

Estructuras Offshore (mar adentro) de Hormigón

MIGUEL LAMAS PARDO (*) y LUIS MANUEL CARRAL COUCE (**)

RESUMEN En la construcción naval en los últimos años ha dominado el acero como material de construcción, frente al aluminio, el PRFV o la madera. Un material que ha tenido incluso menos repercusión hasta ahora ha sido el hormigón. Sin embargo, los últimos desarrollos de la industria offshore han hecho que el hormigón esté siendo considerado como una clara alternativa al acero, sobre todo por su mantenimiento casi nulo y su resistencia a la fatiga, que lo hacen ideal para este tipo de industria. Dos son los tipos de estructuras offshore de hormigón en desarrollo en la actualidad: las estructuras apoyadas en el fondo (gravity base structures) y las flotantes. En este artículo haremos un repaso a todos esos diseños, intentando averiguar cuál será el futuro de este tipo de estructuras. Sin duda las terminales offshore en hormigón de LNG, muy estudiadas en la actualidad, serán una de sus muchas aplicaciones en el siglo XXI. A su vez, seguirán desarrollándose estructuras offshore de hormigón para la industria de extracción del petróleo y gas. Pero otras estructuras que preveemos que también lleguen a verse serán los aerogeneradores flotantes (similares a los ya existentes apoyados en el fondo), o cualquier otro tipo de estructura que ayude a aliviar la presión urbanística sobre las zonas costeras.

OFFSHORE CONCRETE STRUCTURES

ABSTRACT *In the offshore industry there are two possible materials for the construction of the hull of a structure: the steel and concrete, with the first one widely used until now, as in the rest of the shipbuilding industry of merchant ships, warships, etc. Materials such as aluminum, GRP or timber are used in small units with lengths lower than 100 m, and in less adverse conditions than in the offshore industry.*

Nevertheless, some ships/barges have been built of concrete in the past, but have been rather isolated cases which have not changed the practice in the industry. In the First and Second World War were built by the scarcity of materials, while the series of barges by Alfred A. Yee was a rare exception. Other units were also made in concrete, but almost anecdotal.

Still, the behavior of these concrete structures, especially in terms of maintenance, has been excellent. Therefore, the fact that the concrete has not had an adequate reception so far in shipbuilding, does not mean that it will not be the material best suited for the offshore industry in the future.

The extra displacement and associated fuel costs in concrete ships have been found prohibitive in the past. But the loss of mobility of a concrete hull in relation to a steel hull can be perfectly offset by the advantages offered by the concrete, as the shipping and offshore industry have very different priorities. One of the main differences in these priorities is in terms of maintenance and resistance to fatigue, precisely where the concrete performs better. Ships can easily be drydocked for maintenance and repair; while in the offshore platforms these works have to be done "in situ", so maintenance and fatigue are crucial to them.

Besides these, the concrete has other advantages, according to findings of several studies. And although they are interested in the conclusions that he makes, as they came from people in the concrete industry, the fact that in recent years concrete offshore units have been built proof that in certain cases the benefits to the steel tip the balance toward the concrete. Concrete Gravity Base platforms type "Condeep" have been building since the first unit became operational in 1976, together with a few floating platforms, that in its geometry are similar to those made of steel (barges, semi-submersibles and TLP type platforms).

Some of the concepts in concrete that are being emerging in last years are floating and gravity base platforms for use as offshore LNG terminals and as offshore industrial plants. The life of these barges can be designed up to 200 years, as the floating Nkossabarge, so they can be a good alternative to the construction of these facilities on land, thus avoiding landfills on the coast that degrade the already punished coast in industrialized countries. The challenge is precisely to optimize their capital costs to compete for an offshore installation against a shore facility. The environment will undoubtedly benefit from this great challenge that lies ahead in the XXI century.

Palabras clave: Plataforma offshore, Construcción naval en hormigón, Terminal LNG, Planta industrial flotante, Cajones de hormigón.

Keywords: Offshore platform, Concrete shipbuilding, LNG terminal, Floating industrial plant.

(*) Ingeniero Naval y Oceánico. Estudiante de Doctorado en la E.P.S. Ferrol – Universidade da Coruña (UDC). Email: miguel.lamas@udc.es

(**) Dr. Ingeniero Naval y Oceánico. E.P.S. Ferrol – Universidade da Coruña (UDC). Email: lcarral@udc.es

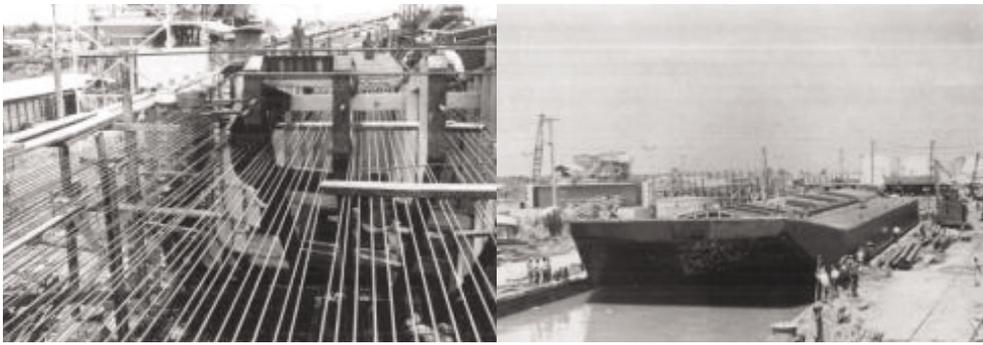


FIGURA 1. Construcción y botadura en 1964 de la primera de las barcasas pretensadas del mundo, diseñada por Alfred Yee (7).

1. INTRODUCCIÓN

Aunque la construcción naval hoy en día emplea acero para prácticamente toda la estructura, hay también otros materiales con bastante aceptación como el aluminio (sobre todo para barcos rápidos), el PRFV (para lanchas de recreo o pequeños pesqueros), o la madera (que ha quedado reducida a su uso en embarcaciones tradicionales). Pero un material que no ha tenido la suficiente aceptación en construcción naval ha sido el hormigón: a pesar de haberse utilizado desde hace años en estructuras marinas fuera de la construcción naval, son contados los casos de buques construidos con este material, y en su mayoría limitados a sencillas barcasas.

Sin embargo, recientemente la industria offshore, como cliente que es de la construcción naval, está redescubriendo las grandes posibilidades que ofrece el hormigón comparado con el acero. Así, está siendo propuesto en cada vez más y más proyectos, como las terminales offshore de LNG, siendo incluso un material más adecuado para este propósito que el acero (1)(2).

Pretendemos con este artículo dar simplemente unas pinceladas sobre el empleo del hormigón en la industria offshore, aún cuando **las aplicaciones marinas del hormigón realmente abarcan más campos como diques, rompeolas, islas artificiales, etc.** Sin embargo estas aplicaciones se restringen a zonas costeras y en aguas de poca profundidad; por ejemplo, el dique flotante de hormigón de más profundidad, el de Mónaco, está a solo 55 m de profundidad (3).

Es por tanto la industria petrolífera offshore la que ha llevado el hormigón a mar abierto y a aguas profundas.



FIGURA 2. Construcción del cajón de hormigón de la terminal LNG "Adriatic" en Algeciras.

2. DEFINICIÓN Y APLICACIONES

Se entiende normalmente por **estructuras offshore (mar adentro) de hormigón** aquellas expuestas a un ambiente en mar abierto. Están diseñadas para permanecer permanentemente o semipermanentemente fijas al fondo del mar (por gravedad, por pilotes o ancladas) o bien permanecer a flote (fondeadas) (4).

