

Depósitos criogénicos de hormigón pretensado

Manuel Elices Calafat

Publicado en

INVESTIGACION Y
CIENCIA

Edición en español de **SCIENTIFIC
AMERICAN**

Número 108 - Septiembre 1985

Depósitos criogénicos de hormigón pretensado

Manuel Elices Calafat

Depósitos criogénicos de hormigón pretensado

Las propiedades excepcionales del hormigón pretensado a temperaturas criogénicas lo hacen muy adecuado en la construcción de depósitos para almacenar gas natural y otros gases peligrosos por su inflamabilidad o toxicidad

Manuel Elices Calafat

Durante la segunda semana de noviembre de 1980, la nave espacial *Voyager 1* se acercó a unas rocas que flotan en el espacio, llamadas Mimas, Tetis, Dione y Rea y descubrió que eran unas enormes masas heladas. Nueve meses después, la nave *Voyager 2* se aproximaba a Encélado, Iapetus e Hyperión. Todos estos mundos helados, con temperaturas inferiores a 170 grados bajo cero, son satélites de Saturno. Un año antes, las naves espaciales habían pasado cerca de Europa y Ganimedes, satélites de Júpiter, gigantes helados del tamaño de la Luna y de Mercurio, respectivamente. La temperatura en su superficie es tan baja, que gases como el amoníaco, el butano o el metano pueden estar en forma sólida. Aunque se sospechaban las bajas temperaturas de estos satélites, las naves *Voyager* fueron las que, por primera vez, transformaron las imágenes puntuales de estos cuerpos en nuevos mundos y gracias a sus sensores confirmaron que su corteza estaba formada por rocas heladas [véase "Los satélites galileanos de Júpiter" por Laurence A. Soderblom, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 1980, y "Los satélites de Saturno" por Laurence A. Soderblom y Torrence V. Johnson, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 1982]. No solamente en mundos remotos es posible encontrar rocas heladas. En nuestro planeta Tierra la técnica produce una roca artificial —el hormigón— y la utiliza a temperaturas tan bajas que también el amoníaco, el butano o el metano podrían solidificarse.

¿Por qué y para qué se utiliza el hormigón helado? Son las primeras preguntas que surgen al presentar este exótico material. Veremos que hay razones de tipo económico y, en algunos casos, de seguridad, que aconsejan la utilización de estas rocas heladas para

el almacenamiento de gases licuados. El desarrollo tecnológico propicia la utilización, cada vez mayor, de productos muy fríos y peligrosos por su inflamabilidad o toxicidad. Las soluciones tradicionales para almacenar estos productos son depósitos construidos con aleaciones metálicas suficientemente dúctiles y tenaces a bajas temperaturas. Por ejemplo, para almacenar metano líquido a presión atmosférica es preciso enfriar hasta 163 grados bajo cero. A medida que aumenta el tamaño de estos depósitos —más de 100.000 metros cúbicos— sube el costo y la fragilidad de la estructura, al aumentar el espesor de las paredes. En estas circunstancias el hormigón pretensado compite ventajosamente con los metales en costo, durabilidad y seguridad. El comportamiento de los depósitos de hormigón pretensado y helado ha sido tan satisfactorio, que ya se entrevén nuevas aplicaciones, desde la construcción de barcos metaneros hasta edificios para albergar imanes superconductores.

Este nuevo material —el hormigón pretensado helado— exhibe unas propiedades sorprendentes en lo relativo a su comportamiento mecánico y térmico. En primer lugar, consideramos el almacenamiento de productos criogénicos, justificando sus razones y la forma de conseguirlo. Después revisaremos las características peculiares del hormigón pretensado a temperaturas criogénicas. Finalmente, analizaremos las peculiaridades de los depósitos pretensados criogénicos y especularemos sobre las futuras aplicaciones de este material singular.

El transporte y almacenamiento de muchos gases resulta más práctico y económico cuando se hace en forma líquida. Por ejemplo, un volumen de 600 litros de gas natural, a presión at-

mosférica y temperatura ambiente, al licuarlo queda reducido a un litro. Las ventajas de almacenar la misma potencia calorífica en un volumen mucho menor son las que están haciendo desaparecer los grandes y clásicos depósitos de gas en las ciudades que están cambiando el gas ciudad por el gas natural.

Todos los gases pueden licuarse enfriándolos. La temperatura a la que se produce este cambio de estado, que prácticamente coincide con la de ebullición del líquido, depende de la presión a que está sometido el gas. Cuando aumenta la presión también aumenta la temperatura de ebullición —fenómeno bien conocido por las amas de casa que utilizan ollas a presión—. En consecuencia, en algunos casos es posible licuar un gas, a la temperatura ambiente, aumentando solamente la presión. Un ejemplo lo tenemos en el butano (C_4H_{10}) almacenado en las bombonas o en los encendedores de gas; a la presión atmosférica, el butano está en forma líquida a un grado centígrado bajo cero, pero si se presuriza a dos atmósferas (por encima de la presión atmosférica) se puede mantener líquido incluso a 20 grados centígrados.

Se sabe que para cada líquido hay una temperatura, llamada crítica, por encima de la cual no es posible licuar el gas por más que se aumente la presión. Para el butano, por ejemplo, esta temperatura crítica es de 152 grados centígrados. Para el metano (CH_4) la temperatura crítica es de -83 grados centígrados y la menor presión necesaria para mantenerlo líquido a esta temperatura —presión crítica— es de 40 atmósferas. Por consiguiente, a temperaturas ligeramente inferiores a -83 °C la aplicación de una presión de 40 atmósferas bastará para licuarlo; por encima de esta temperatura no será posi-

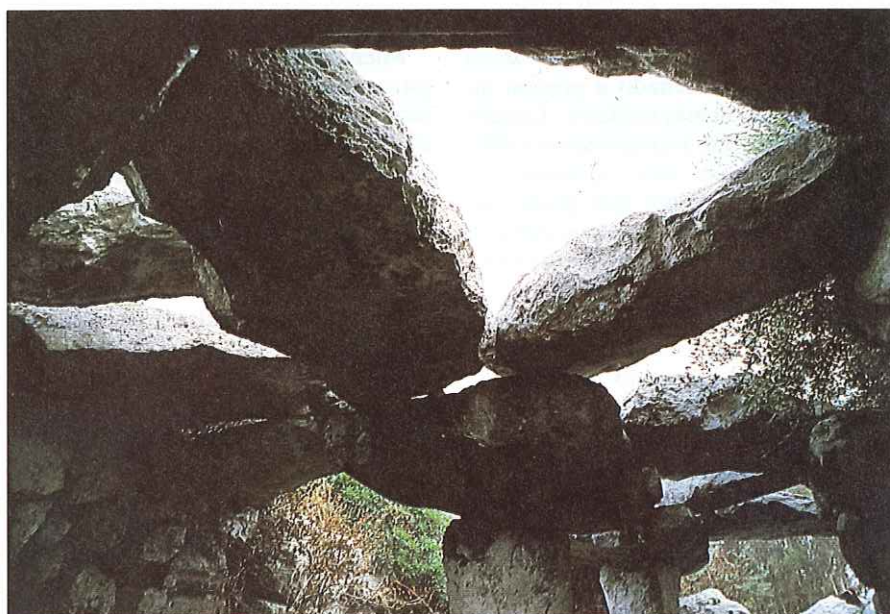
ble licuarlo aunque se aumente la presión.

