

# CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO SISMICO DE TANQUES DE SERVICIO NUCLEAR

Juan Miguel GARCIA-MONGE FERNANDEZ  
y María Angeles SENDIN GONZALEZ

## DISEÑO

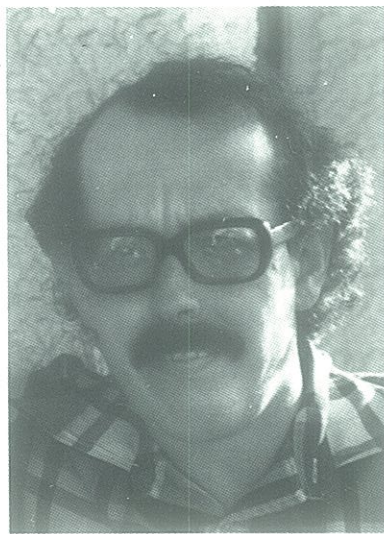
*Contrariamente a lo que ocurre con otras estructuras típicas de una Central Nuclear en que los métodos utilizados para realizar su diseño sísmico están suficientemente sancionados por la práctica, y muchas veces confirmados por ensayo, cuando nos referimos a tanques no existe esta unanimidad, utilizándose criterios muy diferentes cuyos resultados alcanzan dispersiones totalmente inaceptables. La única postura definida por un organismo competente y, por otra parte, la más utilizada en el diseño (TID 7024) posee unas limitaciones que su aplicación en la mayoría de los casos no se corresponde con unos resultados realmente fiables. Otros métodos propuestos tratan de aproximarse al comportamiento conjunto estructura resistente-líquido contenido, aún cuando unas veces por la dificultad de su aplicación y otras por no englobar todas las variables requeridas, tampoco se destacan como método idóneo para el diseño.*

*En lo siguiente se comentan algunos de estos métodos haciendo especial mención de sus limitaciones y el efecto que pueden tener en la respuesta. Se comentan igualmente los resultados obtenidos en algunos ensayos realizados en tanques reales o modelos reducidos, principalmente en cuanto a condiciones de contorno se trata, entendidas éstas como forma de anclaje a la cimentación y tipo de ésta, o efecto de la cubierta.*

*Se concluye con las recomendaciones mínimas que se deben seguir para obtener un diseño sísmico fiable de este tipo de tanques.*



María de los Angeles SENDIN GONZALEZ es Programadora de Aplicaciones en el Centro de Proceso de Datos del MOPU, donde desarrolla diversas aplicaciones, tanto técnicas como comerciales.



Juan Miguel GARCIA-MONGE FERNANDEZ es Ingeniero de Caminos en INITEC, donde es responsable del equipo de calificación, y del de análisis dinámico de la CN Vandellós II. anteriormente trabajó para IBM como Técnico de Sistemas.

## ALGUNOS METODOS DE ANALISIS

Los métodos de uso más común se basan en los estudios realizados por Jacobsen y Housner, que ofrecen una formulación del problema que modeliza la masa del agua desde el punto de vista de que parte de ella se mueve solidaria con el tanque (masa impulsiva), mientras que otra se mueve independientemente (masa convectiva), siendo esta última la que produce el oleaje (fig. 1).

La aplicación directa de esta solución se ofrece en el TID 7024 (1). Este método se ha aplicado y aún se aplica actualmente en el diseño de tanques sin una consideración previa de las características de rigidez estructural. Sin embargo, el TID parte de la base de que el tanque sea rígido lo que en general, y cuando nos referimos a tanques metálicos, no es cierto, lo cual conduce a un diseño que en modo alguno es conservador. Las referencias 2 y 3 estudian los fallos ocurridos en tanques reales bajo la acción de terremotos sucedidos en los últimos años, apoyando la tesis de la falta de conservadurismo de este tipo de diseño.

En las figuras 2 y 3 se han representado los esfuerzos obtenidos por este método (cortantes y momentos de vuelco) comparados con los que se obtendrían al aplicar en el centro de gravedad del tanque una carga equivalente a la producida por una aceleración igual a la del terreno (es decir método estático, supuesto no existe ninguna amplificación).

