

# Nuevos Usos del Cemento

ALFREDO PAEZ BALACA,  
Dr. Ingeniero de Caminos

589 - 1

## sinopsis

En este artículo se trata la evolución de los distintos sistemas de transporte y almacenamiento del petróleo submarino y sus derivados (gas de petróleo y gas natural), resaltando la importancia del uso de barcos de hormigón.

Debido al gran coste de los oleoductos, se ha pasado de los tanques construidos en tierra firme a los depósitos de hormigón pretensado que pueden estar fondeados a gran profundidad o anclados al fondo para mantenerlos flotantes, existiendo la posibilidad de poder desamarrarlos para su traslado.

El transporte y almacenamiento del gas licuado nos hace ver las ventajas del hormigón pretensado sobre el acero, pues éste se vuelve quebradizo a bajas temperaturas, mientras aquél aumenta su resistencia.

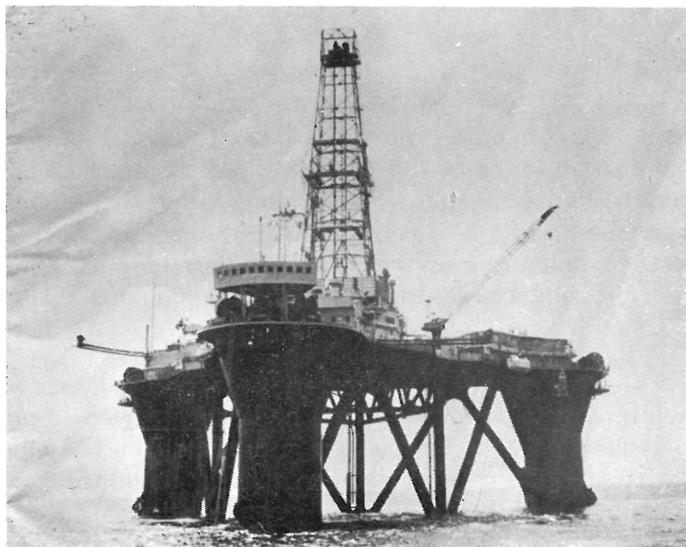
Se analizan las diferentes formas y secciones posibles, destacando la gran importancia de la solución del doble casco de hormigón con aislante de perlita.

Por último se hace un estudio de los «hormigones ligeros», no de los clásicos usados como aislantes térmicos y acústicos, sino de aquéllos semipesados realizados con arcillas expandidas, arena de alta calidad y cemento P-450, cuya técnica en España no está todo lo desarrollada que fuera de desear.



Fig. 1. Plataforma metálica de prospección marina.

Fig. 2. Trípode metálico para sondeos submarinos.



La reciente crisis del petróleo, una crisis que parece lejos de terminarse, ha impulsado la búsqueda, bien sea de nuevas fuentes de energía o bien de nuevos yacimientos. Con la excepción de algunos países que gozan de unas reservas privilegiadas, los demás han ido ampliando el campo de sus exploraciones a la plataforma costera, adentrándose cada vez más en el océano con la esperanza de encontrar en el subsuelo de las profundidades marinas el ansiado estrato petrolífero o al menos los característicos bolsones de gas que con frecuencia le acompañan.

Desde un punto de vista técnico, la exploración, primero, y la explotación, después, de estos recursos submarinos, plantea la necesidad de construir unas plataformas de perforación tanto más costosas cuanto mayor es la profundidad del fondo, mayor la profundidad del estrato y más hostiles las condiciones del ambiente: bajas temperaturas, violentos temporales o vientos de fuertes intensidades (figs. 1 y 2).

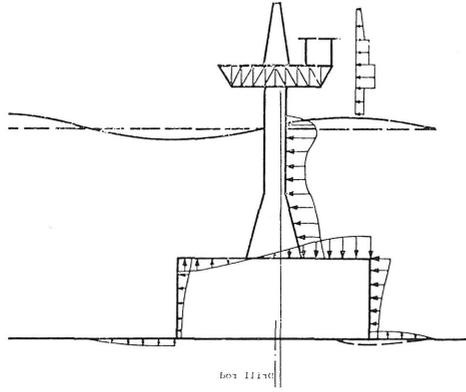


Fig. 3. Esquema de fuerzas actuantes sobre un depósito submarino.

Cuando la distancia a la costa es muy pequeña (pozos del lago de Maracaibo), el petróleo extraído se almacena en tanques construidos en tierra firme que se enlazan con las torres mediante tuberías. Según las dimensiones, estos tanques de almacenamiento son de hormigón pretensado o metálicos, en sus modalidades de techo fijo o flotante, rodeados de unos cubetos bajos, a modo de tapia, destinados a contener el líquido que, accidentalmente, pueda derramarse en caso de rotura del depósito.