Este hecho permite, en la práctica, distinguir entre los gases (como el butano o el propano) que pueden licuarse por presión a temperaturas normales y aquellos (como el oxígeno, el nitrógeno o el gas natural) en que no es posible. Para licuar los primeros se puede escoger entre presurizarlos o enfriarlos. Para los segundos, sólo enfriándolos es posible licuarlos. El proceso inverso también es cierto; los líquidos obtenidos presurizando el gas pueden regasificarse despresurizándolos —es decir, sin aportar calor—, mientras que los líquidos que sólo se han podido obtener por refrigeración es preciso calentarlos para regasificarlos. Para el proyectista de un depósito es muy importante conocer si la licuación se ha conseguido presurizando o sólo refrigerando porque, como veremos más adelante, ello ya influye en la concepción del diseño.

El uso más generalizado del gas natural es como combustible. Su composición varía según el lugar de extracción. El componente principal —entre el 70 y el 90 por ciento— es el metano. El resto está formado por otros hidrocarburos —etano, butano, propano— junto con nitrógeno, hidrógeno y, en algunos casos, compuestos de azufre.

Aunque teóricamente es posible licuar el gas natural por presión a partir de $-83\text{ }^{\circ}\text{C}$, es preferible poderlo almacenar y manejar a la presión atmosférica. El precio que hay que pagar por esta comodidad es una temperatura de almacenamiento más baja, alrededor de $-163\text{ }^{\circ}\text{C}$, dependiendo de la composición exacta. En estos casos, los depósitos deben soportar solamente la presión debida al peso del líquido. Si el gas natural licuado se almacenara a temperaturas más altas, los depósitos deberían calcularse, también, como recipientes de presión.

Además del gas natural licuado (GNL), también se transportan y almacenan los gases licuados del petróleo (GLP). Bajo este nombre genérico se agrupa una serie de gases obtenidos no sólo del petróleo, sino también como subproductos de la destilación del carbón y de otros procesos industriales. La mayor diferencia entre el GNL y el GLP, en relación al diseño de los depósitos para su almacenamiento, es la posibilidad de licuar el GLP a temperatura ambiente solamente por presión, ya que las temperaturas de licuación son bastante altas (para el propano $-42\text{ }^{\circ}\text{C}$ y para el butano $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$). En consecuencia, se prefiere almacenar el



1. LA TECNOLOGIA ACTUAL permite diseñar y construir depósitos capaces de satisfacer los mayores requisitos de seguridad. En la figura superior se muestra la estructura que soporta la cúpula del depósito almacenador de gas natural de la ciudad de Barcelona y, en la inferior, una estructura megalítica que hace más de 2000 años desempeñó una función similar —servir de soporte al techo— en una región próxima al emplazamiento del depósito del poblado de Torre d'en Gaumes, sito en la isla Menorca.

GLP a temperaturas normales en recipientes de presión —que difieren de los depósitos destinados a operar a presión atmosférica—. A pesar de las ventajas que ofrece el hormigón pretensado, los únicos recipientes de presión de gran tamaño construidos con este material son los edificios de contención de los reactores nucleares; aunque recientemente se ha despertado cierto interés por los recipientes de presión de hormigón pretensado para GLP, no se ha construido ninguno de gran tamaño. Aquí nos limitaremos a los depósitos de hormigón pretensado para GNL.

El logro de bajas temperaturas, a escala industrial, constituye un avance

técnico relativamente reciente, cuyo desarrollo se retrasó hasta que se presentó la necesidad que lo impulsara. La mayoría de los gases se pueden almacenar en la planta donde se producen, en depósitos presurizados, y distribuirlos por gaseoductos. Los Estados Unidos fue el primer país que usó industrialmente el gas natural y utilizó su red de gaseoductos. Aún hoy, las ventajas económicas de la distribución mediante una red de tuberías son tan grandes que se siguen construyendo centenares de kilómetros de tubería en regiones inhóspitas o por el fondo del mar, si es preciso, a pesar del riesgo ecológico que entrañan.

No obstante, hay situaciones en las que la red de tuberías no es viable, bien por falta de tiempo o por la orografía. Por el primer motivo se inició la aventura comercial en el transporte y almacenamiento criogénicos en algunas partes de Estados Unidos, durante la segunda guerra mundial. La East Ohio Gas Company edificó en 1942 una planta para licuar gas natural y construyó cuatro depósitos metálicos para almacenarlo. La rotura de uno de estos depósitos, en octubre de 1944, provocó una catástrofe en la que fallecieron más de cien personas. Este desgraciado accidente retrasó unos diez años el desarrollo comercial del transporte y almacenamiento del GNL.

Durante los años 40 y al comienzo de los 50, las naciones energéticamente más débiles notaron cada vez más la necesidad de importar gas. La solución del gas licuado, transportado por barco y almacenado a presión atmosférica, fue la más evidente. Los primeros barcos que transportaron GNL, en 1964, tenían una capacidad de 25.000 metros cúbicos que pronto incrementaron a 40.000 metros cúbicos. En consecuencia, los depósitos de GNL en las estaciones terminales se proyectaron para 40.000 m³. La segunda generación de barcos, a comienzos de la década de los 70, aumentó la capacidad hasta 75.000 m³ y paralelamente lo hicieron los depósitos, que pasaron a 80.000 m³. Actualmente, la capacidad de los barcos metaneros es de 125.000 metros cúbicos, y descargan su contenido en enormes depósitos de similar capacidad.

Los primeros depósitos fueron metálicos y su construcción no estuvo exenta de problemas. Los aceros al carbono, material normalmente utilizado en estas estructuras, no eran aceptables

porque, en general, por debajo de 0 °C son frágiles. La ductilidad a bajas temperaturas se consiguió aleándolos con níquel. Un 9 por ciento de níquel fue suficiente para conseguir aceros dúctiles y soldables para muchas aplicaciones criogénicas. En otros casos, determinadas aleaciones de aluminio proporcionaron también un comportamiento satisfactorio. La fragilidad de las soldaduras preocupó a los constructores desde los primeros instantes. Todavía estaba presente el recuerdo de los barcos "Liberty", que se partieron en dos mitades cuando se construyeron los primeros depósitos que debían operar a -165 °C. No obstante, el esfuerzo realizado desde entonces ha logrado transformar procedimientos empíricos en métodos racionales que han permitido la construcción de depósitos cada vez mayores con resultados enteramente satisfactorios y seguros.

Mientras proseguía el desarrollo de estructuras soldadas se inició en los Estados Unidos la búsqueda de otras soluciones para almacenar líquidos muy fríos. En 1952, la Compañía Linde, de Chicago, construyó el primer depósito de hormigón pretensado para almacenar oxígeno licuado. La capacidad de este depósito experimental es de 2400 metros cúbicos y todavía trabaja satisfactoriamente a -185 °C. Seis años después, la American Gas Association inició una investigación destinada a comprobar el comportamiento de los depósitos de hormigón pretensado para almacenar GNL, y en 1962 instrumentó y ensayó satisfactoriamente un pequeño depósito de 170 m³. En 1968 Gaz de France también ensayó con éxito un depósito de 2000 metros cúbicos en Nantes. Estos resultados motivaron que Gas Natural -ahora Enagas- construyera en Barcelona los dos primeros depósitos de hormigón pretensado para

uso comercial, cada uno de 40.000 m³ de capacidad. En la actualidad operan satisfactoriamente medio centenar, algunos de gran capacidad, como el de 80.000 m³ construido en 1980, también en Barcelona, los dos de 120.000 m³ en Montoir (Francia) y los dos gigantes de 143.000 metros cúbicos en Staten Island, Nueva York.

Hemos comentado la utilización del gas natural licuado, su transporte y la evolución de su almacenamiento empleando un material pétreo, el hormigón pretensado. Veamos a continuación las características de esta roca artificial que la hacen tan idónea que compite con el acero.