El espectro de respuesta utilizado es el caso conservador de que para frecuencias bajas la curva correspondiente al 0,5% de amortiguamiento coincide con los valores del ZPA. (Esto da unos valores de esfuerzos para la masa convectiva muy superiores a los que realmente se obtendrían.)

La observación de estas curvas demuestra que para esfuerzo cortante siempre el valor calculado por el TID queda por debajo del obtenido como elemento rígido. En cuanto a los momentos, se encuentran similares a la suposición de conjunto rígido para valores  $R/H < 1$ , siendo superiores para valores de  $R/H > 1$ , aún cuando si se tuviese en cuenta los valores reales de aceleración, estos valores descenderían de manera significativa debido a la influencia que en estas figuras tiene los esfuerzos producidos por la masa convectiva.

Por todo lo anterior, y en el caso normal de tanque flexible, se puede llegar a un diseño que en modo alguno sea conservador.

Una extensión de este procedimiento pero con las mismas limitaciones está desarrollado por Epstein (4), y una modificación se incluye en el API Standard 650, Appendix E.

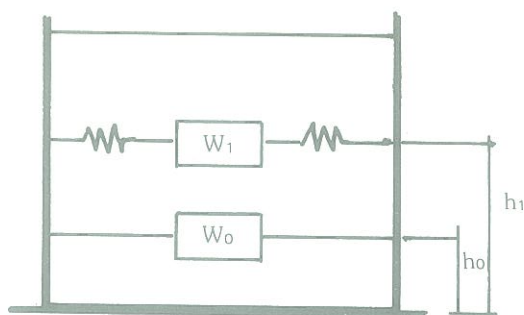
Veletsos (5) ha desarrollado un método que permite tener en cuenta el efecto de la flexibilidad del tanque. Al igual que otros autores, considera los términos convectivo e impulsivo como productores de la carga hidrodinámica. También admite que las fuerzas convectivas no se ven afectadas por la flexibilidad del tanque, con lo que se puede aplicar la condición de tanque rígido. Por el contrario, las fuerzas impulsivas deben ser evaluadas considerando los efectos dinámicos del sistema tanque-fluido.

Debido a resultar muy compleja la evaluación del efecto de flexibilidad del tanque en las fuerzas impulsivas, una aproximación razonable y conservadora es estimar, en primer lugar, las frecuencias naturales del sistema tanque-fluido, y a partir de ella obtener la aceleración correspondiente en el espectro de respuesta de diseño. Finalmente se modifican los resultados obtenidos con las fórmulas para la condición de tanque rígido multiplicando los valores por la aceleración espectral amplificada.

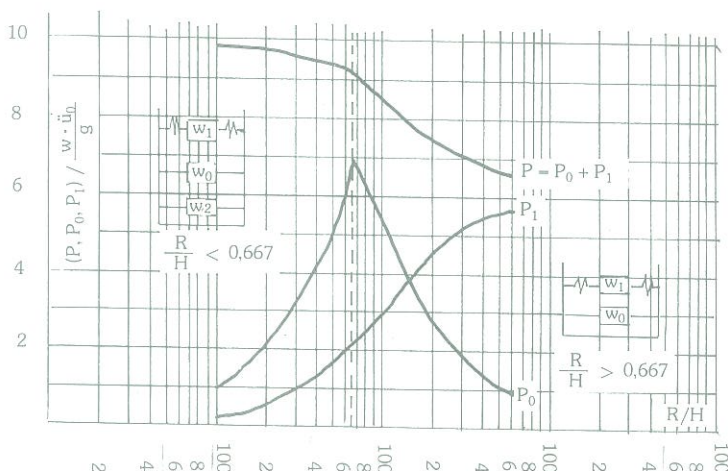
La observación de los métodos anteriores permite comprobar que en ningún momento se tratan las respuestas verticales del tanque. El motivo es que la mayor parte de las estructuras tienen un exceso de resistencia en la dirección vertical debido a los márgenes de seguridad utilizados en el diseño. Esto, por supuesto, no es admitido en las estructuras de una central nuclear, donde se requiere siempre un diseño para esfuerzos verticales producidos por sismo.

