
DESCRIPCION DEL DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN DEPOSITO DE HORMIGON PRETENSADO PARA 80.000 m³ DE CAPACIDAD DE GAS NATURAL LICUADO ESPAÑA

Ramón Fernández de la Reguera,
Director Facultativo

José Luis Rivas Zaragüeta,
Jefe de Control de Calidad
Preload-Auxini

581-30

SINOPSIS

La construcción de un nuevo depósito de 80.000 m³ de capacidad para almacenamiento de gas natural licuado en la Planta que la Empresa Nacional del Gas, S. A. (ENAGAS) tiene en Barcelona, ha sido realizada por la Empresa Auxiliar de la Industria, S. A. (AUXINI) en Agrupación Temporal con PRELOAD SISTEMAS.

Esta obra, una de las últimas realizaciones mundiales en el sector, consistente en doble pared de hormigón pretensado, ha permitido a AUXINI constituirse en una de las empresas líderes de la joven y dinámica tecnología criogénica, aportando soluciones constructivas adecuadas para este tipo de depósitos.

En el trabajo que sigue se hace hincapié en la descripción del depósito indicando los pormenores constructivos del mismo, tales como la construcción y montaje de la chapa del muro interno, así como el pretensado horizontal tipo Preload utilizado, además de otros procedimientos constructivos como la elevación de la cúpula, la soldadura de la chapa 9 % Ni, etc.

Este depósito incorpora los últimos requisitos de seguridad que se exigen en el Proyecto de ese tipo de almacenamiento y, por las numerosas innovaciones que se han introducido durante su construcción, ha constituido una obra pionera en su género y de carácter mundial.

La Empresa Gas Natural, S. A. instaló una planta terminal de gas natural licuado (GNL) en el puerto de Barcelona. Esta planta incluía tres depósitos de almacenamiento que respondían a distintas fechas de construcción y diseño.

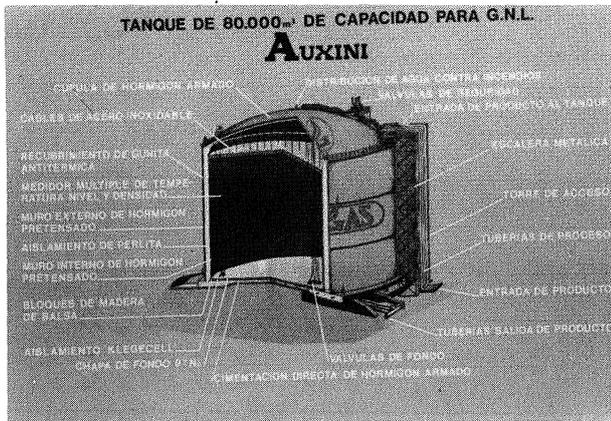
En los años 1967 y 1968, se construyeron dos depósitos de 40.000 m³ de capacidad unitaria, que estuvieron en operación en marzo y junio de 1969. Estos depósitos tienen la pared interna de hormigón pretensado con barrera de vapor de chapa acero al carbono y muro externo también de acero al carbono. La pared interna de hormigón está constituida a base de paneles prefabricados. Es de señalar que esta instalación fue pionera en la construcción de depósitos de hormigón pretensado en el mundo.

Posteriormente, Gas Natural, S. A. decidió la construcción de un tercer depósito de doble pared metálica de 80.000 m³ de capacidad como ampliación de la planta.

ENAGAS se hizo cargo desde su fundación de las instalaciones que pertenecieron a Gas Natural, Sociedad Anónima y decidió la construcción de un nuevo depósito de 80.000 m³ de capacidad en el que tras un cuidadoso análisis de los condicionamientos de seguridad aplicados en los distintos países y dentro de las máximas seguridades que la técnica puede proporcionar actualmente, seleccionó la solución de depósito con doble pared de hormigón pretensado.

ENAGAS, con la colaboración del Contratista, ha debido analizar los requerimientos internacionales más avanzados, decidiendo la solución dentro de una política que garantice la máxima seguridad de las instalaciones.