En el hormigón armado, el acero da fibra a la piedra y el hormigón da masa al acero. De esta forma se pretende que las tracciones sean resistidas por las armaduras y las compresiones por el hormigón. Debido a que las deformaciones que puede soportar el hormigón en tracción son muy pequeñas, éste suele fisurarse antes de que las armaduras estén agotadas, y cuando tiene que resistir tracciones importantes se origina una complicada red de fisuras. Para evitar la fisuración, la mejor solución es comprimir permanentemente el hormigón sometiendo la armadura de acero permanentemente a tensión. Esta solución es, más o menos, lo que se conoce como *hormigón pretensado*; aunque parece ser que ya fue puesta en práctica a finales del siglo pasado, sólo recientemente se está aplicando en gran escala.

¿Cómo se comportará este nuevo material -el hormigón pretensado- a muy bajas temperaturas? Si nos guiamos por la intuición podemos pensar que el hormigón, intrínsecamente frágil, no mejorará sus características. En cuanto al acero, si se trata de un acero al carbono -no aleado- podemos sospechar que irá fragilizándose a medida que disminuya la temperatura. Cabe esperar, pues, que el comportamiento del hormigón pretensado empeore a medida que descienda la temperatura e incluso, como se llegó a afirmar, que a la temperatura del GNL se comporte con la fragilidad del vidrio. Por suerte no es así; los experimentos han demostrado que la intuición puede engañarnos y que el hormigón pretensado puede exhibir un comportamiento igual -o mejor- al de la temperatura ambiente.

Analicemos el comportamiento de los materiales a medida que disminuye la temperatura. Si ensayamos a compresión una probeta de hormigón saturada con agua, nos encontramos con un

COMPONENTES	MAR DEL NORTE	ARGELIA	LIBIA	USA	ALASKA	SAJALIN
METANO	94	84-88	67-70	89	96	97
ETANO	4	8-11	15-20	6	2	<2
PROPANO	<1	2-3	9-10	1	1	<1
BUTANO	<1	1	3	0	<1	0
PENTANO	<1	<1	<1	1	0	0
NITROGENO	<1	<1	<1	3	<1	1

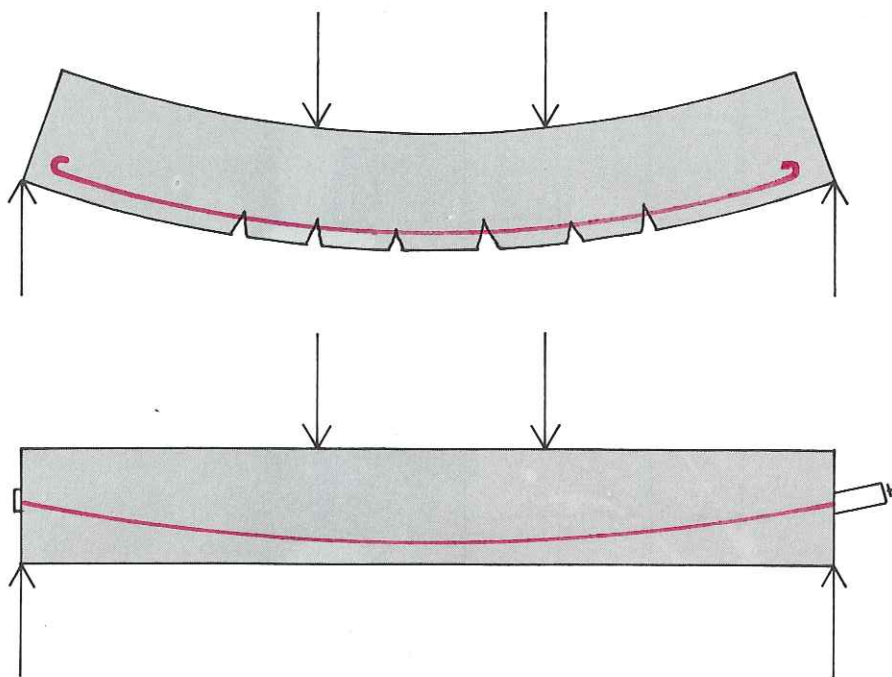
2. COMPOSICION MEDIA DEL GAS NATURAL. Las proporciones indicadas son en porcentaje del volumen y corresponden al pretratamiento. Se ha observado que la composición varía con el tiempo.

comportamiento sorprendente. Por debajo de 0 °C, mientras que la ductilidad aumenta ligeramente, la carga de rotura lo hace de forma espectacular, llegando a alcanzar valores superiores a cuatro veces el valor a temperatura ambiente [véase la figura 4].

No se conoce, todavía, una explicación satisfactoria para este comportamiento del hormigón. Debe tenerse presente que no se trata, simplemente, de un hormigón que se ha enfriado, sino de un material compuesto por hormigón y hielo, y que las propiedades de este último no nos son tan familiares. Al helarse el agua contenida en los poros se produce un micropretensado del hormigón —debido al aumento de volumen del agua— que cierra las fisuras microscópicas, siempre presentes en el hormigón y causantes de su fragilidad, y en consecuencia, tanto la resistencia como la ductilidad aumentan. Esta explicación cualitativa del fenómeno justifica también el hecho experimental de que el comportamiento observado dependa de la cantidad de agua en el hormigón capaz de transformarse en hielo.

Estas sorprendentes propiedades se mantienen siempre que no fatiguemos excesivamente al hormigón, es decir, que una vez enfriado no lo calentemos y lo enfriemos repetidas veces. El hielo y el deshielo en el interior del hormigón producen un agrietamiento interno que acaba debilitando su estructura y se manifiesta, en posteriores ensayos de compresión, por una disminución de la resistencia y del módulo de elasticidad. En la práctica no es de esperar que se den estas circunstancias en un depósito criogénico, ya que una vez construido —a temperatura ambiente— el depósito se enfría hasta la temperatura de operación (−163 °C para el GNL) y no está previsto que se vuelva a calentar durante su vida útil.

La experiencia que se posee a bajas temperaturas con los aceros no aleados —la pérdida de ductilidad y su fragilización— puede hacer sospechar que los aceros utilizados en el hormigón pretensado no son aptos para trabajar a las temperaturas del GNL. No obstante, los resultados experimentales obtenidos en nuestro laboratorio con aceros trefilados demuestran lo contrario: la resistencia a tracción y el límite elástico aumentan ligeramente al disminuir la temperatura, y la ductilidad —medida como alargamiento bajo carga máxima— apenas disminuye si se consigue mantener uniforme la temperatura de la probeta durante el ensayo. La importancia de esta condición, poco cono-



3. HORMIGÓN, débil a tracción y resistente a compresión. El hormigón se comprime —mediante un tendón de acero tensado— para que el conjunto pueda soportar tracciones. Esto es, en esencia, el hormigón pretensado. En la figura superior se representa una viga de hormigón armado, en la que aparecen fisuras y deformaciones excesivas, debido a las cargas que soporta. En la figura inferior se ha representado una viga de hormigón pretensado donde existen fisuras y las deformaciones son menores.

cida, hace dudar de la validez de muchos resultados recién publicados que, posiblemente, infravaloren el alargamiento bajo carga máxima.