Por otra parte, Marchaj (6) estudia este problema, y basándose en observaciones bajo terremotos reales y ensayos, en que los tanques se deforman, e incluso rompen radicalmente en sus zonas inferiores debido a este esfuerzo vertical, ha llegado a las conclusiones de que los esfuerzos debidos al terremoto vertical pueden llegar a duplicar las tensiones ya existentes debidas a carga hidroestática para valores de aceleración de 0,35 g. La base de su cálculo es estudiar el efecto vertical como un sistema de un grado de libertad, que represente la vibración radial del tanque sin distorsión de su sección circular (fig. 4).

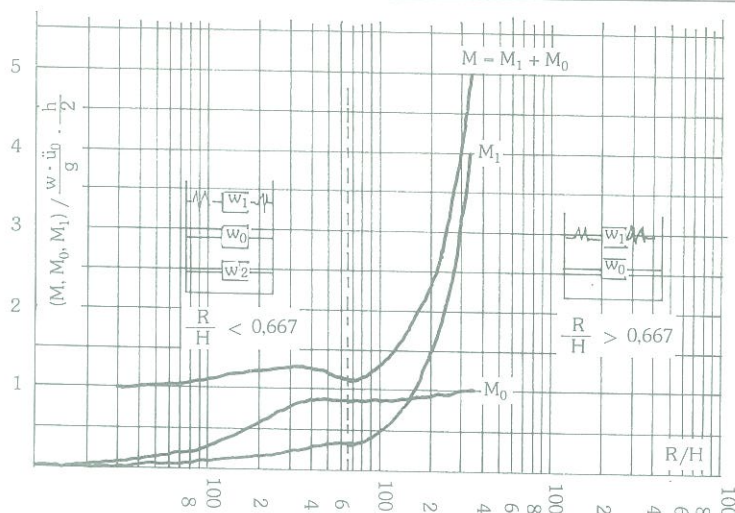
Su conclusión es que un tanque sometido a un sismo de componente horizontal 0,3 g. o mayor, y componente vertical 2/3 ó 3/4 de la anterior, no tiene un diseño fiable, si conjuntamente al



**FI** Modelo propuesto por Housner.



**FII** Relación de esfuerzos cortantes según TID y carga estática.



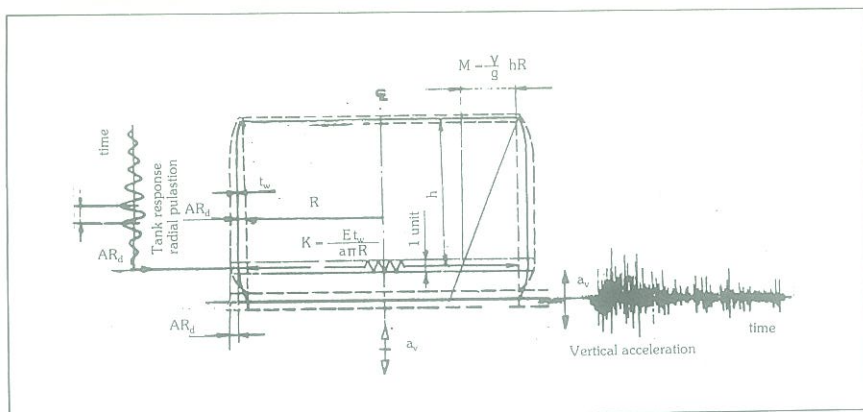
**FI** Relación de momentos de vuelco según TID y carga estática.

estudio de esfuerzos debidos a la sollicitación horizontal no se realiza el correspondiente a la vertical.