La regulación fundamental que ha regido en el diseño de este tipo de depósito, ha sido la norma del National Fire Protection Association 59-A (USA) del año 1975 sobre el «Almacenamiento y Manejo del Gas Natural Licuado», única existente en la fecha en que se comenzó el proyecto.



Dirección y Construcción.	AUXINI (ESPAÑA)
Control de Calidad	AUXINI (España)
Supervisión del Control de Calidad	OBRA CIVIL: INTEMAC (ESPAÑA) SOLDADURA: CENIM (ESPAÑA)
Ensayos de Materiales a baja temperatura	CATEDRA DE FISICA DE LA ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE CAMINOS CANALES Y PUERTOS DE MADRID (ESPAÑA)

Dada la responsabilidad y complejidad de la obra, ENAGAS, contrató con AUXINI en Agrupación Temporal con PRELOAD SISTEMAS el proyecto, dirección de obra y construcción de este cuarto depósito con un contrato de tipo «llave en mano».

El depósito de 80.000 m³ de capacidad para almacenamiento de gas natural licuado, consiste en dos muros concéntricos de hormigón pretensado, fondos de acero, techo suspendido y cúpula de hormigón armado. Entre ambos recipientes se ha dispuesto un sistema de aislamiento. Este depósito lleva incorporada una torre de acceso y soporte de tuberías de proceso y demás elementos de instrumentación. Las penetraciones se efectúan todas por la cúpula excepto la salida de producto que tiene lugar por el fondo.

El proyecto del depósito incorpora las acciones descritas en el artículo 581-28, pág. 21, por lo que podemos concluir que la seguridad ha sido el factor decisivo que ha condicionado la concepción, dimensionamiento y construcción de las estructuras y demás partes de la obra.

Tras esta breve introducción, pasamos a describir someramente el diseño y construcción de este depósito.

DISEÑO Y CONSTRUCCION

Propietario	ENAGAS, S. A. (ESPAÑA)
Especificación Básica.....	ENAGAS, S. A. (ESPAÑA)
Diseño Básico	PRELOAD TECHNOLOGY, INC (USA)
Ingeniería de Detalle	PRELOAD SISTEMAS, S. A. (ESPAÑA) HEREDIA Y MORENO, S. A. (ESPAÑA) AUXINI (ESPAÑA)

DATOS BASICOS DE DISEÑO

Capacidad Neta de Almacenamiento	80.000 m ³
Producto Almacenado.....	GNL (Gas Natural Licuado)
Máxima Tasa de Evaporación Normal....	0,05 % por día.
Presión de diseño	1.400 mm·c.a.
Vacío de diseño	-35 mm·c.a.
Temperatura de diseño.....	-165 °C
Densidad del producto almacenado.....	545 kg/m ³
Presión de operación	500 mm·c.a.

Cimentación y apoyo muro interno

Se ha diseñado una cimentación mediante losa flexible de hormigón armado en su zona central y una zapata de 1,00 m de canto en forma de anillo dispuesta en la zona perimetral de apoyo de los muros. La transición entre ambos elementos es continua y de forma suave.

Esta cimentación lleva incorporado un sistema de calefacción eléctrica a fin de evitar el progresivo enfriamiento del terreno.

Las chapas de subfondo de acero al carbono ordinario están colocadas directamente sobre la losa de cimentación, cumpliendo una misión de estanquidad al vapor que se encuentra dentro del espacio cerrado por el recipiente exterior.

Los bloques de madera de balsa utilizados como apoyo del muro interno, se han presentado como particularmente idóneos para cumplir su misión de resistencia a compresión y de aislamiento, al mis-

mo tiempo, siendo éste el primer depósito de GNL en operación que ha utilizado por primera vez este material.

