; en el segundo caso no hay solidaridad entre los diferentes elementos, sino cuando ha que-

dado terminada la construcción del macizo de coronamiento. Para poder hacer un estudio comparativo entre los diferentes sistemas es necesario tenerlos a la vista, y, aunque en todos los tratados de obras marítimas se encuentran descripciones de la mayor parte de ellos, voy a elegir un ejemplo característico de cada uno de ellos y a examinar después las cualidades y los inconvenientes que cada uno presenta.

Como ejemplo de muro continuo, fundado directamente sobre el suelo debo citar, desde luego, los rompeolas de Dover, que fueron los primeros que se construyeron. En la fig. 56 puede verse un corte de este muro, establecido en una región en que

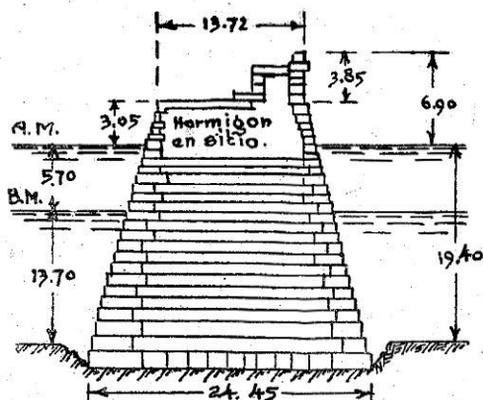


Fig. 56.

la amplitud de la marea es de 5.70 m. y la profundidad en baja marea, de 13.70 m.; dada la situación de este puerto, en el Canal de la Mancha, los rompeolas no pueden encontrarse expuestos a olas de gran violencia, entendiéndose que la altura de ellas no pasa ahí de unos 4 metros, es decir, que se trata de un mar muy moderado. Para la construcción de esta obra se principió por dragar el terreno, que es bastante firme, y en seguida se hizo un emparejamiento con campanas de bucear, después se elevó el muro, formando una mampostería con bloques naturales de piedra tallada en los paramentos y bloques artificiales, de hormigón, en el cuerpo del muro; en la parte que se construyó fuera del agua, hasta cerca de la alta marea las juntas entre los bloques se rellenaron con mortero, como en las mamposterías corrientes. Los bloques en este muro eran de dimensiones uniformes y formaban capas horizontales, cruzándose las juntas en todos sentidos. El macizo de coronamiento se hizo de hormigón con paramentos de piedra sillar y se limitó a la altura de 3.05 metros encima de la alta marea, llegando el parapeto hasta 6.90 m. Esta obra es muy robusta, probablemente más de lo que se necesitaría en el paraje en que está situada; ha resistido perfectamente hasta ahora y sin duda se puede abrigar la seguridad de que nunca dará lugar a ningún accidente. Se le ha criticado siempre su costo muy elevado, superior al triple de lo que habría sido el de un rompeolas de escollera; pero eso se debe en parte a que es más robusto que lo necesario y principalmente a que fué la primera obra de este tipo que se construyó y a que en él se emplearon bloques muy pequeños, de no más de 20 toneladas de peso.

Hicieron los ingleses varias aplicaciones de este mismo tipo de obra, con resul-

tados muy variables, entre los cuales merecen citarse los rompeolas del Tyne, en los cuales se adoptaron bloques de forma especial para oponerse al deslizamiento de una capa sobre otra; pero esos bloques eran demasiado complicados y la construcción de la obra resultó, por eso, demorosa y difícil.

Como ejemplar mucho más moderno, dentro del tipo de muro de mampostería hecho con bloques de hormigón arrimados en capas horizontales, se puede considerar el antemural de Nápoles, fig. 57, obra construída en una profundidad considerable, del orden de 30 metros, sobre una infraestructura de enrocados de mucha importancia. En este rompeolas el muro está fundado a la cota (-9.50 m.), pero su altura vertical libre es sólo de 7.50 m., pues la berma exterior de la plataforma de asiento está cubierta con enrocados, limitados a la cota (-7.50 m.). El muro está formado por cinco capas de bloques, que fueron colocadas con muchas precauciones para reducir la importancia y la irregularidad de los asientos; el macizo de corona-

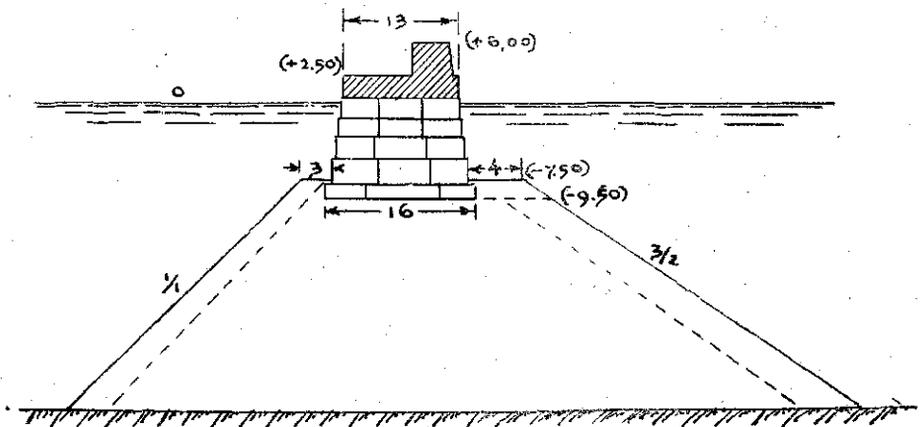


Fig. 57

miento, de hormigón en sitio, está limitado a la cota (+2.50 m.); el muro parapeto alcanza a la cota (+6.00). La infraestructura está limitada superiormente a la cota de fundación del muro (-7.50 m.), formando una plataforma de 27.70 m. de ancho, de los cuales 16 m. corresponden al espesor del muro en su base, 6 m., a la berma exterior y cerca de 5 m. a la interior, ambas protegidas por una capa de enrocados que se eleva hasta el nivel superior de la primera capa de bloques. Los bloques de las capas superiores fueron trabados con barras de hierro, dobladas en forma de grampas, para impedir que por efecto de los asentamientos se dislocaran esas capas y para proteger los bloques durante el plazo de asentamiento que debía mediar entre la terminación del muro y la construcción del macizo de coronamiento. El resultado de esta obra ha sido muy satisfactorio; pero conviene no olvidar que el efecto del oleaje sobre ella es muy atenuado por la oblicuidad con que la ataca.

En el rompeolas de Antofagasta se adoptó este mismo tipo de construcción, fig. 45, limitando la plataforma superior de la infraestructura de enrocados a la cota (-9.40 mts.). En esta obra se reemplazó el hormigón en sitio del coronamiento y del parapeto por bloques de hormigón, formando mampostería; este reemplazo se debió a consideraciones derivadas de la facilidad de construcción, basadas en que, para que

el titán que iba a emplearse para colocar los bloques artificiales pudiera circular sobre la plataforma superior del muro de bloques, ésta no podía estar a un nivel inferior a (+ 3.50 mts.) y que el parapeto tenía que construirse al mismo tiempo que esa plataforma para que el oleaje no la cubriera constantemente; esta modificación, que hasta cierto punto era indispensable, trajo consigo el inconveniente de la falta de solidaridad entre los bloques de las capas superiores y del parapeto, los que quedaban expuestos a ser removidos individualmente; además por efecto de los movimientos del muro, debidos a los asentamientos y a la oscilación producida por las olas, tiende a desorganizarse el arrimo de esos bloques. En ese sentido es indispensable un macizo monolítico de hormigón colocado en sitio, por lo menos como el que se adoptó en la reconstrucción de la parte de este rompeolas que fué destruída, figs. 46 y 47. Durante la construcción de este muro se reconoció la necesidad de disponer salientes en los bloques para oponerse al deslizamiento de una capa sobre otra. Como puede verse en las figs. 45 y 47, salvo entre los de las capas inferiores; esos salientes han demostrado ser eficaces pero habría sido preferible que se encontraran en los bloques del lado exterior del muro para que así se interesaran todos ellos en la

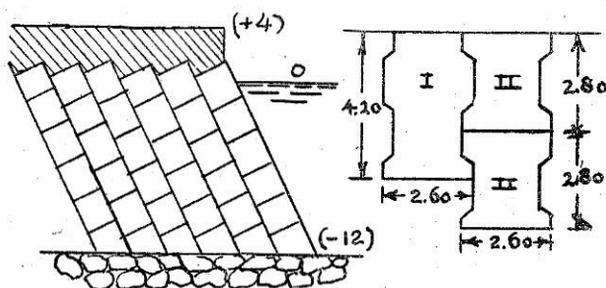


Fig. 58.

resistencia al deslizamiento; por otra parte sería mejor que no formaran ángulos rectos sino obtusos, que no están expuestos a originar grietas o quebraduras. Este rompeolas sufrió perjuicios de mucha consideración, que obligaron a reconstruirlo, como ya he dicho; pero la causa principal de esos perjuicios fué la diferencia enorme entre las condiciones que se habían atribuído al mar y las verdaderas.

