

EL AISLAMIENTO SÍSMICO EN TANQUES DE GNL

Autores: F. Martínez, M.J. Crespo y J. Martí
PRINCIPIA Ingenieros Consultores, principia@principia.es

RESUMEN

El presente trabajo analiza las condiciones de peligrosidad en que el aislamiento sísmico resulta innecesario, conveniente o imprescindible en tanques modernos de almacenamiento de gas natural licuado (GNL).

Se comienza por estudiar los problemas generados en estos tanques por un ambiente sísmico de severidad progresivamente creciente: estos problemas incluyen mayores demandas en el tanque interno, la posibilidad de un levantamiento de esquina y de pandeos de "pata de elefante", el deslizamiento general del tanque interno, la necesidad de emplear espesores superiores al límite soldable y, por último, el levantamiento global del tanque interno. Algunos de estos problemas dan lugar a un encarecimiento del tanque, mientras otros simplemente imposibilitan su construcción. En el estudio se determinan los niveles de aceleración para los que se desarrollan cada uno de estos problemas.

Aunque el trabajo incluyó también la consideración de tanques de referencia de capacidades menores (60.000 y 100.000 m³), la ponencia se centra en la problemática de los tanques de 160.000 m³ de contención completa, que es la opción más frecuentemente adoptada en la actualidad. Se estudian tanto tanques con cimentación pilotada como tanques apoyados en una losa superficial, analizándose en cada caso la viabilidad del diseño tradicional y la conveniencia o necesidad de emplear un sistema de aislamiento sísmico, en función de las aceleraciones de diseño del emplazamiento.

Introduciendo algunas hipótesis sobre costes unitarios, se procede entonces a comparar el coste de hacer frente a la amenaza sísmica con y sin aislamiento sísmico, en los casos en que ambas alternativas son posibles, así como a delimitar el rango de aceleraciones de diseño en que sólo una de ellas resulta viable.

El trabajo fue realizado en el marco del proyecto INDEPTH, financiado por la Comunidad Europea.

SUMMARY

The paper discusses the seismic environments in which modern Liquefied Natural Gas (LNG) tanks need not, may, and must be seismically isolated.

The problems that a gradually increasing seismic demand may cause in an LNG tank are reviewed first: they include greater demands in the inner tank, the possibility of corner uplift and elephant's foot buckling, gross sliding of the inner tank, thickness requirements beyond the weldable limit and global uplift of the inner tank. Some of these problems cause extra costs while others make the construction impossible. The acceleration levels at which these problems are expected to arise are quantified.

Although the work also included conventional and seismically isolated versions of two existing tank configurations (60,000 and 100,000 m³ capacity), the paper concentrates on a full containment 160,000 m³ tank, which is more representative of current tendencies. Both a

surface slab and a pile foundation are considered and the feasibility of conventional and seismically isolated designs is examined as a function of the design acceleration.

By introducing some assumptions in respect of unit costs, it then becomes possible to compare the global cost involved in facing the seismic threat with and without isolation when both alternatives are possible, as well as to establish the ranges of accelerations over which only one of them is feasible.

The study was carried out within the framework of the EC-funded INDEPTH project.

Introducción

Los terremotos contribuyen demandas de diseño significativas en muchas partes del mundo. Una de las posibles estrategias para hacerles frente es el aislamiento sísmico, que se diseña para reducir el nivel de tensiones en la estructura aunque como contrapartida se incrementen los desplazamientos relativos. Los estudios aquí descritos intentan clarificar las ventajas y desventajas del uso de este sistema en tanques modernos de gas natural licuado (GNL). Los trabajos se llevaron a cabo en el marco del proyecto INDEPTH, financiado por la Comunidad Europea, proyecto cuyos desarrollos han dado lugar a otras publicaciones en temas relacionados (Bergamo et al, 2006a, b; Castellano et al, 2006; Gregoriou et al, 2006).

La tipología de tanque más habitual hoy en día es el tanque de contención completa, que proporciona estanqueidad tanto frente al líquido como frente al vapor. Consiste en un tanque interior autoportante de acero y un tanque externo de hormigón. El tanque interior es cilíndrico y abierto en su parte superior; está fabricado con acero criogénico (9% Ni) y se apoya sobre una base de aislamiento térmico. El tanque externo es de hormigón; la pared es cilíndrica, con espesor de unos 80 cm y pretensada vertical y circunferencialmente. La losa y la cúpula esférica son de hormigón armado. Entre el tanque interno y el externo se dispone el necesario aislamiento térmico.

La planta de ENAGAS de Huelva se adoptó como planta de referencia en el proyecto. La planta tiene cuatro tanques en operación: el más antiguo de 60.000 m³ de capacidad, un segundo de 100.000 m³ y los dos más recientes de 150.000 m³. La presente ponencia sin embargo se centra en un tanque genérico de 160.000 m³ y esbeltez convencional, que es representativo de la tendencia actual en la construcción de tanques de GNL.

Objetivos

El objetivo genérico perseguido es mejorar la seguridad de los tanques de almacenamiento de GNL frente a la amenaza sísmica. Más concretamente se trata de determinar qué severidad del ambiente sísmico comenzaría a hacer del aislamiento sísmico un elemento conveniente o incluso imprescindible del diseño. También se busca cuantificar los posibles atractivos del aislamiento cuando no es imprescindible, lo que se lleva a cabo a través de una comparación del coste de construir y operar el tanque con y sin aislamiento sísmico.