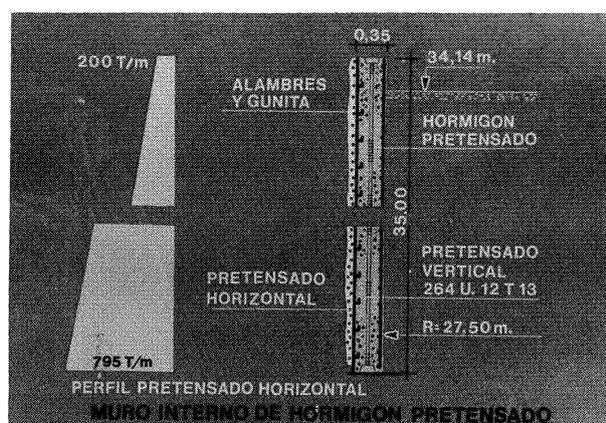
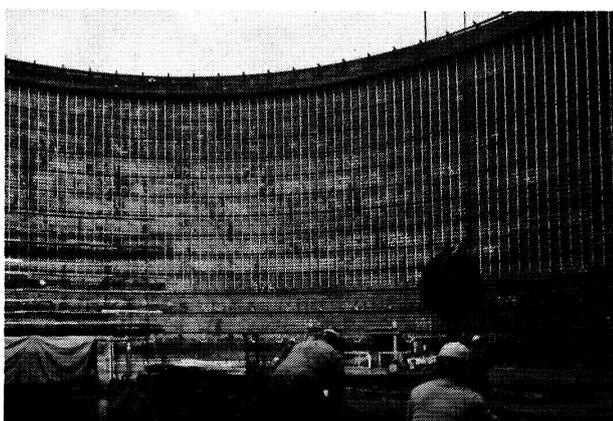
La chapa de fondo se prolonga, en su perímetro, en un anillo de la misma calidad y 10 mm de espesor, que constituye la chapa de base del muro interno; la primera virola, también de acero 9 % Ni, tiene una altura de 50 cm, y ha de ser necesariamente de este material debido a que la disposición del anclaje pasivo del pretensado vertical no permite transmitir al hormigón la compresión deseada hasta una altura equivalente a los 50 cm indicados.

Se han puesto a punto las técnicas más avanzadas para ejecutar correctamente la soldadura del acero 9 % Ni, y se ha establecido un control riguroso en la junta en T del muro con su base en este punto vital del tanque.

Forro metálico del muro interno

El muro contenedor primario de GNL es de hormigón pretensado, e incorpora una barrera de vapor de acero al carbono ordinario aplicada en su paramento externo que impide la difusión gaseosa del líquido a través del muro; no obstante, están en curso actualmente, dentro de un Programa de Investigación desarrollado por AUXINI, ensayos e investigaciones para poner a punto otros productos, tales como resinas o poliuretanos que aplicados en el paramento interno o externo, eviten la construcción de la chapa, siempre costosa y con una problemática muy específica; esta camisa que forma la barrera de vapor está comprimida en ambos sentidos por el pretensado vertical y horizontal, lo que permite su empleo como material criogénico según la regulación de los códigos vigentes.

La barrera de vapor del muro se ha montado por un procedimiento consistente en el arrollamiento en hélice de las chapas preparadas en un banco especial de trabajo. El arrollamiento se consigue mediante 40 gatos hidráulicos que mueven una estructura de 55 m de diámetro y 35 m de altura,



con un espesor de tan sólo 5 mm, lo que ha constituido, evidentemente, un récord mundial en su ejecución y puesta a punto; este sistema de construcción tiene la ventaja de que todo el conjunto del tanque pasa por un mismo punto, debido al giro del sistema, lo que permite concentrar en determinadas zonas la posición de los soldadores que efectúan su trabajo por ambas caras, así como la colocación de las armaduras pasivas y de las vainas del pretensado vertical que se van colocando a medida que el conjunto pasa por unos andamios fijos, lo que además permite un riguroso control de su verticalidad y linealidad.