La segunda manera de realizar la construcción de los muros continuos, hechos con mampostería de bloques de hormigón, consiste en disponer los bloques, formando capas inclinadas, disposición que ha sido usada desde años atrás, con resultados muy variados, ajenos muchas veces a la construcción del muro mismo. El muro de la parte principal del rompeolas de Valparaíso, ya citada, a la que se refiere la fig. 55, se construyó según este sistema, principalmente en vista de que se presta muy bien a seguir sin dislocación los asentamientos irregulares, que eran de temerse, en vista de la naturaleza fangosa del suelo. La infraestructura de esta obra hecha con arena y enrocados, como vimos más atrás, está limitada a la cota (— 12 mts.) por una plataforma de 30 metros de ancho, de los cuales 14 mts. corresponden al espesor del muro, 10 mts. a la berma exterior y 6 mts. a la interior; el muro se hizo con bloques de hasta 60 toneladas de peso, dispuestos en capas inclinadas de cerca de 70° con la horizontal: ver en la figura 58 la elevación del muro y

el detalle de la forma de los bloques, que están provistos de entrantes y salientes destinados a evitar el deslizamiento transversal de una capa sobre otra. Este muro se construyó con un derrick que circulaba sobre rieles colocados sobre los bloques de los dos paramentos, que se elevaban hasta la cota (+ 2.90 mts.), los del cuerpo del muro llegaban sólo hasta la cota (+ 1.20 mt.), tomando como cero el nivel medio del mar; el macizo de coronamiento llega hasta la cota (+ 4 mts.) y constituye una trabazón eficaz entre todos los bloques superiores.

Un detalle de importancia en este tipo de construcción es el que se refiere a la manera de oponerse al deslizamiento de una capa de bloques respecto a las vecinas. En las primeras aplicaciones los bloques tenían entrantes y salientes que formaban ranuras y lengüetas de perfil rectangular en las caras inclinadas; esta disposición presentó el inconveniente de que en los ángulos entrantes se producían grietas, a consecuencia de las cuales se rompían los salientes que formaban lengüetas; posteriormente se dejaron caladuras de sección semicircular en las caras de todos los bloques, que correspondían, dejando verdaderos pozos de sección circular, que se

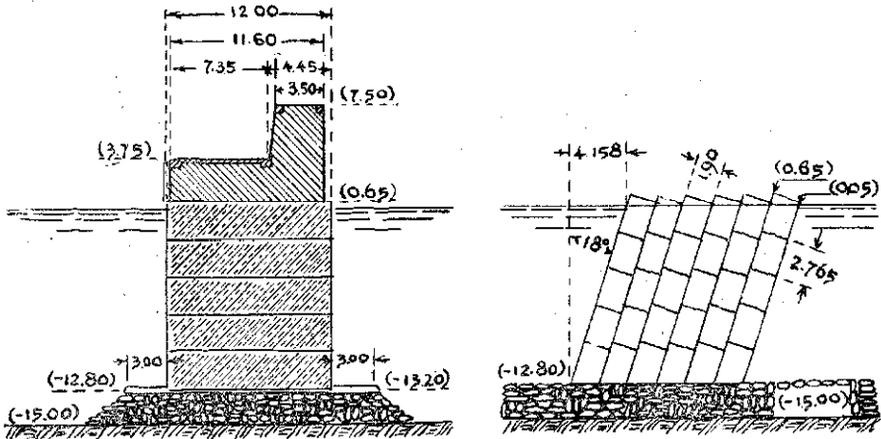


Fig. 59

rellenaban con sacos llenos de concreto, que formaban chavetas. En Valparaíso se adoptó la disposición que ve en la parte de la fig. 57 que reproduce la forma de los bloques perpendicularmente a las juntas inclinadas, y que consiste en entrantes y salientes de sección trapezoidal, que forman ranuras y lengüetas muy robustas y con ángulos obtusos, que no provocan la formación de grietas ni la quebradura de los salientes. Una disposición análoga se adoptó después en el rompeolas de Iquique, construido según este mismo tipo, con el mismo buen resultado de Valparaíso.

El extremo de estos muros es un punto que necesita algunas disposiciones especiales para evitar que la última capa de bloques sea removida por las olas. En varias ocasiones se ha terminado la obra con un monolito de paredes verticales, rellenando el espacio triangular que queda entre él y la última capa inclinada con una serie de bloques artificiales dispuestos en capas horizontales. Esta disposición no deja de presentar dificultades e inconvenientes. En Valparaíso era necesario dejar en capas inclinadas el extremo de la obra, pensando en que la longitud

que tiene es un mínimo y que pronto será necesario prolongarlo; con ese objeto se dejaron los bloques de la última capa inclinada con su forma ordinaria y se englobaron en los de la parte superior gruesos hierros redondos, que servían de articulación a una serie de vigas que une los bloques de dos en dos, dejándolos libres de moverse, pero impidiendo que las capas se separen. Esta obra está terminada desde hace seis años y ha soportado una serie de tempestades sin ningún inconveniente, entre ellas una, en 1936, que ha sido de las más violentas conocidas en el puerto.

Los ingenieros italianos han construídos en estos últimos años en el puerto de Benghasi un rompeolas de 1000 metros de largo, fig. 59, en profundidades de 13 a 14 metros. En este caso el terreno es rocoso y antes de fundar el muro se le limpiaba por medio de una draga de succión; después se colocaba una base hecha con sacos de hormigón plástico que alcanzaban a la cota (-12.80 mts.) a la cual corresponde la base del muro. Este muro, que sobresale ligeramente del nivel del mar, prácticamente invariable en el Mediterráneo, se construyó con bloques de hormigón de 130 toneladas de peso, que tienen 12 metros de largo, o sea el espesor total del muro, por 2.76 mts. de ancho y 1.90 mt. de alto, dispuestos en capas inclinadas. El macizo de coronamiento está limitado a la cota ($+3.75$ mts.) y el muro parapeto a la de ($+7.50$ mts.). La resistencia contra el deslizamiento transversal se ha obtenido por medio de ranuras en las que se colocaban sacos de hormigón o piezas de hormigón armado, formando chavetas. Esta obra es muy robusta y ha resistido sin inconveniente a la acción de tempestades extraordinariamente violentas en 1933 y 34.

Se han construído, principalmente en Inglaterra varios rompeolas por medio de muros monolíticos de hormigón sumergido, fundados directamente sobre el fondo insocavable. Este sistema exige la construcción de obras provisórias de mucha importancia para afirmar los moldes y presenta todos los inconvenientes reconocidos en el hormigón empleado bajo agua, los que han aconsejado preferirles las obras hechas con bloques ya endurecidos.

Otras veces se ha construído una obra mixta, en la cual la parte inferior se ha hecho con sacos de hormigón plástico, que llegan hasta sobresalir de la baja marea y la parte superior, con un macizo de hormigón colocado en seco. Este sistema exige que la amplitud de la marea sea considerable para que se pueda sobresalir de la baja marea en una altura suficiente, pues la colocación de los grandes sacos de hormigón se hace por medio de barcos abiertos en el fondo.

La segunda solución general de este problema consiste en la construcción de grandes monolitos independientes, yuxtapuestos y reunidos posteriormente por el macizo de coronamiento, que los hace solidarios, al cual se agrega el muro parapeto, hecho también de hormigón en sitio. El conjunto de estos monolitos forma un muro, que se fundará directamente sobre el suelo natural, en caso que sea insocavable, o sobre una infraestructura de enrocados, en caso contrario o cuando la profundidad sea demasiado grande para que resultara económica la fundación directa. La principal diferencia entre las distintas aplicaciones de este tipo de obra se encuentra en la manera cómo se construyen los monolitos elementales, que pueden ser verdaderos monolitos, constituídos por cajones metálicos o de hormigón armado, que se llevan flotando y se encallan en el punto que les corresponde, rellenándolos con hor-

migón u otro material, o bien pilas formadas por bloques superpuestos, que se hacen o no solidarios entre sí, según los casos.

Los molos del puerto de Dieppe, de los cuales la fig. 13 representa el del lado noroeste en su parte terminal, presentan un ejemplo de muro formado por medio de cajones monolíticos aislados. Esos cajones son de hormigón armado y tienen 20 metros de largo y 8 o 13 metros de ancho, que corresponden al espesor del muro en su base; fueron fundados directamente sobre el suelo natural por aire comprimido y limitados en su parte superior a la cota (+3.00); desde ese nivel hacia arriba, en una altura de 9.50 m., se ha construido el macizo continuo de coronamiento, que por tratarse de un puerto sometido a mareas de una gran amplitud, tiene una importancia extraordinaria; además tiene un muro parapeto, que llega a la cota (+13.85) y que en el extremo de la obra, a que se refiere la figura, se ha colocado también por el interior. En esta obra, a causa de la amplitud extraordinaria de la marea, el macizo de coronamiento tiene, como he indicado, una importancia extraordinaria, de manera que los cajones fundados por aire comprimido constituyen en rea-

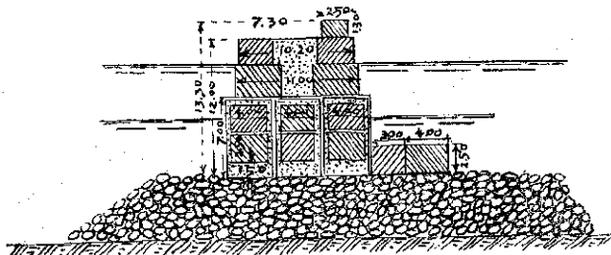


Fig. 60

lidad prácticamente las fundaciones del muro continuo de mampostería y hormigón hecho al aire libre y en seco.

Una solución más común del problema de la construcción de muros formados por macizos yuxtapuestos es la que consiste en construir grandes cajones, metálicos o de hormigón armado, que se llevan flotando hasta el sitio de su ubicación, en el cual se encallan, sobrecargándolos, y que se rellenan después con hormigón o con piedras y arena. Las aplicaciones de esta clase de obra son numerosas y algunas de entre ellas son muy conocidas, como las de Bilbao, Bicerta y Zeebrugges por figurar en todos los tratados de obras marítimas, lo que me dispensa de entrar en detalles acerca de ellas, limitándome a recordar el sistema general de construcción de cada uno de esos casos.