Acción sísmica

Para definir la acción sísmica se han utilizado dos características de la misma: la

forma espectral y una aceleración de referencia. Se han empleado tres formas para el espectro horizontal: una de ellas representativa de un suelo medio y otras dos que desplazan la amplificación hacia los períodos altos o bajos con respecto a la primera. En concreto, las formas espectrales adoptadas responden a las del Eurocódigo 8 (CEN, 2004) para suelos B, C y D, con un terremoto tipo 1 ($M_s > 5,5$) y $S = 1$. Como espectro vertical se ha tomado el horizontal multiplicado por 0,7.

Se ha utilizado la aceleración pico (PGA – Peak Ground Acceleration) como la variable descriptiva del nivel de peligrosidad del emplazamiento. De esta forma, para cada forma espectral, se estudiará cuáles son los niveles de aceleración para los cuales las diferentes soluciones constructivas resultan atractivas, necesarias o inviables.

Efectos sísmicos en el tanque

Los tanques de GNL son estructuras de gran responsabilidad debido a la energía química que almacenan. Como consecuencia, sus requisitos de diseño son bastante estrictos (CEN, 2006; CEN, 2007; API, 1998; NFPA, 2005). A modo de ejemplo, el proyecto contempla un terremoto base de operación (OBE) con un período de recurrencia de 475 años y un terremoto de parada segura (SSE) con un período del orden de los 5000 años, aunque la definición precisa varía de unas normas a otras. Además de las consideraciones sísmicas, las normas también incluyen una serie considerable de accidentes postulados, a los que el tanque tiene que poder hacer frente con éxito.

El tanque debe por supuesto satisfacer todos los requisitos impuestos. Los aspectos sísmicos gobiernan sólo algunas de las características del tanque, pero las implicaciones obviamente crecen a medida que el ambiente sísmico se va haciendo progresivamente más severo. El aumento del input sísmico conlleva un incremento de todas las demandas sísmicas en el tanque, tales como tensiones en la estructura, presiones en el líquido, fuerzas, desplazamientos, etc. Para hacer frente a estos incrementos basta a menudo con aumentar las cuantías de materiales, pero no siempre: sobrepasar determinados umbrales no es factible a base de un simple aumento de cuantías, sino que requiere cambios conceptuales en el diseño. Y finalmente habrá un nivel de input a partir del cual la construcción ya resulta imposible con independencia del concepto.

El diseño del tanque externo generalmente se ve poco afectado por los requisitos sísmicos. Siendo la envolvente protectora, el tanque externo debe hacer frente a un gran número de amenazas externas y algunas internas. Estas amenazas incluyen vientos huracanados, impactos de proyectiles, sobrepresiones asociadas a deflagraciones, etc. Las dos más restrictivas suelen ser el derrame global (en que el gas líquido llena el espacio entre los dos tanques, con lo que entra en contacto directo con el hormigón del tanque externo) y el fuego externo (que aplica fuertes flujos térmicos al tanque durante un cierto período de tiempo). En resumen, aparte de quizá imponer un aumento de las cuantías de armadura en la cúpula, las consideraciones sísmicas prácticamente no afectan al diseño del tanque externo.

Por el contrario, el tanque interno tiene como única misión contener el gas licuado, protegido ya como está de casi todos los eventos exteriores por el tanque externo. Es por tanto mucho más sensible a los efectos sísmicos, que son esencialmente los únicos (aparte de las demandas normales de operación) para los que el tanque externo no proporciona ninguna protección. Una de las consecuencias del terremoto son las oscilaciones inducidas en la superficie libre del líquido (“sloshing”), fenómeno que lleva a aumentar la altura de

resguardo para evitar la posibilidad de derrames sobre la pared del tanque interno. Este incremento de altura implica por tanto una mayor altura de las paredes de ambos tanques, con impacto económico no despreciable. Sin embargo, los períodos característicos de esta oscilación líquida son muy largos, del orden de 10 s. Aunque los períodos propios de un tanque sin y con aislamiento son bastante distintos (unos 0,5 s y unos 2 s respectivamente), ambos están lejos del período de la oscilación líquida, por lo que la amplitud de esta última no se ve afectada por la existencia o no del sistema de aislamiento. Dicho de otra manera, la oscilación del líquido crece con el input sísmico y tiene desde luego un impacto económico, pero ese impacto es el mismo haya o no haya aislamiento por lo que este fenómeno no causa ventajas diferenciales.

Además de las oscilaciones anteriores, que involucran a la masa convectiva del líquido, la actuación del input sísmico sobre el resto de la masa líquida (la masa impulsiva) da lugar a cambios de presión en el líquido. Otro tanto ocurre con la componente vertical del terremoto, que también actúa sobre la masa líquida. Todo ello lleva a estados de presión distintos del hidrostático. Y por otra parte, el balanceo del tanque da lugar a compresiones en una de las paredes (que pueden llegar a desencadenar el pandeo en “pata de elefante”), así como la posibilidad de producir el levantamiento de la esquina opuesta del tanque.

Otra posible respuesta indeseable durante el terremoto es el deslizamiento global del tanque interno. Las fuerzas horizontales, combinadas con la disminución dinámica de los pesos, pueden llegar a producir el deslizamiento general del tanque. Caso de predecirse esta ocurrencia, poco puede hacer el proyectista para evitarlo.

Finalmente, si las aceleraciones verticales son suficientemente grandes, las fuerzas verticales pueden llegar a superar a las de peso, con lo que el conjunto del tanque interno y el líquido se elevarían, separándose de la losa. Como en el caso del deslizamiento, el proyectista se encuentra inerte frente a este efecto.