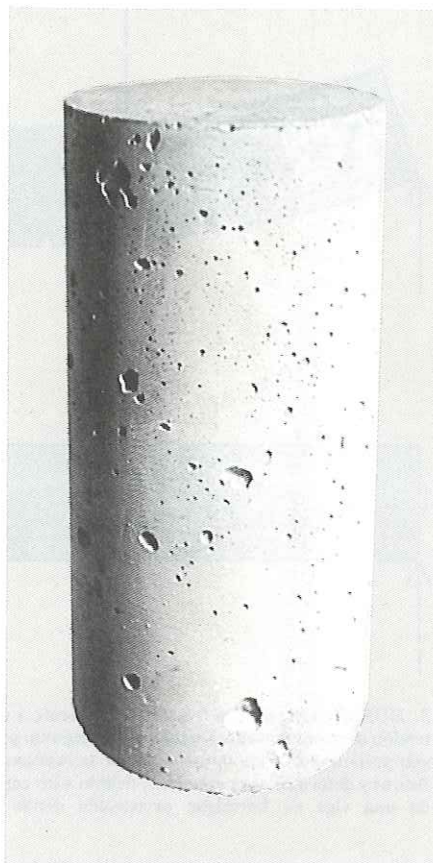
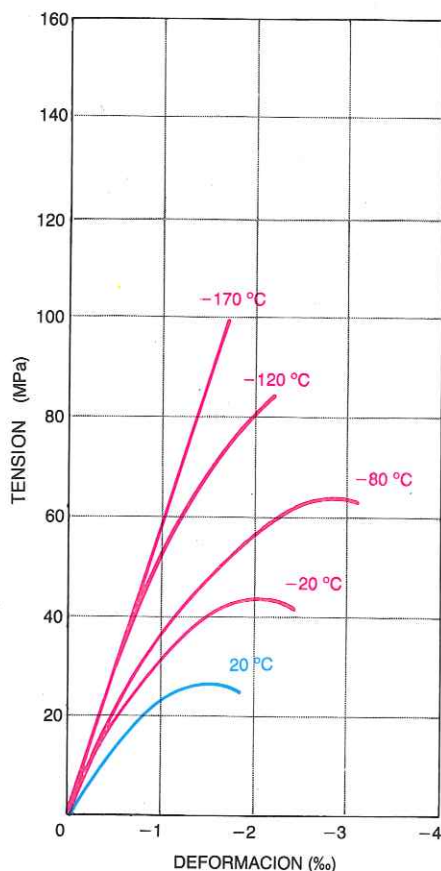
El problema de la sensibilidad a las entallas a bajas temperaturas merece comentarse. (La presencia de entallas puede inducir fragilidad.) Para algunos proyectistas se trata de un mero problema académico, mientras que para otros es tan temible que propugnan que no se utilice el hormigón pretensado a muy bajas temperaturas por el riesgo de la rotura frágil. En estos casos conviene aclarar que los tendones utilizados en el hormigón pretensado siempre están solicitados longitudinalmente y no transversalmente —como se hace en los ensayos normalizados de impacto para estudiar la sensibilidad a las entallas—, que es donde exhiben la fragilidad a bajas temperaturas y de donde proviene, posiblemente, su temor. En la práctica, la fragilidad de los tendones puede provocarse si existen fisuras, porque al tensarlos se producirá una concentración de tensión en el fondo de las grietas.

Existe el riesgo de que algún tendón tenga pequeñas fisuras, originadas durante el transporte, almacenamiento o colocación de las armaduras. Estas fisuras no merman apreciablemente la capacidad resistente del tendón ya que, por ejemplo, los alambres que se utilizan frecuentemente de 7 milímetros de

diámetro pueden soportar, a temperatura ambiente, esfuerzos del 90 por ciento de la carga de rotura, con fisuras de hasta un milímetro de profundidad, como se indica en la figura 5. Si el alambre fisurado se tesa primero y se enfría después, como suele suceder normalmente, sigue exhibiendo un comportamiento bastante dúctil. Pero si primero se enfría y se tesa luego, puede romper frágilmente [véase la figura 5]. Este comportamiento debe tenerse en cuenta en las estructuras dotadas de tendones redundantes, que sólo entrarían en carga en caso de accidente, es decir, posiblemente se tesarían estando fríos.

Hemos visto que tanto el acero como el hormigón mejoran sus propiedades, no todas, a medida que disminuye la temperatura. El hormigón incrementa la resistencia y el módulo de elasticidad. En el acero de pretensado estas dos magnitudes también aumentan, pero en menor proporción que en el hormigón. Mas no basta con que los materiales se comporten satisfactoriamente; es el conjunto —el hormigón pretensado— el que debe hacerlo y, para ello, deben analizarse los aspectos específicos del material y los relacionados con la compatibilidad de los componentes. Comentemos algunos aspectos de la compatibilidad térmica.

Es una circunstancia afortunada que



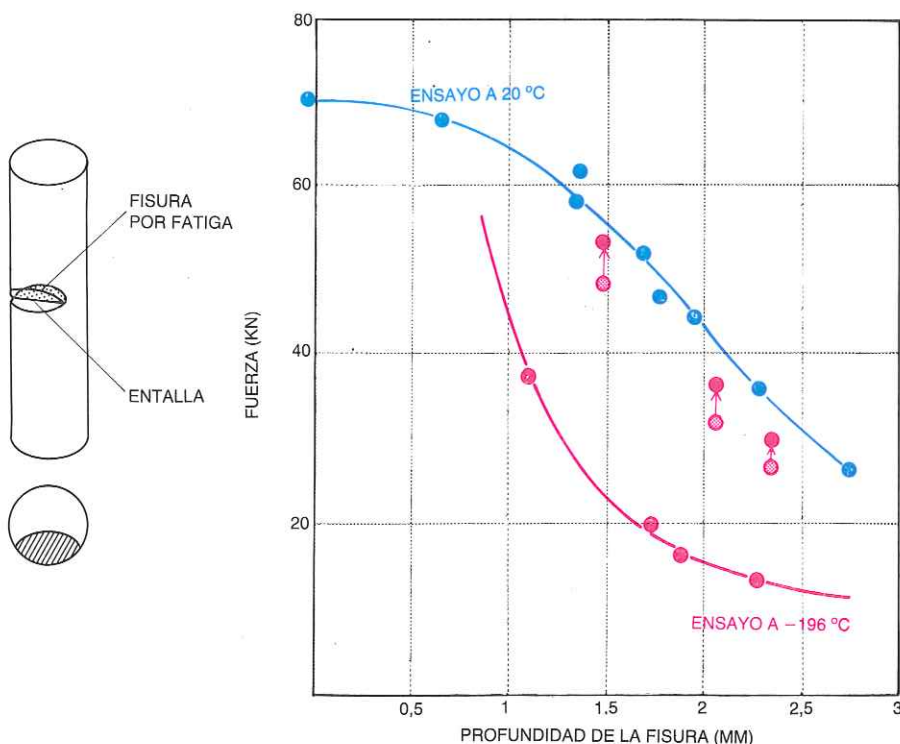
4. COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN a bajas temperaturas. Si ensayamos a compresión una probeta de hormigón saturada con agua, nos encontramos con un comportamiento sorprendente. Por debajo de cero grados Celsius, mientras que la ductilidad aumenta ligeramente, la carga de rotura lo hace de forma espectacular, y alcanza valores superiores a cuatro veces el valor a temperatura ambiente.

el hormigón y el acero tengan un coeficiente de dilatación prácticamente igual en el intervalo de temperaturas en que se utilizan normalmente. Así, una misma variación de temperatura en ambos materiales induce dilataciones análogas y, en consecuencia, no se provoca la aparición de tensiones internas por incompatibilidad de deformaciones. Esta coincidencia –o este matrimonio feliz entre los dos materiales– no tiene por qué mantenerse a bajas temperaturas y, desgraciadamente, así es, como se indica en la figura 6, donde se ha representado la contracción del acero y de dos tipos de hormigón –uno saturado con agua y otro seco– desde la temperatura ambiente hasta la temperatura del GNL. En la figura se aprecia que el acero tiene tendencia a contraerse más que el hormigón y que la contracción del hormigón depende del grado de humedad. Veamos, con un poco más de detalle, las consecuencias que pueden acarrear las diferencias entre los coeficientes de dilatación del acero y del hormigón saturado.