En la desembocadura del Nervión se construyeron las obras de abrigo que forman la rada del puerto de Bilbao en un paraje sujeto a tempestades muy violentas. Un primer molo, que estaba formado por un muro fundado al nivel de la baja marea sobre una infraestructura de enrocados y bloques artificiales, fué destruído por el mar y se construyó un segundo rompeolas, detrás de las ruinas del anterior que le sirven en parte de protección; la fig. 60 representa la parte que se refiere a la obra nueva, que se encuentra a 35 metros de distancia hacia atrás del muro destruído, en profundidades del orden de 14 metros en baja marea y se compone de un muro, fundado a la cota (-5.00) en baja marea, sobre la plataforma de la antigua infra-

estructura, convenientemente ensanchada. El muro se formó con una serie de cajones metálicos de 13 metros de largo, que corresponden al espesor del muro, por 7 m. de ancho, que quedan en el sentido longitudinal, del rompeolas, y 7 m. de altura de manera que los cajones sobresalen del nivel del mar en baja marea; la alta marea los cubre, porque la amplitud de ella alcanza a 4.50 metros. Estos cajones se llevaron flotando y se lastraron con una capa de hormigón de 1.50 m. de espesor; una vez en su sitio se les encallaba, llenándolos con agua, después se colocó en su interior una serie de pilas de bloques de hormigón, separadas entre sí y de las paredes del cajón, y se extrajo el agua para colocar en seco el hormigón necesario para rellenar los huecos correspondientes. El macizo de coronamiento, que tiene 5 metros de altura, se formó con dos capas de bloques artificiales y un relleno de hormigón, colocado en sitio entre ellas. El parapeto se formó con bloques artificiales y el pie del muro se protegió con una capa de bloques pesados. Esta obra, que fué construída hace muchos años, ha resistido en buena forma, a pesar de que el muro ha sido fundado a muy poca profundidad, porque las olas revientan en las ruinas del molo anterior y pierden ahí una gran parte de su energía.

El rompeolas de Zeebruges sué construído, formando el muro con cajones de

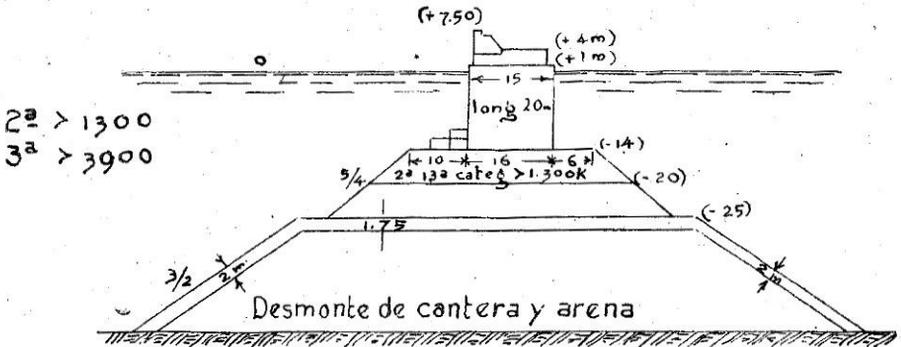


Fig. 61

metal, de 25 metros de largo por 9 m. de espesor y 9 m. de altura, rellenos parcialmente de hormigón, que se llevaron flotando y se encallaron sobre una base de piedras, llenándolos de agua. Esos cajones se rellenaban después con hormigón, colocado bajo agua; encima de ellos se formaba un muro continuo con bloques artificiales y se terminaba con hormigón en sitio. Esta obra se construyó en una región de profundidades reducidas y desde el principio se notó la producción de socavaciones de mucha importancia delante de ella, por efecto de las cuales fué necesario emplear una cantidad enorme de faginas y piedras en la infraestructura para compensar las socavaciones producidas y evitar la formación de nuevas.

Posteriormente se han hecho muchas aplicaciones de este sistema de construcción, en las cuales los cajones han llegado a tener dimensiones considerables, con algunos miles de toneladas de peso, una vez rellenos. Como ejemplo de una obra más moderna de este tipo, construída más de acuerdo con las ideas actuales sobre la materia, se puede citar la parte principal del primer trozo del rompeolas de Valparaíso, que principia en el punto en que la profundidad es de 18 metros y termina en la de 45 m. Esta obra se compone, fig. 61, de una infraestructura de enrocados, li-

mitada a la cota (-14 m.), referida al nivel medio del mar, con un ancho de 34 m. de los cuales 16 corresponden al espesor del muro, 10 m. a la berma exterior y 6 m. a la interior. El muro se construyó por medio de cajones monolíticos de hormigón

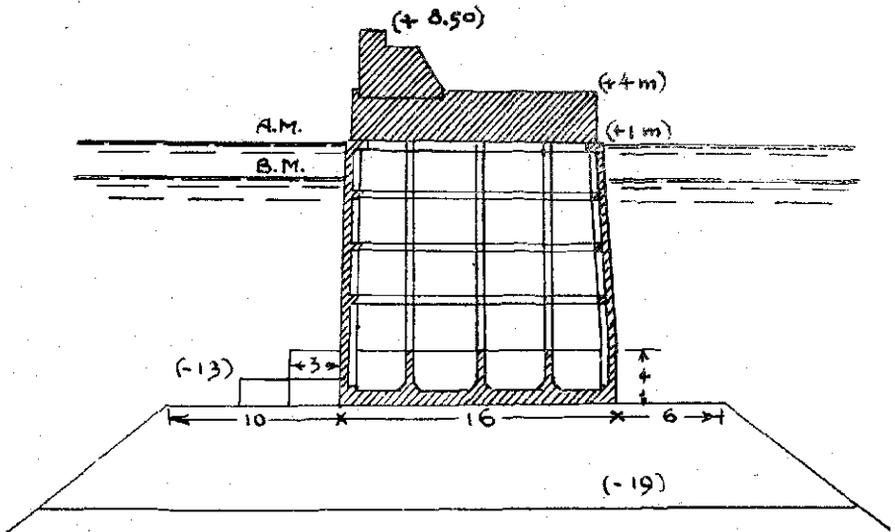


Fig. 62

armado de 20 m, de largo, 16 m. de ancho en la base y 15 m. de altura, de manera que llegan sensiblemente al nivel de las más altas mareas; estos cajones están

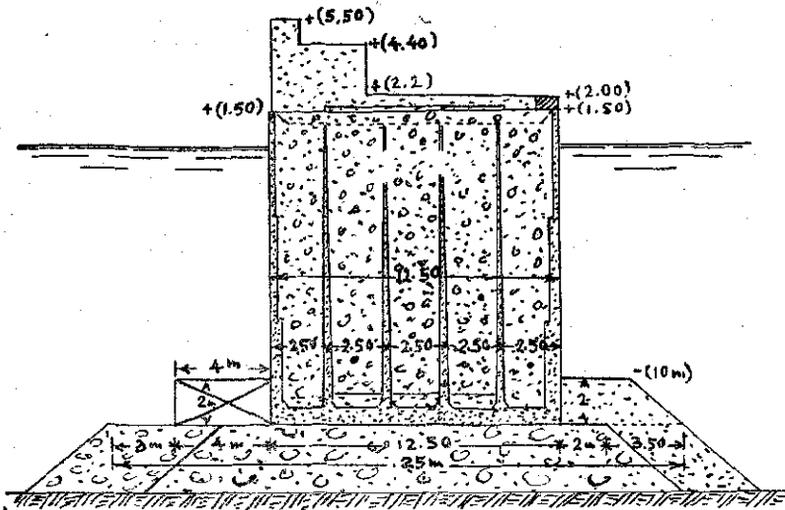


Fig. 63

formados por paredes relativamente delgadas, reforzadas con nervios horizontales y verticales, fig. 62, una serie de tabiques de hormigón armado, reforzados por puntales horizontales del mismo material en el sentido longitudinal del cajón, los dividen

en secciones independientes, que se rellenaron con hormigón colocado en seco, después de haber encallado los cajones en su sitio. Un año después de terminado el relleno se inició la construcción del macizo de coronamiento y posteriormente la del muro parapeto. Esta parte del rompeolas se encuentra terminada desde hace catorce años y se ha manifestado perfectamente resistente, a pesar de que ha estado sometida a temporales de extraordinaria violencia,

Para la transformación del puerto de Marsella se ha adoptado en el dique de La Joliette un tipo de obra de esta misma clase, fig. 63, en el cual la construcción del cajón es diferente: en lugar de emplear paredes delgadas, de espesor uniforme, reforzadas con nervios, como en Valparaíso, las paredes son más gruesas y de espesor variable, según sean las presiones a que están sometidas. Esta disposición presenta la ventaja de que la construcción de los moldes es mucho más sencilla y, por consiguiente, más económica y más rápida.

El empleo de grandes cajones monolíticos para formar los elementos de un muro rompeolas presenta muchas veces dificultades de construcción insuperables, derivados ya sea de la falta de elementos para construir y lanzar al agua los cajones, ya sea de la falta de tranquilidad en el mar, necesaria para encallar y rellenar esos cajones. Esas razones indujeron a los ingenieros italianos a formar monolitos con pilas formadas por elementos superpuestos. La manera de realizar esta idea ha experimentado una serie de modificaciones, hasta llegar a los grandes bloques ciclópeos de Génova, Catania y Argel. Examinaremos las diferentes soluciones.