Muro interno de hormigón pretensado

Diámetro interno	55 m.
Altura	35 m.
Espesor del hormigón.....	0,35 m.
Metros cúbicos de hormigón	2.150 m ³ .
Peso alambre pretensado circular.....	230.000 kg.
Peso cables pretensado vertical	88.500 kg.
Unidades de pretensado vertical	264 Uds.
Armaduras pasivas	40.000 kg.

El hormigonado del muro se ha efectuado mediante tres grúas-torre, dispuestas a 120 grados entre sí, que han colocado el hormigón procedente de una central de hormigonado de 10 m³/h de rendimiento medio, situada a pie de obra; a este hormigón de árido granítico se le ha exigido una resistencia característica a temperatura ambiente de 350 kg/cm² a los 28 días, y se ha incorporado en su masa una cierta cantidad de aire ocluido para aumentar su durabilidad frente a posibles ciclos de calentamiento-enfriamiento. El control del hormigón y su puesta en obra ha sido el denominado «intenso» según la instrucción EP-77, dada la responsabilidad de la obra.

El muro se hormigonó empleando, como encofrado en su paramento interno, placas metálicas elevadas mediante procedimiento convencional.

Es de destacar el proceso constructivo de gran relieve utilizando en este depósito en el que la

ejecución del hormigón in situ, independientemente de eliminar grandes y costosas instalaciones para la prefabricación de paneles como se venía haciendo hasta ahora en depósitos de tipología parecida, evita el tratamiento de las juntas de estos paneles, siempre de difícil solución y garantiza una estructura monolítica.

Podemos concluir en que éste ha sido el primer depósito de GNL en que el hormigón que está en contacto con el líquido ha sido vertido in situ.

Una vez hormigonado el muro y de acuerdo con los controles de resistencia del hormigón, se inició la aplicación del pretensado horizontal, efectuado mediante el sistema PRELOAD, consistente en el arrollamiento con alambre de alta resistencia, de 6 mm de diámetro, trefilado en frío, haciéndolo pasar a través de una hilera de 5,27 mm, que zuncha el muro de hormigón obteniéndose tensiones de tesado comprendidas entre 90 y 100 kg/mm². En total se han aplicado unas 230 toneladas de alambre, aplicándose entre capa y capa una proyección de gunita convencional.

Simultáneamente a la aplicación de este pretensado, pero con la coordinación adecuada para evitar tensiones indeseables en la base del muro, se ha efectuado el pretensado vertical mediante el sistema Freyssinet 12 T 13 constituido por 264 tendones compuestos cada uno por 12 cordones de alta resistencia de 1/2" de diámetro; la fuerza de tesado inicial es de 171 t, equivalente a 144 kg/mm² y los alargamientos obtenidos han estado dentro de lo especificado de 264 milímetros \pm 5 %.

Este pretensado vertical tiene una función clara en el diseño: evita la aparición de tracciones verticales en los puntos de máxima flexión como consecuencia de la aplicación del pretensado horizontal o de la carga del líquido y mantener el forro metálico en un estado permanente de bicompresión.

El criterio para el dimensionamiento del pretensado horizontal ha sido la eliminación de tracciones en el hormigón sometido a la carga hidráulica del líquido suponiendo el apoyo en la base como deslizante y dejando, lógicamente, un cierto nivel de compresiones residuales.

Merece la pena destacar la esbeltez del muro interno construido, cuya relación espesor-altura es 1/100 y ha constituido un récord en depósitos de este tipo.

En este proyecto AUXINI ha desarrollado gracias a la valiosa colaboración de la Cátedra de Física de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, de Madrid, un amplio trabajo de investigación, a fin de verificar el comportamiento del conjunto hormigón-acero, a temperatura criogénica. Para ello se construyó una

probeta de hormigón que incorporaba todos los elementos del muro, ajustándose así fielmente a la realidad y que fue inmersa en nitrógeno líquido.

Con la ejecución de estos ensayos se ha dado un paso adelante para demostrar la idoneidad del empleo de sistemas de pretensados convencionales aplicados a estructuras criogénicas, lo que ha supuesto un importante aporte tecnológico al campo de este tipo de almacenamientos.