La presencia de hormigón con un alto contenido de humedad en una estructura es frecuente en construcciones junto al mar y cuando hay superficies impermeables, porque el hormigón que ha fraguado junto a ellas puede retener una humedad considerable. Al considerar el comportamiento conjunto a bajas temperaturas del hormigón saturado y del acero, es fácil deducir de la figura 6 que el acero entra en tracción porque el hormigón no le deja acortarse todo lo que quisiera estando libre. El cálculo de estas tensiones internas, originadas por la incompatibilidad de las deformaciones, es sencillo y muestra que son grandes –tanto que podrían romper algunos tipos de acero–. Este inquietante resultado motivó una serie de estudios en nuestro laboratorio para comprobar el alcance de este fenómeno.

Al principio se estudió la dilatación de simples cilindros de hormigón saturado, comprobándose que su comportamiento era el de la figura 6. Después, con objeto de simular el comportamiento del hormigón pretensado se estudió la dilatación de cilindros de hormigón saturado sometidos a una compresión del orden de la que soportan las estructuras reales, y se obtuvo la primera sorpresa: el hormigón saturado comprimido se comporta como el hormigón seco, es decir, muy parecido al acero, y por lo tanto no era de esperar la manifestación de grandes tensiones internas [véase la figura 6].

El paso siguiente consistió en construir una viga de hormigón saturado y



5. PEQUEÑAS FISURAS EN EL ACERO no merman la capacidad resistente de un tendón para pretensar el hormigón. Por ejemplo, un alambre de 7 milímetros de diámetro con una fisura de hasta 1 milímetro de profundidad puede soportar una carga del 90 por ciento de la carga de rotura. Si el alambre, con fisuras mayores, se tesa a temperatura ambiente (hasta una carga representada por círculos abiertos) y se enfría después, sigue exhibiendo un comportamiento bastante dúctil (no rompe hasta que se alcanza la carga representada por puntos rojos). Pero si primero se enfría y se tesa después, rompe frágilmente.

pretensado, enfriarla y medir si se producía un retesado en el tendón debido a las diferencias entre los coeficientes de dilatación. Si el efecto que habíamos descubierto con las probetas de hormigón bajo carga era representativo, no cabía esperar ninguna variación en la tensión del acero. En el caso contrario –en el supuesto de que el coeficiente de dilatación no dependiera de la tensión impresa– deberíamos medir un apreciable aumento de la tensión en el acero. Los resultados del experimento nos indicaron que la carga del tendón apenas variaba, conclusión que no sólo facilita los cálculos de las estructuras a muy bajas temperaturas, sino que posibilita su construcción en algunos casos. Vemos pues que la aparente incompatibilidad de los materiales a bajas temperaturas se ha resuelto cediendo uno de los dos; en este caso, adaptándose el más versátil –el hormigón–. Después de habernos acercado al material, conociendo su comportamiento y peculiaridades a bajas temperaturas, pasemos a considerar *la estructura*.

La tipología de los actuales depósitos criogénicos es consecuencia de la natural evolución de los primitivos depósitos de petróleo. Los primeros depósitos eran recipientes cilíndricos cubiertos por un material aislante y rodeados a una cierta distancia de un pequeño muro, cuya función era retener el líquido en caso de que se produjera un derrame de GNL. Pronto se observaron los inconvenientes de situar lejos el murete. En un accidente, el líquido mojaría una gran superficie caliente y, en consecuencia, se formaría una extensa nube baja e inflamable que saldría fácilmente del recinto. El paso siguiente consistió en la construcción de un muro mucho más próximo al depósito y, por tanto, más alto, para que en caso de accidente retuviera el líquido y dificultara la formación de la nube baja capaz de iniciar una reacción en cadena en los depósitos vecinos. La siguiente innovación fue una consecuencia lógica al haber construido un muro de seguridad y consistió en cerrar el muro mediante una cúpula para proteger completamente el depósito de acciones exteriores. El resultado final ha sido la integración de las paredes de protección en un segundo depósito creando el concepto de sistema de doble contención. Veamos ahora la razón de ser y la misión que cumplen algunos componentes de estas exóticas estructuras.

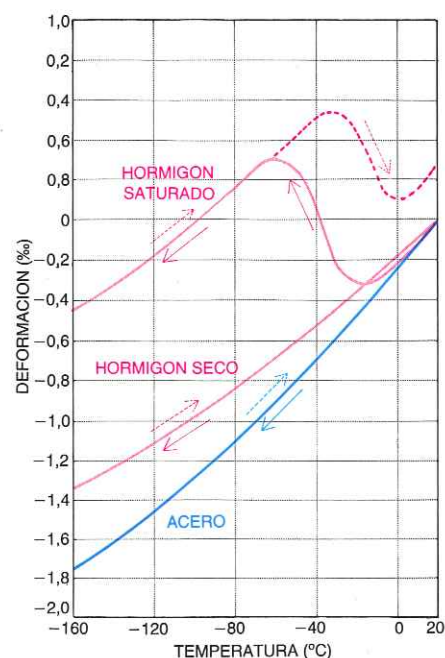
Un depósito criogénico debe desempeñar satisfactoriamente cuatro funciones: almacenar el líquido sin que se

produzcan pérdidas, conseguir que el líquido se caliente lo menos posible, ser estanco en los dos sentidos para evitar accidentes (es decir, el gas no debe escaparse al exterior ni debe entrar aire o vapor de agua hacia el interior) y, por último, si por alguna causa el depósito se rompe, procurar que las consecuencias catastróficas sean mínimas. Este último requisito tiene una enorme influencia en la concepción del diseño.

La misión primordial del depósito interno es contener el líquido frío sin que se produzcan fugas o filtraciones. El GNL es un líquido muy penetrante y de baja viscosidad –alrededor de 0,14 veces la del agua–, por lo que todas las precauciones que se tomen para evitar filtraciones serán pocas. Se han hecho ensayos para determinar la permeabilidad del hormigón al GNL; en general se ha comprobado que el hormigón seco, aunque sea de excelente calidad, es bastante permeable; por el contrario, el hormigón con un alto contenido de humedad es prácticamente impermeable. No obstante, todavía no se dispone de suficiente información fiable que permita a los proyectistas confiar en la impermeabilidad del hormigón y, en consecuencia, las paredes del depósito se proyectan con una camisa de acero, que asegura la estanqueidad, embebida dentro del hormigón, como puede apreciarse en la figura 11. También se ven las vainas que contendrán los tendones encargados del pretensado vertical. El pretensado circunferencial se consigue arrollando un alambre tenso sobre la camisa de acero, una vez que el hormigón ha endurecido.

La diferencia entre la temperatura ambiente y el interior del depósito es alrededor de 200 °C. Esta enorme diferencia puede ocasionar movimientos por retracción muy superiores a los que está acostumbrado el proyectista. Por ejemplo, un depósito de hormigón como el de Barcelona, de 55 metros de diámetro interior, al enfriarse puede retraer alrededor de 100 milímetros y debe estar proyectado de tal forma que permita estos movimientos sin crear tensiones excesivas.