Las estructuras offshore de hormigón se usan mayoritariamente en la industria offshore del petróleo como unidades de perforación, extracción, o almacenamiento de petróleo o gas natural. Estas grandes estructuras albergan la maquinaria y equipamiento necesarios para perforar y/o extraer petróleo y gas. Pero pueden tener otros usos especializados como podrían ser las terminales offshore de LNG (5) o como soporte para las turbinas eólicas offshore, sobre todo en aguas profundas (19), tanto en su versión flotante como apoyadas al fondo.

3. BREVE HISTORIA DE LOS BUQUES Y ESTRUCTURAS OFFSHORE DE HORMIGÓN

El uso del hormigón en estructuras marinas se remonta a la antigua Roma y Grecia, y su uso se extiende a aplicaciones diversas como puentes, muelles, diques y faros.

Pero el uso de hormigón como material de construcción de cascos para buques comerciales comenzó a finales del siglo XIX. Las aplicaciones iniciales generalmente eran para su uso en aguas de todo el mundo y consistían en barcasas y pontonas de hormigón. El primer buque para navegación de hormigón armado fue el "Namsenfjord", construido en Noruega en 1917 (4). La escasez del acero hizo que fueran empleados buques de hormigón en la Primera y Segunda Guerra Mundial. Posteriormente, una serie de 19 barcasas hechas en Filipinas por Alfred Yeepara *Lustveco* en los años 1960 tuvieron una gran aceptación y mostraron una gran competitividad frente al acero sobre todo en cuanto a mantenimiento (7).

La primera plataforma de hormigón para la producción de petróleo y gas en el Golfo de Méjico se instaló en 1950; desde entonces, se han construido en aquel área más de 1.000 pequeñas estructuras de hormigón similares (4). Pero la primera gran estructura offshore de hormigón apoyada en su base por gravedad (gravity base structure) se instaló en 1973 en el Mar del Norte: la Ekofisk Tank. Esta marcó un hito en la industria, y desde entonces se construyeron más de 40 estructuras offshore de hormigón para uso en el Mar del Norte, África Occidental, Golfo de Méjico y Mar de Java (8). En España, encontramos las primeras referencias publicadas sobre el tema ya en 1947 en el artículo "Buques con casco de hormigón armado" (9). La terminal LNG "Adriatic", cuyo cajón de hormigón fue construido por Acciona en Algeciras en 2007, es el último gran hito en cuanto a estructuras offshore de hormigón en nuestro país.

4. CARACTERÍSTICAS DEL HORMIGÓN FRENTE AL ACERO

De todos los tipos de hormigón, los de aplicación en construcción naval e industria offshore son dos: el hormigón armado y el hormigón pretensado. Vemos a continuación sus propiedades frente al acero, material empleado mayoritariamente en construcción naval.

4.1. HORMIGÓN ARMADO

El hormigón armado (en inglés *reinforced concrete*) es el que en su interior tiene armaduras de acero, debidamente calculadas y situadas. Este hormigón es apto para resistir esfuerzos de compresión y tracción. Los esfuerzos de tracción los resisten las armaduras de acero. Es el hormigón más habitual.

El hormigón armado tiene muchos menos requerimientos de mantenimiento que el acero, si está adecuadamente ejecutado. Sin embargo, si se carga con tensión, el hormigón desarrollará grietas a lo largo del tiempo, lo que puede causar que las barras de refuerzo se oxiden. Además, sus límites de esfuerzos en tensión restringen su rango de aplicabilidad en la construcción naval, ya que las estructuras marinas, sobre todo las flotantes, están sometidas constantemente a esfuerzos de tensión.

Dada la *resistencia a la fluencia* más alta del acero sobre el hormigón, el soportar una carga dada requiere mucho más hormigón que acero, en términos de volumen. Incluso aunque el hormigón tiene una densidad más baja, esto se traduce en componentes más pesados, aproximadamente en un factor de 2-3 veces más peso para hormigón estándar (10). Aún así, el coste por peso del hormigón es mucho más barato que el acero, por lo que aún pesando más, la estructura de hormigón tendría un coste menor.

4.2. HORMIGÓN PRETENSADO

El hormigón pretensado (en inglés *prestressed concrete* o *tensioned concrete*), es el que tiene en su interior una armadura de acero especial sometida a tracción, con lo que se obtiene un esfuerzo a la tracción mucho más elevado que el hormigón armado habitual. Aunque superficialmente se asemeja al hormigón armado, debería considerarse como un material distinto. Puede ser:

- Pre-tensado si la armadura se ha tensado antes de colocar el hormigón fresco.
- Post-tensado si la armadura se tensa cuando el hormigón ha adquirido su resistencia.

En el hormigón pretensado, el acero tensionado soporta todas las cargas, y el hormigón completa su papel simplemente de protección contra la corrosión y como enlace no térmico (*nonthermal bond*) entre el acero. Debido al hecho de que las

armaduras no necesitan ser soldadas, sino que están incrustadas en el hormigón, puede emplearse un acero de mucha más resistencia; por tanto, el límite a la fluencia de estas armaduras son de un factor unas 8 veces mayores que aquellos de una placa de acero típica.

4.3. APLICABILIDAD DEL HORMIGÓN EN CONSTRUCCIÓN NAVAL

Por tanto, de lo anterior sacamos las siguientes conclusiones referentes a la aplicación del hormigón en construcción naval:

- **Las construcciones cilíndricas** que están cargadas por una fuerza dominante de compresión, tales como las los submarinos, podrían construirse de hormigón reforzado. De hecho, hay ejemplos de construcción de pequeños submarinos en hormigón (11).
- **Las estructuras elongadas tales como barcazas y grandes plataformas**, que podrían experimentar grandes fuerzas netas de tensión, pueden ser realizadas de una forma efectiva solamente con hormigón pretensado. De hecho, todas las estructuras offshore de hormigón en funcionamiento están construidas usando hormigón pretensado.

5. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL HORMIGÓN FRENTE AL ACERO EN CONSTRUCCIÓN NAVAL

Las estructuras offshore de hormigón muestran un comportamiento excelente:

- Tienen una durabilidad muy elevada.
- Están construidas de material casi libre de mantenimiento.
- Mejor comportamiento en movimiento, en el caso de estructuras flotantes.
- Son adecuadas para ambientes duros y/o árticos, como regiones heladas y sísmicas.
- Pueden portar pesados "topsides" (equipos y sistemas petrolíferos sobre cubierta).
- Ofrecen capacidad de almacenamiento en el interior de la propia estructura.
- La mayoría de las plataformas apoyadas en el fondo (gravity base) no necesitan un anclaje adicional por las grandes dimensiones de sus apoyos y peso extremadamente elevado, por lo que son adecuados para suelos blandos y poco firmes.
- Resistencia al fuego.
- Libres de chispas, por lo que los hace ideal como almacenaje para cargas inflamables y explosivos y por tanto para



FIGURA 3. Instalación de armaduras pre-tensada en la barcaza Nkossa (12).

funcionar como barcasas para bunkering, FPSOs, Terminales LNG, y en general para la industria offshore del petróleo y gas.

- La contaminación por corrosión y otros daños a la carga se minimizan por la baja conductividad térmica y resistencia a la corrosión del hormigón (7).

