

## ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE TANQUES CILÍNDRICOS BAJO EXCITACIÓN SÍSMICA

M. E. Compagnoni<sup>a,b</sup>, R. O. Curadelli<sup>a,b</sup>, C. A. Martinez<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup> *Grupo de Dinámica Experimental, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo, Centro Universitario, Parque Gral. San Martín, Mendoza, Argentina, [ecompagnoni@conicet.gov.ar](mailto:ecompagnoni@conicet.gov.ar)*

<sup>b</sup> *Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, CONICET, <http://www.conicet.gov.ar>*

**Palabras claves:** Tanques cilíndricos, interacción fluido-estructura.

**Resumen.** En este trabajo se presenta una evaluación de los modelos simplificados que han sido desarrollados para análisis y diseño de tanques de almacenamiento de líquidos. La evaluación se basa en un análisis comparativo de la respuesta a una excitación sísmica de dos tanques cilíndricos con diferentes relaciones de esbeltez, los cuales han sido modelados mediante un modelo mecánico simplificado en donde el comportamiento del líquido se representa por un sistema masa-resorte (modelo de Housner modificado por Haroun) y modelos más complejos basados en una aproximación lagrangiana implementados en un código de elementos finitos. Si bien los resultados muestran una aceptable aproximación de los modelos simplificados para fines de diseño, existen casos en los cuales las diferencias son considerables.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los tanques son estructuras especialmente construidas con el propósito de almacenar algún material o sustancia fluida tales como agua, combustibles, productos químicos, etc.. Su función es estratégica dado que son vitales para los sistemas de distribución de agua, y pueden almacenar sustancias peligrosas (corrosivas o explosivas) en la industria petroquímica y en centrales nucleares. El interés por un comportamiento seguro bajo cargas sísmicas, radica no sólo en el costo de reposición en caso de falla, sino también en los desastres ambientales que un accidente puede provocar, (Chang y Lin, 2006). Por lo tanto, dada la necesidad de que continúen operando después de un evento sísmico, hace que sea extremadamente importante el estudio de su comportamiento.

Los tipos más comunes de depósitos son, tanques cilíndricos verticales, y estos los podemos clasificar en depósitos cuyo fondo está apoyado directamente en la fundación (no elevados), y aquellos que se apoyan en pilares (elevados).

En los últimos años se han producido numerosas fallas catastróficas de tanques contenedores de líquido debido a eventos sísmicos severos tales como los ocurridos en 1960 en Chile, (Steinbrugge y Flores, 1963); 1994 en Northridge, California, (Knoy, 1995); 1995 en Kobe, Japón, (Malhotra, 2006); 1999 en Chi-Chi, Taiwán, (Event Report Chi-Chi, Taiwan Earthquake, 1999) y en 1999 en Kocaeli, Turquía, (Sezen, Livaoglu, Dogangun, 2008 y Yazici, 2008). Esto motivó numerosas investigaciones experimentales y analíticas a fin de mejorar su comportamiento.

En este trabajo, se presenta un estudio comparativo de modelos mecánicos simplificados que se han desarrollado para análisis y diseño de tanques (modelo de Housner modificado por Haroun, 1981) y modelos más complejos basados en una aproximación lagrangiana del fluido implementados en un código de elementos finitos. Las simulaciones numéricas se llevan a cabo en tanques cilíndricos con diferentes relaciones de esbeltez bajo distintos registros sísmicos.

### 1.1. Comportamiento de Depósitos no Elevados Durante un Sismo.

Las diferentes fallas que presentan los depósitos de almacenamiento de líquidos, tienen importantes implicancias tanto económicas como sociales. Los daños registrados en estos, debido a acciones sísmicas, se pueden clasificar en cuatro categorías generales:

- Pandeo en la parte baja de la pared del tanque, donde la compresión axial debido al momento de vuelco es máximo. En esta zona, el pandeo de la pared aparece con grandes deformaciones y es conocido como “*pata de elefante*” (Figura 1).
- Daños de pandeo en la tapa o en la parte superior de la pared lateral debido al efecto de oleaje del líquido (Figura 2).
- Daños en las tuberías y otros accesorios que se vinculan rígidamente a las paredes del tanque.
- Daños debido a falla de la fundación.



Figura 1: Falla "pata de elefante".