Pero cuando la distancia a la costa es grande, el oleoducto hasta el terminal en tierra supone una fuerte inversión. En estos casos, parece más económico situar el depósito en el fondo marino y construir sobre él la plataforma necesaria para las instalaciones auxiliares de bombeo y carga en los buques petroleros (fig. 3).

Hasta ahora las instalaciones de este tipo recientemente construidas en pleno Mar del Norte, en el Golfo Pérsico y en el de Méjico, son, todas ellas, unas gigantescas botellas de hormigón pretensado. En algunos casos, el empuje violento de las olas se amortigua mediante una pantalla agujereada (muros Jarlan) que rodea al tanque (figs. 4 a 6).

Dadas las condiciones hostiles del ambiente marino, la construcción de estos depósitos se inicia en seco, dentro de un recinto ataguado, de tal modo que mediante la inundación del mismo en el momento oportuno pueda remolcarse la base del depósito por flotación a un punto próximo a la costa con calado suficiente para proseguir el hormigonado ascendente de la cuba. Ocasionalmente se recurre a un segundo traslado a aguas más profundas para poder terminar la construcción, remolcándose después la estructura hasta su emplazamiento definitivo, donde se fondea mediante la inundación de compartimientos periféricos dispuestos a este efecto (figs. 7 a 9).

No podemos entrar en el detalle de estas maniobras ni en las características particulares de estas singulares estructuras. Lo que sí es interesante advertir es que nada se opone a la posibilidad de mantener flotante el depósito, anclándolo al fondo cuando la profundidad sea muy grande. Esta solución, que en algunos casos puede ser más económica que la de fondear la estructura a gran profundidad, presenta la ventaja adicional de que, al cabo del tiempo, puede ser desamarrada y transportada a otro lugar sin mayores complicaciones (fig. 10).

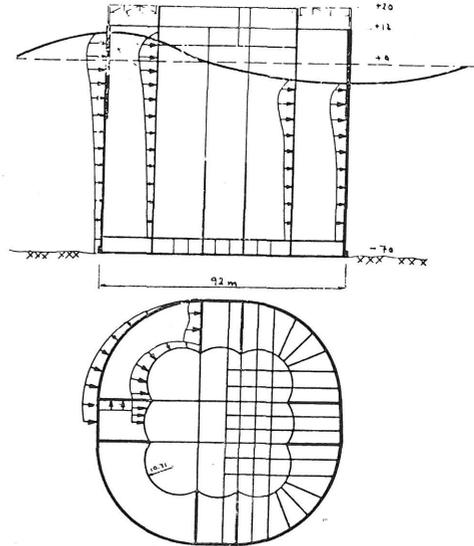


Fig. 4. Protección de un depósito mediante una pantalla agujereada envolvente.

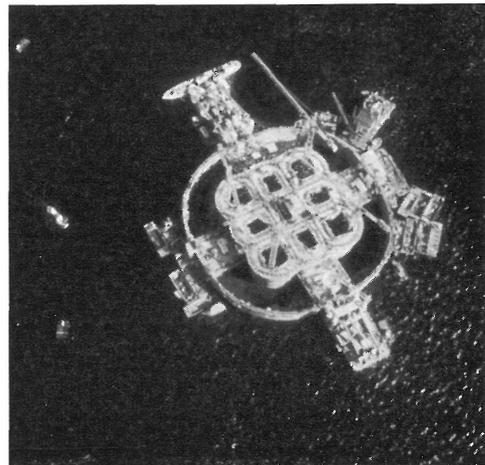


Fig. 5. El islote artificial de Ekofisk en pleno Mar del Norte.

sar que la maquinaria propulsora tiene un bajo rendimiento debido a sus largas horas de inactividad, se recurre con frecuencia a la solución de separar la bodega-silo de la maquinaria propulsora, transformándose el barco en una gabarra arrastrada o empujada por un remolcador que, siendo independiente por naturaleza, puede atender a otras gabarras. En ciertos tipos de transporte, un remolcador o empujador turna su acción sobre tres gabarras: una en origen en carga, otra en descarga en destino, y una tercera en viaje. Tanto en el caso de barcos metálicos como en éste de gabarras-silo, el empleo del hormigón en el casco y en el recipiente brinda un interesante conjunto de nuevas soluciones abiertas al juego imaginativo del proyectista que busca, en cada material, el medio más idóneo para resolver el problema que tiene planteado (figs. 12 y 13).

Es evidente que la función de la estructura o razón por la cual ésta se construye, influye poderosamente en la forma o disposición adecuada a esa finalidad. La inversa también es cierta; la forma de una estructura debe definir, por sí sola, cuál es su función. Si al observar la arquitectura de una solución no descubrimos la razón de sus formas, deduciremos que o nuestra sensibilidad está atrofiada o la estructura no es la apropiada tanto en su aspecto funcional como en el artístico.

