

Diseño sísmico del tanque de gas natural licuado en Mejillones, Chile

Seismic design of a liquefied natural gas storage tank in Mejillones, Chile

Diego Peña Ruiz^a, Flor Vaquero Morena^a y Santiago Guzmán Gutiérrez^{b,*}

^a Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Técnicas Reunidas, S.A., Madrid, España

^b Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Ingeniero de Materiales, Técnicas Reunidas, S.A., Madrid, España

Recibido el 24 de junio de 2016; aceptado el 29 de agosto de 2016

Disponible en Internet el 19 de octubre de 2016

Resumen

El diseño y la construcción de un tanque de gas natural licuado (GNL) plantean numerosos retos a superar como proyecto de indudable complejidad técnica. En el caso de Mejillones (Chile), a las enormes dimensiones (más de 90 m de diámetro externo y 50 m de altura, para un volumen neto de 175.000 m³) y al efecto de las temperaturas criogénicas (−170 °C en el interior del tanque), hay que añadir la ubicación en uno de los lugares con mayor riesgo sísmico del planeta. Los trabajos fueron desarrollados por Técnicas Reunidas como contratista Engineering Procurement Construction (EPC) en el marco de la segunda fase de la Terminal de GNL de Mejillones y culminados con éxito con la puesta en servicio en enero de 2014. El resultado, probablemente, el mayor tanque de GNL sobre aisladores sísmicos en el mundo.

© 2016 Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural (ACHE). Publicado por Elsevier España, S.L.U. Todos los derechos reservados.

Palabras clave: Tanque de gas natural licuado; Aislador sísmico; Hormigón criogénico; Acero 9% Ni; Interacción suelo-fluido-estructura

Abstract

The design and construction of a Liquefied Natural Gas (LNG) storage tank involves multiple challenges to be overcome as a project of high technical complexity. In the case of Mejillones (Chile), in addition to the enormous dimensions (more than 90 m of outer diameter and 50 m in height; 175,000 m³ of net volume), and the effect of cryogenic temperatures (−170 °C inside the tank), we have to consider that it is located in one of the highest seismic risk areas on the planet. The company, Técnicas Reunidas, successfully carried out the works as the EPC (Engineering Procurement Construction) contractor, within the framework of the second phase of Mejillones LNG Terminal, brought into service in January 2014. As a result, it is probably the biggest LNG tank on seismic isolators in the world.

© 2016 Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural (ACHE). Published by Elsevier España, S.L.U. All rights reserved.

Keywords: LNG tank; Seismic isolator; Cryogenic concrete; 9% Ni steel; Fluid-soil-structure interaction

1. Introducción

A finales de 2010, Técnicas Reunidas resultó adjudicataria de los trabajos correspondientes a la fase II de la Terminal de Gas Natural Licuado (GNL) de Mejillones (región de Antofagasta, Chile), en la modalidad de llave en mano. Como contratista único y principal, Técnicas Reunidas quedó encargada de diseñar y

construir un tanque de almacenamiento de GNL con una capacidad de 175.000 m³ y tipología de contención total, así como las conexiones a la terminal y algunas ampliaciones asociadas. Se daba así continuidad a la relación establecida entre GNL Mejillones (GDF Suez-Codelco) y Técnicas Reunidas, que ya se había encargado del diseño y construcción de la fase I.

La terminal tiene actualmente una capacidad de 5,5 millones de Nm³/día, con tres trenes de regasificación en funcionamiento, lo que supone disponer de un equivalente de 1.100 MW para generación de electricidad. Con la construcción del cuarto tren de regasificación y una mejora de los tres trenes existentes en

* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: guzman.s@tecnicasreunidas.es (S. Guzmán Gutiérrez).

Tabla 1
Ficha técnica del tanque de Gas Natural Licuado de Mejillones

| | |
|----------------------------|--|
| Cliente | GNL Mejillones (GNLM) |
| Ubicación | Mejillones, Antofagasta, II Región de Chile |
| Contratista EPC | Técnicas Reunidas (TR) |
| Tipología | Contención total |
| Normativa de referencia | NFPA 59A [1], API 620 [2], EN 1473 [3], EN 14620 [4], NCh 2369 [5] |
| Capacidad | 175.000 m ³ |
| Temperatura de diseño | −170 °C |
| BOG (Boil-Off Gas) ratio | 0,05% máx./día |
| Dimensiones tanque externo | Ø91,9 m, altura máxima = 52,3 m |
| Dimensiones tanque interno | Ø88,3 m, altura = 33,6 m |
| Volumen total de hormigón | ≈ 25.700 m ³ |

una futura fase, la capacidad de la planta se incrementará hasta los 10 millones de Nm³/día.

La fase II implicaba la sustitución de la unidad flotante de almacenamiento (*Floating Storage Unit* [FSU]) por un tanque en tierra, cuyas principales características se resumen en la *tabla 1*. Como tanque de contención total, de acuerdo a la normativa de referencia [1], el tanque de GNL consiste en un contenedor primario, en este caso de acero 9% Ni, que contiene el líquido refrigerado en condiciones de operación y un contenedor secundario, de hormigón postesado, estanco a los vapores y capaz de contener la totalidad del líquido en caso de derrame por fallo del contenedor primario. Entre ambos recipientes se dispone un aislamiento térmico formado fundamentalmente por bloques de vidrio celular en los fondos, perlita expandida en la zona anular y manta de fibra de vidrio sobre un techo suspendido de la cúpula de hormigón.

La normativa aplicable a este tipo de estructuras [1–4] exige, ya de por sí, un estudio de peligrosidad sísmica específico para la zona de ubicación y un análisis dinámico que tenga en cuenta la interacción entre el suelo, el fluido y la estructura. En el caso de Mejillones, donde se considera un escenario máximo creíble de magnitud $M_w = 9$, se debía cumplir, además, con la exigente normativa local en aspectos sísmicos [5].