A efectos del presente estudio, se listan debajo los problemas que el sismo genera, junto con las correspondientes soluciones cuando existen:

- Mayores presiones en el líquido y compresiones en la pared: se resuelve aumentando espesores de acero y/o rigidizadores.
- Levantamiento de esquina: se resuelve disponiendo anclajes.
- Deslizamiento global del tanque: sin solución.
- Espesor requerido de acero superior a 50 mm: no es soldable.
- Levantamiento global del tanque: sin solución.

Los dos primeros son problemas técnicamente solubles, simplemente generan costes adicionales. Los tres últimos sin embargo no tienen solución conocida en el entorno técnico y normativo actual: en consecuencia, al llegar a los niveles de movimientos que generan estos problemas, el tanque deja de ser construible.

El listado anterior es el que se empleará para comparar el coste de hacer frente a la demanda sísmica en diversas hipótesis, especialmente con y sin aislamiento sísmico, así como para tanques sobre losa superficial o sobre pilotes. También permitirá determinar el nivel de movimientos para el que un concepto de diseño deja de resultar viable.

Hipótesis sobre costes

Al crecer la demanda sísmica, aumentan los costes de proyecto, construcción y operación de los tanques. El aumento de coste depende de diversos factores, uno de los cuales es si el tanque cuenta o no con aislamiento sísmico. En esta sección se presentan las hipótesis de costes empleadas en el ejercicio comparativo.

En general, no es fácil hacerse con información fiable sobre costes unitarios concretos en relación con la construcción de estos tanques. Se trata normalmente de proyectos llave en mano y los contratistas son lógicamente reacios a divulgar sus costes. Las cifras empleadas son por tanto hipotéticas y tienen un carácter puramente orientativo.

Dispositivos de aislamiento

Los costes estimados para un sistema de aislamiento sísmico formado por aisladores elastoméricos se presentan en la Tabla 1 en función del tamaño de tanque y del desplazamiento relativo a contemplar. Los cálculos suponen que el aislamiento se diseña usando la normativa americana AASHTO (1999). Esta hipótesis no es intrascendente: el coste sería mayor si se utilizara la normativa italiana y menor si se empleara la japonesa.

Capacidad del tanque (m ³)	Desplazamiento calculado (m)	Coste del aislamiento sísmico (M€)
60.000	0,2	0,48
	0,4	0,96
	0,6	1,72
100.000	0,2	0,80
	0,4	1,62
	0,6	2,63
160.000 (losa)	0,2	1,15
	0,4	2,52
	0,6	4,46
160.000 (pilotes)	0,2	1,15
	0,4	2,52
	0,6	4,86

Tabla 1 Costes de dispositivos de aislamiento para varias capacidades y varios desplazamientos

Conexiones flexibles

El aislamiento sísmico permite que la estructura se mueva con respecto al suelo, movimientos que deben ser asumibles por todas las tuberías que llegan al tanque sin perder su funcionalidad. Se trata de unas veinte tuberías, según el tamaño y diseño de tanque, entre las que están lógicamente las principales de carga y descarga del tanque pero también muchas otras. El coste de instalar conexiones flexibles en todas las tuberías del tanque de GNL se ha estimado en unos 0,3 M€, aunque la cifra real sea probablemente algo superior.

Hormigón

Los costes unitarios de los dos tipos de hormigón que pueden ser necesarios se han estimado en lo siguiente:

- hormigón colocado sobre el suelo: 300 €/m³
- hormigón elevado que requiere encofrado y soporte estructural: 450 €/m³

Si las condiciones geotécnicas locales requieren que el tanque esté pilotado, la presencia de aislamiento sísmico no requiere hormigón adicional: cada pilote contaría con su dispositivo de aislamiento debajo de la losa. Sin embargo, si la cimentación del tanque es una simple losa superficial, el aislamiento sísmico conlleva construir una doble losa con pedestales intermedios en los que se colocarían los dispositivos. Se ha supuesto que un tanque sin aislamiento tiene una losa de 0,7 m de espesor, mientras que en caso de necesitar una doble losa, ambas serían de 1 m de espesor. Se ha supuesto así mismo que los pedestales serían de 2 m de altura y 1 m de diámetro y que habría que disponer uno cada 12 m².

Acero

A medida que la acción sísmica crece, las paredes del tanque interno han de ser más gruesas y, a partir de cierto nivel, es necesario anclar el tanque para evitar el levantamiento de esquina. El espesor de pared necesario es función de las presiones ejercidas por el líquido, que a su vez dependen de la acción sísmica. El tipo de acero a emplear, tanto en el tanque como en los anclajes, es criogénico a fin de garantizar su ductilidad a las temperaturas de almacenamiento del GNL (unos -165°C). Se ha supuesto que el acero criogénico del tanque tiene un coste unitario de 5 €/kg.

El anclaje resulta necesario para niveles de aceleración (PGA) por encima de 0,3g. El coste del anclaje crece lógicamente con la aceleración. Se ha supuesto un coste mínimo de 0,35 M€ para los anclajes, aumentando esta cifra a medida que crece el acero requerido.

Sistema de calefacción

El GNL se almacena a -165°C. Esto implica que, si la losa se apoya directamente sobre el suelo, hay que calentar la losa para evitar que se congele el suelo bajo la misma. Si la losa está elevada de forma que circule el aire entre losa y suelo, no es necesario contar con un sistema de calefacción. Esta disposición sólo es posible cuando hay doble losa o, en caso de cimentaciones pilotadas, si los pilotes se elevan un par de metros por encima de la superficie del terreno.