Muchas de estas ventajas han sido documentadas en el pasado con estudios para buques y barcasas (8):

- Costes de mantenimiento más bajos.
 - Este hecho está respaldado por estudios de muelles flotantes de hormigón durante los años 1970, mostrando ahorros drásticos, requiriendo menos del 10% de mantenimiento que muelles similares hechos completamente en acero.
 - Sare y Alfred A. Yee documentaron unos costes de reparación y mantenimiento insignificantes para las 19 barcasas de hormigón pre-tensionado construidas en las Islas Filipinas durante 1964-66. El coste anual medio de mantenimiento de las barcasas de hormigón se encontró que era alrededor del 1/3 parte comparada con las barcasas de acero (8). Estuvieron trabajando ininterrumpidamente durante 35 años sin diqueado (7).
- Costes de fabricación más bajos.
 - El coste de fabricación de las barcasas de Alfred A. Yee mostraron un ahorro del 16% comparadas con las mismas en acero.
- Tiempo de inactividad de la estructura.
 - En las barcasas de Yee, en el periodo 1974 a 1975, el tiempo total de inactividad por barcaza flotante por año para trabajo de mantenimiento era 6 días para las estructuras de hormigón. Las barcasas similares de acero tenían un tiempo medio de inactividad de 24 días.
- Mayor vida de la estructura.
 - En una estructura de hormigón, no hay un coste adicional significativo relacionado con el extensión de la vida de diseño por ejemplo de 30 años a 50 ó 70 años. Una

razón es el hecho de que el hormigón reforzado y pre-tensionado no es sensible a la fatiga.

- Mejor comportamiento en la mar.
 - Las características de movimiento de un casco de hormigón son normalmente mayor que para un flotador de acero diseñado para el mismo propósito. Esta conclusión está basada en informes de capitanes de buques (de los mencionados buques de la Segunda Guerra Mundial y de las Barcasas de Yee), varios estudios y recientemente confirmado por tanto análisis y ensayos con modelos para grandes unidades offshore FPSO (BP Atlantic Frontier Stage 2 / Schiehallion, eslora del casco 280 m). El peso y calado normalmente algo más grandes tienen un efecto en la mejora de las características de movimiento.

Sin embargo, lo que no se mencionaba es que el mayor peso añadido de hormigón frente a una estructura similar en acero, aumentaba el desplazamiento y en consecuencia el consumo del buque. Esta fue la principal razón de que no se construyesen buques en acero.

Otra de las ventajas del hormigón es su buen comportamiento térmico para almacenar líquidos criogénicos, como el LPG y el LNG, que se almacenan a temperaturas desde -40°C a -160°C respectivamente, y son muy inflamables. Los cascos de hormigón pretensado tienen muchas ventajas sobre el acero para contener tales líquidos criogénicos incluyendo excelente resistencia a temperaturas criogénicas e impactos por choques.

La Tabla 1 resume las conclusiones de un estudio (13), hecho para comparar terminales flotantes LNG de hormigón y de acero. Podemos observar las mismas ventajas ya mencionadas anteriormente, unidas a su buen comportamiento para almacenar líquidos criogénicos.

En referencia al mantenimiento, estudios hechos recientemente en estructuras offshore de hormigón (15) también muestran un proceso de degradación inherente a cualquier estructura en alta mar, muchas de las causas son comunes al acero, y otras propias del hormigón. Así encontramos: degra-

Ventajas para casco de hormigón	Ventaja para casco de acero
Comportamiento criogénico superior	Fabricación en astilleros existentes (*)
Buena separación de procesado/almacenamiento	Potencialmente, el coste más bajo para una sola unidad
Reducido tiempo de inactividad debido a inspecciones	Ingeniería tradicional y conocimientos muy consolidados
Costes de mantenimiento reducidos	Proceso constructivo con años de experiencia, tradicional
Economías de escala	Disponibles más fabricantes de acero
Buena Resistencia al impacto	Disponible más diseñadores de acero
Centro de gravedad bajo/Buen comportamiento en el mar/Movimientos reducidos	La mayor flexibilidad reduce los esfuerzos térmicos
Excelente Resistencia a la Fatiga	No Sujeto a daño por congelamiento-deshielo
Momento de Inercia elevado	No se requiere tensionado de la armadura
Respuesta térmica más baja/Mejor aislamiento	Impermeable al Gas y Líquidos
Resistencia a la fatiga y propagación de grietas	Similar a numerosos buques LNG/LPG
Resistencia al pandeo	No requiere membrana

TABLA 1. Ventajas de un casco de acero y uno de hormigón en una terminal LNG (13). (*) Esta es una de las mayores desventajas frente al acero, ya que si no hay una zona preparada para tal fin, el coste de crear un dique para construir una sola unidad de hormigón dispara el coste total del proyecto. Este depende del tamaño, el suelo, la profundidad, etc; pero puede ser del orden de los 8 mill\$ (8).



FIGURA 4. Dique en la costa de Nigeria para fabricar plataformas offshore de hormigón. En construcción y en operación (14).

dación química, corrosión de la armadura de acero, corrosión de la armadura pretensada, fatiga, impacto de buques, caída de objetos, degradación bacteriana, efectos térmicos, pérdida de presión, erosión y liquidación, etc. Por lo que no se libran de daños y es necesario un cierto mantenimiento, aunque menor que el acero, para reparar los mismos.

6. EJECUCIÓN Y CALIDAD DEL HORMIGÓN EN ESTRUCTURAS OFFSHORE

La calidad del hormigón empleado en las plataformas offshore así como su proceso constructivo tiene unos requerimientos más exigentes que en edificación residencial, pero no mucho más que los que pueda haber en estructuras civiles como puentes, grandes edificios, muelles, etc. En general, las prácticas recomendadas para la construcción con hormigón, incluyendo la selección de material y proporciones de mezcla, que existen en los varios códigos de construcción, especificaciones y estándares de la mayoría de los países desarrollados son suficientes para el uso en la industria offshore de hormigón. Simplemente, y debido a la exposición al ambiente marino, pueden requerirse algunos valores diferentes para la proporción de agua-cemento, contenido en cemento del material, y/o en el recubrimiento del hormigón sobre las armaduras, pero estos valores están bien documentados.

Como la mayor parte de los otros tipos de hormigones, los hormigones usados para estructuras offshore están hechos normalmente con materiales ejecutados por trabajadores locales en cumplimiento con las guías y especificaciones locales.

Así, pueden variar ampliamente en calidad. Dependiendo de su aplicación particular, sus esfuerzos pueden variar desde los 25 a los 65 MPa. A todos ellos se les requiere que sean extremadamente duraderos, ya que una vez que una estructura de hormigón se sitúa en el mar, el mantenimiento se vuelve muy difícil debido al entorno hostil y además es muy caro. De hecho, las estructuras offshore de hormigón tienen diseños de vida de 50 a 70 años (4) e incluso de 200, como la barcaza *Nkossa*.

6.1. ESPECIFICACIÓN DEL HORMIGÓN

Para plataformas offshore de hormigón hay esencialmente dos tipos de hormigón que pueden usarse:

1. Hormigón de densidad normal (*normal density*, ND).
2. Hormigón agregado de peso ligero (*light weight aggregate*, LWA).

El hormigón LWA tiene alrededor de un 20% menos de densidad que el hormigón ND, lo que supone una ventaja para las plataformas flotantes. Sin embargo, éstas adquieren su estabilidad por el peso, por lo que necesitan bajar el centro gravedad, y consecuentemente, tener peso en su base. Por tanto, podría ser beneficioso usar hormigón ND en la parte más baja y LWA en la parte más alta. Esta ventaja debe ser comparada a la posible desventaja de tener que tratar con dos materiales diferentes tanto en la fase de ingeniería como en la de construcción. En estudios de viabilidad hechos (8) se recomienda que el casco esté hecho en hormigón ND grado C60 y hormigón LWA grado LC55, tal y como se define en el stan-



FIGURA 5. Actividades de construcción típicas de una plataforma offshore de hormigón: (14) y (16).

dard noruego NS3473. Estas calidades de hormigón han sido probadas en muchos países y se consideran bastante sencillas de ejecutar. Para reforzados ordinarios y pre-tensados se recomiendan los grados KT500TE (NS 3570) y St 1570/1770 (EU-RONORM).