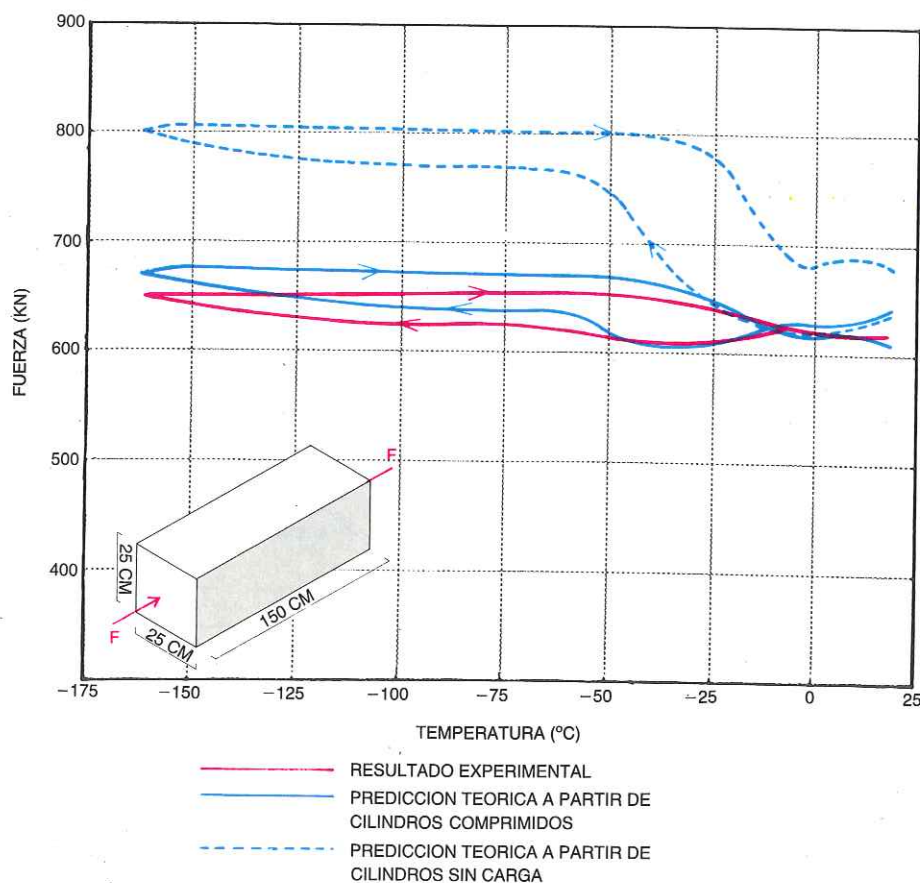
Es obvio que el depósito interior debe aislarse térmicamente para evitar la gasificación del GNL. En la práctica, el aislamiento de las paredes y del techo suele hacerse con material granular o suelto, mientras que el fondo reposa sobre bloques de material aislante. El material granular más utilizado es la perlita, que es un mineral expandido. En cuanto a los aislantes con capacidad resistente, además del poliuretano se utilizan vidrios y plásticos espu-



6. DILATACION del hormigón y del acero. El hormigón seco y el acero presentan un comportamiento similar. El hormigón saturado, sin carga, exhibe primero una expansión irreversible –mientras el agua se transforma en hielo– y después una contracción. Tras un ciclo térmico –enfriamiento y calentamiento– aparece una expansión remanente debida, posiblemente, al deterioro del hormigón causado por la transformación del agua en hielo.

mados y madera de balsa. En general, la eficiencia térmica de un aislante aumenta con el contenido en aire y, por consiguiente, los buenos aislantes son ligeros y poco resistentes. Los aislantes resistentes, pesados por lo común, sacrifican parte de la eficacia térmica por la capacidad de transmitir esfuerzos.

Como ningún aislante es perfecto, algo de calor acaba entrando en el depósito. En algunos depósitos, parte de este calor proviene del suelo y a medida que pasa el tiempo la cimentación se va enfriando cada vez más. Al final acaba formándose hielo y el terreno subyacente se deforma dando lugar a asientos diferenciales que causan inconvenientes y que pueden acabar provocando roturas. Por este motivo se procura evitar los depósitos enterrados o en contacto directo con el terreno. Esta situación se corrige calentando el fondo mediante resistencias eléctricas o bien levantándolo y permitiendo circular aire entre el fondo y la cimentación. El calor que inevitablemente penetra en el depósito evapora una pequeña cantidad de líquido. (A esta pequeña ebullición se la conoce como “boil-off”.) Por ejemplo, en un depósito de 80.000 m³, cada día se convierten en gas entre 9 y 11 toneladas de líquido. Esta cantidad es demasiado valiosa



7. COMPROBACION EXPERIMENTAL de la compatibilidad entre el hormigón y el acero, en el hormigón pretensado. Si el efecto que habíamos descubierto con las probetas de hormigón bajo carga hubiera sido representativo, no cabría esperar ninguna variación en la tensión del acero. En el caso contrario —en el supuesto de que la dilatación no dependiera de la tensión impuesta— deberíamos medir un apreciable aumento de la tensión en el acero. El experimento mostró que la tensión en el acero apenas variaba durante el ciclo térmico. Este resultado no sólo facilita los cálculos a bajas temperaturas sino que, en algunos casos, posibilita la utilización del hormigón pretensado en construcciones criogénicas.

para desperdiciarla y se toman las medidas necesarias para recuperar el gas y volverlo a licuar.

El depósito exterior opera a temperatura ambiente en condiciones normales; solamente en caso de accidente debe ser capaz de retener el líquido frío. Aun cuando el GNL llegara a inflamarse, habrá de permitir su combustión sin perder la integridad del depósito. Esta es una condición muy dura, ya que en dichas circunstancias la parte inferior de la pared —en contacto con el GNL— estará a -165°C y, escasamente a 2 ó 3 metros por encima, la pared estará a 1.350°C —debido al fuego—. En la práctica se ha demostrado que el hormigón pretensado puede soportar estas situaciones, y el accidente ocurrido en 1973 en Staten Island —donde el fuego duró unas 18 horas sin destruir las paredes— es una clara, aunque no deseable, demostración a escala natural.

Anteriormente se indicó que el depósito debe ser estanco en los dos sentidos: no sólo debe evitarse que el gas salga al exterior, sino también que el aire o el vapor de agua entren en el in-

terior. Si el vapor de agua penetra, emigrará hacia el depósito interior —que está frío— y aumentará la conductividad calorífica del aislante, reduciendo su eficacia. Por este motivo los depósitos exteriores de hormigón armado o pretensado se construyen con una segunda barrera de vapor, o camisa de chapa. En algunas circunstancias se requiere que el depósito exterior sea capaz de soportar acciones externas singulares, como el impacto de un avión de determinadas características —si está cerca de un aeropuerto—. La tecnología actual permite diseñar y construir depósitos que cumplan estos requisitos.

Para terminar consideremos algunos aspectos relacionados con la seguridad. En estos casos el objetivo primario del depósito externo es contener el GNL y retenerlo mientras se quema. Después, este depósito quedará inutilizado. Cuando se trate de otros líquidos criogénicos, los requisitos primarios pueden ser distintos. Por ejemplo, en el caso de gases licuados tóxicos deberá garantizarse la estanqueidad por enci-

ma de todo, en vez de asegurar una combustión controlada. Un derrame de amoníaco licuado puede ser catastrófico si el viento arrastra al gas sobre una región poblada, porque se trata de un gas tóxico. Recientemente se han producido accidentes dramáticos que han puesto de relieve la necesidad de extremar estas medidas de seguridad.