Como ejemplo de la complejidad de los modelos computacionales asociados al diseño del tanque, cabe destacar que se requiere el análisis y comprobación del evento accidental de fuga de la cuba primaria (*Major leak*) acompañado por un sismo normal admisible (*Operating Basis Earthquake* [OBE]). Esto es, ante un fallo del contenedor primario, el tanque exterior debe ser capaz de resistir la acción de un terremoto, incluyendo los efectos hidrodinámicos así como el gradiente térmico generado por el contacto directo del producto, en ese caso, con la pared interna de hormigón.

En el diseño, bajo el alcance de Técnicas Reunidas y la supervisión de Tractebel, también participaron otras empresas altamente especializadas, como la japonesa Kawasaki Heavy Industries (KHI) o las chilenas Metacontrol Ingenieros y Seismic Protection Technologies (SIRVE), encargadas estas últimas del desarrollo del modelo computacional 3D en elementos finitos. Como resultado de los análisis, se eligió un sistema antisísmico constituido por 208 aisladores elastoméricos con núcleo de plomo en la zona perimetral de la losa de cimentación y

otros 293 aisladores elastoméricos sin núcleo de plomo en la zona central, para configurar un total de 501 aisladores elastoméricos. Todos ellos dispuestos en un sistema de doble losa y pedestales de hormigón, de manera que fueran accesibles y, en caso necesario, reemplazables.

La misión de los aisladores sísmicos es desacoplar en la medida de lo posible la respuesta de la estructura al movimiento del suelo durante un sismo. En primer lugar, proporcionando flexibilidad lateral a la estructura para llevarla a periodos propios de vibración más altos que reduzcan la respuesta sísmica y, en segundo lugar, disipando energía al funcionar como elementos de alto factor de amortiguamiento para reducir los desplazamientos sísmicos a un nivel aceptable. Ambos aspectos están limitados: el primero, por la deformación máxima de los propios aisladores y el desplazamiento relativo máximo a soportar por elementos de conexión como son las tuberías asociadas al tanque; el segundo, por la capacidad de amortiguamiento de los aisladores y los límites estipulados en la normativa de aplicación.

En definitiva, se trataba de encontrar un equilibrio, una solución óptima que garantizara los niveles de desempeño y seguridad exigidos, bajo las condiciones impuestas y cuyos aspectos más significativos se desarrollan a continuación.

2. Acción sísmica y datos del terreno

De acuerdo a la NFPA 59A [1], dos son los terremotos básicos a considerar en el diseño de un tanque de GNL:

- El sismo normal admisible (OBE), correspondiente a un período de retorno de 475 años (i.e. 10% de probabilidad de excedencia en 50 años), para el que la instalación debe continuar funcionando con seguridad;
- El sismo mayorado de seguridad (*Safe Shutdown Earthquake* [SSE]), correspondiente a un período de retorno de 2.475 años (i.e. 2% de probabilidad de excedencia en 50 años), para el que se admiten deterioros irreversibles pero sin pérdida de la integridad estructural.

El comportamiento sismotectónico de Mejillones está gobernado por la subducción de la placa de Nazca por debajo de la placa Sudamericana, a una profundidad de tan solo 40 a 60 km de la superficie. Se trata, por tanto, de una zona de gran actividad sísmica. Mejillones se sitúa en la región de Antofagasta, dentro del desierto de Atacama, y su clima se caracteriza por temperaturas suaves y la prácticamente total ausencia de precipitaciones. Respecto al suelo, se trata básicamente de arenas superficiales sobre una capa de diatomita de gran espesor, clasificado como tipo II de acuerdo al código chileno [6] o tipo C según ASCE 7 [7].

Debido a la diferencia de cota entre la plataforma sobre el tanque y el nivel del mar (motivada por la altura de la costa, la cual, por otra parte, constituye una excelente defensa natural frente a posibles tsunamis), fue necesario semienterrar el tanque unos 15 m para evitar un desnivel excesivo en las tuberías de descarga de los metaneros (*fig. 1*). De esta forma, el tanque quedaba totalmente apoyado en la capa de diatomita. Esta roca sedimentaria presenta algunas peculiaridades, como una densidad muy baja y una enorme capacidad de absorción de agua



Figura 1. Vista general del tanque de GNL de Mejillones.

que imposibilita la viabilidad de un hormigonado directo. Sin embargo, en condición seca, presenta buenas características de resistencia y rigidez que resultaron suficientes para poder utilizar una losa de cimentación en el tanque directamente apoyada sobre una capa de relleno protectora y una lámina impermeable de polietileno.

Los cálculos del informe de peligrosidad sísmica para la zona de estudio dieron como resultado unas aceleraciones pico de suelo (*Peak Ground Acceleration* [PGA]) de 0,65 g para el caso OBE y de 0,70 g para el SSE, lo que evidencia el elevado riesgo sísmico del lugar. Los espectros de diseño, para un amortiguamiento del 5%, se representan en la figura 2.

En general, la estabilidad de un tanque de GNL ante la acción sísmica se mejora reduciendo su esbeltez, siendo necesario, en algunos casos, anclar el tanque interno a la cimentación. A partir de un determinado valor de la acción sísmica, la disposición de aisladores resulta beneficiosa, siendo imprescindible para las condiciones más severas [8]. Hay que destacar que si

bien el tanque está sísmicamente aislado respecto a la excitación horizontal, no lo está respecto a la componente vertical de la acción sísmica. Por tanto, los efectos de interacción suelo-estructura resultan de especial importancia en esa dirección. De hecho, en la propia definición de los espectros verticales de diseño se tuvieron en cuenta factores como la distancia al epicentro más cercano, la falta de coherencia de las ondas sísmicas (provocada por las reflexiones y refracciones de las mismas en semiespacios no homogéneos) o la disipación adicional de energía debida al amortiguamiento material (histerético) del terreno.