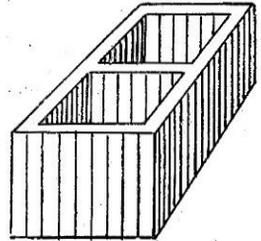


fig. 64

Al construir el rompeolas *dei Granili*, en Nápoles, mucho más expuesto al ataque de las olas que el *antemurale*, de que ya nos hemos ocupado, no se adoptó el mismo sistema de construcción para el muro y se acordó recurrir a formar pilas verticales independientes, hechas con la superposición de bloques celulares, cuya forma se indica en la fig. 64; las células de esos bloques, superpuestas forman pozos de toda la altura del muro, que se rellenan con hormigón, colocado bajo agua y forman

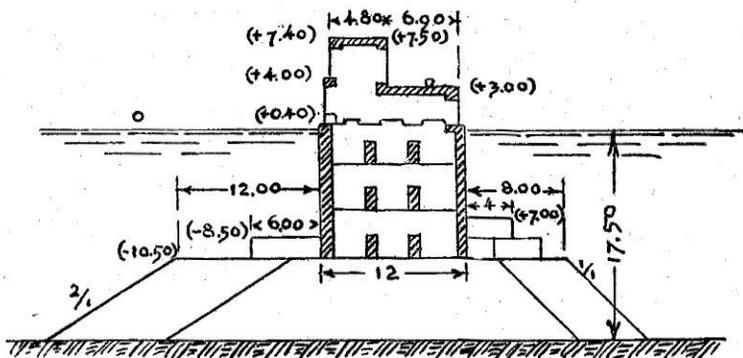


fig. 65.

un verdadero monolito. En el puerto de Génova, en el molo Príncipe Humberto, que se encuentra en la prolongación del molo Galliera, hacia el poniente, se adoptó un sistema de construcción derivado del ensayo hecho en Nápoles. La fig. 65 repre-

senta un perfil de ese rompeolas, cuya silueta ya conocíamos por la fig. 20; se compone de una infraestructura de enrocados, limitada a la cota de profundidad (-10.50 m.) por una plataforma horizontal, que sirve de asiento al muro vertical; éste tiene 12 m. de espesor y está constituido por pilas verticales, formadas por tres bloques celulares superpuestos, que se elevan hasta la cota ($+ 0.40$ m.). Los bloques tienen 12 metros de largo, que corresponde al espesor del muro, 6 m. de ancho, que quedan en el sentido longitudinal del rompeolas y que indican el largo de las pilas, y 3.60 m. de altura; el espesor de las paredes de estos bloques es de 0.75 m., así como el de dos tabiques transversales que los dividen en tres células; estos tabiques son un poco más bajos que las paredes del bloque, para que el relleno de hormigón sea más continuo. Estos bloques celulares pesan 220 toneladas y se les colocaba en su sitio por medio de un aparato flotante; los grandes pozos formados por la superposición de las células, que tienen $10,8 \times 4,5 \times 3$ m. representan unos 450

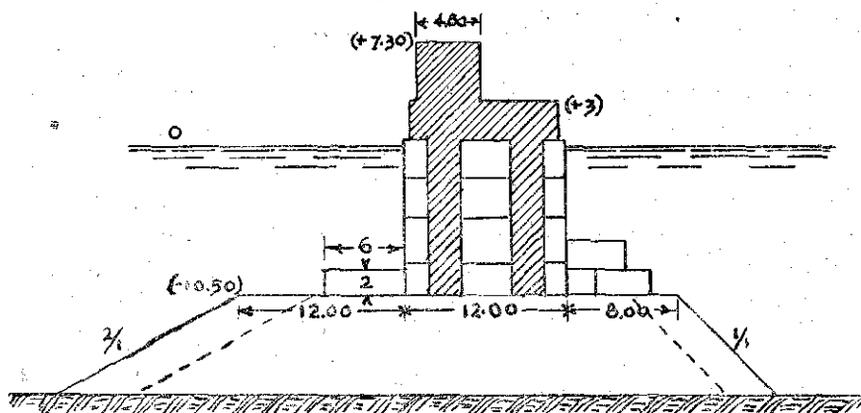


Fig. 66.

metros cúbicos de hormigón, que debe colocarse en un día y que exige una faena de fabricación y colocación de hormigón muy poderosa y muy bien organizada; el macizo de coronamiento está limitado a la cota ($+ 3$ m.) y el muro parapeto a la de ($+ 7.40$ m.).

La berma exterior tiene 12 m. de ancho, de los cuales 6 m. corresponden al largo del bloque de defensa del pie del muro; la berma interior tiene 8 m. de ancho y está protegida por tres bloques artificiales, puestos en dos capas. Este tipo de obra ha dado buenos resultados, una vez terminado, salvo pequeños movimientos de los bloques de guarda, pero en la construcción presertó una serie de inconvenientes de que nos ocuparemos más adelante y que aconsejaron a sus autores modificarlo.

La fig. 66 reproduce la modificación adoptada, que consistió en disminuir el tamaño de las células, de manera que los bloques fueran más pesados relativamente a su superficie expuesta a la acción de las olas durante la construcción; para que los bloques pudieran ser manejados con los aparatos de que se disponía, sin disminuir su largo, que tenía que ser siempre igual al espesor del muro, fué necesario reducir la altura de ellos, poniendo cuatro en lugar de tres en cada pila, y disminuir también su ancho, es decir, el largo de las pilas, bajándolo de 6 m. a 4 m.; en lugar

de las grandes células de los anteriores, estos bloques tenían dos huecos circulares, de 2 m. de diámetro, que formaban pozos de 10.80 m. de profundidad y que se rellenaron de hormigón. Las demás disposiciones de la obra no fueron modificadas. El resultado de este segundo tipo fué superior al del anterior, desde el punto de vista de la colocación del hormigón, que ahora no representaba sino 72 metros cúbicos por pila; pero se observaron varias quebraduras de bloques en la sección debilitada por los pozos circulares, después de hecho el relleno de hormigón.

En el puerto de Bari, en un paraje mucho menos expuesto, se construyó un muro de 10 metros de espesor, fundado a 10.30 m. de profundidad con pilas de bloques de 10 m. de largo (espesor del muro), por 3 m. de ancho (largo de las pilas) y 3.60 m. de altura; estos bloques tienen dos pozos cuadrados de 1.80 m. de lado y pesan 350 toneladas.

En vista de los inconvenientes observados en las dos soluciones adoptadas en Génova en el molo Príncipe Humberto, se modificó nuevamente el tipo de esa obra, como lo indica la fig. 67. En primer lugar se limitó la infraestructura a la cota (-11.50), aumentando en 1 m. la profundidad de fundación del muro, sin duda para evitar el desplazamiento de los bloques de defensa; el espesor del muro en la base se aumentó a 13.50 m.; el largo de los bloques de defensa se redujo a 5 m., y la berma exterior, que se disminuyó en 1 m., se cubrió con enrocados en la parte no ocupada por los bloques, para evitar que ellos fueran removidos; la berma interior se redujo a 6.25 m. y se la protegió con enrocados en lugar de hacerlo con bloques artificiales.

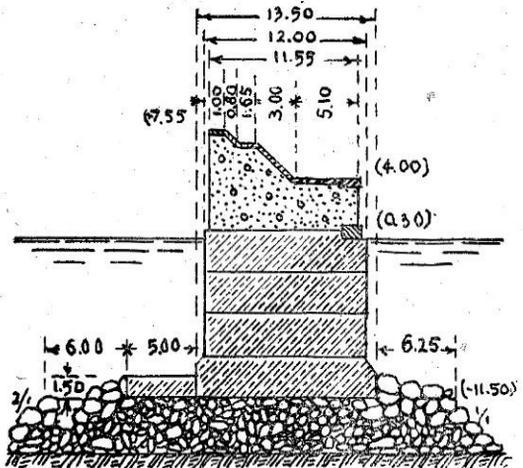


Fig. 67.

Las dimensiones de los bloques en los cuales no se dejaron más huecos que los indispensables para los hierros de colocación en obra, quedaron como sigue: los de base tienen 13.50 m. de largo por 4.50 m. de ancho (largo de las pilas) y 2.95 m. de alto; los otros tienen 12 m. de largo, y las otras dos dimensiones iguales a las del anterior. El macizo de coronamiento y el parapeto fueron modificados en su paramento exterior, de manera que forma casi un plano vertical con el paramento del muro, con el objeto de no perturbar la reflexión de las olas; además el macizo de coronamiento se elevó hasta la cota (+ 4.00) y se cambió la forma del parapeto. El resultado de la obra así modificada ha sido bastante satisfactorio en general; sin embargo, la berma exterior y el talud de la infraestructura de enrocados no tienen todavía la estabilidad necesaria. Para mejorar sus condiciones se va a ensanchar hasta 10 m. la parte de la berma exterior que queda libre de los bloques de guarda y el talud exterior se va a dejar en 3/1 en lugar de 2/1; el objeto de esta nueva modificación es proteger el fondo al pie de la infraestructura contra la violenta resaca

producida por la reflexión de las olas. Esta precaución es buena, sin duda, pero es probable que no sea suficiente, porque con olas de 5 m. de altura y 150 m. de largo, que no son improbables en Génova, la velocidad al pie del talud será del orden de 3 m., capaz de remover la arena y provocar el hundimiento de los enrocados; en todo caso, la deformación del talud y de la berma sólo podría llegar a ofrecer peligro al cabo de mucho tiempo.