6.2. MÉTODOS DE CONEXIÓN DE ACERO/HORMIGÓN

Las conexiones acero/hormigón están basadas normalmente en el principio de embutir el acero dentro del hormigón por detrás de las capas de acero de refuerzo, de manera que los elementos embutidos forman parte de la estructura. Para alcanzar las capas posteriores de reforzado pueden usarse clavijas con cabeza, varillas de acero o similares. Ejemplos de conexiones de acero/hormigón son las conexiones entre el casco y los “topsides”, las guías y consolas de amarre y remolque, soportes de tubería, soportes para elementos de cubierta, etc (8).

6.3. REGLAMENTOS DE APLICACIÓN

Existen varios reglamentos en la industria específicos para el diseño de plataformas de hormigón. Estos incluyen (17):

- Reglas gubernamentales: en EE.UU., Reino Unido y Noruega, que las aplican en sus aguas jurisdiccionales.
- Estándares normativos: Canadian Standard, ISO, Nors Standard (con la *NS 3473 Concrete Structures*).
- Certificaciones de clase: *Lloyd’s Register* o *Det Norske Veritas*. Este último tiene un reglamento específico para estructuras de hormigón flotantes: *DNV-OS-C502 Offshore Concrete Structures* (18). Explícitamente dice que puede

aplicarse a “*Floating concrete structures for production of oil/gas. The structure may be of any type floating structure, i.e. Tension leg platform (TLP), Column stabilize dunnits and Barge type units*”, que son los tipos de estructuras flotantes de hormigón existentes en la actualidad, como veremos más adelante.

- Especificaciones de compañías petrolíferas: cuando las anteriores no son suficientes. Un ejemplo es la *NSD 001*, de Statoil (Noruega).

7. TIPOS DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN EN LA INDUSTRIA OFFSHORE

Las estructuras offshore de hormigón normalmente se clasifican en dos grandes tipos:

- Estructuras Apoyadas en el Fondo (*Gravity Base Structures, GBS*)** ó fijas. Aunque muchas ellas también requieren tener una cierta flotación en varias etapas de su vida, para facilitar su traslado y desmantelamiento, por lo que a veces se llaman “semiflotantes”.
- Estructuras Flotantes.** Ya que es una clasificación muy simplificada, dentro de estos dos tipos encontramos a su vez una enorme variedad y versatilidad, y cada autor las subdivide a su vez de forma distinta. Nosotros vamos a establecer aquí esta subdivisión tratando de recopilar y aunar las hechas por varios autores distintos (4)(19)(20)(17).

En la Figura 6 se muestran una plataforma GBS tipo “Condeep” y una Flotante tipo “TLP”.

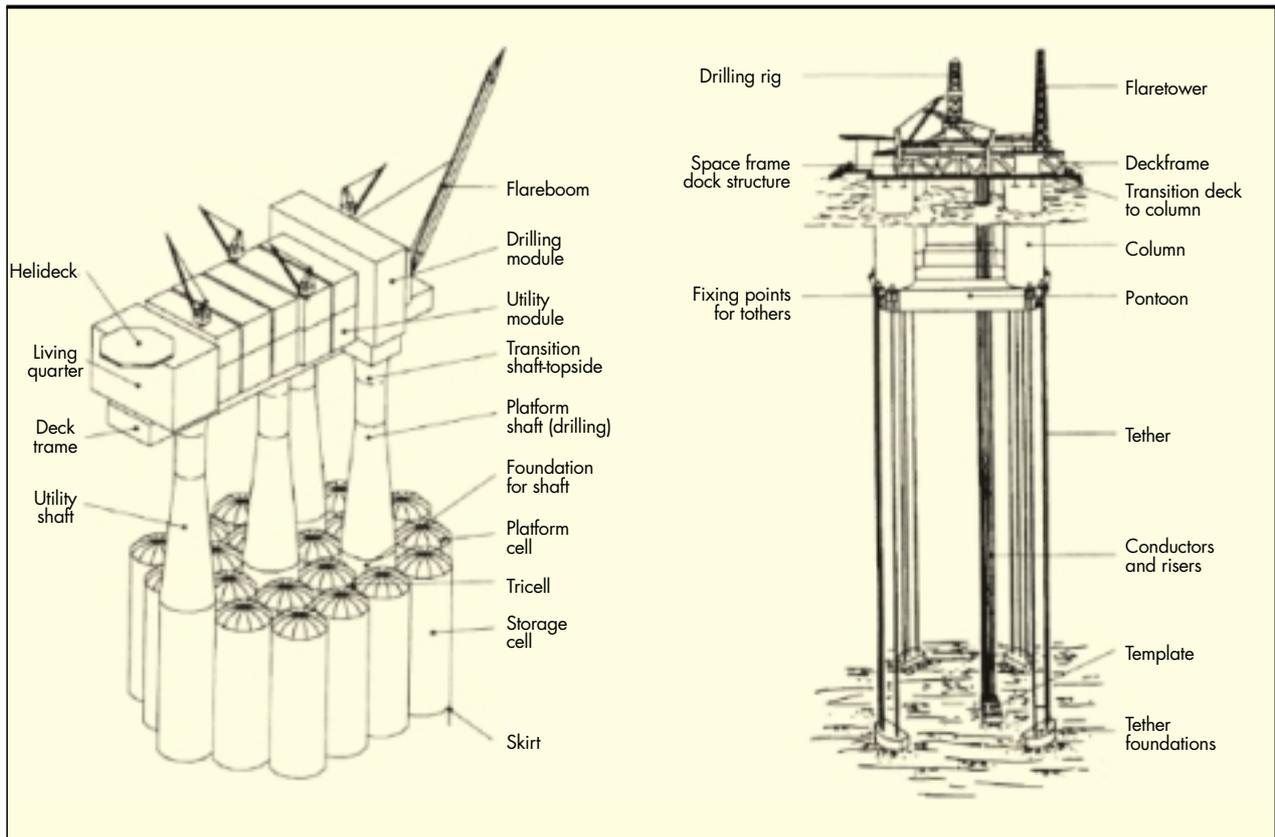


FIGURA 6. Plataforma apoyada en el fondo tipo “Condeep” y flotante tipo “TLP” (17).



FIGURA 7. Rompeolas construidos por separado y en construcción rodeando la estructura.

7.1. ESTRUCTURAS APOYADAS EN EL FONDO – GRAVITY BASE STRUCTURES (GBS)

Las estructuras de hormigón apoyadas en el fondo (*Concrete Gravity Base Structures*, CGBS ó simplemente GBS) dirigen sus cargas de apoyo directamente sobre las capas superiores del suelo que las soporta. El cajón proporciona flotabilidad durante la construcción y remolque y actúa a su vez de apoyo estructural en la fase de operación. Además, el cajón puede usarse como volumen de almacenamiento para petróleo y otros líquidos (19).

La mayoría de las plataformas tipo GBS descansan en un suelo de arena densa con una faldas ó *skirts* (ver figura anterior) de acero cortas que penetran en la arena para protección contra la corrosión. Para terrenos blandos, se requieren unas faldas más profundas. Las condiciones del terreno con arcilla muy blanda, requieren que las faldas penetren hasta las capas más duras del terreno (8). Por tanto, El estudio del apoyo en el fondo es uno de los mayores inconvenientes de estas estructuras sobre todo cuando este no es firme.

En cualquier caso, su empleo está restringido a aguas someras, siendo la *Troll A* “*Condeep*” con 303 m de profundidad, la que ha alcanzado la mayor profundidad. (8). Hoy en día sin embargo se limitan a aguas mucho más someras, 25-30 m, siendo la opción flotante la más adecuada (14).

7.1.1. Tipo Tanques Cilíndricos

La primera plataforma offshore de hormigón en el Mar del Norte fue la *Ekofisk*, que fue construida en 1973 según el concepto de la empresa francesa-canadiense *CG DORIS* (Compagnie General pour les Developpements Operationelles des Richesses Sous-Marines) para *Phillips Petroleum*. El diseño consiste en un voluminoso cajón formado por tanques cilíndricos que una vez unidos forman una sola estructura que es a su vez la base para la cubierta superior. Está apoyado en el fondo del mar y rodeado a su vez de un rompeolas exterior, construido en dos piezas.