Asimismo, los espectros de diseño habituales se suelen limitar a períodos por debajo de 4 s, suficiente para cubrir el rango de frecuencias características de las estructuras. Sin embargo, en los tanques, en las presiones hidrodinámicas hay que distinguir entre una componente impulsiva, solidaria con las paredes del tanque (y, por tanto, relacionada con períodos de vibración bajos), y una componente convectiva, que se mueve de manera independiente generando olas en la superficie libre del líquido.

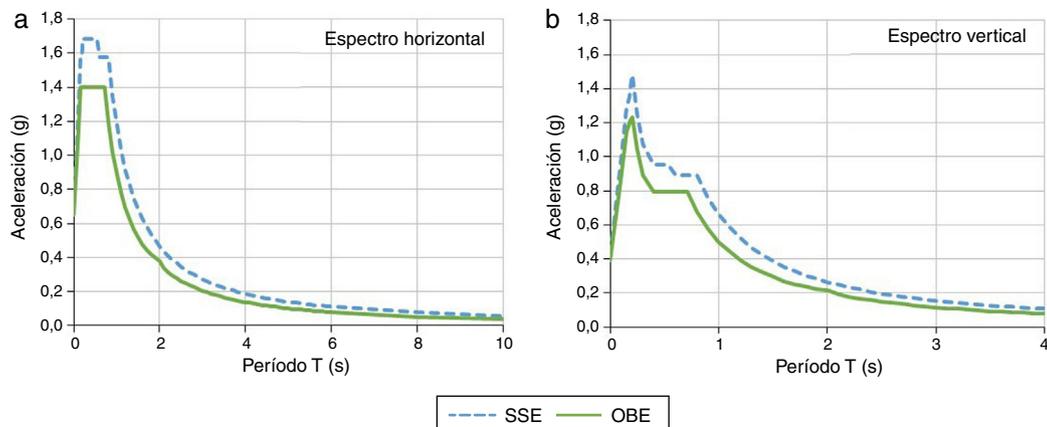


Figura 2. Espectros sísmicos de diseño. SSE: Safe Shutdown Earthquake; OBE: Operating Basis Earthquake.

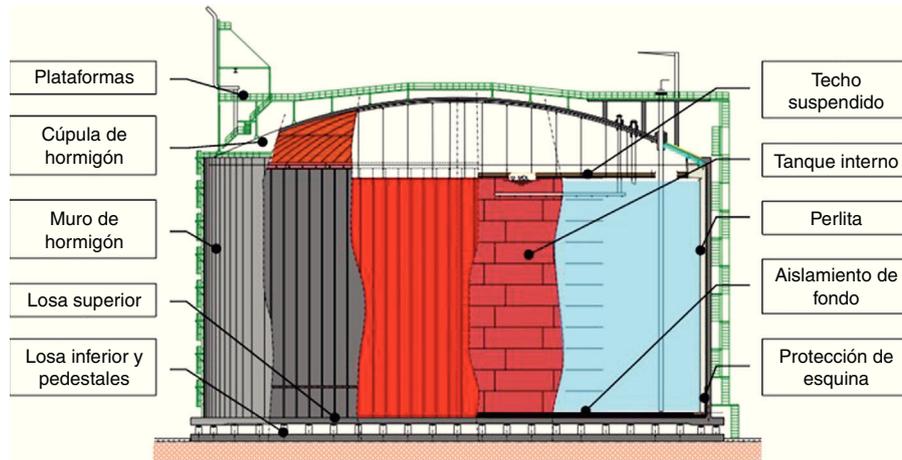


Figura 3. Esquema de tanque de GNL, tipo contención total, sobre aisladores sísmicos.

El movimiento convectivo en tanques de GNL está asociado a períodos propios del orden de 10 s y a un amortiguamiento en torno al 0,5%. Si bien su efecto frente a la acción impulsiva, respecto a fuerzas y momentos generados, resulta, en general, pequeño; condiciona la altura del tanque, por lo que se requiere conocer con precisión la rama del espectro horizontal también para períodos largos.

Finalmente, según las bases de diseño, no se utilizaron factores de reducción inelástica (i.e. $R = 1$), incluso para el caso de SSE, tanto en el tanque interno como en el externo.

3. Modelo de cálculo

El modelo de cálculo computacional recoge los elementos estructurales principales que configuran el tanque de GNL (fig. 3). A su vez, el correspondiente cuadro de materiales se lista en la tabla 2:

- Losa inferior de cimentación: transmite las cargas del tanque, que le llegan a través de los aisladores sísmicos y los pedestales, directamente al terreno.
- Losa superior de cimentación: fondo del tanque exterior; se apoya sobre los aisladores sísmicos.
- Aisladores sísmicos: se localizan entre las dos losas, dispuestos en pedestales cilíndricos de hormigón.
- Muro de hormigón: sirve de contenedor secundario y transmite las cargas de la cúpula. Consta de un sistema de pretensado a partir de tendones dispuestos en vainas embebidas horizontales que se postesan desde anclajes situados en contrafuertes diametralmente opuestos, y de tendones en vainas verticales que se entrecruzan en la parte inferior mediante tubos en U y se postesan desde anclajes situados en el pasillo perimetral de la coronación del muro.
- Cúpula de hormigón: cubierta del tanque sobre la que descansan las diferentes plataformas de operación y cuelga el techo suspendido interior.
- Tanque interno: contenedor primario de acero criogénico (9% Ni); se apoya aquí directamente sobre un anillo de hormigón, sin necesidad de anclajes, y un fondo de aislamiento que se sitúan sobre la protección de esquina.