El coste total del sistema de calefacción está en torno a 1 M€ con instalación incluida. El coste de la energía a lo largo de la vida del tanque es difícil de estimar pues, sobre períodos largos de tiempo, está dominado por parámetros inciertos como la evolución de la inflación, tipos de interés y coste de electricidad. En el presente estudio, se ha equiparado el ahorro energético al consumo de 10 años con un coste unitario de 0,1 €/kWh. Para un tanque de 160,000 m³, esta cifra es aproximadamente 1 M€.

Respuesta Sísmica

Los cálculos se han realizado para tanques con y sin aislamiento sísmico, tomando

como input sísmico los espectros antes mencionados, aumentando gradualmente el nivel de aceleraciones. Se supone que si el tanque no está pilotado, descansa en una cimentación razonablemente competente; de otro modo no hubiera podido satisfacer los límites que la normativa impone sobre los asientos diferenciales. Concretamente, se ha supuesto que el terreno tiene un módulo de cortante efectivo de 250 MPa y una densidad de 2000 kg/m³, con una velocidad de ondas de cortante de 350 m/s. En el caso de tanques con aislamiento sísmico, se supone que los dispositivos son verticalmente rígidos y que el aislamiento lleva el primer período horizontal del tanque a 2,5 s con un amortiguamiento del 15%.

En cada caso, se han llevado a cabo los siguientes cálculos:

- Determinación de las masas (impulsiva y convectiva) de líquido que se movilizan en la respuesta horizontal del tanque, supuesto lleno.
- Determinación de las masas (rígida y vibrante en el primer modo de respiración) de líquido que se movilizan en la respuesta vertical del tanque, supuesto lleno.
- Determinación de las primeras frecuencias del tanque interno, tanto horizontales como verticales.
- Cálculo en base al método del espectro de respuesta, combinando adecuadamente las respuestas horizontales y verticales, para determinar la necesidad de aumentar cuantías y el límite tras el cual el diseño es imposible.

La metodología empleada en los cálculos es la del ASCE Standard 4-98 (ASCE, 2000) y las Guidelines for the Seismic Design of Oil and Gas Pipeline Systems (ASCE, 1984). Para excitaciones verticales, esta metodología se ha complementado con la de Veletsos y Tang (1986, 1990). En tanques convencionales, la respuesta vertical no suele jugar un papel importante, pero en tanques aislados puede ser decisiva: el aislamiento reduce las demandas horizontales, pero no afecta a las verticales, que pueden pasar a ser las que gobiernan el diseño.

Los análisis deben incorporar la influencia de las masas líquidas en la respuesta tanto horizontal como vertical. Para la respuesta horizontal, la masa de líquido puede considerarse dividida en dos componentes: la masa impulsiva, que se mueve rígidamente con el tanque, y la masa convectiva, que es la involucrada en las oscilaciones ("sloshing") antes mencionadas. Las magnitudes correspondientes se determinaron en base a la metodología de Veletsos (ASCE, 1984). La respuesta vertical conlleva un tratamiento análogo, distinguiéndose una vez más dos componentes: una que se mueve rígidamente con la base del tanque y otra vibrante, asociada al primer modo de respiración del tanque. En el caso que nos ocupa, la primera resulta ser un 42% del total y la segunda el resto.

Un elemento importante en el coste es la cantidad de acero criogénico requerida por el tanque interno. A cada elevación, el espesor del tanque debe ser capaz de soportar:

- Las demandas hidrostáticas
- Las demandas producidas por el OBE
- Las demandas producidas por el SSE

Rara vez es obvio cuál de los dos últimos escenarios es más condicionante. Aunque el SSE es claramente mayor que el OBE, la normativa impone distintas metodologías de evaluación y valores admisibles de los parámetros al analizar los dos casos. Por otra parte, para evaluar el tanque interno deben combinarse los efectos de los movimientos horizontales y verticales; la regla de combinación adoptada es sumar el 100% de los efectos de una dirección con el 30% de los efectos de las otras. Por último, para los cálculos

relativos al levantamiento de esquina se ha seguido la metodología del API 620 (API, 1998).

Los umbrales de aceleración en que se desencadenan los problemas antes mencionados aparecen en la Fig. 1 para los cuatro tanques considerados en la hipótesis de que no cuentan con aislamiento. La Fig. 2 presenta análoga información para los tanques aislados. El input utilizado es el del espectro de suelo tipo C de acuerdo con el Eurocódigo 8 (CEN, 2004).

Para los tanques de 100.000 y 160.000 m³, puede observarse que:

- a) En tanques sin aislamiento, cuando la PGA alcanza:
 - 0,25g-0,30g: se produce levantamiento de esquina en tanques no anclados
 - 0,50g-0,65g: el tanque interno desliza durante el terremoto
 - alrededor de 1,00g: se produce el levantamiento global del tanque
- b) En tanques con aislamiento, cuando la PGA alcanza:
 - 0,80g-0,90g: el tanque interno desliza durante el terremoto
 - alrededor de 1,00g: se produce el levantamiento global del tanque

El aislamiento sísmico no modifica la respuesta vertical del tanque. La pequeña diferencia observable en las aceleraciones que producen el levantamiento global del tanque, que como puede verse en las Figs. 1 y 2 son algo mayores sin aislamiento, provienen del menor espesor de lámina requerido en el caso con aislamiento.