También en el seno del mismo Programa de Ensayos, se han efectuado los necesarios para determinar las propiedades de los materiales utilizados, tales como chapa de acero, madera de balsa, aceros de pretensados, aislamientos, etc., demostrando con todo ello su adecuación para el empleo criogénico.

Cúpula metálica y techos suspendidos

La estructura metálica de la cúpula se montó en la base del depósito simultáneamente al hormigonado del muro interno en los metros superiores. Esta estructura metálica consta de 88 perfiles IPE-270, apoyados en su arranque en una viga de borde formada por un perfil U-300; la estructura quedaba soportada en su centro por un castillete temporal.

A continuación se montó la chapa de la cúpula sobre la estructura metálica antes indicada, así como el techo suspendido colgado directamente de los nervios metálicos.

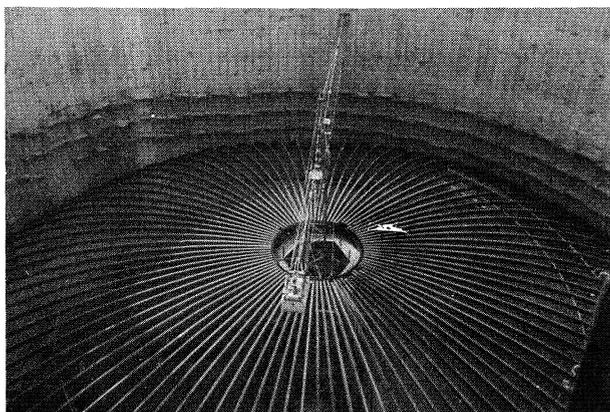
Sobre la chapa de aluminio colocada encima de los angulares, se dispuso el aislamiento del techo formado por 7 capas de paneles de fibra de vidrio que totalizan un espesor de 840 mm.

Este techo incorpora cuatro orificios compensadores, de forma tal que cualquier diferencia de presión, entre el recipiente interno y externo, es compensada automáticamente mediante la comunicación entre ambos recipientes, evitándose así una posible elevación del mismo.

Todo este conjunto formado por la estructura metálica chapa, techo suspendido y aislamiento, fue elevado a su posición definitiva una vez finalizada la construcción del muro externo.

Muro externo de hormigón pretensado

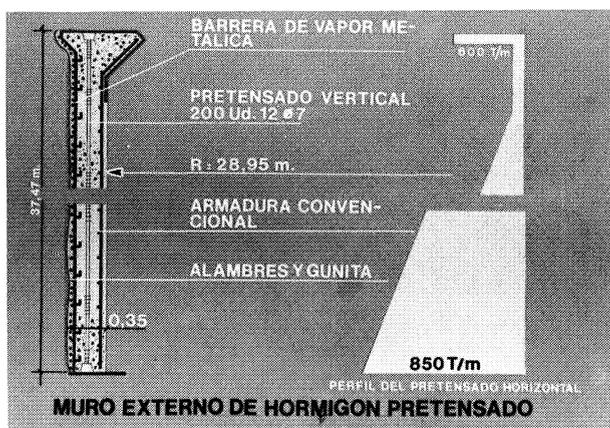
Diámetro interno	57,9 m.
Altura total	37,47 m.
Espesor chapa	5 mm.
Espesor hormigón	0,35 m.
Metros cúbicos de hormigón	2.400 m ³ .
Peso de alambres pretensado circular	240.000 kg.
Peso de cables pretensado vertical	27.000 kg.
Unidades de pretensado vertical	200 uds.
Armaduras pasivas	90.000 kg.



Este muro, muy similar en su diseño al interno, se construyó elevando simultáneamente las chapas que constituyen la barrera de vapor del muro y el hormigonado del mismo de forma que el desfase entre ambas actividades favoreciera la coordinación de las mismas; en este caso la barrera de vapor del muro cierra completamente el depósito exterior, lo que no permite penetración alguna de humedad ni salida de gas metano al exterior.