Tabla 2
Cuadro de materiales

| Ítem | Descripción | Material | Codificación |
|------|--|--|--|
| 1 | Tanque interno | Acero 9% níquel | A553 Tp.1 |
| 2 | Protección de esquina | Acero 9% níquel | A553 Tp.1 |
| 3 | Techo suspendido | Aluminio | B209 Alloy 5083-O |
| 4 | Tirantes techo suspendido | Acero inoxidable | A312 Tp. 304/304L |
| 5 | Barrera de vapor | Acero al carbono de baja temperatura | S355J2 + N |
| 6 | Tubería interna | Acero inoxidable | A312/358 Tp. 304/304L |
| 7 | Tanque externo ^a | Hormigón Acero pasivo Pretensado | H45 ($f'c = 40$ MPa) A630-420H ASTM A416/A416 M |
| 8 | Plataforma principal sobre cúpula del tanque | Hormigón armado | H45 ($f'c = 40$ MPa) A630-420H |
| 9 | Resto de plataformas | Acero galvanizado | ASTM A36 |
| 10 | Aislamiento de fondo | Vidrio celular | — |
| 11 | Aislamiento de pared | Perlita y manta resiliente | — |
| 12 | Aislamiento de techo | Manta de fibra de vidrio | — |

^a En las zonas potencialmente sometidas a temperaturas criogénicas los materiales cumplen adicionalmente con los requisitos específicos indicados al respecto en EN 14620.

- Protección de esquina: fondo secundario de 9% Ni que recoge el líquido en caso de fuga y protege el muro de hormigón hasta una altura de 5 m.
- Techo suspendido: de aluminio, sirve de base para el aislamiento de techo sobre el tanque interno.

Para los cálculos preliminares y el diseño conceptual, se utilizó el análisis modal espectral preconizado por la normativa, si bien para el cálculo de detalle se llevó a cabo una integración directa en el tiempo, basada en acelerogramas compatibles con el espectro de diseño e incluyendo el efecto no lineal en el comportamiento de los aisladores sísmicos.

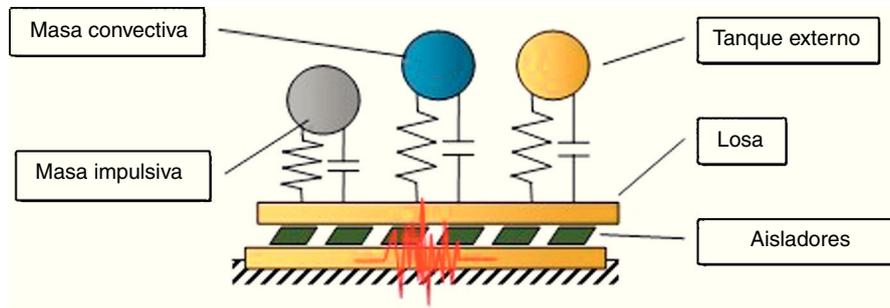


Figura 4. Diagrama de modelo de cálculo.

3.1. Análisis modal espectral

Conocidas las componentes impulsiva, convectiva e inercial de las presiones hidrodinámicas debidas al sismo [9,10], el sistema tanque-fluido puede asimilarse al diagrama de la figura 4. Bajo la acción horizontal del sismo, la masa impulsiva que se mueve solidariamente con las paredes del tanque interno resultó un 42% del total del producto almacenado, mientras que el 58% restante representa la masa convectiva. Si bien el período fundamental impulsivo queda totalmente definido por el sistema de aislamiento sísmico (y prefijado a un valor en torno a 2 s bajo la condición de tanque lleno y desplazamiento máximo de 250 mm), los modos convectivos son prácticamente independientes de dicho sistema, resultando un primer modo de chapoteo (*sloshing*) de 10,6 s. Como ya se ha indicado anteriormente, los aisladores sísmicos tampoco tienen prácticamente influencia bajo la acción vertical del sismo, situándose el modo característico (*breathing*) en torno a 0,5 s.

Respecto a los factores de amortiguamiento, se consideró un 15% a garantizar por el sistema de aislamiento para el modo impulsivo bajo las condiciones de tanque lleno y sismo SSE, un 0,5% para el convectivo y un 4% para el modo vertical, tanto en OBE como en SSE.

3.1.1. Interacción suelo-estructura

Los valores de períodos fundamentales y amortiguamientos reflejados hasta ahora recogen la interacción fluido-estructura, pero están basados en asumir una base rígida, esto es, sin tener en cuenta los efectos de interacción suelo-estructura. Para recoger este fenómeno de interacción en la componente vertical se utilizó el procedimiento descrito por Veletsos [10], a partir de un módulo de deformación transversal G degradado, incrementándose el factor de amortiguamiento vertical hasta prácticamente el 10% tanto en OBE como en SSE. Para una descripción más detallada de la evaluación del factor de amortiguamiento en tanques de GNL a partir de modelos de elementos finitos, se remite a la literatura [11].

3.1.2. Aisladores sísmicos: predimensionamiento

De los resultados del predimensionamiento se concluyó que el sistema de aislamiento sísmico estaría configurado por apoyos elastoméricos de alto factor de amortiguamiento (*High Damping Rubber Bearing* [HDRB]) y con núcleo de plomo para aquellos dispuestos en la periferia (*Lead Rubber Bearing* [LRB]).

Frente a otras opciones basadas en aisladores tipo péndulo, los apoyos elastoméricos ofrecen una gran capacidad de disipación de energía a partir del comportamiento histerético del material, suplementada, en su caso, por la capacidad disipativa del plomo y permiten limitar con mayor facilidad los desplazamientos máximos (en Mejillones, 250 mm bajo OBE y 290 mm bajo SSE, debido a los condicionamientos de tuberías asociadas al tanque). Por el contrario, plantean dificultades en aspectos relativos al envejecimiento, re-centrado tras la acción sísmica o el comportamiento frente al fuego, factores que justifican la necesidad en cualquier caso de que todos los aisladores fueran accesibles y reemplazables.