Por tanto, a medida que van aumentando las aceleraciones de diseño, caracterizadas por la PGA, va teniendo lugar lo siguiente:

- Hasta 0,25g-0,30g: son viables los tanques sin anclaje, tanto con como sin aislamiento sísmico.
- Desde 0,25g-0,30g hasta 0,50g-0,65g: un tanque aislado puede construirse sin anclaje, pero un tanque sin aislamiento necesita anclarse.
- Desde 0,50g-0,65g hasta 0,80g-0,90g: sólo los tanques aislados son viables, que por otra parte siguen sin necesitar anclaje.
- Desde unos 0,90g en adelante: el tanque no es viable ni siquiera con aislamiento, pues sufrirá el deslizamiento global en cualquier caso.

Para los tanques de 60.000 m³ analizados los umbrales son algo inferiores a los mencionados, pero esto no es consecuencia de la capacidad sino de la relación altura/radio algo peculiar del tanque concreto analizado.

Costes diferenciales

Combinando la información estructural y la económica, se hace ya posible establecer las comparaciones buscadas. Se presentarán tres casos de especial interés:

- Tanque convencional, sin aislamiento sísmico, sobre losa superficial o pilotes.
- Tanque con aislamiento, que en cualquier caso requería una cimentación pilotada y que incluye un dispositivo de aislamiento por pilote.

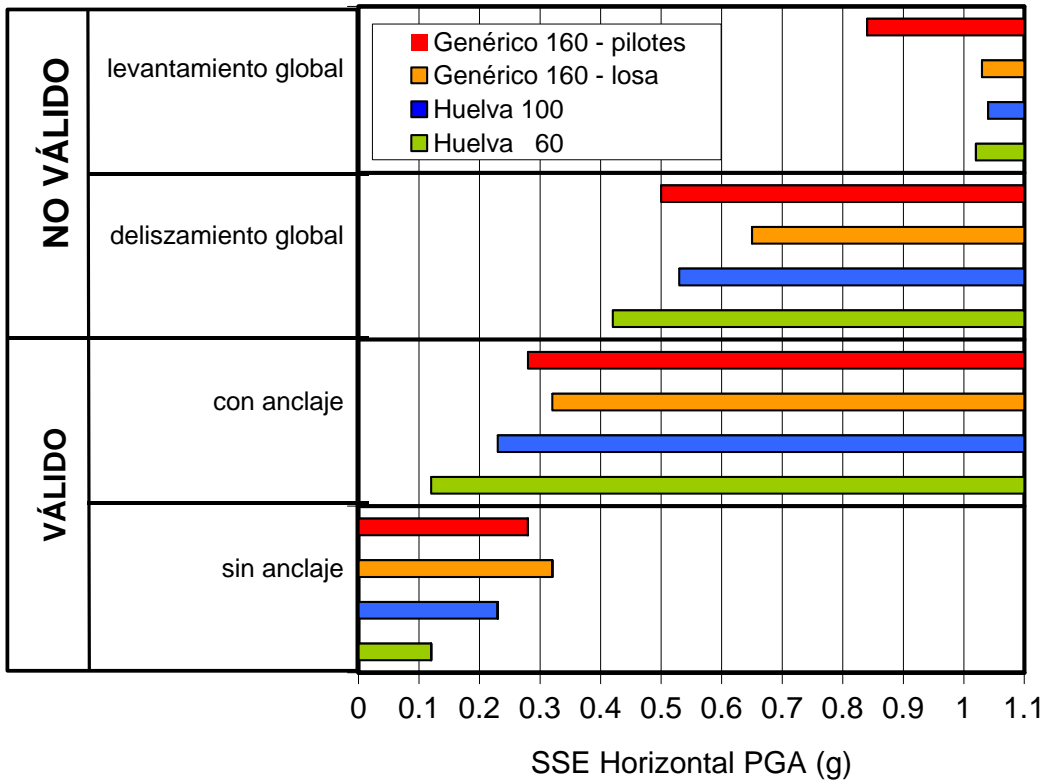


Figura 1 Aparición de problemas para tanques sin aislamiento. Espectro para suelo C (CEN, 2004)