Para la prolongación del abrigo de Catania se proyectó un rompeolas de muro vertical del tipo que nos ocupa, en que las pilas verticales estarían formadas por cuatro grandes bloques superpuestos, con huecos que dejaban pozos verticales, que se rellenarían con hormigón, realizando un perfil propuesto por los ingenieros señores Albertazzi y Coen-Cagli, parecido al que indica la figura 66, pero más robusto y en el cual la base del muro estaba a mayor profundidad, en vista de que iba a encontrarse expuesto a un mar más violento. La empresa que llevó a cabo la obra,

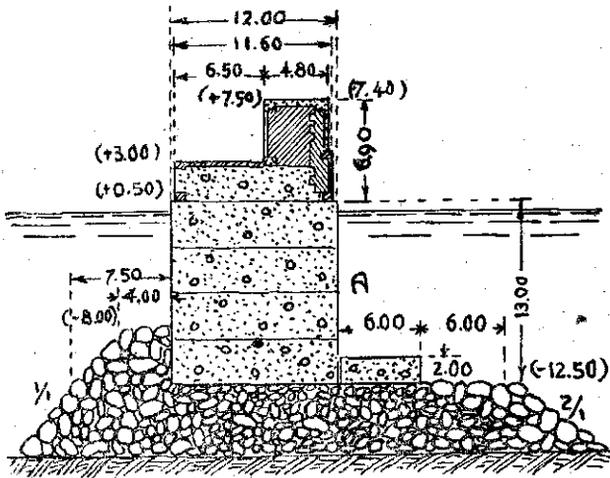


Fig. 68

propuso suprimir los huecos de los bloques, dejando el perfil como indica la figura 68; el perfil así modificado, en lo que se refiere al muro de bloques, es enteramente análogo al último tipo de Génova; difiere de él en el macizo de coronamiento, que es más bajo, en el muro parapeto y en la defensa de las bermas de la infraestructura. Los bloques artificiales macizos, que se designaron con el nombre de *ciclópeos*, tienen 12 metros de largo, cuatro metros de ancho, que determinan el largo de las pilas, y 3.25 metros de altura; su peso es de 320 a 330 toneladas. La resistencia al deslizamiento transversal de unos bloques sobre otros se debe únicamente al frotamiento, sin la intervención de salientes ni pozos rellenos de hormigón.

Para los rompeolas del nuevo puerto Mirabeau, en Marsella, se ha ejecutado un muro formado por pilas de grandes bloques superpuestos, fig. 69. Estas obras se encuentran en un paraje no muy expuesto, porque las características de las olas que se han tomado en consideración son 4 metros de altura y 60 metros de largo, menores que las de otros puertos en el Mediterráneo; la cota de la fundación del muro se fijó en (-12.00 m.), que corresponde a la plataforma superior de la infraestructura de enrocados, que tienen 29 metros de ancho, de los cuales 11 metros son del muro

un tipo bastante parecido al del molo Mustafá de Argel, que ya hemos visto en la fig. 37. En este último, los bloques que forman las pilas son cuatro y tienen un largo de 11 metros o 13 metros, ancho de 4.00 metros y alto de 4.00 metros, con pesos unitarios de 400 a 450 toneladas. La resistencia contra el deslizamiento transversal entre las capas horizontales de los bloques se obtuvo, prolongando los huecos necesarios para la colocación de los hierros de suspensión, de manera que formen pozos angostos, que se rellenaron de hormigón después de haber introducido en ellos barras de hierro, ya fueran rieles viejos, ya barras redondas de 50 a 60 mm. de diámetro, formando así verdaderas chavetas de hormigón armado; estos pozos eran cuatro en cada bloque y tenían 1.50 metros en el sentido longitudinal de los bloques y 0.65 metros de ancho medio, eran suficientemente grandes para poder obtener una buena construcción, pero no alcanzan a debilitar los bloques. La resistencia contra el deslizamiento en las caras verticales de separación de dos pilas se obtuvo con caladuras en forma de ranuras y lengüetas trapeziales, de 4.00 y 2.80 metros de ancho y 0.30 metros de saliente. Esta parte del molo Mustafá fué destruída, según hemos visto; pero parece que el resultado de las disposiciones adoptadas en la construcción eran perfectamente satisfactorias, pues la obra pereció por socavación del fondo y los bloques que formaban las pilas verticales permanecían en partes solidarios después del volcamiento de ellas hacia adelante.

Las principales diferencias entre las líneas generales de ambas obras se encuentran en que en Marsella la profundidad natural es mucho mayor (35 m. en lugar de 20 m.), el terreno es de mejor calidad y la base de fundación del muro sobre la infraestructura se encuentra a la cota (-11.50), en lugar de (-15.00) que tiene en Argel. Por lo que se refiere a las pilas verticales, están formadas por tres grandes bloques, análogos a los de Argel, de 12.50 m. \times 4.00 m. \times 4.20 m. y de 11.00 m. \times 4.65 m. \times 4.20 m. de unas 500 toneladas de peso unitario; estos bloques se hacen solidarios por medio de cuatro chimeneas verticales, que se rellenan posteriormente con hormigón, en el cual se han incorporado barras de hierro, como en Argel; la resistencia transversal en las caras verticales se asegura también por medio de ranuras y lengüetas trapeziales. El resultado de esta obra ha sido perfectamente satisfactorio.

La reseña de las distintas soluciones que se han adoptado en la construcción de los muros que forman la parte principal de los rompeolas verticales, indica, como decía al principio, que esas soluciones son numerosas; pero es fácil ver que, en realidad, se las puede clasificar en dos grupos. Cada una de ellas ha obedecido a consideraciones particulares, ajenas muchas veces a las cualidades técnicas de la obra misma, como, por ejemplo, la necesidad de ejecutar la obra con un material determinado, que permite reducir mucho los gastos de instalación, de manera que no parece posible recomendar de una manera absoluta una solución de preferencia a las otras; pero como cada sistema presenta ventajas e inconvenientes, que le son propios, conviene insistir en las unas y en los otros para ayudar en la elección en un caso determinado. Pero antes de entrar en este estudio, creo necesario hacer algunas consideraciones sobre el macizo de coronamiento y el parapeto, que son independientes del sistema de construcción empleado en el muro.

El macizo de coronamiento desempeña un papel muy importante en los rompeolas verticales, porque establece una solidaridad perfecta entre los elementos que constituyen el muro, impidiendo que sean removidos individualmente por las olas;

además agrega un peso considerable, que mejora las condiciones de estabilidad y permite elevar el muro parapeto, asegurando su resistencia contra el deslizamiento, que es, por lo general, la más precaria. Para que el macizo no esté expuesto a quebrarse por efecto de los esfuerzos de flexión que pueden resultar del asentamiento de la obra después de su construcción, es necesario que su espesor sea proporcionado al ancho del muro; pero las necesidades de la construcción de éste pueden hacer que a veces sea difícil asignar al macizo de coronamiento un espesor suficiente, sin llegar a una cota muy alta para la plataforma que lo limita superiormente, haciéndose necesario aceptar un espesor menor que lo que habría sido de desear, como ha sucedido en el caso de la reconstrucción del molo de Antofagasta, aun a riesgo de que se produzcan quebraduras en el macizo.

Respecto a la construcción del macizo superior y del parapeto, se la hace siempre con hormigón y conviene formar trozos lo más grandes que prácticamente sea posible; sin embargo, no es prudente que el largo de esos trozos sea exagerado, porque la contracción del hormigón al endurecer provoca la quebradura del hormigón, lo que si bien es cierto que no tiene ninguna importancia desde el punto de vista de la resistencia, presenta el inconveniente de un aspecto de debilidad. En ese sentido parece conveniente no hacer trozos más largos que unos 30 ó 40 metros, por lo demás ese largo quedará a veces subordinado a las dimensiones de los elementos que forman el muro, especialmente en caso de cajones monolíticos. La separación entre un trozo y otro debe ser pequeña, unos pocos centímetros; pero no conviene exagerar en ese sentido para evitar que se quiebren las aristas superiores por efecto de los asentamientos. En algunas ocasiones se ha considerado conveniente unir por medio de barras de acero los diferentes trozos que forman el macizo de coronamiento; yo creo que esa precaución está de más, porque no es bueno oponerse a que esos trozos sigan el asentamiento del muro, porque las barras de acero difícilmente serían suficientemente resistentes para obtener ese resultado y, finalmente, porque al cabo de poco tiempo la oxidación habrá dado cuenta de ellas.

El parapeto se hace a veces al mismo tiempo que el coronamiento, y otras veces después que él; la manera de proceder depende de las circunstancias y parece que no hay razones especiales que aconsejen proceder en una u otra forma. Algunas veces se ha atribuído gran importancia a la falta de parapeto, estimando que de ella pueden resultar efectos dinámicos y aumento de presiones, peligrosos para la conservación de la obra. En algunas obras en construcción es probable que haya hecho falta el parapeto, pero sin duda no tanto como el macizo de coronamiento. El estudio del señor Miche, al cual hice referencia en el capítulo I, en que asimila un rompeolas de muro que sobresale muy poco del agua a un muro con paramento a 45°, lo condujo a admitir la existencia de presiones dinámicas, que pueden ser considerables y comprometer la estabilidad del muro; pero creo que esa solicitación, que puede ser aceptable en caso de un muro que apenas sobresale del agua, sería exagerado para un muro cuyo macizo de coronamiento llega hasta unos 4 metros sobre el nivel del mar. La falta de parapeto solo no me parece peligrosa. A este respecto conviene notar que en el rompeolas de Valparaíso, fig. 55, se dejó sin parapeto toda la parte extrema, en una longitud de más de 200 metros y hasta ahora no se ha notado ningún efecto perjudicial, a pesar de que esta obra ha soportado tempestades muy violentas, en algunas de las cuales las olas han sobrepasado el parapeto, co-

no sucedió particularmente en el temporal de 1936, uno de los más fuertes que se han registrado.