Los aisladores sísmicos se describen con mayor detalle en un apartado posterior, pero se adelanta aquí que, de los cálculos preliminares, se optó por un diámetro de 750 mm y un espesor de goma de 160 mm, tanto para los 293 apoyos centrales (sin núcleo de plomo) como para los 208 perimetrales (con núcleo de plomo). Como orden de magnitud, las máximas fuerzas verticales sobre los aisladores, sin mayorar y bajo la acción sísmica, se establecieron en torno a los 5.000 kN para los aisladores centrales y los 4.000 kN para los periféricos. Los cálculos preliminares se corroboraron con los cálculos de detalle que se describen a continuación.

3.2. Análisis tiempo-historia

Los modelos 3D de detalle, desarrollados por las empresas Metacontrol y SIRVE [12], permitieron la comprobación de los diferentes elementos estructurales bajo la acción sísmica, aparte del análisis modal, también a través de una integración directa (análisis tiempo-historia), teniendo en cuenta los siguientes puntos:

- Amortiguamiento. Se consideran los factores de amortiguamiento de los diferentes materiales establecidos en las bases de diseño. El comportamiento histerético de los aisladores se tuvo en cuenta directamente a través de las correspondientes relaciones constitutivas no lineales.
- Interacción suelo-estructura. Se utilizaron las funciones de impedancia dinámicas [13], tanto en rigideces como en amortiguamientos, tomando ventaja de un valor de G degradado prácticamente constante en una columna de suelo de, al menos, 70 m. La velocidad de onda de corte característica

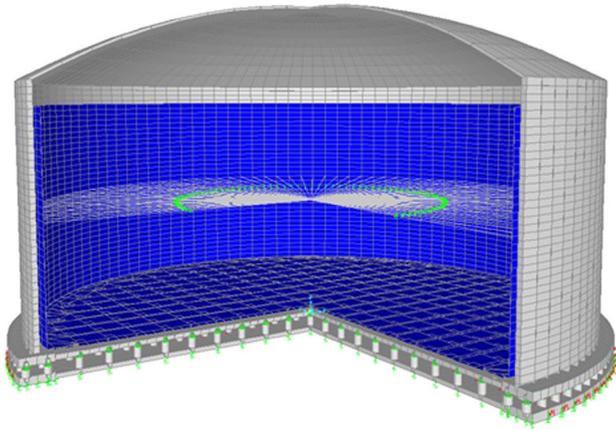


Figura 5. Modelo 3D de elementos finitos SAP2000.

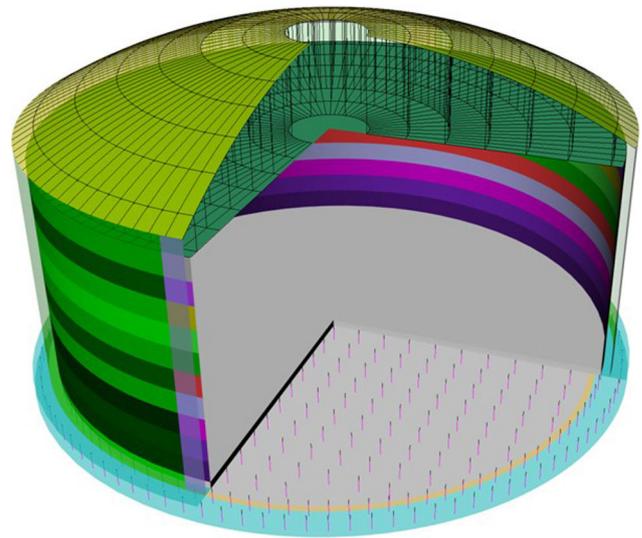


Figura 6. Modelo 3D de elementos finitos ANSYS (por simplicidad de dibujo, sin incorporar los elementos tipo «fluid»).

del terreno para grandes deformaciones se situó alrededor de los 300 m/s.

- Acelerogramas. Los registros sísmicos artificiales, compatibles con los espectros OBE y SSE, se generaron a partir de la técnica descrita por Clough y Penzien [14]. Como semillas se utilizaron 3 registros de terremotos ocurridos en Chile: San Felipe, Melipilla y Lolleo.
- Modelo SAP2000 (fig. 5). Para un primer modelo computacional 3D se utilizó el programa SAP2000. Como principal característica, el fluido se incorporaba a partir de masas conectadas a la estructura con muelles equivalentes, para el caso convectivo, y de masas concentradas (*lumped mass*), adheridas a la pared y al fondo del tanque interno, para el caso impulsivo. La interacción fluido-estructura se realizaba entonces a partir del método de Veletsos [9,10]. Respecto al suelo, para tener en cuenta la flexibilidad de la losa secundaria, se propuso una distribución parabólica de muelles verticales cuya resultante equivalía a la rigidez vertical global establecida a partir de la matriz de impedancias. Para obtener también la rigidez global a balanceo, se añadieron muelles rotacionales. Este modelo quedaba limitado para la obtención precisa de tensiones en el tanque interno, pero con un coste computacional considerablemente menor a aquel que también modelizaba el producto almacenado con elementos finitos.
- Modelo ANSYS (fig. 6). Para el modelo más complejo y detallado, mediante el programa ANSYS, se utilizaron elementos *shell* para las paredes y fondos de los tanques; elementos *beam* para los pedestales de hormigón y la vigería metálica que se dispone debajo de la cúpula de hormigón; elementos *solid* para el aislamiento de fondo; elementos *combin* para el suelo y los aisladores; y, especialmente, elementos *fluid* para el líquido contenido (GNL), con restricciones cinemáticas normales a la superficie (radiales). Las consideraciones respecto al suelo fueron similares al caso anterior, puesto que una modelización 3D del terreno hacía prácticamente inmanejable el modelo computacional.