Le siguieron en el Mar del Norte tres conceptos adicionales (*Frigg CDP-1* en 1975; *Frigg MP-2* en 1976; *Ninian Centre* en 1978) y otro en Canadá en 1997 en el Campo *Hibernia*.

7.1.2. Tipo Condeep y evoluciones posteriores

7.1.2.1. Tipo Condeep

El concepto *Condeep* (*concrete deep water structure*) fue el más popular durante un periodo de tiempo. Estaba formado por una base de celdas circulares y de una a cuatro columnas huecas (ejes), de forma que tenía la ventaja de tener en la zona de mayor impacto del oleaje una forma esbelta. La cu-

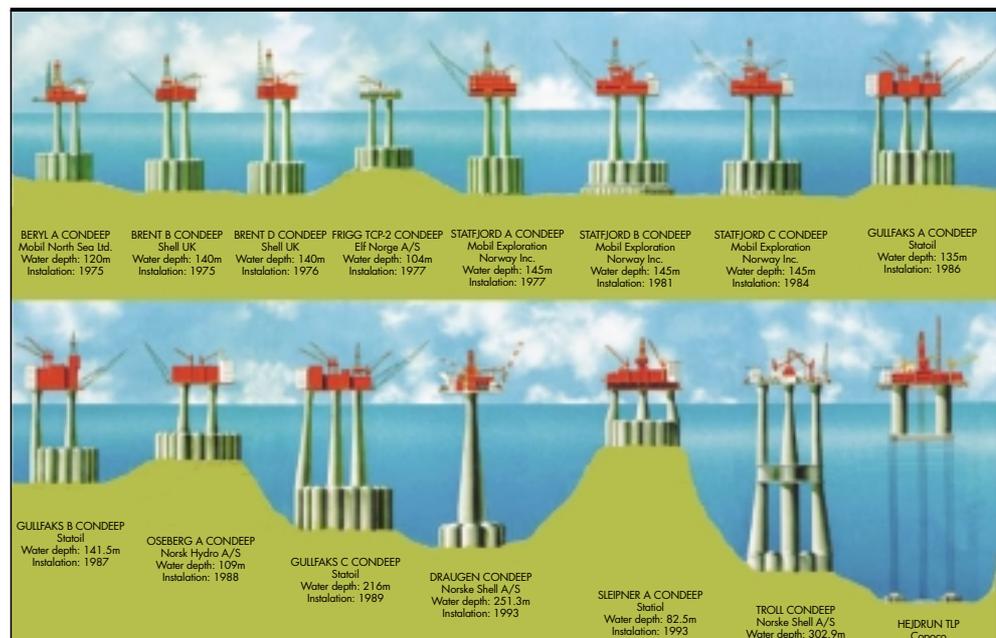


FIGURA 8. Las 14 plataformas “Condeep” y la tipo “TLP” construidas por Aker Kværneren Hinna (8).

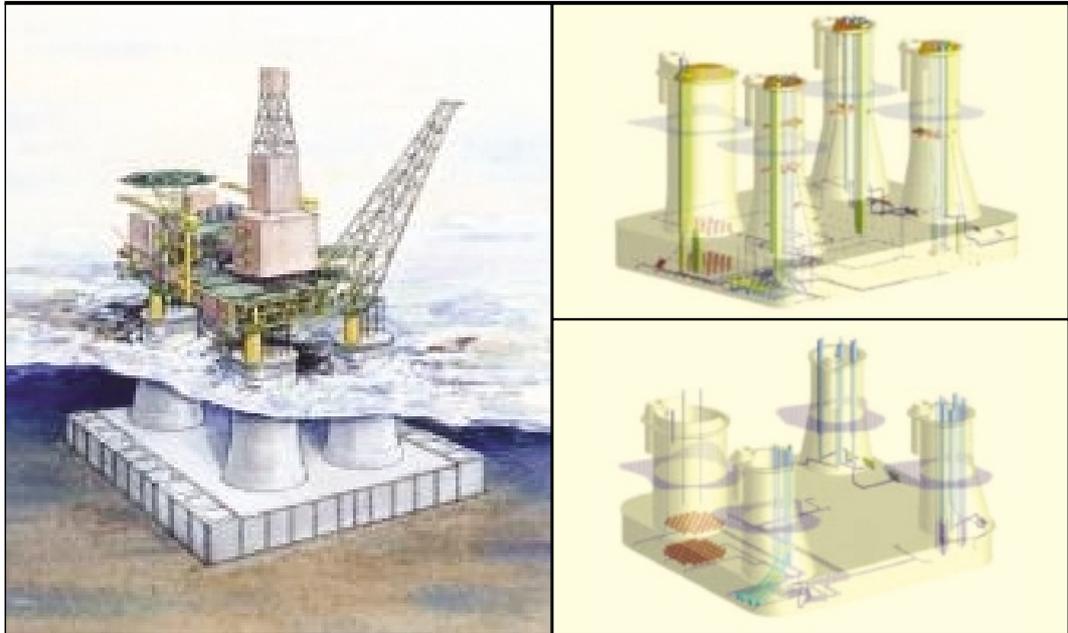


FIGURA 9.
Evoluciones del
concepto "Condeep"
(21)(8). Plataforma
PA-B. Plataforma
Lunskoyede. Arup.

bierta superior no formaba parte de la estructura en sí de hormigón. En su mayoría estaba hecho de hormigón post-tensionado (20).

Entre 1975 y 1995 se instalaron un total de 14 "Condeeps" en el Mar del Norte (17), con profundidades de entre 104 m a 302,9 m. El "astillero" de Aker Kværner en Hin (cerca de Stavanger, Noruega) fue en encargado de construirlas. En la figura siguiente se muestran esas 14 plataformas "Condeep".

7.1.2.2. Evoluciones posteriores

Otros diseños de otras compañías estaban basados en los mismos principios, excepto que las celdas en el cajón de la base eran rectangulares: cuatro plataformas realizadas en el Mar del Norte de 1976 a 1978, y también la "BP Harding" en aguas de Reino Unido, 1995, y "South Arne" en la plataforma continental danesa, 1999 (17).

7.1.2.3. Proyecto Sakhalin II de Arup

El proyecto más reciente de evolución de la "Condeep" con celdas de base rectangular es el diseño de Arup para Exxon Mobil en el Proyecto Sakhalin II (Rusia). En la Figura 9 se muestra el diseño de las dos Concrete Gravity Substructure (CGS)

diseñadas por Arup. La base era de 90 m x 100 m, con un calado de 12 m. (21)(8).

7.1.2.3.1. Tipo barcazas

Podríamos definir una estructura tipo barcaza como un buque flotante con sus costados casi verticales y una forma casi rectangular en el fondo. La proa y la popa pueden, o no, ser rectas. Tal y como se definen, estas estructuras tienen por objeto operadas a flote ya sea temporalmente o permanentemente. Pero algunas barcazas, no operan a flote, sino que son remolcadas a un lugar de despliegue, hundidas al fondo, y reflotadas en una fase más tardía (22). Mostramos dos ejemplos de estas últimas.

7.1.2.3.1.1. CIDS (Concrete Island Drilling System), 1984.

La plataforma Concrete Island Drilling System (CIDS), fue construida en 1984 con elementos prefabricados de hormigón pre-tensados para soportar las presiones severas del hielo en el Ártico. Se utilizó el sistema patentado Honeycomb (69) de Yee Precast Design Group Ltd. Este tipo de plataforma reemplaza la construcción de islas hecha con grava, cuya construcción costaba en su momento unos 100 mill\$, tanto si el petróleo se



FIGURA 10. Sistema
Honeycomb y
plataforma CIDS en
operación (24).