Al estudiar comparativamente los diferentes sistemas de construcción empleados en los muros propiamente dichos, vamos a recordar las cualidades características de cada uno de ellos y a señalar los principales inconvenientes que presenta su aplicación, siendo de notar que muchas veces durante la construcción o el período de asentamiento algunos de ellos pueden estar expuestos a accidentes que no son posibles después de construído el macizo de coronamiento.

Desde luego, considerando esta cuestión desde un punto de vista general, parece que los muros sin solución de continuidad debieran ofrecer mayores garantías de buen resultado, precisamente porque no hay separación apreciable entre los elementos que los componen. Vamos a examinar un poco despacio las dos maneras de construirlos, empleando los bloques artificiales colocados en capas horizontales o bien en capas inclinadas; dejo a un lado los macizos continuos hechos con hormigón colocado bajo agua, que ya no se emplean, por las razones que indiqué antes.

Los muros hechos con bloques en capas horizontales deben cumplir con todas las condiciones de una buena mampostería en seco, es decir, de los elementos que la componen deben estar bien trabados en todos sentidos, lo que exigirá el empleo de bloques de peso considerable; además no hay que perder de vista que, después de terminado el muro, deben producirse asentamientos de cierta importancia y que el muro debe seguirlos sin experimentar dislocaciones y sin que se produzcan cavidades debajo de los bloques. La primera de estas necesidades, si se tiene en vista que la altura de los bloques será por lo menos de 2 metros, conduciría a disponer por lo menos a 2 metros los cruces de las juntas lo que llevaría a bloques de 4 metros de ancho y más o menos 6 metros de largo, con un peso unitario de unas 110 toneladas, cifra superior a la generalmente adoptada en esta clase de obras. Para oponerse al deslizamiento transversal de unas capas de bloques sobre otras, se han adoptado salientes y entrantes, como los que he indicado al hablar de las obras de Tynemouth y Antofagasta, que han demostrado ser eficaces; pero conviene que las caras de esos salientes no formen ángulos rectos, sino de 120° ó 130° más o menos, para evitar la formación de grietas y las quebraduras consiguientes. Esos entrantes y salientes no complican mucho la fabricación de los bloques ni tampoco dificultan su colocación de manera que no hay que tener preocupaciones por ese lado. En la construcción del rompeolas de Antofagasta, en la cual los bloques pesaban 60 toneladas y eran colocados por medio de una grúa titán que circulaba por encima de la obra recién hecha, se observó que los bloques de las diferentes capas tenían cierta tendencia a deslizarse en el sentido longitudinal de la obra y que los cruces de las juntas se reducían por ese motivo; esta consideración aconsejaría hacer grande la distancia entre las juntas de las diferentes capas, como he indicado más atrás, y corregir de cuando en cuando la deficiencia de los cruces, por medio de bloques especiales. En cuanto a los asentamientos, si no son irregulares, los bloques en capas horizontales los siguen bastante bien, cosa que es de esperarse, por lo demás, porque las inclinaciones que necesitan tomar los bloques para seguirlos son muy pequeñas y la altura de los bloques es de poca importancia relativa; esta consideración aconsejaría también aumentar el ancho de los bloques para que sea menor el número de las juntas en el sentido longitudinal. De todos modos la impor-

tancia de los asentamientos se reduce, dejando asentar la infraestructura, como hemos dicho antes. No se han empleado hasta ahora grandes bloques en obras de este tipo pero en caso de mares bastante violentos podría ensayarse con buenas garantías de éxito un tipo como el que indica la fig. 71, en el cual los bloques serían solo de tres tipos diferentes, con pesos de 150 a 210 toneladas, que no son exagerados. En caso que el estado ordinario del mar hiciera necesario aumentar la cota a que alcanza la capa superior de bloques, el aumento del peso de ellos no sería de ninguna manera prohibitivo, en ese caso sería probablemente necesario elevar el coronamiento del macizo de concreto en sitio, a fin de que no quedara muy delgado. En caso que los muros de este tipo sean hechos con grúa flotante, se recomendaría hacerlo por capas sucesivas, dejando mediar un tiempo considerable, del orden de 6 meses, entre la colocación de una y otra capa; de esa manera los asentamientos serán más regulares y tendrán menos importancia relativa. Por otra parte el empleo de la grúa flotante tiene la ventaja de que permite limitar la altura del muro de bloques a

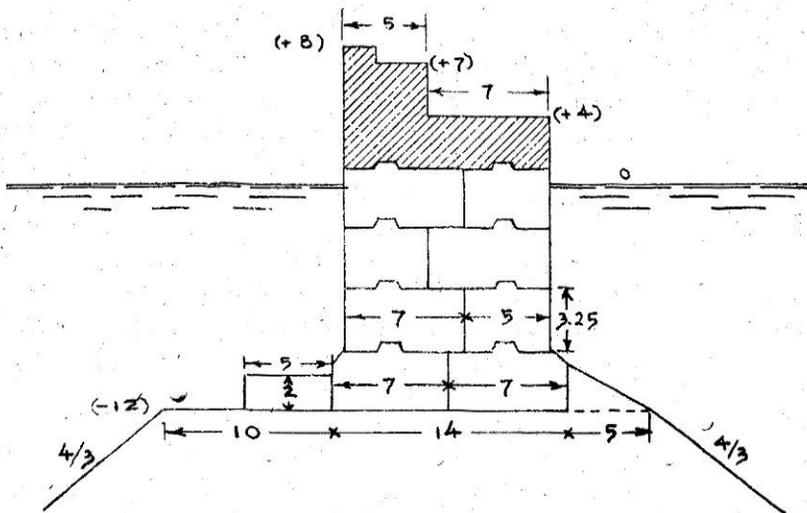


Fig. 71

una cota poco superior al nivel del mar, lo que aumenta la importancia del macizo de coronamiento.

La disposición de los bloques en capas inclinadas presenta ventajas desde el punto de vista de la trabazón y también desde el de la flexibilidad para seguir los asentamientos de la infraestructura. Esta última cualidad es de la mayor importancia, principalmente en el caso en que las variaciones de la profundidad o la naturaleza compresible del suelo hagan temer irregularidades en los asentamientos, y son muchas las obras que han permitido comprobar las cualidades sobresalientes en este sentido de los muros hechos con bloques en capas inclinadas; sin duda el mejor ejemplo en este sentido lo presentan los muros de malecones del espigón de atraque de Valparaíso, que fueron fundados en un fondo fangoso sobre una base de enrocados en condiciones muy variadas; en el arranque de los muros se hizo un dragado de 5 metros de hondura y se rellenó la zanja así obtenida con piedras; en el estre-

mo del espigón la profundidad es de 35 metros y el muro descansa sobre un prisma de enrocados de 25 metros de altura: en la primera parte el peso del muro representa una carga muy fuerte para el terreno; en el extremo esa carga es pequeña relativamente a la que ya había recibido el suelo al construir el muro; los asentamientos fueron aumentando desde el extremo del espigón hasta el arranque del muro y es fácil ver que la diferencia entre ellos alcanza a más de 2 metros. Las capas de bloques han deslizado perfectamente sin que se note ningún desperfecto en el arrimo de ellas ni en su unión con el macizo de hormigón que forma el coronamiento. En caso de grandes profundidades, aun cuando se trate de terrenos muy comprensibles, como el fango, los asentamientos no son muy irregulares, pero siempre será recomendable disponer los bloques de esta manera. Durante la construcción del rompeolas de Valparaíso, fig. 55, en que el fondo está formado por una capa de fango de espesor desconocido, se hicieron nivelaciones muy prolijas que permitieron conocer los asentamientos que se producían de mes en mes hasta llegar a un año, que era el plazo fijado para el asentamiento del muro, antes de iniciar la construcción del macizo de coronamiento. En el cuadro siguiente he reunido las cifras que representan esos asentamientos, en centímetros, al cabo de 4, 6, 8 y 12 meses, tomando las capas de bloques de diez en diez que equivalen a 26.25 metros de distancia, en la parte de la obra en que los asentamientos fueron más pronunciados; las cifras de las dos últimas columnas indican, los asentamientos producidos entre el 6.º y 12.º mes, y el tanto por ciento del asentamiento al cabo del año que representa el correspondiente al 6.º mes.