Los modelos de detalle permitieron corroborar las primeras aproximaciones (tabla 3) así como reflejar con precisión el comportamiento del conjunto suelo-fluido-estructura para

Tabla 3
Comparativa entre los diferentes modelos de cálculo

| Hipótesis de tanque lleno | Preliminar | SAP2000 | ANSYS |
|---------------------------------------|------------|---------|---------|
| 1.º período impulsivo | 2,01 s | 2,04 s | 2,01 s |
| 1.º período convectivo | 10,58 s | 10,18 s | 10,76 s |
| Período vertical (<i>breathing</i>) | 0,48 s | 0,55 s | 0,52 s |
| Altura de ola OBE | 2,0 m | — | 1,3 m |
| Altura de ola SSE | 2,9 m | — | 2,0 m |

SSE: Safe Shutdown Earthquake; OBE: Operating Basis Earthquake.

optimizar el diseño, tanto en la hipótesis de tanque lleno como de tanque vacío. Asimismo, permitieron obtener los espectros de piso necesarios para el análisis del techo suspendido interior de aluminio y de las plataformas que se sitúan sobre la cúpula de hormigón. De acuerdo al requerimiento de la Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC), el diseño sísmico fue revisado por un profesional independiente con experiencia mínima acreditada de 5 años como revisor sísmico de estructuras industriales.

3.3. Major leak + Operating Basis Earthquake

El diseño de un tanque de GNL, además de la consideración de las acciones normales (entre las que se incluye el sismo normal admisible, OBE), exige la comprobación de acciones accidentales como explosiones e incendios externos, el sismo mayorado de seguridad (SSE) o la fuga de la cuba primaria (*Major leak*).

Un caso de singular trascendencia para el dimensionamiento del tanque externo de hormigón es el de la hipótesis de fallo del tanque primario seguido de un terremoto OBE. Este escenario se fundamenta en la posibilidad de réplicas después de un terremoto de gran magnitud e implica los siguientes supuestos:

- El GNL se derrama en el espacio entre los 2 tanques.

Tabla 4
Principales dimensiones y características técnicas de los aisladores

| Tipología | Diámetro aislador | N.º de capas de goma | Diámetro placa anclaje | Espesor de goma | Espesor total | Rigidez efectiva (desplazamiento total 250 mm) | Amortiguamiento (desplazamiento total 250 mm) |
|---------------------|-------------------|----------------------|------------------------|-----------------|---------------|--|---|
| Sin núcleo de plomo | 75 cm | 20 | 105 cm | 16 cm | 25,7 cm | 1,56 kN/mm | 10% |
| Con núcleo de plomo | 75 cm | 20 | 105 cm | 16 cm | 25,7 cm | 2,08 kN/mm | 23% |

- La perlita que ocupa dicho espacio queda inoperativa como aislamiento térmico.
- La protección de esquina mantiene su funcionalidad evitando la entrada de producto tanto en el fondo del tanque como en los 5 primeros metros del muro de hormigón.

El resultado es que, al efecto de la presión hidrostática ejercida ahora sobre las paredes del tanque externo, hay que añadir el gradiente térmico (-170°C en el interior) así como las presiones adicionales provocadas por la acción del sismo. Se utilizaron los mismos modelos de cálculo descritos anteriormente, suprimiendo el tanque interno y añadiendo un proceso iterativo para tener en cuenta la fisuración del hormigón. Como simplificación, se aplicaron varias distribuciones estacionarias de temperatura relativas a diferentes niveles de líquido, ignorando cualquier fenómeno transitorio. Se concluyó que la acción determinante era la componente vertical del sismo, con sobrepresiones del orden del 50% respecto al caso hidrostático, debiéndose ajustar la distribución de pretensado para poder cumplir con los requisitos de integridad estructural y mínimo espesor comprimido de hormigón en el muro establecidos en las bases de diseño, mediante la inclusión de 3 torones adicionales en 16 tendones situados en torno al tercio de la altura del muro, pasando en ese caso de 22 a 25 torones 0,6" por tendón.

4. Aisladores sísmicos

Para otorgar al sistema estructural de un período natural de vibración en torno a 2 s, bajo un desplazamiento máximo de 250 mm y la hipótesis de tanque lleno, con el objeto de limitar la acción sísmica horizontal, se dispusieron 293 aisladores elastoméricos en la zona central de la losa de cimentación (dispuestos hasta un radio de unos 42 m, con una separación de 4 m) y 208 aisladores elastoméricos con núcleo de plomo en la periferia (en la corona circular hasta el radio exterior de 48 m, con una separación en torno a 3 m). Estos dispositivos están formados por varias láminas de elastómero vulcanizado alternadas con placas de acero. El uso de los aisladores con núcleo de plomo facilitaba conseguir el factor de amortiguamiento global requerido (15% bajo la acción del sismo SSE y la hipótesis de tanque lleno) y aumentaba la rigidez torsional del sistema de aislamiento. El comportamiento histerético del aislador se representa en la aproximación bilineal mostrada en la figura 7. Asimismo, el detalle de la disposición del aislador entre la superestructura y los pedestales se muestra en la figura 8 y se resumen las dimensiones y características principales en la tabla 4.

El desplazamiento horizontal total de los aisladores sísmicos debía considerar el desplazamiento debido a la acción sísmica

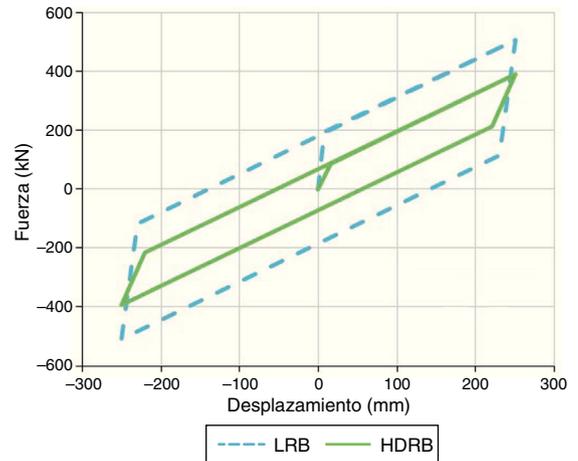


Figura 7. Ciclo de histéresis de los aisladores. LRB: Lead Rubber Bearing; HDRB: High Damping Rubber Bearing.