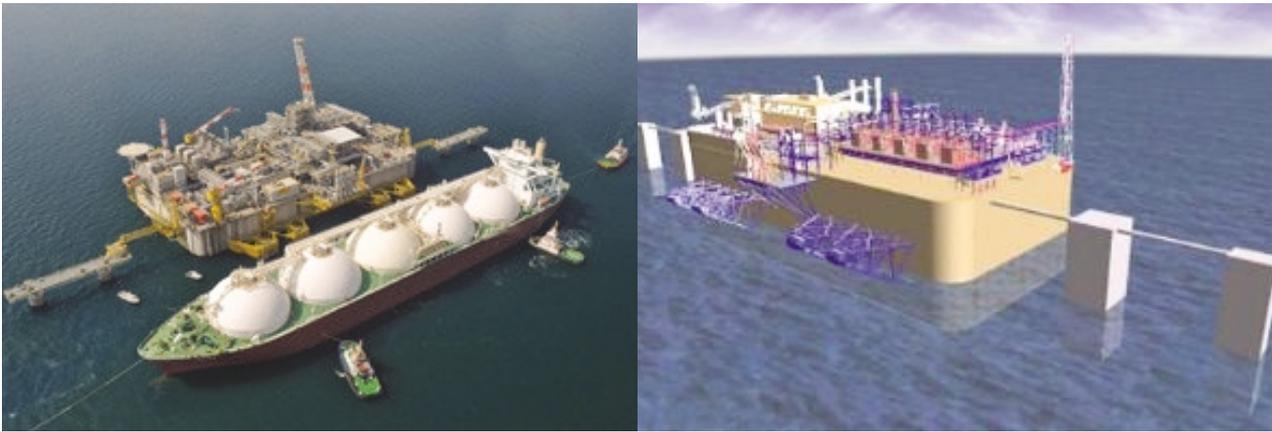


FIGURA 11. Adriatic LNG Terminal (25).

había encontrado como si no. En contraste, la CIDS costó solamente 75 mill\$ y se reusaba para explorar numerosas localizaciones a lo largo de la costa norte de Alaska y Rusia sin haber mostrado ningún deterioro. Se lastraba y se fondeaba allí donde hiciera falta sin dejar huellas una vez que abandonaba el lugar (16).

7.1.2.3.1.2. Adriatic LNG Terminal

Es la primera terminal de gas offshore que se ha instalado en el mundo. La terminal consiste en un cajón de hormigón pretensado apoyado al fondo (GBS), de 180 m de longitud, 88 m de ancho y 47 m de altura, cuyo presupuesto fue de más de 200 millones de euros. Toda la estructura de hormigón está fuertemente reforzada por hormigón armado y pretensado. Fue ejecutado en 2007 por Acciona-Infraestructuras, subcontratada por Aker Kvaerner quien se encargó de su diseño, remolque final desde Algeciras al Adriático (a 17 km de las costas venecianas) y de su puesta en funcionamiento y entrega (5).

7.2. ESTRUCTURAS FLOTANTES

Puesto que el hormigón es bastante resistente contra el agua salada y mantiene los costes de mantenimiento bajos, las estructuras flotantes de hormigón se han vuelto bastante atractivas para la industria del petróleo y gas en las últimas décadas. Las plataformas flotantes temporalmente como las tipo "Condeep" flotan durante la construcción y remolque, pero finalmente se sitúan en el suelo marino. Las estructuras de hormigón flotantes permanentemente se usan en el descubrimiento de depósitos de gas y petróleo para producción, como unidades de almacenaje y descarga y también en algunos casos como sistema de elevación de cargas pesadas.

Los diseños comunes en las estructuras flotantes de hormigón son del tipo barcaza/ buque monocasco (como los FPSO y FSO), las estabilizadas por columnas (tipo semisumergible y TLP), así como las terminales flotantes, por ejemplo para LNG. Son por tanto diseños empleados y probados ampliamente en la industria offshore que simplemente usan para la construcción del casco hormigón en vez de acero.

Son sin embargo limitados los casos en los que se han llevado a cabo estos diseños en hormigón. Así, tipo Semisumergible y tipo TLP solamente hay una de cada, siendo las tipo barcazas las de más implantación, aunque también en contadas unidades en lo que a industria offshore se refiere.

7.2.1. Tipo Semisumergible y Tipo TLP

La geometría de las plataformas semisumergibles y TLP son muy similares: tienen una pontonas en el fondo y unas columnas para estabilización que atraviesan la línea de flotación para soportar la cubierta de acero. Las diferencias están en el sistema de fondeo fundamentalmente; así, mientras la tipo semisumergible tiene un sistema tradicional de fondeo con anclas-cadenas **en catenaria**, la TLP tiene un sistema de anclaje con tendones de acero fijos **verticalmente** al fondo, que no le permiten los movimientos en sentido vertical. La semisumergible por el contrario puede lastrarse y deslastrarse para variar su calado.

Mostramos a continuación las dos únicas plataformas semisumergibles y TLP hechas en hormigón.

7.2.1.1. Troll B

La plataforma semisumergible Troll B fue diseñada por CG DORIS entrando en funcionamiento en 1995 en aguas de profundidad 335 m.

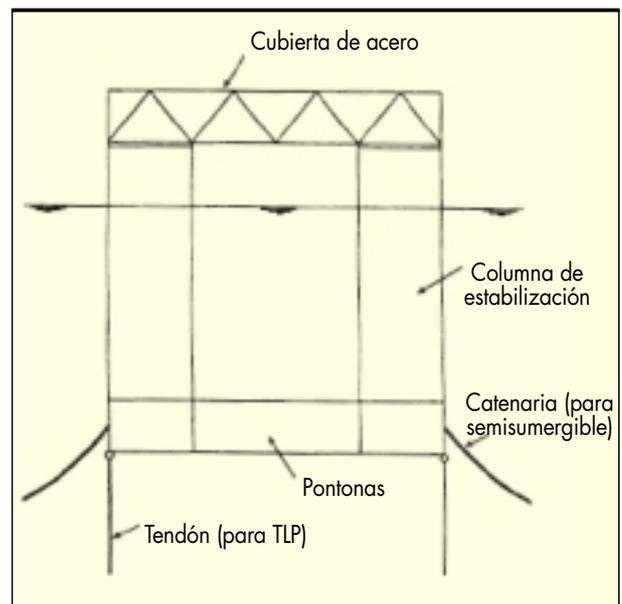


FIGURA 12. Esquema común de una plataforma semisumergible y TLP.



FIGURA 13. Plataforma "Troll B".



FIGURA 14. Plataforma TLP "Heidrun".

7.2.1.2. Heidrun TLP

La plataforma Heidrun TLP fue diseñada por Aker Maritime e instalada en junio de 1995 y está operada por Statoil.

7.2.2. Tipo Barcaza

Ya hemos visto anteriormente la definición de barcaza (22) y cómo las barcasas de Yee construidas en los años 1960 tuvieron un buen comportamiento, principalmente en su casi nulo mantenimiento. Eran barcasas ajenas a la industria offshore. No obstante, sus principios son trasladables a la industria offshore, donde el principal uso para las barcasas/buques monocasco es como FPSO (floating production, storage and offloading) o simplemente como FSO (floating production, storage). Los FPSO y FSO son unidades para almacenaje de petróleo y gas en tanques localizados en el casco del buque, que permanecen flotando fondeadas al fondo pero permitiendo al buque orientarse para buscar las mejores condiciones de viento y olas, permitiendo a su vez el flujo constante de petróleo/gas.



FIGURA 15. Barcaza petrolífera FPSO(13).