Esta afirmación no quiere decir que exista una relación biunívoca entre la forma y la finalidad. También el material influye en la forma. Si estos vínculos no están claramente expresados, si la estructura no indica su función ni comprendemos la razón del empleo de un cierto material, sentiremos la intranquilidad que nos produce el enigma de un efecto cuya causa ignoramos, o la razón de un mensaje que no comprendemos. Si para facilitar la exposición de unos conceptos hemos pasado del tanque flotante al petrolero, y de éste a la gabarra, no quiere decir que sus formas son parecidas, ni tampoco que un petrolero metálico tenga la misma forma que un petrolero de hormigón de igual capacidad. El hecho de que en los balbucesos del hormigón se copien las soluciones metálicas, no indica más que la falta de madurez de una idea nacida en una etapa de transición.

José Capmany, en sus documentados artículos publicados en la revista «Cemento y Hormigón» el año 1971, describe los pormenores de la construcción de las embarcaciones de «ferrocemento», por emplear una palabra directamente extraída del léxico italiano y muy generalizada por su expresividad, aunque debiéramos haberla traducido por «ferromortero», ya que en realidad lo que con este material se construye no es más que un casco compuesto por uno o dos mallazos de barras finas de acero recubiertos por un mortero de pocos centímetros de espesor.

El casco de estas embarcaciones, generalmente de pequeña eslora y modestas dimensiones, tiene la forma clásica del casco de madera. Lo único que se modifica es el material, que ahora se sustituye por otro más permanente y estable. El hecho de que estas embarcaciones de

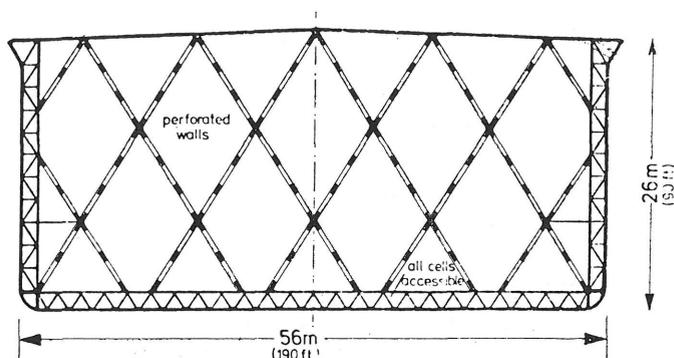


Fig. 11. Sección transversal de un petrolero de hormigón pretensado.



Fig. 12. Remolcador empujando una gabarra de 50.000 t.

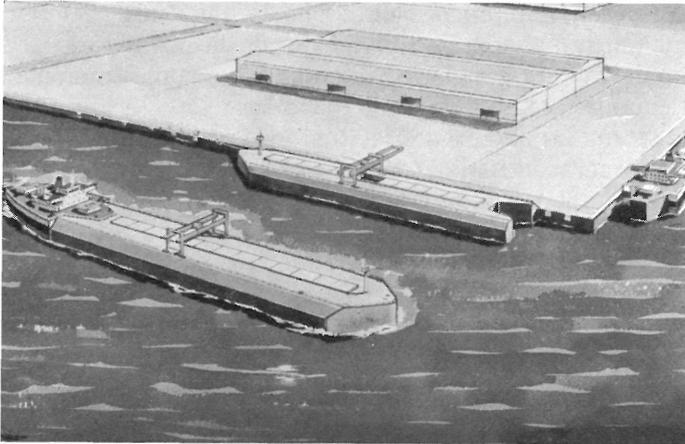


Fig. 13. Acoplamiento de empujador a gabarras de hormigón.

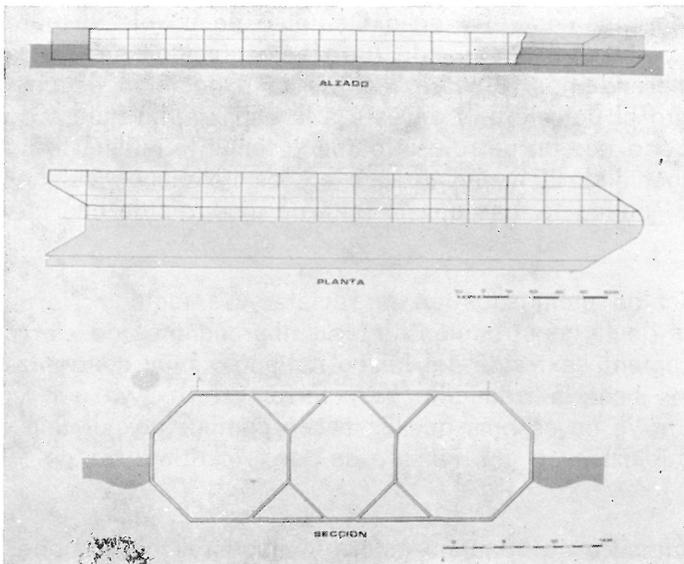


Fig. 14. Posible solución de gabarras graneleras de hormigón pretensado.