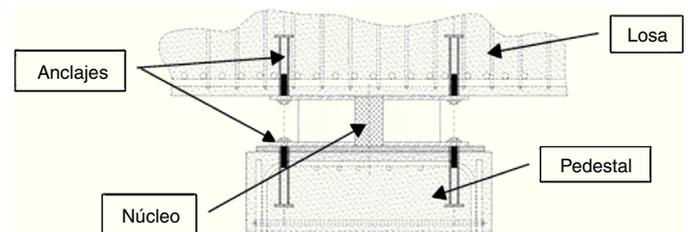


Figura 8. Disposición del aislador sísmico circular sobre el pedestal de hormigón.

y el 50% del desplazamiento máximo inducido por la acción térmica, así como el desplazamiento provocado por las deformaciones a largo plazo del hormigón (retracción y fluencia).

Los aisladores sísmicos se diseñaron para ser estables bajo cargas verticales (considerando un factor de seguridad de 3 en su estado no deformado lateralmente y un factor de seguridad de 1 bajo el desplazamiento horizontal total) y para cumplir con los límites de deformación transversal en la goma de acuerdo con las recomendaciones de AASHTO [15].

El sistema de aislamiento de la estructura así definido, además de reducir la acción sísmica actuante sobre la estructura, permitió cumplir con los desplazamientos máximos admisibles, debiéndose incorporar en su comprobación aspectos como el efecto P-delta de no linealidad geométrica (se genera un momento de segundo orden provocado por el desplazamiento relativo entre las caras inferior y superior del aislador, quedando desalineadas las reacciones sobre infraestructura y superestructura, respectivamente) o la curva histerética del material.



Figura 9. Aisladores sísmicos sobre pedestales de hormigón, antes y después del hormigonado de la losa superior.

Por su parte, los pedestales de hormigón, de 1,3 m de diámetro, habilitan un espacio de ventilación suficiente entre la superficie del terreno y la losa superior de cimentación (en torno a 2 m; fig. 9), de manera que se evitaba disponer el sistema de calefacción de losa habitual en este tipo de tanques para impedir la congelación del suelo. La losa de cimentación, simplemente armada, se dispuso finalmente con un diámetro exterior de 96,1 m y un canto variable entre 0,7 m (zona central) y 1,2 m (anillo perimetral). Como referencia, los espesores mínimos en pared y cúpula de hormigón fueron, respectivamente, de 0,8 y 0,4 m.

4.1. Ensayos

La certificación de los aisladores, encargados a la empresa chilena SIRVE, requería cumplir tanto con los requisitos estipulados en AASHTO [15] como en la normativa local [16]. Para ello se desarrolló un programa específico de inspección y control de calidad en la fabricación e instalación de los aisladores. Los ensayos de control en cada apoyo elastomérico fueron de 2 tipos:

- Estáticos, para comprobar la capacidad de compresión bajo carga vertical sostenida.
- Dinámicos, para comprobar la estabilidad bajo carga vertical y ciclos de desplazamiento horizontal impuesto (fig. 10).

Dichos ensayos se efectuaron en los laboratorios de DICTUC, filial de la Pontificia Universidad Católica de Chile, y permitieron corroborar los valores de rigidez equivalente y el comportamiento histerético (energía disipada por ciclo) previstos en los cálculos; en función de los criterios de aceptación estipulados en la normativa.

Asimismo, se estableció un juego adicional de dos aisladores por cada tipo (i.e., dos con núcleo de plomo y otros dos sin núcleo de plomo), a almacenar en el sitio bajos las mismas condiciones que los aisladores de producción, de manera que permitieran la repetición de los ensayos tras 10 años de exposición a las



Figura 10. Ensayo dinámico sobre aislador sísmico.

condiciones ambientales y a una carga equivalente de servicio. De esta forma, se permite monitorizar el comportamiento de los aisladores en el tiempo. Cabe recordar que todos los apoyos debían ser totalmente accesibles y reemplazables, tal y como se detalla en el apartado siguiente.

5. Aspectos constructivos

La instalación de los aisladores fue llevada a cabo por la empresa española Balzola, principal subcontratista civil encargada de la ejecución del tanque externo de hormigón, con la colaboración de SIRVE y bajo la dirección de Técnicas Reunidas. Se pueden diferenciar las siguientes fases:

- Hormigonado de los pedestales, dejando embebidos los casquillos roscados en posición para la fijación posterior de los pernos inferiores de anclaje.
- Aplicación de la capa de grout, prestando especial atención a su correcta nivelación.



Figura 11. Apriete de los pernos inferiores de anclaje.



Figura 12. Vista general de los pedestales y aisladores durante la fase de construcción.

- Posicionamiento de los aisladores, fijando la placa de anclaje inferior con los pernos correspondientes (fig. 11).
- Colocación del sistema superior de anclaje, firmemente amarrado para asegurar su posición entre la armadura de la losa superior.
- Encofrado y hormigonado de la losa superior.

Estas diferentes fases se ejecutaban simultáneamente por zonas, según se pueden atisbar en la figura 12, hasta completar la totalidad de los trabajos.

5.1. Reemplazabilidad

Como se indicó anteriormente, un factor importante en el diseño de los aisladores era el de garantizar en todo momento la capacidad de reemplazo. El primer aspecto a considerar es la carga a la que está sometido el aislador, que puede estimarse a partir de los modelos de cálculo previamente descritos. Además, en su caso, debe reproducirse la deformación horizontal a la hora de fabricar el nuevo aislador, de manera que se pueda acomodar a la geometría del antiguo. En la medida de lo posible, resulta preferible el reemplazo del aislador bajo la condición de tanque vacío.