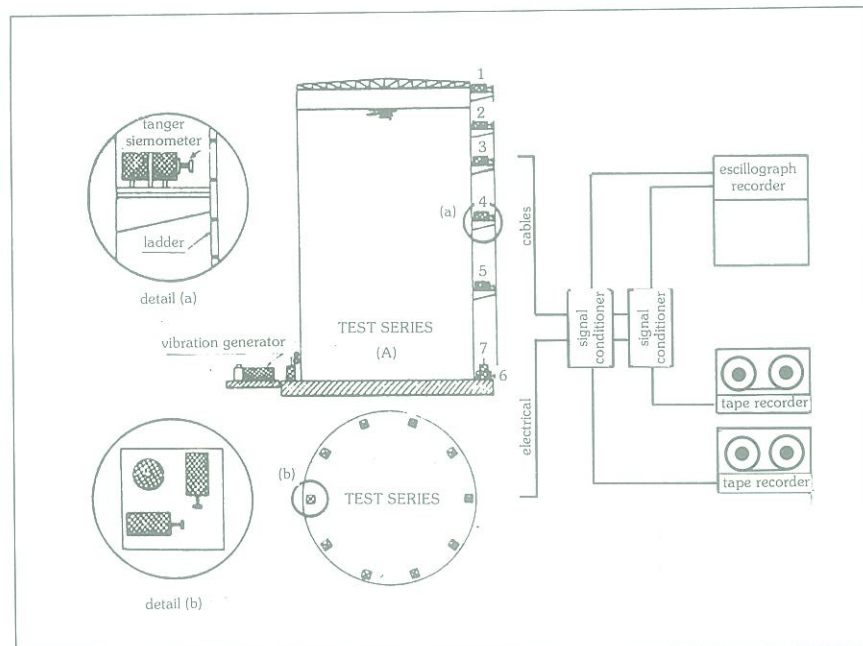
Otros métodos son los debidos a Kana (7), Housner (8), Lev (9), Shiraki (10), en que se ofrecen modelos simplificados, o más complicados de elementos finitos, considerando el líquido contenido ya sea como incomprensible o comprensible.

## Conclusiones de ensayos realizados

El método seguido para estudiar el comportamiento real de los tanques se ha basado principalmente en la realización de modelos reducidos a los que se aplica un movimiento sísmico teórico mediante una mesa de ensayo adecuada (11, 12), o bien sobre tanques reales



**FIG IV** Modelo propuesto por Marchaj para aceleración vertical.



**FIG V** Diagrama esquemático de los ensayos en modelos realizados por Housner.

(13), a los que se les excita por medio de vibradores aplicados en la estructura o sobre la losa de cimentación (fig. 5).

#### Las principales conclusiones de estos estudios son:

- Influencia muy importante de la rigidez del tanque, de tal forma que para aquellos que se encuentran en la zona de resonancia del espectro de respuesta, el modelo propuesto en TID 7024 no es en modo alguno válido para la fuerza impulsiva, ofreciendo respuestas muy inferiores a las registradas.
- Validez del modelo propuesto para la altura del oleaje (fuerza convectiva).
- Importancia de modos distintos a la consideración del tanque como ménsula. Estos modos son debidos a deformaciones de la sección (fig. 6).
- Importancia de las condiciones de contorno en cuanto a base anclada o simplemente apoyada y cimentación más o menos rígida (fig. 7). Un tanque simplemente apoyado tiene un comportamiento muy alejado de los supuestos teóricamente y muy difícil de predecir debido al efecto de levanta-

tamiento que se produce al combinarse los efectos verticales con los de cabeceo.

- Efecto favorable de la cubierta, rigidizando la parte superior del tanque y, por tanto, reduciendo el efecto de deformación en las secciones.
- Aparición de tensiones significativas debidas a los modos de vibración que deforma la sección. Esto se hace más evidente en las alturas medias del tanque, donde tiene menos influencia el efecto rigidizador de cimentación y cubierta. En tanques de base libre este efecto se hace más importante.