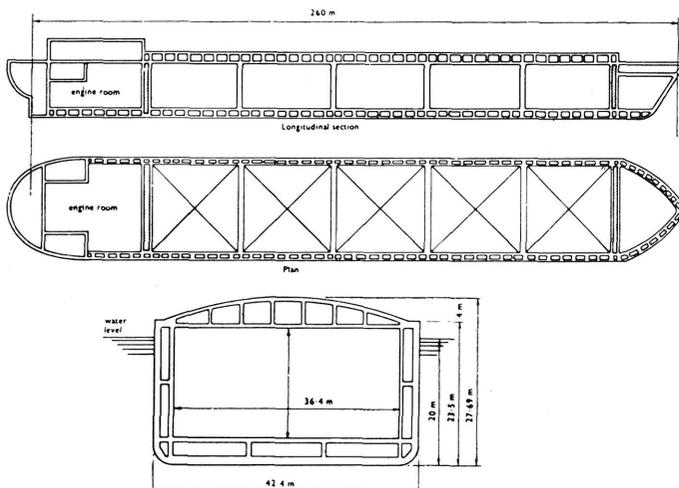


Fig. 15. Barco metanero autopropulsado de hormigón, en proyecto.

ferrocemento o ferromortero se hayan construido por lo menos en cuatro de los cinco continentes preferentemente para navegación del interior, fluvial o en los grandes lagos, indica que no son pocos los casos particulares en los cuales el ferromortero o incluso el hormigón armado constituye un verdadero sucedáneo en puntos en donde escasea la chapa o la mano de obra especializada. Con todo, hay que reconocer que estos intentos han suministrado una inapreciable fuente de experiencia respecto al comportamiento de estos cascos a lo largo del tiempo, con su secuela de datos referentes a la permanencia de la armadura, recubrimientos, adherencia de moluscos y de algas, rugosidad de las superficies y efecto de rozamiento durante la navegación, reparación de accidentes por choques, incendios e incluso su excepcional comportamiento frente a las explosiones nucleares en el atolón de Bikini (21 de mayo de 1956) y frente a los bombardeos sufridos por varias gabarras de hormigón pretensado durante nueve años de la guerra del Vietnam (Informe Turner).

Conviene advertir que, pese a toda la información hasta la fecha disponible, el intento que ahora hacemos intuir las soluciones apropiadas partiendo de unas bases distintas, como son los depósitos flotantes de hormigón pretensado, nos lleva a la consideración de que la forma de la estructura depende esencialmente de la finalidad de ese «objeto flotante no identificado». Si el transporte es su función primaria, deberá tener proa y popa, independientemente de que sea autopropulsado o no. Si es un silo, habitualmente anclado en un lugar, la proa podrá adoptar la forma de un bisel más o menos apuntado, así como la popa. Las proporciones calado-manga-eslora dependerán de las profundidades en donde se ancle, así como de las condiciones de la carga y descarga, a fin de limitar su escora o su variación de calado con el peso almacenado.

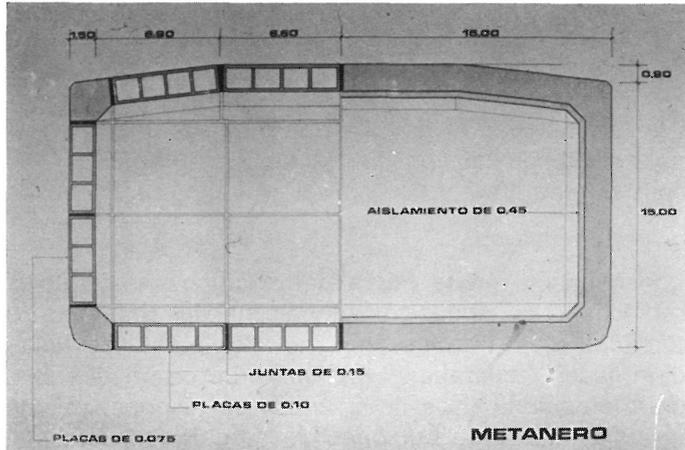


Fig. 16. Proyecto de gabarra de hormigón pretensado para el transporte de gas natural licuado.