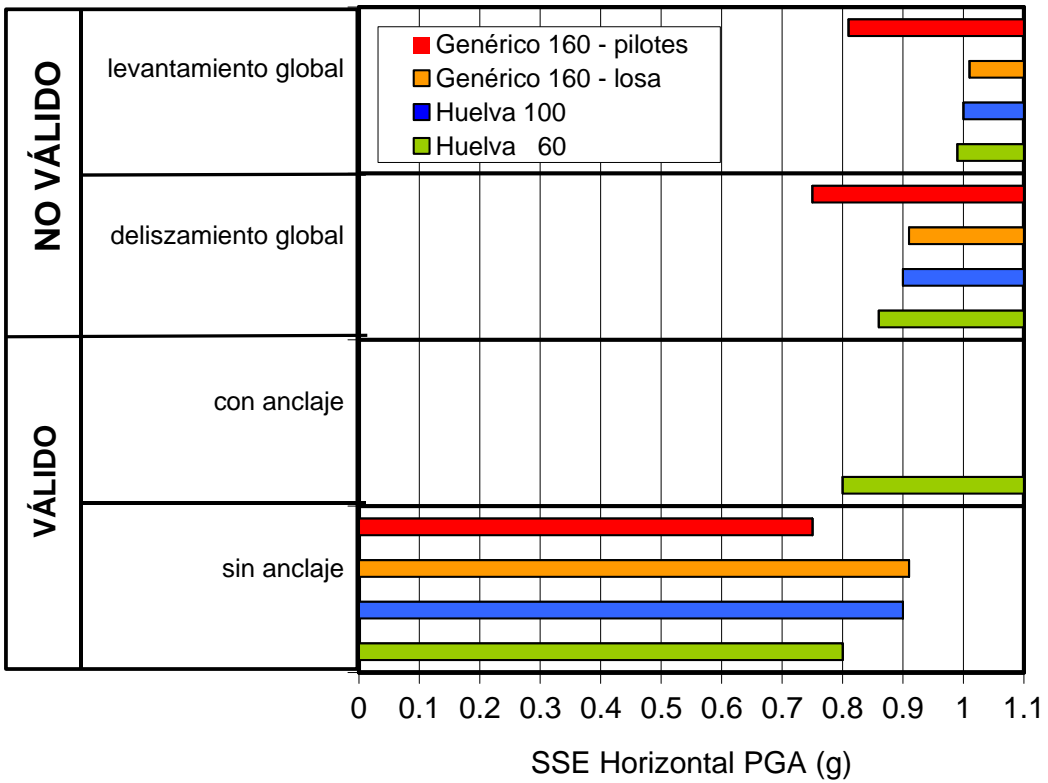


Figura 2 Aparición de problemas para tanques con aislamiento. Espectro para suelo C (CEN, 2004)

- Tanque con aislamiento, que no requería una cimentación pilotada, por lo que hubo que disponer una doble losa con pedestales en los que se ubican los dispositivos.

Los costes considerados son exclusivamente los costes de hacer frente a la demanda sísmica y sólo en el caso de que contribuyan un diferencial entre las distintas alternativas. Por ejemplo, es claro que un terremoto mayor produce mayores oscilaciones del líquido, lo que requiere una mayor altura de resguardo y con ello un mayor coste; pero al ser idéntico en las distintas alternativas, no está incluido pues no influye en la comparación. Es importante recordar este aspecto al observar las curvas presentadas: sirven para comparar unas alternativas con otras, pero los costes globales no reflejan la totalidad de los costes derivados del diseño sísmico sino sólo aquéllos que varían de unas alternativas a otras.

Para clarificar la situación, los costes incluidos en cada caso son:

- a) tanque sin aislamiento
 - mayor espesor del tanque interno
 - anclaje del tanque interno
- b) tanque con aislamiento sobre pilotes
 - sistema de aislamiento
 - conexiones flexibles para las tuberías
 - mayor espesor del tanque interno
 - anclaje del tanque interno
- c) tanque con aislamiento sobre losa superficial
 - doble losa y pedestales
 - ahorro del sistema y energía de calefacción
 - sistema de aislamiento
 - conexiones flexibles para las tuberías
 - mayor espesor del tanque interno
 - anclaje del tanque interno

Los resultados combinados se presentan en la Fig. 3 para el tanque de 160.000 m³ sobre losa superficial y en la Fig. 4 para el mismo tanque con cimentación pilotada. Las curvas reflejan los aumentos de materiales impuestos por la demanda sísmica creciente.

Para un tanque sin aislamiento, a partir de un momento (el triángulo rojo en la figura), hay que hacer algo para evitar el levantamiento de esquina. Una posible solución es anclar el tanque; el salto que aparece en una de las ramas corresponde al coste de disponer el anclaje. La otra rama representa el caso en que la estrategia adoptada es aumentar el espesor de la chapa; como puede verse, esta alternativa es más cara que los anclajes.

En el caso de una cimentación sobre losa, con aceleraciones entre 0,30g y 0,65g, en principio es posible construir el tanque con tal de que esté adecuadamente anclado. Lo mismo ocurra para el tanque sobre pilotes pero para el intervalo entre 0,25g y 0,50g. Sin embargo, la cuestión del anclaje requiere alguna matización:

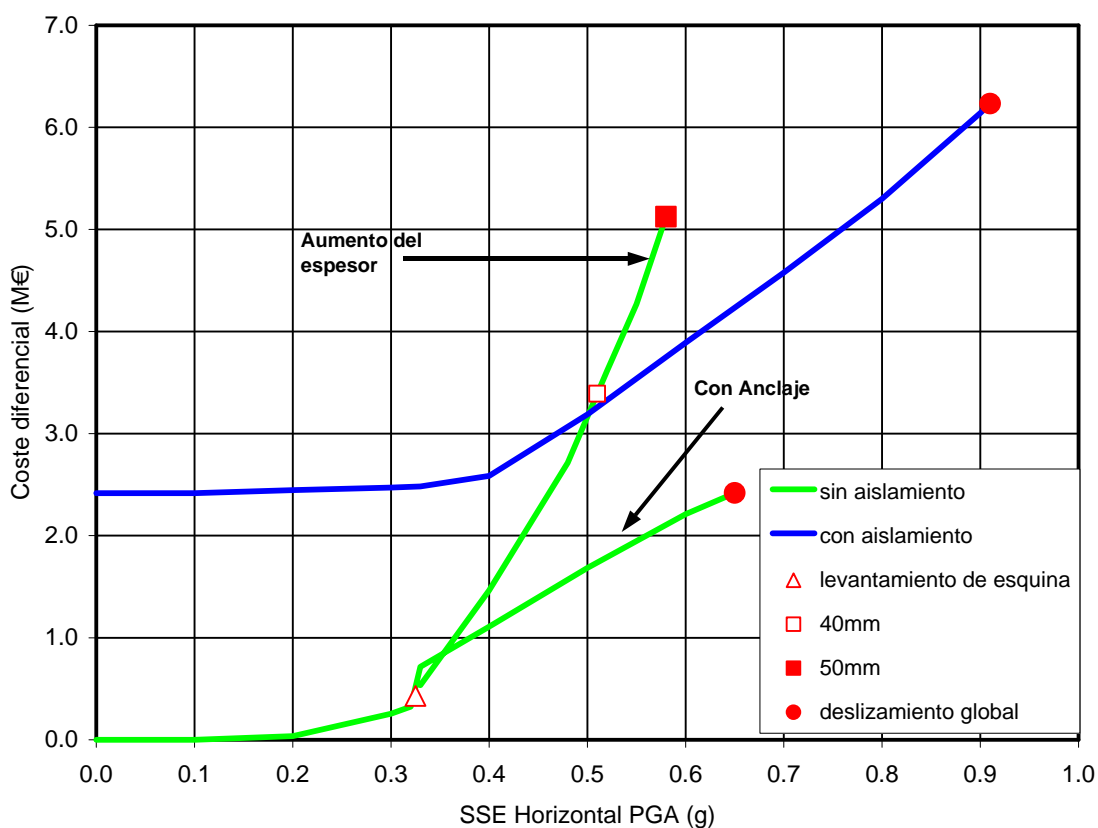


Figura 3 Evolución de los costes con la demanda sísmica. Cimentación sobre losa.

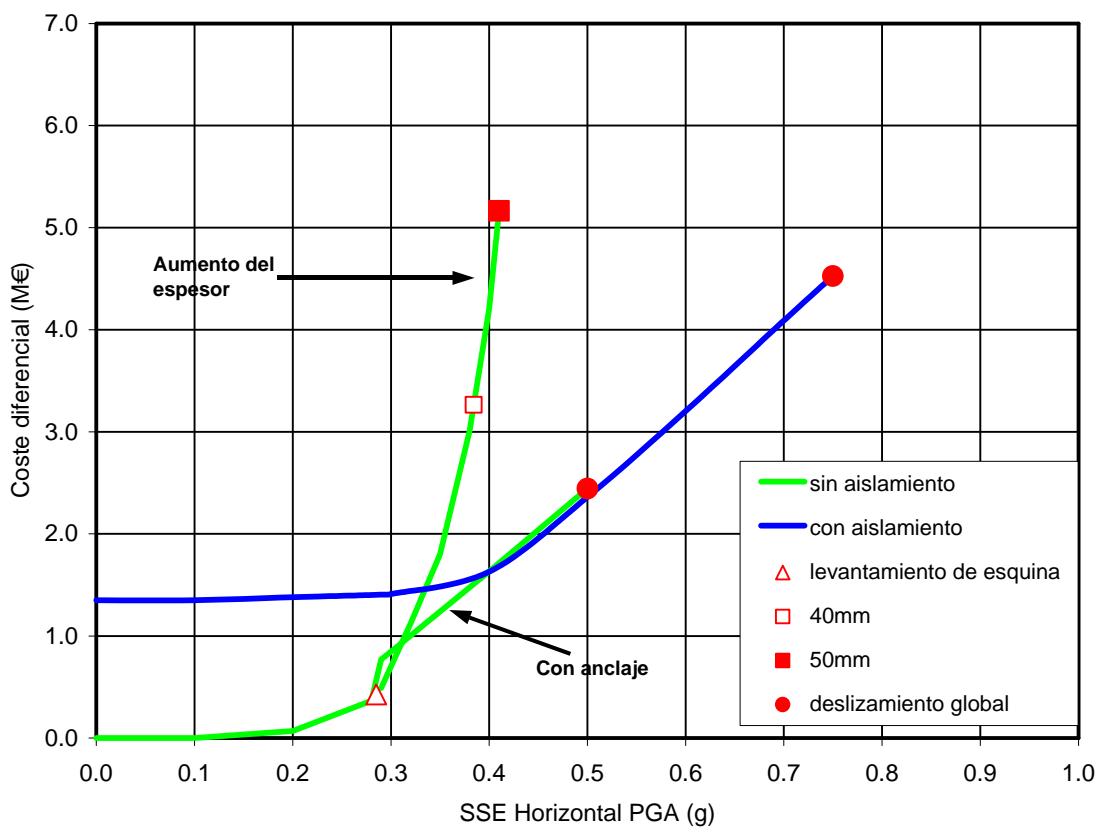


Figura 4 Evolución de los costes con la demanda sísmica. Cimentación sobre pilotes.

- El anclaje introduce algunos costes adicionales, aparte del acero requerido, de difícil cuantificación. Por ejemplo, da lugar a concentraciones de tensiones en puntos del tanque interno, así como a puentes térmicos a través de la losa. Y también introduce complicaciones y demoras en el proceso constructivo al tener que dejar los anclajes emergiendo sobre la superficie de la losa, donde luego deben colocarse la viga perimetral y el aislamiento térmico de la base.
- A pesar de que se trata de una práctica común, el funcionamiento del anclaje no deja de plantear algunas dudas sobre su fiabilidad durante el terremoto. Los anclajes deben ser flexibles para adaptarse a los desplazamientos radiales del tanque interno, lo que les condena a ser bastante más rígidos en dirección circunferencial. Es difícil garantizar el buen comportamiento de los anclajes que están deformándose en esta última dirección (por ejemplo, sin experimentar roturas frágiles en las soldaduras o sus alrededores).