FIGURA 16. Terminal flotante LPG "ArdjunaSakti" (26).

7.2.2.1. Ardjuna Sakti LPG

Fue la primera barcaza de hormigón pretensado y también la primera unidad FSO LPG. Fue terminada en 1975 para funcionar como barcaza de almacenamiento de LPG (liquefied petroleum gas) en el Campo Ardjuna (Indonesia). Esta unidad LPG FSO está construida de hormigón reforzado y pretensado conteniendo tanques cilíndricos, tal y como se muestra en las imágenes de la Figura 16.

7.2.2.2. Nkossa

La barcaza "Nkossa" de *Elf Congo* es la barcaza de hormigón pretensado más grande del mundo. Fue construida en los diques de Marsella, Francia, y remolcada a la costa de Congo, donde permanece fondeada a 170 m de profundidad desde 1996. Sus dimensiones son: Eslora 220 m, Manga 46 m, Puntal 16 m, Calado 10 m. Su vida de servicio esperada es de 200 años.

7.2.2.3. Usos de barcasas monocasco fuera de la industria offshore

Como ya hemos comentado, las barcasas monocasco tienen un amplio abanico de usos fuera de la industria offshore. Las aplicaciones actuales incluyen además de barcasas de transporte y almacenamiento, cajones para muelles, plantas industriales, puentes, rompeolas, helipuertos, aparcamientos y garajes, aeropuertos. El éxito actual de la tecnología de las estructuras tipo barcaza de hormigón serán incluso más diversificada y ampliadas en el futuro (22).

Un ejemplo, es la *Rofomex I*, construida en 1980, que alberga una planta de procesamiento de fosfatos, diseñada para una vida ininterrumpida de 80 años. Fue también la primera barcaza con el sistema Honeycomb de Yee.

7.2.3. Conceptos novedosos

Aunque como hemos visto en anteriores apartados, el uso de estructuras flotantes de hormigón está reducido a unos pocos



FIGURA 17. Barcaza de producción petrolífera "Nkossa": construcción en dique y en operación (12).



FIGURA 18. Barcaza Rofomex I: en construcción, con el sistema Honeycomb a la vista, y a flote (7).

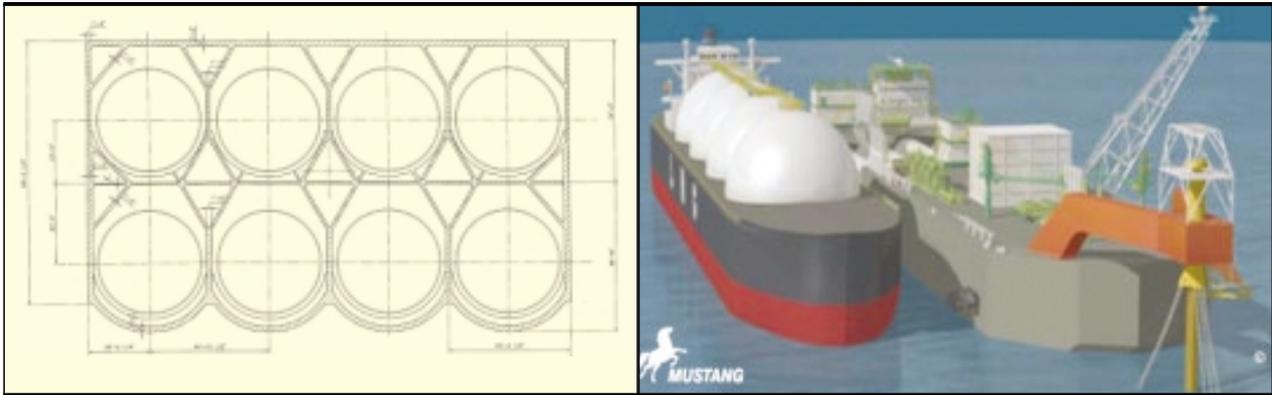


FIGURA 19. Concepto de LNG FPSO con casco de hormigón de Mustang: sección transversal e imagen virtual (2).

casos, en los últimos años se ha observado un interés creciente, siendo la industria offshore la que más ha alimentado este deseo, empujada por la necesidad de desarrollar campos de petróleo y gas en regiones cada vez más duras, como el ártico, donde el hormigón tiene un mejor comportamiento que el acero.

Además, también ha sido causado por la necesidad de desarrollar más terminales de importación y exportación de LNG, ya que el comportamiento del hormigón es superior al acero como casco para almacenamiento de líquidos criogénico como hemos visto anteriormente (6)(27).

Además de estas demandas, el uso del hormigón en estructuras offshore también está siendo aplicado en ideas conceptuales de las Very Large Floating Structures (VLFS) como aeropuertos flotantes (28), así como en aerogeneradores flotantes, que aunque se están diseñando en acero, tienen en el hormigón una mejor alternativa (6).

8. CONCLUSIONES

En la industria offshore existen dos posibles materiales para la construcción del casco de una estructura: el acero y el hormigón, siendo el primero el que se ha utilizado ampliamente hasta ahora, al igual que en el resto de la construcción naval de buques mercantes, de guerra, etc. Materiales como el aluminio, el PRFV o la madera se usan en unidades pequeñas con esloras que no suelen superar los 100 m y para condiciones menos adversas que en la industria offshore.

Sin embargo se han construido algunos buques de hormigón en el pasado, pero han sido más bien casos aislados que no han hecho cambiar la práctica en la industria. En la Primera y Segunda Guerra Mundial se construyeron por la escasez de materiales, mientras que la serie de barcas de Alfred A. Yee fueron una rara excepción. Otras unidades fueron hechas también en hormigón, pero casi anecdóticas.

Aún así, el comportamiento de estas estructuras en hormigón, sobre todo en cuanto a mantenimiento, ha sido excelente. Por ello, el hecho de que el hormigón no haya tenido una acogida adecuada hasta ahora en la construcción naval, no significa que no sea el material más adecuado para la industria offshore en el futuro.

El desplazamiento adicional y los costes de combustible asociados en los buques de hormigón han sido encontrados prohibitivos para la navegación marítima en el pasado. Pero la pérdida de movilidad de un casco de hormigón relativa a un casco de acero puede ser perfectamente compensada por las ventajas ofrecidas por el hormigón, dado que la navegación marítima y la industria offshore tienen prioridades muy diferentes. Una de las principales diferencias en esas prioridades es en cuanto a mantenimiento y resistencia a la fatiga, precisamente donde el hormigón se comporta mejor. Los buques pueden vararse fácilmente para mantenimiento y reparación, mientras que en las plataformas offshore estos trabajos han de hacerse "in situ", por lo que mantenimiento y fatiga son cruciales en ellas.