La sección transversal dependerá, en primer lugar, de la misión que tiene que cumplir (granelero, aljibe, silo, barco cementero, petrolero, metanero, plataforma de sondeo, planta de licuación, barco-hospital, etc.). La solución clásica de marco rectangular proporciona una bodega amplia, pero tiene el inconveniente de su escasa rigidez torsional. La sección bi-tubular es la más apropiada para reducir los giros diferenciales, pero el acondicionamiento de los espacios libres está más limitado. Una solución mixta es la de rigidizar con elementos diagonales el marco rectangular, solución posible cuando se trata de almacenar líquidos (figuras 11 y 14).

El doble casco, unido por elementos transversales a modo de cuadernas, constituye una magnífica solución para silos o cargueros para el transporte de gas natural licuado a  $163^{\circ}\text{C}$  bajo cero. Entre ambos cascos se disponen las capas de aislante, generalmente perlita, que queda así encerrada en compartimientos estancos. En el caso de una violenta colisión, estos compartimientos podrán inundarse sin poner en riesgo la estabilidad del buque. Mecánicamente el doble casco funciona como una doble T a efectos de la flexión transversal del costado del casco. En algunos casos estas unidades de doble pared pueden prefabricarse en trozos que se unen entre sí mediante los esfuerzos desarrollados por el pretensado, con las ventajas inherentes a la calidad obtenida por estos procedimientos aptos para la ejecución de unos paños de menos de 0,10 m de espesor (figs. 15 y 16).

Este mismo sistema de la construcción por bloques que se solidarizan por la acción del pretensado es el que se ha seguido en la ejecución del dique de Génova y en la construcción de los diques flotantes de hormigón. Uniendo una sucesión de estos elementos se forman extensas plataformas flotantes que pueden destinarse a la constitución de pistas de aterrizaje y despegue o bien a la forma-

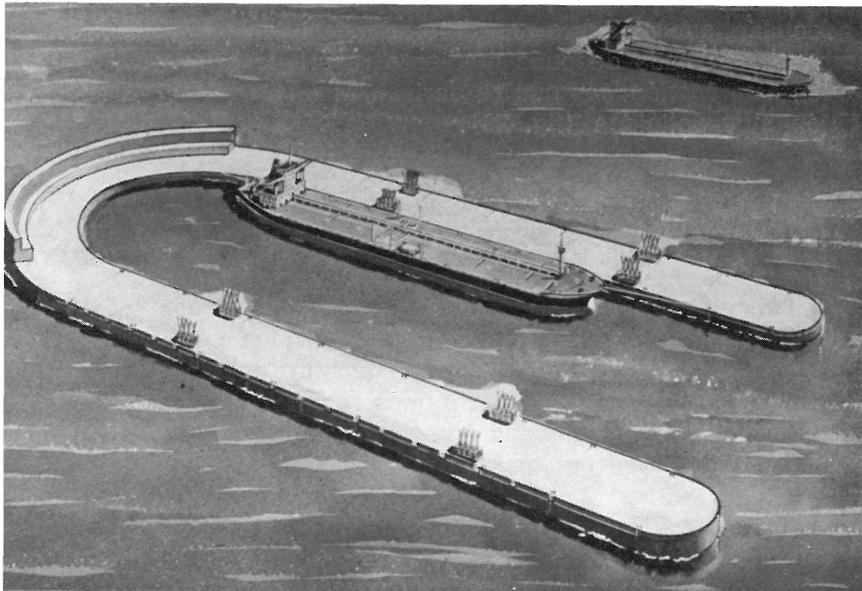


Fig. 17. Proyecto de muelle flotante de abrigo y distribución, constituido por cajones ensamblados de hormigón pretensado.

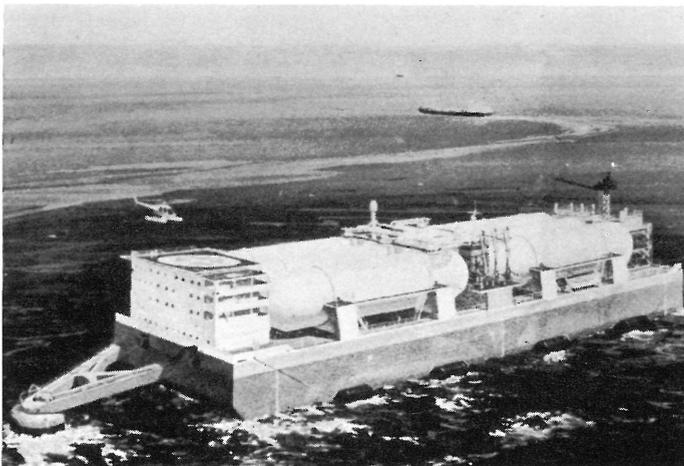


Fig. 18. Planta flotante de licuación y de almacenamiento de gas natural en el Pacífico.

ción de puertos más o menos importantes, en general anclados al fondo por unos amarres que permiten orientarle en la dirección del temporal, con lo cual el rompeolas tiene una altura máxima en un limitado desarrollo del muelle (fig. 17).