Capa N.º	MESES				Entre 6.º y 12.º	Al cabo del 6.º %
	4.º cm.	6.º cm.	8.º cm.	12.º cm.		
20	57	63	64	67	4	94
30	76	82	86	86	4	96
40	68	70	73	76	6	72
50	78	82	86	88	6	93
60	78	83	89	92	9	90
70	76	81	85	99	18	82
80	83	87	98	105	18	83
90	75	81	91	99	18	82
100	79	94	96	108	14	87

Las cifras de este cuadro nos indican, desde luego, que los asentamientos se producen rápidamente al principio, de tal modo que al cabo del sexto mes el asentamiento correspondía, como promedio, al 87%, del que se observó al cabo de un año; pero en realidad no es tanto el valor mismo de los asentamientos lo que más interesa, sino la mayor o menor irregularidad de ellos a lo largo de la obra. En ese

sentido se observa que la mayor diferencia de asentamientos al cabo de un año, entre cada 10 capas, es de 19 cm., y se la encuentra donde los asentamientos totales fueron menores; esta diferencia equivale a una pendiente media de 0,7% aproximadamente en 26 metros de distancia. Pero, para la flexibilidad de la obra interesan más las diferencias en longitudes menores; no he considerado necesario alargar el cuadro anterior, tomando un mayor número de capas, pero de las medidas que se hicieron se deduce que por cada dos capas de bloques, es decir, para una distancia de 5,25 metros, la diferencia entre los asentamientos de dos grupos, tomando cien de ellos sucesivos, no pasó de 5 cm. en 38 casos y no pasó de 10 cm. sino en 6 casos, siendo en uno solo de 15 cm. Estas cifras indican que la inclinación media de la superficie de los enrocados de base no pasó, en general, 1% y que fué de 3% como máximo extraordinario; una deformación de esta naturaleza es compatible con la flexibilidad de un muro de bloques, aun sin que sea necesario que se produzca un deslizamiento apreciable de una capa sobre otra. Creo que estas cifras pueden ser interesantes, sobre todo si se considera que en esta parte del rompeolas de Valparaíso el terreno es de muy mala clase; pero no hay que perder de vista que la enorme profundidad del mar, del orden de los 60 metros, era favorable en este caso, pues la carga que representa sobre el terreno el peso del muro es pequeña al lado de la que ya le había transmitido la infraestructura.

Creo que no es necesario contemplar el caso de un muro de paramentos verticales fundado en profundidades reducidas en un terreno de mala clase, pues no presentaría garantías contra las socavaciones; pero si, a pesar de todo, las circunstancias obligaran a adoptar una solución de esta clase, sería indispensable proteger el fondo de una manera muy eficaz y hasta una distancia considerable del muro, superior a la tercera parte del largo de las olas, dragando el terreno socavable y rellenando la excavación con piedras o faginas. En cuanto a la construcción del muro, si se le hiciera con bloques artificiales, estaría indicada la disposición de ellos en capas inclinadas,

En cuanto a la construcción de esta clase de muros, se ha observado siempre que la inclinación de las capas de bloques se va acentuando paulatinamente, lo que obliga a rectificarla de distancia en distancia, colocando una capa de bloques especiales. Este inconveniente es más notable, cuando los bloques son colocados por medio de un titán que circula sobre el muro recién hecho. En Valparaíso se observó, además, una tendencia del eje del muro a encorvarse hacia el interior del puerto, que también debía ser corregida al mismo tiempo que la inclinación de las capas de bloques. Estos inconvenientes no alcanzan a complicar las faenas y no quitan nada a la sencillez de la construcción. En todo caso, en las nuevas aplicaciones de este tipo debe aumentarse el peso unitario de los bloques, en caso de mares violentos, hasta 150 toneladas o más.

Los muros construídos con elementos independientes entre sí, que se hacen solidarios posteriormente por medio del macizo de coronamiento, presentan también ventajas e inconvenientes, que examinaremos a continuación.

Indudablemente la mejor solución para este problema, considerándolo desde el punto de vista técnico, es la de los cajones monolíticos, porque permiten obtener elementos de una pieza que llegan a pesar varios miles de toneladas; pero la construcción de estos cajones, cuyo peso en vacío tiene que ser considerable, más de 2,000

toneladas en el primer trozo del rompeolas de Valparaíso, exige instalaciones costosas, salvo que circunstancias especialmente favorables permitan utilizar medios sencillos. Con frecuencia ha sido la concurrencia de esas circunstancias favorables lo que ha aconsejado adoptar este sistema de construcción de preferencia a los demás. En la construcción de los cajones se emplea actualmente casi exclusivamente el hormigón armado, porque se presta a darles la forma que se quiera y además permite economizar metal. Hemos visto que en la disposición general de estos cajones se han empleado dos sistemas distintos: uno que consiste en hacer las paredes más o menos delgadas y de espesor uniforme, colocando nervios horizontales para reforzarlas, que se apoyan a su vez en tabiques transversales; y otro que consiste en emplear paredes de espesor variable, sin nervios horizontales, unidas también por tabiques transversales, que las refuerzan. Parece que una y otra disposición conducen a un volumen de hormigón armado semejante, y de ser así, sería preferible el segundo sistema, porque la construcción de los moldes resulta más sencilla.

En las primeras aplicaciones del hormigón armado a estas obras se tenía cierta desconfianza en la duración de este material en el agua de mar y no se aceptaba otro relleno que el hormigón rico, colocado en seco. En este caso era necesario que el relleno de los cajones fuera interrumpido solamente por tabiques transversales al muro, de manera que en caso de destrucción del cajón podría subsistir el relleno, con macizos monolíticos más pequeños y de todo el espesor del muro; con ese criterio se establecieron los tabiques y refuerzos de los cajones del rompeolas de Valparaíso. Posteriormente se ha llegado a tener mucha confianza en la conservación del hormigón armado y el relleno de los cajones se ha hecho con piedras y con arena. Se ha criticado a este último relleno su falta de rigidez, de manera que, si un cuerpo flotante pesado llega a golpear las paredes de los cajones o aun por efecto de la presión de las olas, pueden producirse deformaciones muy grandes en esas paredes, que pueden traer como consecuencia la formación de grietas, por las cuales el agua de mar atacaría las armaduras y acarrearía la destrucción de los cajones; por esta razón se aconseja hacer el relleno con una capa de hormigón junto a la pared exterior y con piedras y arena el resto; naturalmente esto reducirá algo la economía. Por otra parte, el empleo de rellenos pobres y por consiguiente menos densos, obligará a aumentar el espesor del muro, aumentando el ancho de los cajones, lo que aumentará su costo, pues no sólo se aumenta el volumen de las paredes extremas del cajón, sino también el de los tabiques intermedios. Además la parte superior del relleno deberá cubrirse con una capa de hormigón de 1 metro de espesor por lo menos, destinada a impedir que las olas arrastren la arena durante el período de asentamiento, lo que también vendrá a reducir la economía. En vista de estas consideraciones parece que no es posible determinar de una manera general cuál será la solución más conveniente para la construcción de los cajones monolíticos y en cada caso convendrá estudiar distintos anteproyectos para adoptar el que resulte preferible.

Por otra parte, se ha objetado al relleno de hormigón la falta de adherencia con las paredes del cajón, debida a la contracción del hormigón, de la cual puede resultar que el relleno no contribuya a la resistencia contra los esfuerzos accidentales. A mi juicio esta observación carece de importancia, porque la contracción del

hormigón representa una cantidad muy pequeña y la deformación que tomarían las paredes antes que alcancen a producirse grietas hará que se apoyen en el relleno. En todo caso, si el temor de que se trata fuera fundado, se evitarían los inconvenientes que podrían resultar, haciendo el relleno con hormigón rico, dispuesto como se dijo antes. Por lo demás, los cajones de Valparaíso están hechos desde hace cerca de veinte años y no se nota en ellos ningún signo de alteración.

Se ha objetado también a los cajones monolíticos el gran volumen del relleno, cuya colocación exigirá un tiempo tanto más largo cuanto más grande sea el cajón, de donde puede resultar un peligro para la obra si sobreviene una tempestad. Este temor puede ser fundado en muchas regiones y lo es, sin duda, en el Mar Mediterráneo, donde no hay casi día seguro; pero no tiene importancia en otras partes, como, por ejemplo, en Valparaíso, donde hay varios meses seguidos durante los cuales no hay nunca una tempestad. Este no es en realidad un inconveniente técnico del sistema de construcción, sino una condición del mar. El empleo de los grandes cajones presenta, en cambio, una sujeción seria, que se deriva de la dificultad de su colocación, pues ésta exige un mar perfectamente tranquilo y puede hacer inaplicable el sistema, aunque no haya tempestades, como sucedería en la mayor parte de los puertos abiertos de Chile.

En lo que se refiere a la aplicación de este sistema, existe un punto respecto al cual hay opiniones contradictorias entre los ingenieros, pues mientras unos estiman conveniente que los cajones sean lo más largos posibles, los otros creen que es mejor hacerlos cortos, de no más de 5 ó 6 metros. Los primeros se basan en la consideración de que mientras más largos sean los cajones menor será el número de interrupciones del muro y mayor el peso de cada monolito una vez relleno; los segundos creen conveniente hacer cortos los cajones para disminuir la importancia del efecto de los asentamientos de la infraestructura. Por mi parte, estimo que los cajones deben ser largos, hasta de 20 metros o poco más, a fin de no dificultar demasiado su construcción y creo que se ha exagerado en lo que se refiere a los asentamientos. Es fácil ver que esos asentamientos pueden producir dos efectos perjudiciales diferentes: uno debido a la inclinación media de la superficie de los enrocados en la longitud correspondiente al cajón, por efecto de la cual las caras extremas de los cajones se inclinan, tendiendo a aumentar o a disminuir el ancho de las juntas, lo que obliga a darles cierta importancia; el otro, debido a que los enrocados pueden separarse del fondo del cajón al asentarse y formar así huecos por los cuales el mar puede arrancar los materiales de la infraestructura y producir desperfectos de importancia. El primero de estos efectos será tanto menos perjudicial cuanto más largo sea el cajón, puesto que la pendiente media de la superficie de los enrocados será menor; si recordamos las cifras anotadas a este respecto al tratar de rompeolas de Valparaíso, vemos que para largo de 25 metros esa pendiente no pasa de 0,7%, a la cual correspondería una desviación de la vertical de 12 cm., que exigiría separaciones de unos 30 cm. entre los cajones, para ponerse a salvo de cualquier imprevisto; en Valparaíso se habrían previsto separaciones de 0.50 m., y en la construcción se las redujo a 0.30 m. y el resultado ha sido perfectamente satisfactorio; en el caso de cajones de 5 m. de largo la pendiente media podría alcanzar a 2%, es decir que para la misma altura la desviación respecto a la vertical sería de 28 cm., lo que exigiría separaciones de más de 50 cm.; es decir, que las separaciones serían casi el

doble más anchas y cinco veces más numerosas. Respecto al segundo efecto de los asientos de los enrocados, es indudable que, mientras más corto sea el cajón habrá menos probabilidades de que se formen huecos debajo de ellos; pero creo que en caso de grandes cajones, que pesan miles de toneladas, si llegara a producirse un hueco de cierta extensión debajo de él, las piedras que quedarían soportándolo cederían y se produciría un ligero descenso de todo el cajón, con el cual desaparecería el hueco. Los cajones de Valparaíso fueron colocados hace cerca de veinte años y no se ha observado ningún inconveniente por este motivo. Dejando a un lado las dificultades de construcción de los cajones y los peligros que pueden resultar de la demora de su relleno, parece que debe darse la preferencia a los cajones largos, no pasando de 20 a 25 metros.