Como consecuencia de estas consideraciones, aunque no pueda ofrecerse una cuantificación precisa, un tanque con aislamiento puede ser preferible a uno convencional al menos en la parte alta de los rangos de aceleraciones mencionados para ambas soluciones de cimentación: 0,30g-0,65g para tanque sobre losa y 0,25g-0,50g para tanque pilotado.

Para tanques pilotados el coste del tanque anclado sin aislamiento y el coste del tanque con aislamiento coinciden a partir de aproximadamente 0,4g. Sin embargo, para tanques sobre losa superficial, el coste del tanque aislado es siempre superior al del tanque sin aislar. Los motivos son:

- La colocación de aisladores requiere disponer una doble losa con pedestales, coste que se compensa sólo parcialmente con el ahorro energético.
- El tanque interno se encarece ligeramente con cimentaciones pilotadas a causa de la mayor rigidez de éstas.

Para tanques sobre pilotes, la estrategia de aumentar el espesor de chapa es prácticamente siempre más cara que la de aislar el tanque. Para tanques sobre losa, esto ocurre con aceleraciones superiores a 0,5g, que ya requieren un espesor de chapa de 40 mm.

El mismo tipo de cálculos han sido realizados para otras combinaciones de configuración de tanque y de input sísmico, que no se presentan aquí por razones de espacio. En cualquier caso, las observaciones son al menos cualitativamente análogas a las aquí expuestas.

Conclusiones

En base al trabajo realizado pueden ofrecerse una serie de conclusiones, relativas a tanques con la geometría habitual (altura aproximadamente igual al radio):

- Para aceleraciones (PGA) inferiores a 0,25g-0,30g, un tanque sin aislamiento es perfectamente adecuado, así como 2 M€ más barato que uno con aislamiento.
- Para aceleraciones entre 0,25g-0,30g y 0,50g-0,65g, un tanque sin aislamiento sigue siendo posible pero debe anclarse, lo que introduce incertidumbres y costes adicionales difíciles de aquilatar. De todos modos, el sobre coste del tanque aislado disminuye al crecer la aceleración, llegando incluso a desaparecer a partir de 0,40g para el tanque de 160.000 m³ sobre pilotes.

- Si la aceleración supera unos 0,60g, el tanque sin aislamiento deja de ser factible, al no poderse impedir el deslizamiento global del tanque interno. En el rango entre 0,50g-0,65g y 0,90g, sólo resultan viables los tanques con aislamiento sísmico.
- Por encima de 0,90g incluso el tanque aislado es inviable al no poderse evitar el deslizamiento.
- Con independencia de lo anterior, el levantamiento global del tanque (el tanque interno se despega de la base) es esperable para aceleraciones en torno a 1,00g tanto con aislamiento como sin él.

Conviene añadir un último comentario, relativo al método del espectro de respuesta utilizado en todos los cálculos aquí descritos. Se trata de un método bastante conservador, aunque está bien establecido en la industria y presenta pocas incertidumbres. Si los cálculos se hubieran realizando por integración temporal en base a acelerogramas sintéticos, es prácticamente seguro que todos los resultados hubieran sido algo menos severos. Sin embargo, la aceptabilidad de una metodología que se separa de las habituales, junto con las incertidumbres derivadas de la disparidad de resultados esperable con distintos acelerogramas, son cuestiones complejas susceptibles de generar problemas considerables.

Referencias:

- AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials, (1999), "Guide Specifications for Seismic Isolation Design", Washington, D.C.
- API – American Petroleum Institute (1998) "API 620. Design and Construction of Large, Welded, Low-Pressure Storage Tanks", 9th Edition, American Petroleum Institute, Washington, diciembre.
- ASCE – American Society of Civil Engineers (1984) "Guidelines for the Seismic Design of Oil and Gas Pipeline Systems", Committee on Gas and Liquid Fuel Lifelines.
- ASCE - American Society of Civil Engineers (2000) "Standard 4–98. Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and Commentary".
- Bergamo G., Castellano M.G., Gatti F., Poggianti A., Summers P. (2006a), "Seismic isolation of spheres at petrochemical facilities", *First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Ginebra, Suiza*, artículo no. 1009
- Bergamo G., Castellano M.G., Gatti F., Rebecchi V. (2006b) "Parametric analyses for the seismic isolation of LNG tanks", *First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Ginebra, Suiza*, artículo no. 1046
- Castellano M.G., Poggianti A., Summers P. (2006) "Seismic retrofit of spheres using energy-dissipating braces", *First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Ginebra, Suiza*, artículo no. 1001
- CEN – Comité Europeo de Normalización (2004) "EN 1998-1. Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance - Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings", diciembre.
- CEN – Comité Europeo de Normalización (2006) "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", Norma Europea, septiembre.
- CEN – Comité Europeo de Normalización (2007) "EN 1473. Installation and Equipment for Liquefied Natural Gas – Design of Onshore Installations", Norma Europea, enero.
- Gregoriou V.P., Tsiniopoulos S.V., Karabalis D.L. (2006), Base isolated LNG tanks:

seismic analyses and comparison studies, *First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Ginebra, Suiza*, artículo no. 1128

- NFPA – National Fire Protection Association (2005) “NFPA 59A. Production, Storage and Handling of Liquefied Natural Gas. 2006 Edition”, Maryland.
- Veletsos, A.S. y Tang, Y. (1986) “Dynamics of Vertically Excited Liquid Storage Tanks”, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 112, No. 6, junio.
- Veletsos, A.S. y Tang, Y. (1990) “Soil-Structure Interaction Effects for Laterally Excited Liquid Storage Tanks”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.19, pp 473-496.