El hormigón de este muro es convencional no aireado, y ha sido también pretensado de forma similar a como se hizo en el muro interno. El pretensado vertical consta de 200 unidades, 12 \varnothing 7 del sistema Freyssinet.

Este muro externo de hormigón pretensado incorpora simultáneamente las funciones de recipiente externo y las derivadas de un muro de seguridad por lo que, a este tipo de almacenamientos, se les denomina comúnmente «depósitos integrados».



Elevación de la cúpula y hormigonado de la misma

La elevación de las 350 t de peso mediante un dispositivo formado por tres series de grupos de gatos hidráulicos autorregulables, creando un dispositivo de apoyo en tres planos para minimizar los efectos hiperestáticos, ha sido de por sí una innovación tecnológica utilizada en muy po-

cos depósitos, a la par que ha requerido complejos controles de nivelación.

La cúpula de hormigón armado protege al depósito de cualquier agente externo, dando una mayor seguridad respecto a los depósitos de simple cúpula metálica, normalmente utilizados incluso en depósitos de pared de hormigón.

Para su construcción se ha presurizado el tanque a una presión admisible para la chapa de la cúpula, evitando que el peso del hormigón fresco fuese soportado por la estructura metálica.

Aislamientos y fondo del depósito

El aislamiento de fondo se consigue mediante elementos de espuma de PVC expandida que soporta la carga del GNL y aísla la cimentación, mientras que entre paredes se ha colocado perlita expandida, aislamiento suficientemente probado en otro tipo de depósitos.

El fondo del tanque interno está constituido por acero 9 % Ni empleado usualmente en este tipo de almacenamientos, dada la demostrada idoneidad de este material para su empleo criogénico.

Pruebas de aptitud

El depósito así construido ha sido sometido a las pruebas y operaciones necesarias para probar su aptitud antes de llenarlo con GNL.

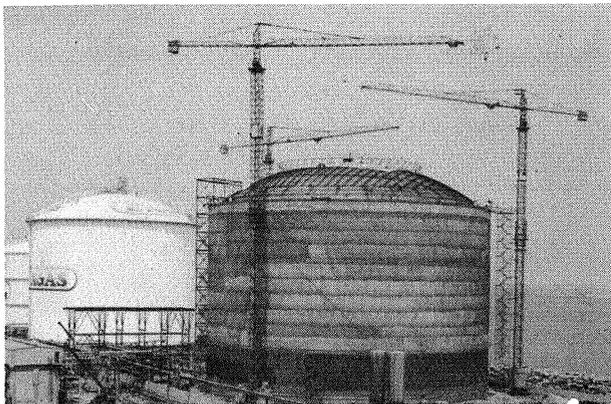
Las pruebas hidráulicas y neumáticas someten al depósito a presiones superiores a las de operación para demostrar su estanquidad y capacidad resistente.

A continuación, la operación de purga desplaza el aire del interior y lo sustituye por nitrógeno, reduciendo así el contenido de oxígeno y humedad a límites admisibles.

Y por fin la operación de puesta en frío hace descender gradualmente, de forma controlada, la temperatura del recipiente interior desde la ambiente hasta la de operación, preparando así el depósito para recibir el GNL.

Tuberías e instalaciones

El tanque lleva incorporada una torre de acceso sobre la que se soporta las tuberías de proceso y demás elementos de instrumentación; entre aquellas merece destacarse la existencia de dos tuberías de llenado de GNL de 28" de diámetro. La entrada de estas tuberías y otras de proceso se efectúa por la cúpula del tanque, mientras que la salida de producto tiene lugar a través de tres tuberías encamisadas de 16" que extraen el producto por el fondo.



En cuanto a la instrumentación y equipos especiales, merece destacarse la instalación de 182 termopares distribuidos en todo el depósito, que permiten conocer la temperatura en cada momento, así como la existencia de un medidor múltiple de temperatura, nivel y densidad del contenido de GNL, que permite obtener información de estos parámetros a lo largo de un eje vertical, pudiéndose prevenir los fenómenos de estratificación que conducirían a un posible efecto de inestabilidad («roll-over»), por ello este instrumento es muy útil para la operación del depósito.