Con la excepción de estos casos, singulares por su tamaño, lo más frecuente es la construcción de estas estructuras en un dique más o menos convencional con los medios auxiliares acordes con el tamaño del casco y de la posible repetición de idénticos o similares procesos constructivos en unidades semejantes.

Un caso típico de repetición es el de la construcción, en la costa del Pacífico, de gabarras destinadas al almacenamiento de gas natural licuado en depósitos cilíndricos de aluminio, de eje horizontal, algunas de las cuales, las unidades más grandes, incluyen una planta de licuación. Dado que estas instalaciones están destinadas a cumplir su misión en determinados puntos del Pacífico, su disposición general es paralelepípedica, es decir, sin proa ni popa, ya que su transporte será muy infrecuente y sólo en especiales distribuciones de carga y en condiciones meteorológicas particularmente favorables (figs. 18 y 19).

Son muchas las regiones del globo en las cuales la construcción es particularmente difícil, bien por sus especiales condiciones climáticas o por la escasez de mano de obra, generalmente asociada a dificultades en el suministro de materiales. En estos casos, la solución de construir una plataforma flotante, en una zona adecuada, que albergue una determinada instalación industrial y que una vez terminada totalmente se traslada después mediante remolque hasta el punto del litoral elegido, puede tener las ventajas económicas que se derivan de una producción cuyos plazos de ejecución y costes están muy definidos (fig. 20).

Según el número de unidades que haya que construir y según sus dimensiones y analogías entre unas y otras, estas áreas de construcción tendrán una ubicación más o menos definida. En un principio, bastará con localizar una zona del litoral que sea inundable con el calado suficiente para poder maniobrar la estructura construida. La magnitud de este calado, la previsible repetición de esta maniobra y la capacidad de la maquinaria auxiliar que se precisa disponer, definirán las características de estos astilleros de estructuras flotantes de hormigón. En unos casos se requerirán unos diques secos completos y unos muelles de armamento dotados de poderosos medios de elevación. En otros bastará con la excavación de unos recintos defendidos con una ataguía y con la cota de su plataforma a la profundidad conveniente para alcanzar el calado requerido, sin otros medios auxiliares que los habituales en la construcción de estructuras de hormigón.

Del mismo modo que la técnica del pretensado permite la sólida unión de unos elementos o módulos prefabricados con otros, también la técnica de los hormigones ligeros juega un importante papel a la hora de decidir el tipo ideal de estructura.

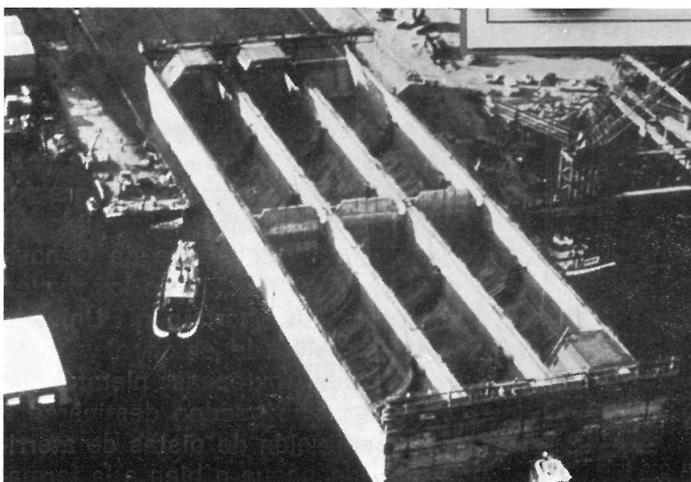


Fig. 19. Construcción de gabarras de hormigón pretensado para constituir el casco de plantas flotantes para licuación y almacenamiento de gas natural.