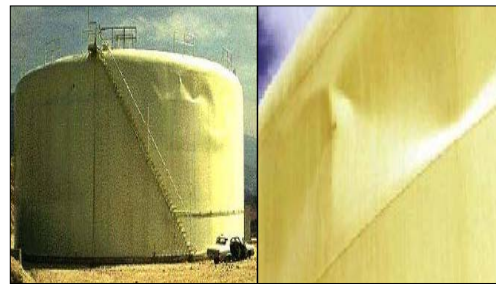


Figura 2: Pandeo en la parte superior de la pared lateral.

## 1.2. Evolución del Análisis de Depósitos.

El análisis sísmico de tanques de almacenamiento de líquidos requiere consideraciones especiales, debido a las fuerzas hidrodinámicas ejercidas por el fluido sobre la pared del tanque. La evaluación de estas fuerzas y la seguridad general de la estructura bajo una excitación sísmica deben llevarse a cabo considerando las características de los sismos locales y de la obra en particular. Además, se ha demostrado que la respuesta sísmica de los tanques de almacenamiento de líquidos se ve afectada significativamente por la interacción entre el líquido contenido y la estructura ([Livaoglu y Dogangun, 2006](#)). Por lo tanto, la interacción fluido-estructura debe ser considerada durante el proceso de diseño, para lo se requiere de modelos adecuados.

El desarrollo de modelos mecánicos, que aproximan la respuesta de tanques, ha simplificado considerablemente el análisis de este tipo de estructuras. Estos modelos mecánicos simplificados (Mass Spring Model -MSM-), representan el sistema de tanque-líquido mediante un sistema masa-resorte equivalente, lo que simplifica la evaluación de las fuerzas hidrodinámicas y permite predecir la respuesta en términos de cortante basal, momento de vuelco y altura máxima de las olas (Maximum Sloshing Wave Height -MSWH).

En general, las investigaciones sobre la respuesta sísmica de tanques han sido llevadas a cabo durante los últimos 60 años. A partir de ensayos ([Graham y Rodriguez, 1952](#)) se ha comprobado que el líquido vibrante dentro del contenedor tiene dos componentes, una que se mueve al unísono con el tanque (componente impulsiva) y otra que representa el movimiento de olas en superficie (componente convectiva). Housner ([Housner, 1954 y 1957](#)) propuso el primer modelo simplificado (MSM) para el cálculo de la respuesta dinámica, que sigue siendo ampliamente utilizado con algunas modificaciones y contempla las siguientes hipótesis:

- El líquido contenido en el depósito es incompresible, irrotacional, sin viscosidad, e inicialmente en reposo.
- El contenedor es rígido.
- Como se trabaja con pequeños desplazamientos, se admite que el sistema es lineal. Como consecuencia de lo anterior, puede suponerse que el líquido permanece siempre en contacto en las paredes del depósito (no hay cavitación).

Considerando sólo los efectos de una componente horizontal de los movimientos del suelo, Housner, mostró que los resultados obtenidos de un análisis exhaustivo, basado en la solución de la ecuación de Laplace por series infinitas, hacían ver que se podría establecer un modelo simplificado, en que la parte media e inferior del contenido líquido (masa impulsiva) se movía rígidamente con el depósito y que la porción superior restante (masa convectiva) actuaba como una masa sujeta a las paredes por medio de resortes, representando la acción del oleaje del líquido.

Con los supuestos antes mencionados, el modelo mecánico Housner describe los efectos impulsivos y convectivos mediante masas equivalentes adheridas a las paredes del depósito localizadas a una determinada altura..

En estudios posteriores, el modelo de Housner de MSM ha sido modificado para tener en cuenta la flexibilidad de la pared del tanque. Veletsos y Yang (Veletsos y Yang, 1976) utilizaron una masa para describir el efecto impulsivo y dos masas para el efecto convectivo. Haroun y Housner (Haroun y Housner, 1981; Haroun, 1983) dividen la masa impulsiva en dos partes; una parte rígidamente conectada al tanque y otra que representa la masa que participa con un movimiento relativo debido a la deformación de la pared del tanque. Malhotra (Malhotra, 2000) realizó modificaciones a las propiedades del MSM simplificado propuesto por Veletsos y Yang (Veletsos y Yang, 1976). El procedimiento tiene en cuenta las acciones impulsivas y convectivas del líquido en tanques de acero o de hormigón con fundaciones rígidas.