Además de estas, el hormigón tiene otra serie de ventajas, según conclusiones de varios estudios hechos. Y aunque son

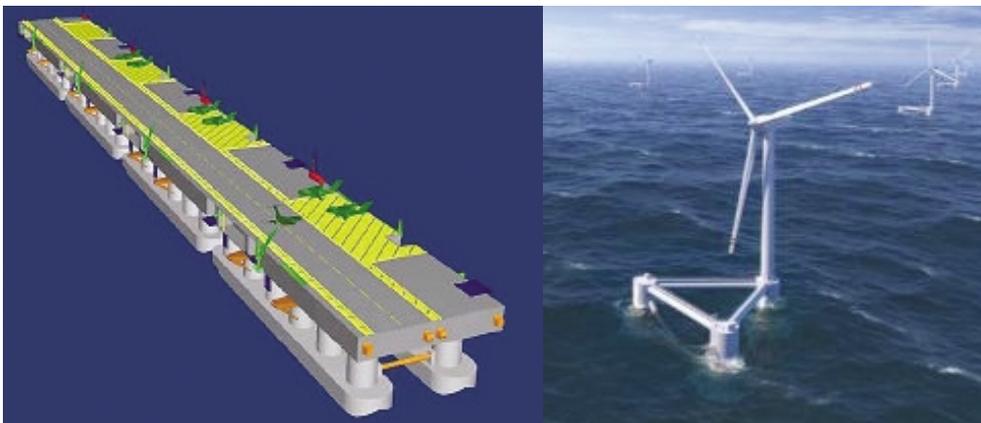


FIGURA 20. Concepto de aeropuerto flotante para la U.S. Navy (29) y aerogenerador flotante (6).

conclusiones interesadas en el sentido de que quien hace estos estudios es gente de la industria del hormigón, el hecho de que se hayan construido en los últimos años unidades offshore en hormigón prueba que efectivamente para ciertos casos las ventajas sobre el acero inclinan la balanza hacia el hormigón. Se han estado construyendo plataformas de hormigón apoyadas en el fondo (Gravity Base) tipo "Condeep" desde que la primera unidad entrara en funcionamiento en 1976. Y conviviendo también con unas pocas plataformas flotantes que en su geometría son similares a las construidas en acero (tipos barcazas, semisumergibles y TLP).

Uno de los conceptos en hormigón que se augura cogerán auge en estos años son las barcazas flotantes y apoyadas en el fondo para su uso como terminales LNG o como plantas industriales flotantes alejadas de la costa, offshore. La vida de estos cajones puede diseñarse hasta para 200 años, como la barcaza flotante *Nkossa*, por lo que pueden ser una buena alternativa a la construcción de estas instalaciones en tierra, evitando así rellenos en la costa que degraden el ya de por sí castigado litoral de los países industrializados. El reto está precisamente en optimizar sus costes de capital para hacer competitiva una instalación offshore frente a una instalación en tierra. Sin duda el medioambiente saldrá favorecido de ese gran reto que tenemos por delante en el siglo XXI.

9. TRABAJOS CITADOS

- Díaz, Abel Méndez.** *Diseño de Terminales Offshore de Regasificación de Gas Natural*. Departamento de Ingeniería Naval y Oceánica, Universidade da Coruña. Ferrol : s.n., 2004. Tesis Doctoral.
- Hubbard, Brad.** *Small Scale, Short Haul LNG*. Houston: Mustang Engineering, L.P., 2007.
- Fousert, M.W.** *Floating Breakwater. Theoretical study of a dynamic wave attenuating system*. Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology. Delft : s.n., 2006. Tesis Doctoral.
- Hoff, George C.** Concrete for Offshore Structures. [book auth.] Edward G. Nawy. [ed.] Edward G. Nawy. **Concrete Construction Engineering Handbook**. Piscataway: CRC Pr I Llc, 2008, 13.
- Acciona Infraestructuras.** Cajón Adriatic LNG Terminal de Algeciras. *Acciona Infraestructuras*. [En línea] 02 de 12 de 2007. [Citado el: 11 de 05 de 2011.] <http://www.accionainfraestructuras.es/actividades/edificacion/espaa%3B1a/andaluc%3BADA/c%3BA1diz/caj%3B3n-adriatic-lng-terminal-dealgeciras.aspx?page=0&desde=1380&pais=3999&localidad=0&ccaa=1311&provincia=5279&actividad=0§or=0>.
- Roddir, D., y otros, y otros.** *Wind Float: A Floating Foundation for Offshore Wind Turbines*. 3, Colorado USA: American Institute of Physics, 15 de June de 2010, Journal of Renewable and Sustainable Energy, Vol. 2.
- Yee Precast Design Group Ltd.** Luzon Stevedoring Barges. [En línea] 2010. http://www.precastdesign.com/projects/platformsbarges/luzon_stevedoring_barges_gallery.php#3_Luzon_Stevedoring_Barges/Luzon_2.jpg.
- Sandvik, Knut, y otros, y otros.** *Offshore Structures – A new challenge*. Acapulco : s.n., 2004. XIV National Conference on Structural Engineering.
- Vidal, A. Rodríguez.** *Buques con casco de hormigón armado*. Madrid : Asociación de Ingenieros Navales de España, 1947, Ingeniería Naval.
- Hoogendoorn, Eelco.** *Seasteading Engineering Report - Part 1: Assumptions & Methodology*. The Seasteading Institute. Sunnyvale : s.n., 2011. White Paper.
- Ellmer.** Concrete Submarine. [En línea] <http://concrete-submarine.com/>.
- VSL International Ltd.** *Nkossa Barge*. Berne - Switzerland : VSL International Ltd, 1996.
- Berner, Dale and Gerwick, Ben C.** *Large Floating Concrete LNG/LPG Offshore Platforms*. Berkeley : Ben C. Gerwick, Inc, 2001. UJNR Marine Facilities Panel.
- Raine, B. y Kaplan, A.** *Examining Nigerian built concrete substructures for floating or gravity based Liquefied Gas production facilities*. Houston : Arup Energy, 2002.
- Ocean Structures Ltd.** *Ageing of Offshore Concrete Structures*. Petroleum Safety Authority Norway. Laurencekirk-Scotland : Ocean Structures Ltd, 2009. OSL-804-R04.
- Yee, Alfred A.** *Precast and prestressed concrete*. s.l. : The McGraw-Hill Companies, 2007.
- Holand, Ivar, T.Gudmestad, Ove and Jersin, Erik.** *Design of Offshore Concrete Structures*. 2003. New York : Taylor & Francis Group, 2000. p. 225. ISBN 0-203-78649-1.
- Det Norske Veritas.** *DNV-OS-C502 Offshore Concrete Structures*. April 2009. Høvik : Det Norske Veritas, 2007. DNV-OS-C50.
- Wikipedia.** Concrete Offshore Structures. [En línea] http://en.wikipedia.org/wiki/Offshore_concrete_structure.
- VSL International Ltd.** *Floating Concrete Structures. Examples from practice*. Berne - Switzerland : VSL International Ltd, 1987. p. 27.
- Arup.** Sakhalin concrete gravity structure. [En línea] 2010. http://www.arup.com/Projects/Sakhalin_concrete_gravity_structure.aspx#!.
- Stat-of-the Art Report on Barge-Like Concrete Structures*. Birdy, Jal N., Fiorato, Anthony E. y Cichanski, William J. s.l. : American Concrete Institute., 1997. ACI 357.2R-88.
- Yee, Alfred A.** *Honeycomb design concept for floating concrete structures*. Honolulu : s.n., 1983.
- Yee Precast Design Group Ltd.** Concrete Island Drilling System (CIDS). [En línea] 2010. http://www.precastdesign.com/projects/platform-barges/CIDS_gallery.php#1_CIDS/CIDS_6.jpg.
- Aker Solutions.** Adriatic LNG Terminal. [En línea] 2011. <http://www.akersolutions.com/en/Global-menu/Products-and-Services/technology-segment/Fielddevelopment/Concrete-GBS-for-offshore-platforms1/Concrete-GBS-for-LNG-facilities/>.
- Concrete Technology Corporation.** "Ardjuna Sakti" LPG Floating Storage Facility. [En línea] 2010. http://www.concretetech.com/project%20reports/Ardjuna_Sakti.htm.
- Haug, Aile K., y otros, y otros.** *Offshore Concrete Structures for LNG facilities – New developments*. Houston : Offshore Technology Conference, 2003. OTC 15302.
- Lamas Pardo, Miguel y Carral Couce, Luis Manuel.** *Very Large Floating Structures (VLFS). Puertos y Aeropuertos Flotantes*. Madrid : s.n., 2011, Revista de Obras Públicas.
- Rognaas, Gunnar, y otros, y otros.** *Mobile offshore base concepts. Concrete hull and steel topsides*. 14, s.l. : Elsevier, 2001, Marine Structures, págs. 5-23.