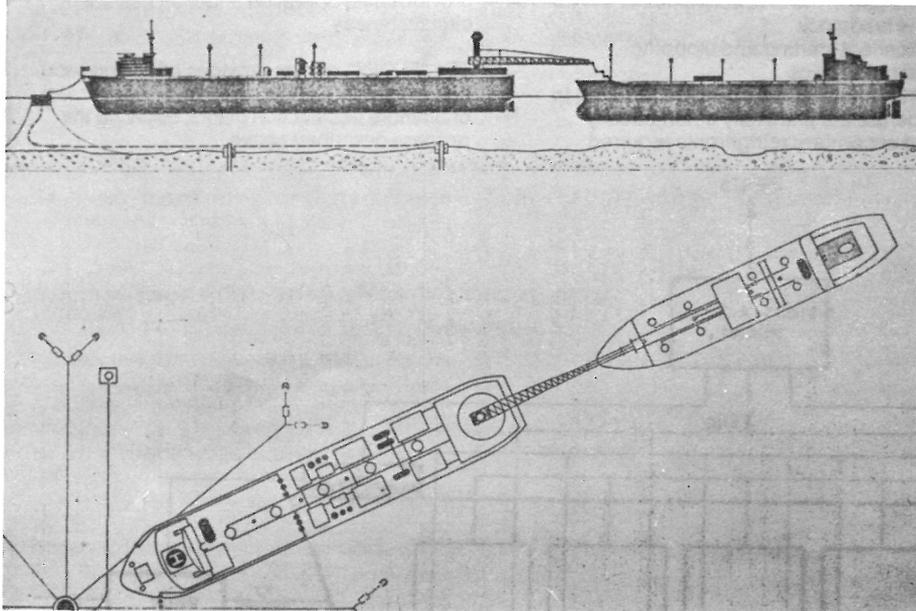


Fig. 20. Instalación industrial flotante.

En este caso particular, el término «hormigón ligero» está vinculado al de hormigón de alta resistencia. No se trata de los hormigones ligeros habitualmente empleados en la construcción de viviendas como barrera térmica y acústica de muy bajo peso específico, pero también de escasa resistencia mecánica. Los hormigones a los cuales hacemos referencia son los que algunas veces se denominan como semipesados, es decir, hormigones cuya densidad oscila alrededor de  $1,85 \text{ kg/dm}^3$  y que, utilizando como árido grueso arcillas expandidas, alcanzan resistencias del orden de los  $50 \text{ N/mm}^2$  en probeta cúbica a los 28 días. Su alta dosificación de cemento, entre los  $380$  y los  $420 \text{ kg/m}^3$ , su baja relación agua-cemento, su adecuada granulometría, que ahora puede fijarse de un modo muy preciso por la homogeneidad en tamaños del árido industrializado y su enérgica consolidación, deben conducir a la obtención de unos hormigones cerrados y compactos, altamente impermeables, como conviene a la misión encomendada, resistentes a la acción agresiva de las aguas marinas y con unas magníficas propiedades de aislamiento térmico. El reducido tamaño del árido ligero,  $8$  ó  $16 \text{ mm}$ , simplifica la colocación de las masas vertidas, envolviendo con facilidad la densa armadura con recubrimientos de  $20$  a  $25 \text{ mm}$  situadas en el interior de unas paredes de escaso espesor.

La arena para estos hormigones también deberá ser de alta calidad, limpia y resistente. La arena de playa queda proscrita a causa del fuerte contenido de cloruros que impregna su superficie. Sólo en casos especiales podrá utilizarse después de comprobarse que, mediante un enérgico lavado con agua dulce, el porcentaje de sales disueltas es inapreciable.

Con el fin de alcanzarse las severas condiciones de durabilidad que se exigen para estos hormigones en contacto con el mar, el cemento utilizable deberá ser un portland, de calidad 450 o superior, cuyo contenido de aluminato tricálcico sea inferior al  $10 \%$ , pero superior al  $5 \%$ . La experiencia indica que estos cementos, con las dosificaciones antes indicadas, proporcionan normalmente un satisfactorio comportamiento a lo largo del tiempo en este tipo de estructuras. Por debajo del límite inferior, la durabilidad del hormigón sigue manteniéndose, pero al reducirse la alcalinidad disminuye la protección que el aluminato tricálcico ejerce sobre las armaduras proporcionándoles la adecuada pasivación anticorrosiva.

Desgraciadamente la técnica de los hormigones ligeros no está en España todo lo desarrollada que fuera de desear. Para ser sinceros deberíamos decir que actualmente estamos en los principios de sus aplicaciones y que son pocas las instalaciones nacionales que fabrican las arcillas expandidas. Fuera de nuestras fronteras su empleo ha sido mucho más dilatado y amplio, pudiéndose leer en la bibliografía sobre el tema todo tipo de realizaciones, algunas de ellas tan

espectaculares como el hangar para la Lufthansa en Frankfurt. No obstante, forzoso es reconocer que, por tratarse de una técnica relativamente moderna, estamos faltos de la experiencia a largo plazo. Concretamente sabemos que los módulos de elasticidad del hormigón son más bajos que de costumbre, y más grandes las deformaciones lentas, como cabía suponer.

Esta circunstancia hace que las pérdidas de pretensado sean mayores que en los hormigones normales, lo cual implica la necesidad de mantener una prudente actitud a la hora de definir los niveles de pretensado.