Hace 75 años que surcó el mar el primer barco de hormigón armado y casi medio siglo que lo hizo por primera vez uno de hormigón pretensado. Entre los mayores inconvenientes de los barcos de hormigón está su peso, por cuyo motivo se han utilizado sólo para transportar mercancías de poca densidad, y el GNL es una de las mercancías más ligeras. Existen varios proyectos para la construcción de superdepósitos criogénicos flotantes para transportar GNL. Una de las grandes ventajas frente a los barcos metálicos es su mejor resistencia al impacto. Así como el impacto de un avión sobre un depósito de GNL es muy probable que no ocurra durante la vida de la estructura, la colisión de dos barcos metálicos —si aumenta la demanda de gas— estadísticamente es muy probable que ocurra dentro de unos años. La superioridad del hormigón pretensado frente a la estructura metálica, en caso de impacto, se debe a la mayor tenacidad y redundancia de la primera frente a la segunda. En una estructura pretensada, la rotura de un tendón debe influir poco en los restantes y, de originarse una grieta, es posible que vuelva a cerrarse, mientras que en un depósito metálico una grieta grande puede arruinar la estructura. En este sentido se orienta la moderna normativa sobre seguridad. Cada vez es más frecuente —y en algunos países obligatorio— que los depósitos criogénicos metálicos se rodeen de paredes protectoras de hormigón pretensado.

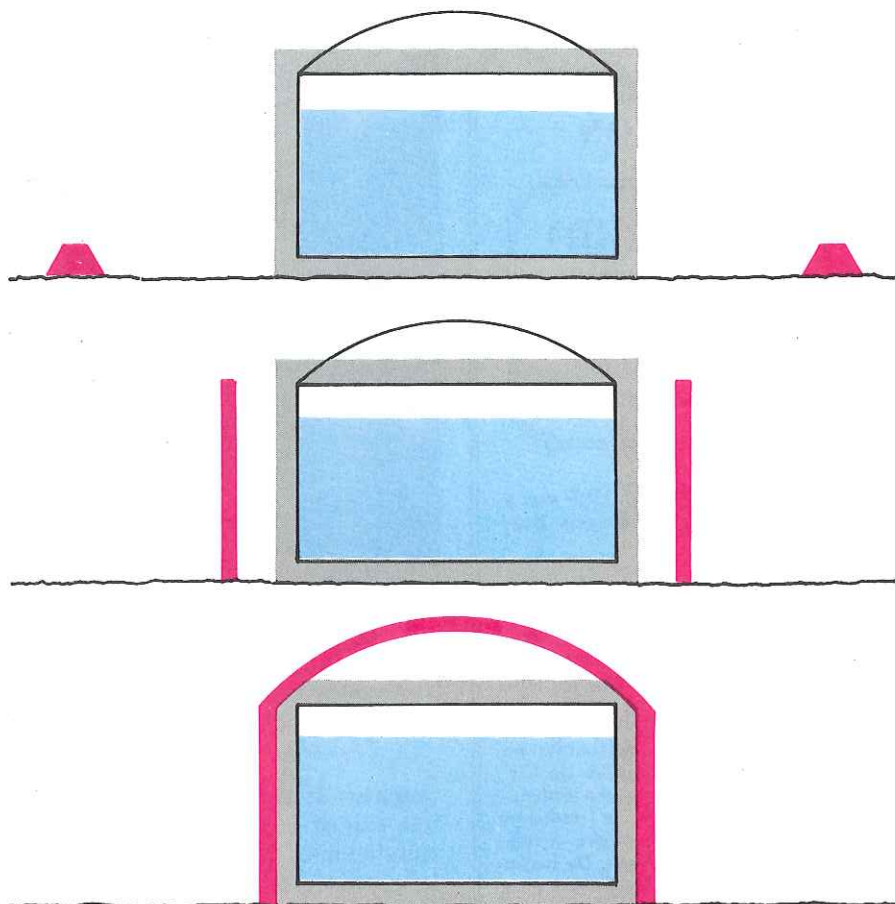
Entre los inconvenientes para la utilización del hormigón pretensado en los cascos de los barcos también está su resistencia a la fatiga. No obstante, ensayos realizados por B. Gerwick, Jr., de la Universidad de California en Berkeley, indican un comportamiento satisfactorio del hormigón pretensado sometido a fatiga a temperaturas del GNL. Por otra parte, se cree que con la utilización de hormigones especiales se podría reducir el peso en un 30 por ciento. Aunque todavía el casco de hormigón seguiría siendo más pesado que el de acero, la diferencia se acortaría significativamente.

El "Contranstor" es uno de los dos

proyectos más importantes destinados a transportar GNL mediante barcos de hormigón pretensado. El proyecto lo inició la compañía suiza International Gas Storage and Transport y fue desarrollado en cooperación con Taylor Woodrow International. Se han proyectado barcos de 25.000 toneladas, de 200 metros de eslora por 35 metros de manga. La estructura es celular y los depósitos son de doble pared. El otro proyecto, el "Dytam", es un barco de 56.000 toneladas, desarrollado por la compañía americana Tampimex en colaboración con la alemana Dyckerhoff y Widmann. La eslora del barco es de 290 metros y la manga de 44 metros. El espesor del casco es de medio metro y está dividido en diez compartimentos. Un análisis de estos proyectos indica no sólo una mayor seguridad, sino también un ahorro en el mantenimiento y en la construcción del orden del 15 por ciento. Ambos proyectos se han aprobado por la compañía aseguradora Lloyd y, además, el "Dytam" por la United States Coast Guard.

La utilización de los depósitos criogénicos de hormigón pretensado en los casquetes polares constituye otro sueño de los ingenieros. Los recientes proyectos para explotar los recursos del Ártico y del Antártico han estimulado el interés en el desarrollo de plataformas en mar abierto, primero para perforaciones exploratorias y después para producción. Estas plataformas se construirían en regiones templadas de los Estados Unidos, Japón o Corea y, luego, se transportarían al océano glacial Ártico. Este tipo de estructuras debe ser capaz de soportar presiones locales, debidas al hielo, del orden de 1000 toneladas por metro cuadrado. El hormigón, adecuadamente pretensado y reforzado, es dúctil y rígido y puede resistir este tipo de impactos a bajas temperaturas. Diversas empresas están realizando ensayos de campo y de laboratorio para estudiar el comportamiento del hormigón en el ambiente ártico, en particular los ciclos de hielo-deshielo alrededor de la línea de flotación y la abrasión debida al roce con el hielo. La experiencia con estructuras pretensadas en la isla de Tarsint, en el mar de Beaufort, es alentadora. La utilización del hormigón pretensado para la construcción de plataformas móviles para perforaciones está aceptada por la industria y por los organismos reguladores. Una estructura de este tipo, la Global Marine "Super CIDS", está construyéndose en Japón.

Pero la imaginación de los proyectis-

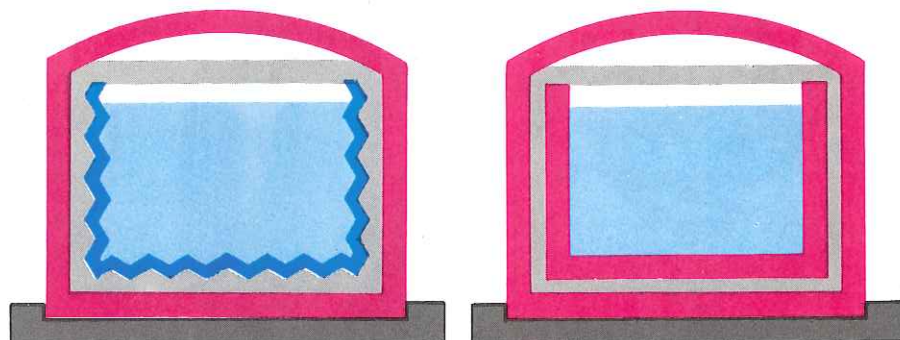


8. EVOLUCION DE LOS DEPOSITOS para almacenamiento de GNL. Los primeros depósitos eran recipientes cilíndricos cubiertos por un material aislante y rodeados por un murete, cuya función era retener el líquido en caso de que se produjera un derrame de GNL. El paso siguiente consistió en la construcción de un muro mucho más próximo al depósito y por lo tanto más alto, para que en caso de accidente retuviera el líquido y dificultara la formación de la nube baja capaz de iniciar una reacción en cadena en los depósitos vecinos. La siguiente innovación consistió en cerrar el muro mediante una cúpula para proteger el depósito del exterior, integrando las paredes de protección en un segundo depósito.

tas va más lejos. La explotación integral de las reservas petrolíferas del Ártico requerirá el transporte sobre el hielo o bajo él. Estas estructuras deberán ser capaces de resistir impactos, socavones en el hielo y grandes presiones en el caso de depósitos submarinos. Se cree que estas estructuras podrían ser mixtas, de hormigón pretensado y acero, donde se aprovecharían al máximo las características de los nuevos hormigones de alta resistencia.