Existen otras conclusiones particulares de cada estudio, dado que éstos se realizaron con fines diferentes, ya sea la comprobación de un método de análisis propuesto o bien alguna característica particular del comportamiento dinámico de la estructura.

Merecen mención especial los estudios de Shiraki y Fujita (10), debido a sus comentarios respecto al efecto de la altura de líquido contenido en el amortiguamiento del conjunto o a la consideración de cortante o flexión en el modo principal, y todo ello mediante compa-

raciones del análisis propuesto, los ensayos realizados y otros métodos corrientemente utilizados.

## CONSIDERACIONES ANTE EL DISEÑO SISMICO. UN METODO SIMPLIFICADO

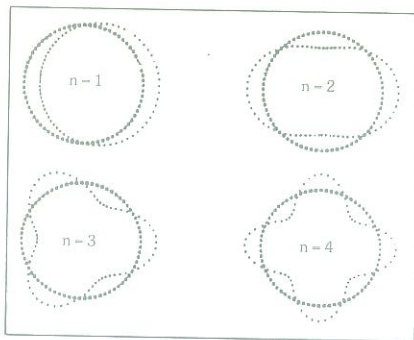
En lo anterior se han visto tanto los métodos analíticos propuestos por diversos autores como las conclusiones principales observadas en algunos programas de ensayos. La conclusión principal es que, debido a la gran variedad de incertidumbres que hay que contemplar, no existe un método analítico que pueda predecir un comportamiento exacto de las respuestas significativas del tanque. Por otra parte, los métodos analíticos propuestos pueden, o bien, ser complicados para una utilización normal a menos que se disponga de los programas de ordenador correspondientes o presuponen un comportamiento del tanque que en casos pueden no corresponderse con la realidad, llegándose a una respuesta no siempre satisfactoria, sea por quedar debajo de unos criterios conservadores mínimos utilizados en otros tipos de estructuras o bien por llegar a desconocer el grado de conservadurismo que realmente se alcanza, lo cual puede penalizar en demasía el diseño normal de este tipo de tanques.

Para muchos autores, cuando se enfrentan con el estudio de una estructura antisismo, consideran más importante un diseño correcto de ella que el utilizar unos análisis por sofisticados que sean, que en algunos casos sólo demostrarán la falta de idoneidad para soportar el terremoto del diseño elegido. Esto es aún más notorio cuando nos referimos a detalles constructivos.

La disgresión anterior viene a cuento a que de nada servirá un diseño sísmico llevado a la saciedad de la estructura del tanque si olvidamos el efecto demostrado en los ensayos, de una cimentación correcta y una cubierta adecuada que obligue al tanque a un comportamiento presupuesto en cuanto a las consideraciones que se realizarán en los análisis posteriores.

En cuanto al método de análisis a seguir, es necesario que contemple la flexibilidad del tanque, principalmente cuando éste se encuentre en las zonas de resonancia del espectro de respuesta de diseño. Un método como el de Veletos (5) debido a su simplicidad, nos dará un resultado satisfactorio.

No obstante, si la relación altura del



**F VI** Formas modales de la sección del tanque según análisis.

tanque y su radio es pequeña puede utilizarse el método descrito en TID 7024 (1), aún cuando es recomendable utilizar como masas convectiva e impulsiva las  $Q_1$  y  $Q_0$  que se indican en la figura 8, en lugar de las formuladas por aquél.

Un método simplificado que proponemos supone la aplicación de una carga estática adecuada, definida teniendo en cuenta los problemas antes apuntados (fig. 9).