El depósito dispone de tres válvulas de clapeta que evitan la salida de productos en caso de accidente o rotura de alguna tubería exterior, así como tres válvulas de seguridad que evacúan 37.500 m³/h de gas, que satisface las condiciones más exigentes.

Este depósito está en operación satisfactoriamente desde febrero de 1981.

Control de Calidad

Como dato significativo de la importancia de la correcta ejecución, dada la responsabilidad de la obra, señalamos que el equipo de AUXINI de control de calidad de la obra ha supuesto un 15 % del costo total de la misma.

Es de destacar que la responsabilidad del Control de Calidad de la construcción ha recaído en la propia empresa constructora, con una organización totalmente independiente de la producción de la obra.

A parte de los ensayos a baja temperatura a los que someramente nos hemos referido antes, cabe citar las siguientes actuaciones principales de esta organización:

- Realización de Ensayos previos de los materiales para determinación de los parámetros que inciden en el proyecto.
- Realización de Ensayos de los materiales a pie de obra para comprobar su adecuación a los requisitos del proyecto.
- Control de Ejecución de las operaciones que intervienen en los distintos procesos construc-

tivos: radiografiado de soldaduras, caja de vacío, obtención de probetas testigo, pretendidos, etc.

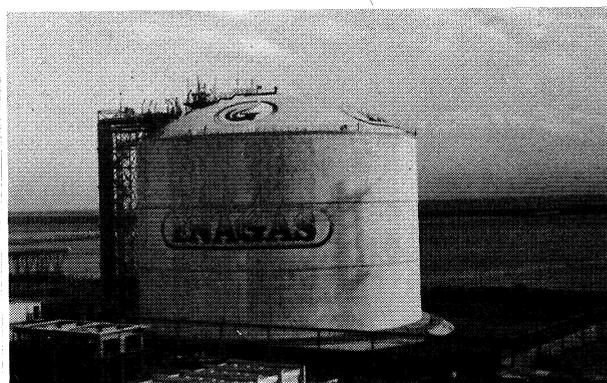
- Realización de Ensayos de los materiales durante la ejecución de la obra: hormigón, etc.
- Comprobación de tolerancias y otros aspectos dimensionales durante los procesos constructivos.
- Obtención de los resultados durante la ejecución de las pruebas de aptitud del depósito, tuberías e instrumentación anejas.
- Comprobación de que la evolución de las operaciones previas a la puesta en servicio, tales como purga y enfriamiento, responde a lo previsto en las operaciones de detalle.

Pretendemos haber mostrado en este breve artículo que la ejecución por AUXINI del depósito de GNL en Barcelona, para ENAGAS, ha abierto unas vías de investigación y desarrollo en una tecnología que por sus características y novedad presenta grandes perspectivas en su aplicación.

Baste mencionar al respecto que los complejos ensayos de materiales en condiciones criogénicas han potenciado los laboratorios españoles en la materia y en especial el de la Cátedra de Física de la E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid, hasta el punto de desarrollar procedimientos inéditos que han permitido que la F.I.P. (Federación Internacional del Pretensado) haya otorgado al Director de dicho laboratorio la responsabilidad de una ponencia sobre comportamiento del acero de pretensar en condiciones criogénicas.

Fruto de todo ello es la ejecución de un programa de desarrollo de esta tecnología, efectuado por AUXINI con financiación parcial del Fondo de Fomento a la Investigación del I.N.I. y que permitirá continuar en cabeza en la aplicación del hormigón a los almacenamientos de productos potencialmente peligrosos y, en especial, los almacenados en condiciones criogénicas.

Por último nuestro agradecimiento a la Empresa Nacional del Gas por haber puesto toda su confianza en AUXINI, así como su inestimable colaboración por llevar a buen fin una obra tan singular.



* * *