Algunas de las obras mencionadas han constituido la base de las disposiciones de diseño sísmico de tanques cilíndricos verticales tales como el Euro-código 8 (Eurocode-8, 2003) y la norma de diseño API-650 (American Petroleum Institute) (API Standard 650, 2007).

## 2. MODELO MECÁNICO SIMPLIFICADO DEL TANQUE

En este trabajo el comportamiento del sistema tanque-líquido, se representa mediante el modelo de Haroun (Haroun, 1983) que modificó el modelo de Housner para considerar la flexibilidad de la pared del tanque. En este modelo, la masa de líquido durante la excitación sísmica, vibra en tres formas diferentes denominadas, masa convectiva  $m_c$ , (parte superior de la masa de líquido que controla la superficie libre, es decir, representa la masa de las olas en la superficie del líquido) los desplazamientos horizontales de dicha masa, son equivalentes a la altura de ola, masa impulsiva  $m_i$ , (parte intermedia de la masa de líquido que vibra junto a la pared del tanque) y masa rígida  $m_r$  (parte inferior de la masa de líquido que vibra solidaria al fondo del recipiente), (Figura 3). Los desplazamientos absolutos de cada grado de libertad son denotados por  $u_c$ ,  $u_i$  y  $u_r$ , respectivamente. En el análisis se admitieron las siguientes hipótesis: a) la masa convectiva e impulsiva son conectadas a la pared del tanque mediante resortes que tienen rigidez equivalente igual a  $k_c$  y  $k_i$  respectivamente y la masa rígida es vinculada al fondo del tanque b) el peso propio del tanque es despreciable frente al peso total efectivo, c) el tanque permanece en comportamiento elástico lineal durante todo el análisis y d) el amortiguamiento asociado con la masa convectiva e impulsiva se expresa mediante una relación de amortiguamiento crítico previamente admitida.

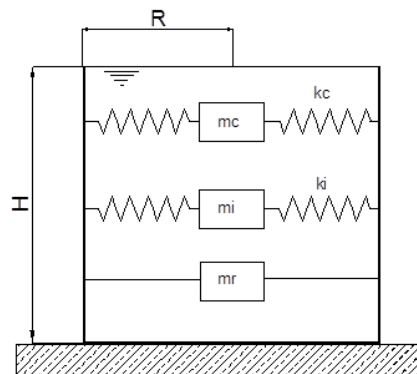


Figura 3: Modelo mecánico del tanque.

Las masas convectiva, impulsiva y rígida se determinan a partir de la masa de líquido,  $m$ , como:

$$\begin{aligned} m &= \pi R^2 H_w \rho_w \\ m_c &= Y_c m \\ m_i &= Y_i m \\ m_r &= Y_r m \end{aligned} \quad (1)$$

en el cual  $\rho_w$  es la densidad del líquido;  $Y_c$ ,  $Y_i$ ,  $Y_r$  son relaciones de masa las cuales son función del espesor del tanque,  $t_h$ , y la relación de esbeltez definida como  $S = H_w/R$ ; en el cual  $H_w$  es la altura de líquido y  $R$  es el radio del tanque.

La frecuencia fundamental de la masa convectiva,  $\omega_c$ , e impulsiva,  $\omega_i$  se determinan mediante las siguientes expresiones:

$$\omega_c = \sqrt{1,84 \left(\frac{g}{R}\right) \tanh(1,84 S)} \quad (2)$$

$$\omega_i = \frac{P}{H_w} \sqrt{\left(\frac{E}{\rho_w}\right)} \quad (3)$$

donde  $E$  y  $\rho_s$  son el módulo de elasticidad y la densidad de la pared del tanque, respectivamente y  $g$  es la aceleración de la gravedad.