Los pasos a seguir son los siguientes:

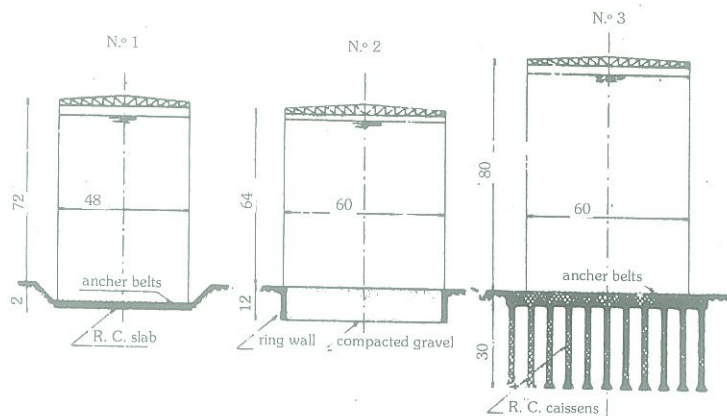
- Considérese en el diseño estático un peso de líquido que incluya el efecto del terremoto vertical, sumándole el tanto por ciento correspondiente a la aceleración sísmica vertical del suelo (ZPA).
- Determinése la frecuencia del conjunto tanque-fluido a partir del gráfico de la figura 10. Esta frecuencia tiene en cuenta el comportamiento del tanque a flexión y cortante, considerando el efecto de grandes secciones. La aceleración sísmica se obtiene a partir de este valor en el espectro de respuesta de diseño para amortiguamiento del 5 al 7 % (10). Para otros líquidos distintos al agua multiplíquese la frecuencia obtenida por la raíz cuadrada de la relación de densidades del agua al líquido considerado.
- Obténgase la altura de aplicación de la fuerza sísmica en la figura 11. Las curvas representan la altura de aplicación para momento máximo en el cierre a presión o momento de vuelco total del tanque.
- Determinénsen los esfuerzos a cortante y momentos de vuelco aplicando esta carga sísmica sobre toda la masa de agua.
- La altura de la ola se puede obtener según se indica en el TID, o simplemente por la fórmula propuesta por Epstein (4).

$$d_{\text{máx.}} = 0,831 \times \frac{a}{g} \times R$$

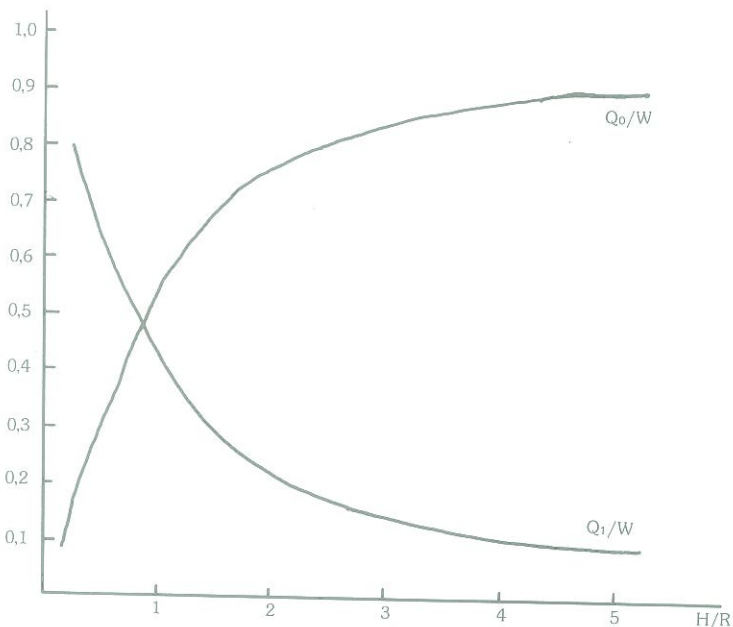
(a = aceleración para frecuencia de masa convectiva)

La tabla incluida en la figura 12 nos da una comparación de los resultados obtenidos mediante este método con otras aproximaciones.