Las aplicaciones potenciales de este nuevo material no terminan en los depósitos criogénicos. El desarrollo industrial de grandes dispositivos superconductores necesitará estructuras económicas que sean resistentes a muy bajas temperaturas, y nuevamente el hormigón —las rocas heladas fabricadas por el hombre— se presenta como un candidato indiscutible.

En 1975, alrededor de 30 expertos se reunieron durante 10 semanas, bajo los



9. DEPOSITOS DE DOBLE PARED. En la figura izquierda la pared interior es flexible y se apoya en la pared exterior; en la figura derecha la pared interior es rígida, de acero o de hormigón pretensado.

UNA ESPERADA REEDICION

DICCIONARIO DE SIMBOLOS

Juan Eduardo Cirlot

Un volumen de 13,5 × 19,5 cm y 476 páginas, con numerosas ilustraciones

La simbología fue, desde Egipto, la gran ciencia de la Antigüedad. En Oriente perduró siempre. En Occidente inspiró el gran arte medieval, así como el manierista y barroco. Durante los siglos XVI a XVIII dio origen a la inmensa corriente de los libros de emblemas, con frecuencia redactados en forma de diccionario. El libro de Cirlot es el primero que con una ordenación alfabética, reanuda la tradición perdida. Cada cualidad, objeto o concepto vale por su significado. De hecho poseen valor simbólico las formas geométricas, los colores, los números, las zonas del espacio y cuantos seres pueblan el mundo. Su interacción crea una sintaxis simbólica, como explica en su introducción el autor del libro. Por tanto éste es, además de una obra de simbología y signografía, un verdadero tratado de ciencias humanistas desde tales ángulos.



EDITORIAL LABOR, S. A.

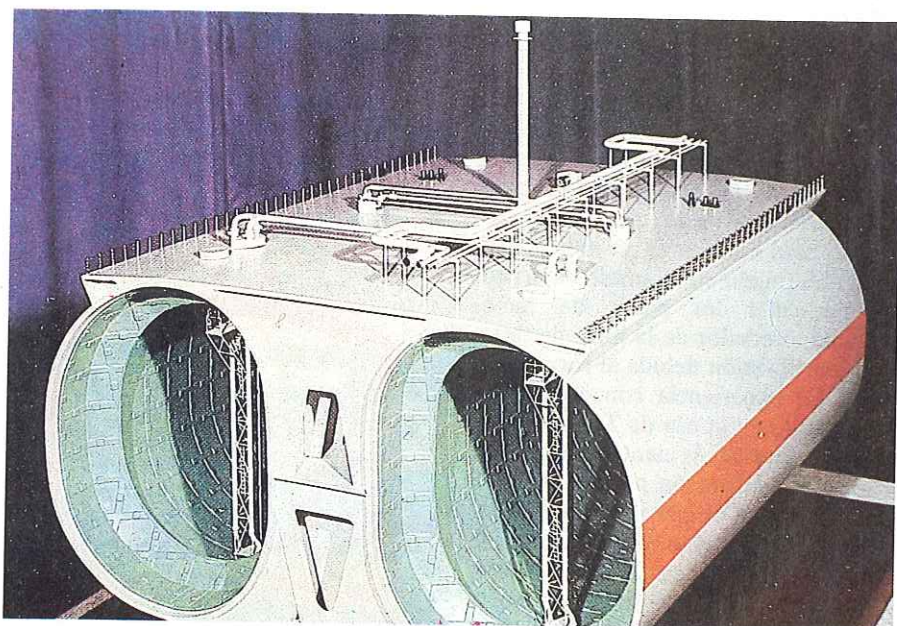


10. DETALLE DEL DEPOSITO INTERIOR de hormigón pretensado, de 80.000 metros cúbicos, de Barcelona (España), durante la fase de construcción. Se puede apreciar la camisa de acero, que asegurará la estanqueidad y que servirá de encofrado para hormigonar, luego, la pared. Los tubos verticales son las vainas por donde se enhebrarán luego los tendones de acero para el pretensado vertical de la pared.

auspicios de la NASA, para proyectar una ciudad espacial. Para su realización, millares de toneladas de materiales procedentes de la Luna y asteroides se utilizarían para construir un gigantesco tubo circular —un toro— de casi dos kilómetros de diámetro. Esta ciudad está proyectada para albergar una colonia de 10.000 habitantes, con escuelas para los nacidos en el espacio, jardines, campos de deporte y fábricas en las que se podrán desarrollar materiales y medicamentos.

Este artículo empezó describiendo cómo las naves espaciales se habían en-

contrado con enormes rocas a la temperatura del GNL. Se ha descubierto que el hormigón criogénico —una roca helada fabricada por el hombre— es el estado natural de pequeños mundos que vagan por el espacio. ¿Acaso no podría utilizarse el hormigón pretensado, que ha demostrado poseer excelentes propiedades a temperaturas siderales, para la construcción de las ciudades espaciales? Si dejamos volar la imaginación podremos intuir que quizás, en un futuro no muy lejano, el hormigón pretensado tenga un lugar entre los viajeros de las estrellas.



11. SECCION DEL CASCO del supermetanero Dytam, de 56.000 ton., desarrollado por la compañía americana Tampimex en colaboración con la alemana Dyckerhoff y Widemann. La eslora es de 290 m y la manga de 44 m. El casco tiene un espesor de medio metro y está dividido en 10 compartimentos.

Los autores

MANUEL ELICES CALAFAT ("Depósitos criogénicos de hormigón pretensado") es catedrático de la Escuela de Ingenieros de Caminos de la Universidad Politécnica de Madrid y director del departamento de física y física de materiales. Desde 1964 trabaja en problemas relacionados con el hormigón pretensado, corrosión de armaduras, fractura del hormigón, fenómenos viscoplásticos y comportamiento a muy bajas temperaturas. En 1981, la Asociación Técnica Española del Pretensado le otorgó su medalla por la colaboración al desarrollo del hormigón pretensado. En la actualidad preside y coordina las actividades del grupo de trabajo relacionado con las aplicaciones criogénicas del hormigón pretensado en el seno de la Federación Internacional del Pretensado.

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

DEPOSITOS CRIOGENICOS DE HORMIGON PRETENSADO

CONCRETE AND CRYOGENICS. F. H. Turner. Cement and Concrete Association, 1979.

PRESTRESSED CONCRETE FOR THE STORAGE OF LIQUEFIED GASES. A. S. G. Bruggeling. Cement and Concrete Association, 1981.

CRYOGENIC BEHAVIOUR OF MATERIALS FOR PRESTRESSED CONCRETE. M. Elices, F. S. Rostasy, W. M. Faas y G. Wiedemann. FIP, Wexham Springs; Slough, 1982.