En cierto modo esta situación, característica de toda técnica moderna, no debe desanimarnos encerrándonos en una posición de desconfianza y de espera. Si queremos incorporarnos a las corrientes del momento actual no debemos permanecer inactivos, sino, al contrario, adoptar la actitud dinámica de participación en los estudios que están en marcha y desarrollar nuestros propios ensayos con la amplitud de miras necesaria para que los resultados que se obtengan no sólo sirvan para refrendar la calidad de nuestros productos, sino que añadan algo al quehacer de los demás.

Y para eso no basta con el entusiasmo de unos pocos. Hace falta una generosa colaboración por parte de todos los que nos sentimos comprometidos con esta técnica del hormigón y con la herencia de inquietudes que nos legó aquel hombre extraordinario que se llamó Eduardo Torroja.

## résumé

### Nouveaux usages du ciment

Alfredo Páez Balaca,  
Dr. ingénieur des Ponts et Chaussées

Dans cet article, l'auteur traite l'évolution des différents systèmes de transport et d'emmagasinage du pétrole sous-marin et ses dérivés (gaz de pétrole et gaz naturel) et signale l'importance de l'utilisation de bateaux en béton.

Etant donné le grand coût des pipe-lines, on est passé des réservoirs construits sur terre ferme aux réservoirs en béton précontraint qui peuvent mouiller à grande profondeur ou être ancrés au fond pour se maintenir flottants, et être démarrés pour leur déplacement.

Le transport et l'emmagasinage du gaz liquéfié nous fait voir les avantages du béton précontraint sur l'acier, car celui-ci devient fragile à des basses températures, tandis que celui-la augmente sa résistance.

Puis, l'auteur analyse les différentes formes et sections possibles et souligne la grande importance de la solution de la double coque en béton avec un isolant de perlite.

Finalement, il fait une étude des «bétons légers», non pas des bétons classiques utilisés comme des isolants thermiques et acoustiques, mais de ces bétons mi-lourds réalisés avec des argiles expansées, du sable de haute qualité et du ciment P-450, dont la technique en Espagne n'est pas aussi développée qu'il serait souhaitable.

## summary

### New uses of cement

Alfredo Páez Balaca, Dr. civil engineer

In this article, the evolution of the different systems of transporting and storing submarine oil and its by-products (petroleum gas and natural gas), is dealt with stressing the importance of the use of concrete boats.

Due to the high cost of oil pipelines, we have passed from tanks built on land to prestressed concrete tanks which can be berthed at great depths or anchored to the bottom to keep them afloat, it being possible to unmoor them for transferring them.

Transporting and storing liquated gas leads us to see the advantages of prestressed concrete over steel, as the latter becomes brittle at low temperatures, whereas the former's strength increases.

The different forms and possible sections are analyzed, stressing the great importance of the solution of the double concrete hull with perlite insulation.

Finally, a study is made of «light concretes», not the classical types used as thermal and acoustic insulation, but the semi-heavy ones made with expanded clay, high quality sand and P-450 cement, which technique is not yet as developed in Spain as might be wished.

## zusammenfassung

### Neue Verwendungsmöglichkeiten für den Zement

Alfredo Páez Balaca, Dr. Hochbauingenieur

In diesem Artikel wird die Entwicklung der verschiedenen Methoden für den Transport und der Lagerung des sich unter Wasser befindlichen Erdöls und seine Derivate (Erdgas und Naturgas) behandelt und die Wichtigkeit der Anwendung von Betontanker hervorgehoben.

Aus Gründen der grossen Kosten der Oelleitungen, ist man von den Bunkern, die auf Festland errichtet wurden, zu den Spannbetonbehältern übergegangen, die in grossen Tiefen untergebracht sind oder auf dem Meeresgrund verankert werden, um sie schwimmend zu erhalten, wobei die Möglichkeit besteht, sie für ihre Versetzung zu lösen.

Der Transport und Lagerung von Flüssiggas zeigt uns die Vorteile des Spannbetons gegenüber dem Stahl, da dieser bei niedrigen Temperaturen brüchig wird, während der andere dabei fester wird.

Es werden verschiedene Formen und möglich Abschnitte untersucht, wobei die grosse Wichtigkeit der Lösung durch eine doppelte Schicht aus Beton mit Perlitisolierung hervorgehoben wird.

Zum Abschluss wird ein Studium über die Leichtbetonarten, nicht die normalerweise angewandt werden als Wärmeisolierungen und akustische Isolierungen, sondern über diejenigen halbschweren, die aus expandiertem Ton, hochwertigem Sand und Zement P-450 hergestellt werden und deren Technik nicht so weit entwickelt ist in Spanien, wie es man wünschen könnte.