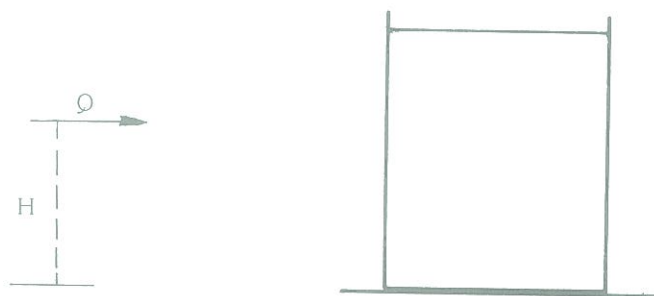
No hace falta recordar la importancia que puede tener el considerar la carga



**F VII** Sección de tanques y sus cimentaciones según Housner.



**F VIII** Valores propuestos de  $Q_0$  y  $Q_1$  para su utilización en lugar de los formulados en TID.



**F IX** Modelo simplificado propuesto.

sísmica vertical como negativa en el momento de obtener los esfuerzos para el diseño de anclajes, principalmente si la aceleración a nivel del suelo es elevada y puede producirse levantamientos de la estructura.

## CONCLUSIONES

Se ha pasado revista a algunos de los métodos de análisis sísmico de tanques, así como a los resultados obtenidos en ensayos. Se ha visto la importancia que se desprende de la flexibilidad propia del tanque, al obtenerse tensiones muy superiores a las calculadas por métodos clásicos que no tienen en cuenta este parámetro. Igualmente se ha señalado las muchas incertidumbres que posee este tipo de cálculo, imposibilitando una solución que los englobe a todos y complicando cualquier solución que trate de tener en cuenta varias de ella, con lo que se puede decir que no existe una solución del problema suficientemente operativa.

Las condiciones de contorno es un punto de vital importancia para que los supuestos hechos en el cálculo tengan una aproximación con la realidad, por lo que el diseño del tanque debe ir acompañado por un adecuado proyecto de obra civil.

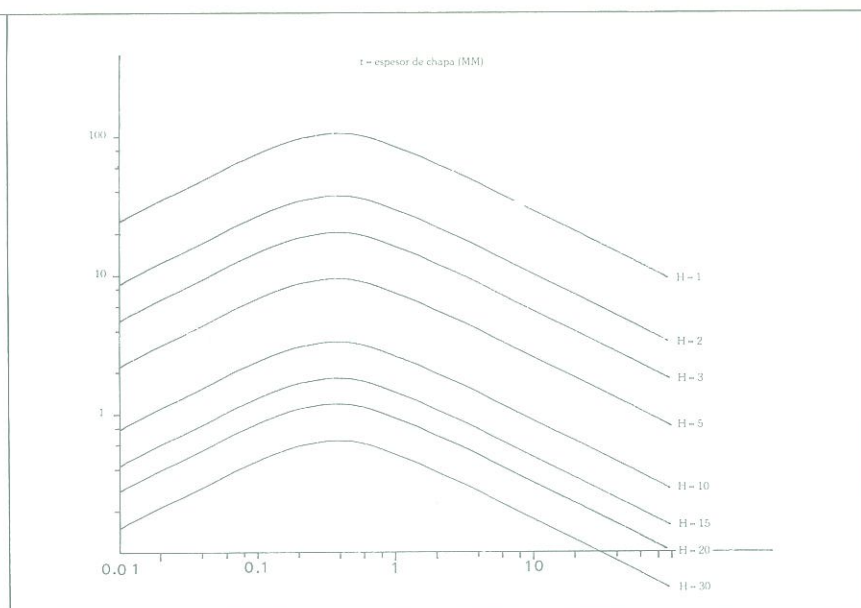
Finalmente se ha propuesto un método simplificado de análisis del tanque que en ninguna forma trata de competir o sustituir con los desarrollados hasta el momento, pero que por su sencillez permite evaluar rápidamente el impacto que la flexibilidad del tanque puede tener en las tensiones, así como ser una herramienta útil para el diseño.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a B. Sendín y L. Sánchez Bilbao su colaboración en este trabajo que ha facilitado grandemente la realización del mismo.