En cuanto a la colocación de los cajones, haciendo el trabajo al aire libre o al aire comprimido, me parece que la elección es cuestión de especie, porque para colocar un cajón que se lleva flotando y se encalla sobrecargándolo, es necesario preparar la superficie de asiento por medio de buzos, lo que constituye un trabajo largo y delicado, que exige más o menos un mes para un cajón de 20 metros de largo; en cambio el cajón colocado con aire comprimido se puede fondear sobre una superficie groseramente emparejada, terminando en el interior de la cámara de trabajo; el relleno de esta cámara se hace al mismo tiempo que se termina el relleno de la parte superior, que se hace al aire libre. Parece que, en general, resultará más sencillo y menos costoso el trabajo hecho por el primer sistema.

La otra manera de realizar los monolitos aislados es la que han adoptado en la mayor parte de sus puertos los ingenieros italianos, que ya han construído 18 kilómetros de obras de esta clase y se han hecho maestros en ellas. El primer sistema que emplearon fué el de bloques celulares, en cuya aplicación encontraron dificultades desde el principio, porque al rellenar los pozos que formaban las células, colocando el hormigón bajo agua con honduras de más de 10 metros, la agitación se transmitía al agua de los pozos a través de las piedras y se dificultaba el trabajo aparte de que se lavaba el hormigón; en Génova se remedió ese inconveniente colocando primero el bloque celular inferior y rellenándolo parcialmente de hormigón; después se colocaban los dos bloques celulares superiores, interponiendo entre ellos juntas de filástica o de fieltro alquitranado, con lo cual el relleno de los pozos se hacía con el agua muy tranquila y aun se vió que era posible hacerlo en seco, por agotamiento. Además, como esos cajones celulares pesan relativamente poco, mientras no se ha hecho el relleno, si sobreviene una tempestad puede moverlos, hacerlos caer y quebrarlos. Estos inconvenientes hicieron que en Génova se los reemplazara por bloques más bajos y con huecos más pequeños, conservando las otras dimensiones y el mismo peso unitario, como hemos dicho.

Esta segunda manera de construir los monolitos, que quedaron formados por bloques superpuestos en los cuales se dejaron dos huecos circulares de 2 metros de diámetro, formando así pozos cilíndricos, que se rellenaron como antes con hormigón colocado bajo agua, corrigió en gran parte los inconvenientes anotados en los bloques celulares, pero se manifestaron menos resistentes que aquéllos, quebrándose en la sección debilitada por los pozos. Parece, en vista de eso que este sistema es en definitiva inferior al de los bloques celulares.

La tercera solución de este problema fué adoptada en Génova, como hemos

visto antes, y seguía después en la construcción de las obras de otros puertos con resultados muy variables, pero que no pueden imputarse al sistema en sí. Consiste, según se vió en la fig. 67, en formar las pilas con bloques de gran peso unitario, 300 a 330 toneladas en Génova, y hasta 450 toneladas en Argel. En Génova la solidaridad entre los bloques de las dos capas superiores se obtuvo por medio de cuatro pequeñas cavidades verticales, que se rellenaron con hormigón pusolánico muy rico en cemento; la solidaridad entre los bloques inferiores depende sólo del frotamiento entre ellos. El resultado de este sistema de construcción fué satisfactorio en Génova, pero no ha sucedido lo mismo en otras partes, según hemos tenido ocasión de ver. En Catania, por ejemplo, antes de la tempestad que destruyó la obra, se habían producido accidentes que demostraban que la obra era débil; pero ellos se debieron a que las olas eran mucho más fuerte que las que se habían tenido en vista al hacer el proyecto y no afectan al sistema de construcción mismo. Sin embargo, es indudable que es mucho mejor establecer entre los bloques una solidaridad mayor que la que puede resultar del simple frotamiento; en ese sentido son preferibles los bloques provistos de salientes forma de trapecial en su cara superior, como los indicados en las figs. 69 y 71, que calzan con ranuras de los bloques superiores, destinados a oponerse al deslizamiento en el sentido transversal del muro; pero es más satisfactoria la solidaridad que se obtiene, aprovechando las caladuras hechas en los bloques para colocar los hierros destinados a la puesta en obra, prolongándolas en toda la altura de los bloques, para formar pozos angostos, que se rellenan posteriormente con hormigón, englobando barras redondas o rieles, como se hizo en Argel y Marsella, figs. 37 y 70. En estos casos hay que prestar atención a las dimensiones de esas aberturas, porque si son demasiados grandes es fácil que se quiebren los bloques, y si son demasiado pequeñas se hace difícil la colocación del hormigón; la menor dimensión de ellas puede ser del orden de 0,60 a 0,70 m. En Marsella se produjeron algunas quebraduras, que pueden atribuirse tal vez a que el espesor que quedaba entre ellas y los paramentos era de 1.25 m. en lugar de 1.50 que había en Argel. En obras ya ejecutadas se puede aumentar su resistencia al cizalle, haciendo perforaciones inclinadas de unos 100 mm. de diámetros que comprendan todos los bloques, y colocando en ellas hierros de unos 60 mm. sellados con mortero inyectado bajo presión.

Durante la construcción de las obras formadas por monolitos, hechos con bloques, cualesquiera que sean sus disposiciones, se ha observado que, mientras los monolitos no han sido hechos solidarios por medio del macizo de coronamiento, están sujetos a movimientos de nutación, sensiblemente elípticos. La amplitud de esos movimientos es considerable, pero no ha sido posible medirla en caso de olas grandes; para olas de 1 m. de altura ha sido de 5 cm. en el sentido transversal al muro y de 2 cm. en el longitudinal, es decir, en el sentido de las juntas entre los monolitos, en el puerto de Argel. En Marsella y en Catania fueron constatados estos mismos movimientos, que en caso de tempestades puedan llegar a hacer chocar los bloques de una pila con los de las vecinas, con lo cual se producen quebraduras de mucha importancia. Estos movimientos se deben a la falta de solidaridad entre las diferentes pilas, que son atacadas sucesivamente por las olas y que se encuentran solicitadas periódicamente de manera variable; como consecuencia de estos movimientos, después de una tempestad el eje longitudinal del muro ha experimentado una deforma-

ción, que lo ha hecho pasar de la forma rectilínea a una sinusoidal, con amplitudes hasta de 0,25 m. en Marcella y 0,40 m. en Argel. El largo de las ondas de sinusoidal ha alcanzado a 70 m. en Marsella y 80 m. en Argel.

En el caso del molo Mustafa de Argel, y en el del molo Mirabeau de Marsella se han dispuesto salientes y entrantes en las caras laterales, que corresponden a las juntas verticales con el objeto de establecer cierta solidaridad en el sentido transversal. Parece que para que esta disposición sea eficaz, los salientes y las caladuras debieran ser rectangulares, pues las trapeziales no se tocan; por otra parte si llegan a tocarse se oponen a que los bloques sigan en asentamiento de la infraestructura, exponiéndose a que se quiebren los bloques o a que queden huecos debajo de ellos.

En resumen creo que, cuando las circunstancias sean favorables, en los mares violentos debe darse la preferencia a los muros formados por grandes cajones monolíticos o a los muros continuos, hechos con bloques artificiales colocados en capas inclinadas, en caso de terreno poco compresible; si el terreno es de mala clase debe preferirse este último tipo. Cuando es posible la colocación de grandes bloques con grúa flotante y hay inconvenientes para adoptar una de las dos soluciones anteriores, puede recurrirse al tipo de monolitos formados por grandes bloques de peso de 300 a 500 toneladas, prefiriendo hacerlos solidarios por medio de caladuras verticales de dimensiones reducidas, que se rellenan de hormigón con barras de acero.

En caso que las características de las mayores olas que pueden atacar una obra de esta clase sean conocidas, si se observan bien todas las precauciones indicadas más atrás y si se determinan sus dimensiones de acuerdo con las indicaciones del método de cálculo de Sainflou, puede tenerse la seguridad de obtener resultados satisfactorios. Es cierto que muchas veces resultará menos costosa una obra del tipo de escollera, protegido con bloques artificiales «pêlé-mêle», tipo que tiene por otra parte la ventaja de que las averías que puede experimentar son de carácter local y reparables sin enormes gastos, mientras las averías de los rompeolas de muro son casi siempre de carácter gravísimo; pero habrá siempre muchos casos en que la naturaleza de las canteras no permitirá obtener grandes piedras de la calidad o en la cantidad necesaria, lo que obligará a recurrir al tipo de paramentos verticales.