Una vez conocido el dato de carga, el proceso previsto de sustitución es el siguiente:

- Retirada de los pernos inferiores de anclaje del aislador en cuestión y de los pernos superiores de anclaje de los aisladores adyacentes.
- Liberación parcial de la carga mediante gatos hidráulicos, controlando la ejecución en todo momento mediante células de carga y galgas de medición de desplazamiento vertical.
- Apuntalamiento de la zona como medida adicional de seguridad.
- Retirada del grout, con hilo de diamante.
- Retirada de los pernos superiores y del aislador.
- Colocación del nuevo aislador y fijación de los pernos superiores.
- Utilización de un gato plano permanente para la transmisión de las cargas al aislador y relleno de la cavidad con mortero sin retracción.
- Retirada de los puntales y de los gatos hidráulicos.
- Fijación de los pernos inferiores del aislador y de los superiores de los adyacentes.

6. Resumen y conclusiones

El tanque de Mejillones, de contención total, con capacidad para almacenar 175.000 m^3 de GNL a -170°C , presenta unas dimensiones de más de 90 m de diámetro exterior y 50 m de altura máxima. El presente documento describe los aspectos sísmicos más relevantes en su diseño, teniendo en cuenta que involucra una masa total en torno a las 160.000 t bajo la hipótesis de tanque lleno, en una zona de muy elevado riesgo sísmico (región de Antofagasta, Chile); según se resume a continuación:

- Dada la magnitud de la acción sísmica a considerar en el diseño del tanque, se incorporó un sistema de aislamiento compuesto por 501 aisladores elastoméricos (208 de los cuales con núcleo de plomo) dispuestos sobre pedestales de hormigón.
- El objeto de los aisladores es flexibilizar la estructura y aumentar la capacidad de disipación de energía frente a la acción del sismo horizontal.
- Sin embargo, se comprueba que dicho sistema de aislamiento prácticamente no tiene influencia ni en la parte convectiva (altura de ola) ni en la respuesta frente a la acción vertical del sismo.
- Asimismo, deben limitarse los desplazamientos máximos relativos entre suelo y tanque, condicionados por los requerimientos de las tuberías de conexión.
- Se desarrollaron modelos computacionales 3D muy complejos, basados en elementos finitos, para tener en cuenta la interacción suelo-fluido-estructura mediante integración directa de acelerogramas sintéticos compatibles con los espectros de diseño.
- Dichos modelos permitieron corroborar y optimizar los resultados obtenidos por el método modal espectral, más simplificado y ampliamente utilizado en la industria.

- Se efectuaron los análisis necesarios para cumplir rigurosamente con las normas tradicionales de diseño sísmico para este tipo de estructuras e instalaciones industriales, así como con la estricta normativa local.
- El programa de inspección y control de calidad de los aisladores incluyó ensayos estáticos y dinámicos, utilizándose un juego adicional para poder monitorizar el comportamiento en el tiempo.
- Entre los aspectos constructivos, cabe destacar la posibilidad de reemplazo de todos y cada uno de los aisladores.

El tanque, desarrollado por Técnicas Reunidas como contratista único y principal, fue puesto en servicio con éxito en enero de 2014.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer el soporte brindado por la Dirección Comercial de Initec Plantas Industriales (Grupo TR) en la elaboración del artículo, así como a Marcel Dewals (Tractebel Engie, Repr. GNLM Chile) y a Rodrigo Flores (Metacontrol Ingenieros) su colaboración y sus valiosos comentarios.

Bibliografía

- [1] NFPA 59A, Standard for the Production, Storage, and Handling of Liquefied Natural Gas (LNG), 2006.
- [2] API 620, Design and Construction of Large, Welded, Low-Pressure Storage Tanks, 11th edition, 2008.
- [3] EN 1473, Installation and Equipment for Liquefied Natural Gas-Design of Onshore Installations, 2007.
- [4] EN 14620, Design and Manufacture of Site Built, Vertical, Cylindrical, Flat-Bottomed Steel Tanks for the Storage of Refrigerated, Liquefied Gases with Operating Temperatures Between 0 °C and –165 °C, 2006.
- [5] NCh 2369, Diseño Sísmico de Estructuras e Instalaciones Industriales, 2003.
- [6] NCh 433, Diseño Sísmico de Edificios, 1996.
- [7] ASCE 7-05. Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures (ASCE/SEI 7-05).
- [8] J. Martí, M. Crespo, F. Martínez, Seismic Isolation of Liquefied Natural Gas Tanks: A comparative assessment, *Seismic Isol Protect Syst* 1 (1) (2010) 125–140.
- [9] A. Veletsos, Seismic Response and Design of Liquid Storage Tanks. Guidelines for the Seismic Design of Oil and Gas Pipeline Systems, Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering (ASCE), New York, 1984, pp. 255–370.
- [10] A. Veletsos, Y. Tang, Dynamics of vertically excited liquid storage tanks, *J. Struct. Eng.* 112 (6) (1986) 1228–1246.
- [11] D. Peña, S. Guzmán, Finite element methodology for the evaluation of soil damping in LNG tanks supported on homogeneous elastic halfspace, *B Earthq Eng* 13 (2015) 755–775.
- [12] M. Rendel. Aislamiento sísmico Estanque GNL — Mejillones. Corporación de Desarrollo Tecnológico (CDT), Cámara Chilena de la Construcción. Curso *Sistemas de protección sísmica: Conceptos generales, alternativas y beneficios*. Santiago de Chile, 6 de octubre de 2011.
- [13] ASCE 4-98. Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and Commentary.
- [14] R.W. Clough, J. Penzien, *Dynamics of Structures*, 2nd ed., McGraw-Hill Book Company, New York, NY, 1993.
- [15] AASHTO, Guide Specifications for Seismic Isolation Design, 3rd ed, July 2010.
- [16] NCh 2745, Análisis y diseño de edificios con aislación sísmica, 2003.