## REFERENCIAS

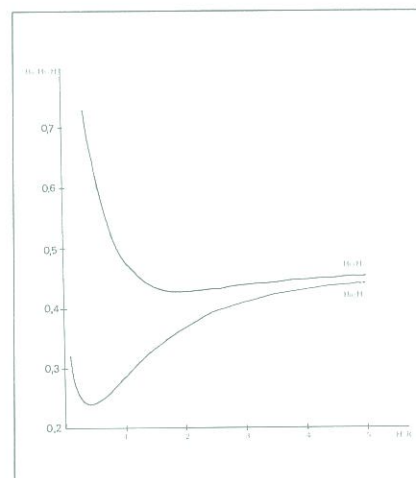
1. Thomas et al **Dynamic Pressure on Fluid Containers**. Nuclear Reactors and Earthquakes TID 7024, U.S. Atomic Energy Commission, 1963.
2. Rinne, J. E. **Oil Storage Tanks**. The Prince Williams Sound, Alaska, Earthquake of 1964. U.S. Dept. of Commerce, Coast & Geodetic Survey, vol. II-A, p. 72, 1967.
3. Jennings, Paul C., **Damage to Storage Tanks**. Engineering Features of the San Fernando Earthquake of February 1971, California Institute of Technology, June 1971.
4. Epstein, H. J., **Seismic Design of Liquid Storage Tanks**. Journal of the Structural Division. September 1976, pp. 1659-1673.
5. Veletsos, A. S. & Yang J. Y., **Dynamics of Fixed-Based Liquid Storage Tank**. Proceeding U.S.-Japan Seminar on Earthquake



**FX** Frecuencia (CPS) del conjunto estructura-fluido en función de las dimensiones del tanque.

Engineering Research with Emphasis on Lifeline Systems, Japan Society for Promotion of Earthquake Engineering, Tokio, Japan. Nov. 1976, pp. 317-341.

6. Marchaj, T. J., **Importance of Vertical Acceleration in the Design of Liquid Containing Tanks**. Proceedings of the 2nd U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Aug. 22-24, 1979. Stanford University.
7. Kana, D. D.; Dodge, F. T., **Design Support Modeling of Liquid Slosh in Storage Tanks Subject to Seismic Excitation**. Proceeding of ASCE Conference on Structural Design of Nuclear Plants Facilities, vol. I-A, 307-337. Dec. 1975.
8. Housner, G. W.; Haroun, M. A., **Earthquake Response of Deformable**



**FXI** Altura de aplicación de carga sísmica.

| <b>FXII</b> Datos | Método               | Aceleración | Cortante | M. Vuelco |
|-------------------|----------------------|-------------|----------|-----------|
| H = 10 m          | TID                  | 0.20        | 36       | 232       |
| R = 8 m           | Veletsos             | 0.55        | 86       | 516       |
| t = 6 mm          | Fujita (equivalente) | 0.52        | 103      | 502       |
|                   | Propuesto            | 0.54        | 111      | 498       |
| H = 15 m          | Propuesto            | 0.20        | 23       | 228       |
| R = 5 m           | Propuesto            | 0.58        | 72       | 464       |
|                   | Propuesto            | 0.58        | 69       | 459       |
| H = 3 m           | Propuesto            | 0.20        | 2.5      | 6.0       |
| R = 4 m           | Propuesto            | 0.20        | 3.0      | 5.3       |
| T = 3 mm          | Propuesto            | 0.20        | 3.0      | 5.3       |
|                   | Propuesto            | 0.21        | 3.23     | 5.1       |

9. Lev, O. E.; Jain, B. P., **Seismic Response of Flexible Liquid Containers**, 1977.
10. Shiraki, K.; Fujita K., **Approximate Seismic Response Analysis of Thin Cylindrical Liquid Storage Tanks**. Preprint of JSME, n.º 740-12. Nov. 1974.
11. Clough, R. W.; Clough, D. P., **Seismic Response of Flexible Cylindrical Tanks**. 1977.
12. Kana, O. O., **Seismic Response of Flexible Cylindrical Liquid Storage Tanks**. 1977.
13. Housner, G. W.; Haroun, M. A., **Vibration Test of Full-Scale Liquid Storage Tanks**. Proceedings of the 2nd U.S. National Conference on Earthquake Engineering, 22-24 Aug. 1979.