Para  $t_h/R = 0.004$  las relaciones de masa y el coeficiente  $P$  se expresan de acuerdo al trabajo de Haroun (Haroun, 1983) y referenciadas en Shrimali y Jangid (Shrimali y Jangid, 2004) como:

$$\begin{pmatrix} Y_c \\ Y_i \\ Y_r \\ P \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1.01327 & -0.87578 & 0.35708 & 0.06692 & 0.00439 \\ -0.15467 & 1.21716 & -0.62839 & 0.14434 & -0.0125 \\ -0.01599 & 0.86356 & -0.39094 & 0.04083 & 0 \\ 0.037085 & 0.084302 & -0.05088 & 0.012523 & -0.0012 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ S \\ S^2 \\ S^3 \\ S^4 \end{pmatrix} \quad (4)$$

La rigidez y amortiguamiento equivalente de las masas convectivas e impulsivas se determinan como sigue:

$$\begin{aligned} k_c &= m_c \omega_c^2 \\ k_i &= m_i \omega_i^2 \\ c_c &= 2\xi_c m_c \omega_c \\ c_i &= 2\xi_i m_i \omega_i \end{aligned} \quad (5)$$

donde  $\xi_c = 0,5\%$  y  $\xi_i = 2\%$  son la relación de amortiguamiento de la masa convectiva e impulsiva, respectivamente (Malhotra, 2000).

## 2.2. Ecuación de movimiento

Dado que la masa rígida,  $m_r$ , está unida solidariamente al fondo del tanque que a su vez se encuentra vinculado a la fundación, el tercer grado de libertad queda restringido y se trabaja solo con dos grados de libertad.

La ecuación de movimiento básica del modelo de dos grados de libertad para el tanque bajo excitación sísmica se expresan en forma matricial como:

$$[m]\{\ddot{x}\} + [c]\{\dot{x}\} + [k]\{x\} = -[m]\{r\}\{\ddot{u}_g\} \quad (6)$$

donde  $\{x\} = \{x_c \ x_i\}^T$  es el vector desplazamiento;  $x_c = u_c - u_g$  es el desplazamiento de la masa convectiva respecto al suelo;  $x_i = u_i - u_g$  es el desplazamiento de la masa impulsiva respecto al suelo;  $[m]$ ,  $[c]$ ,  $[k]$  son las matrices de masa, amortiguamiento y rigidez, respectivamente;  $\{r\} = \{1 \ 1\}^T$  es el vector de influencia;  $\ddot{u}_g$  es la aceleración del suelo y  $T$  denota la matriz traspuesta. Las matrices  $[m]$ ,  $[c]$ ,  $[k]$  se expresan como:

$$[m] = \begin{bmatrix} m_c & 0 \\ 0 & m_i \end{bmatrix} \quad [c] = \begin{bmatrix} c_c & 0 \\ 0 & c_i \end{bmatrix} \quad [k] = \begin{bmatrix} k_c & 0 \\ 0 & k_i \end{bmatrix} \quad (7)$$

### 3. MODELO NUMERICO DEL TANQUE

Para realizar el análisis numérico se utiliza el software ANSYS, ya que posee elementos para describir los efectos de interacción fluido-estructura. En este modelo de elementos finitos, el líquido está representado mediante un elemento tridimensional del tipo fluido, FLUID80 caracterizado por ocho nodos, teniendo tres grados de libertad traslacionales en cada nodo. El fluido se supone que es incompresible e irrotacional.

Para la modelización de las paredes del depósito se utilizó el elemento tipo SHELL63 definido por cuatro nodos, con seis grados de libertad cada uno.

Los nodos del fluido están acoplados con los nodos de la pared del depósito en la dirección radial, mientras que los movimientos relativos en la dirección tangencial y vertical pueden ocurrir libremente.

Los desplazamientos verticales de la ola se toman en un Punto A, que se encuentra en la superficie libre del líquido, alineado con el eje x y a una distancia muy pequeña de la pared del tanque (Figura 4). El desplazamiento vertical de este punto es el que se utiliza en la comparación con los desplazamientos de la masa convectiva del modelo mecánico  $m_c$ .

Para calibrar el modelo de elementos finitos se realizaron ensayos experimentales a escala real. En los mismos se efectuaron, análisis en vibraciones libres a fin de determinar los parámetros modales. Estos permitieron ajustar el modelo numérico, y así tener buena correlación entre los mismos en los análisis dinámicos posteriores.

### 4. DESCRIPCIÓN DE LOS TANQUES ANALIZADOS

Para el estudio se seleccionaron dos tanques cilíndricos de acero apoyados sobre el terreno cuyas propiedades son densidad  $\rho_s = 7900 \text{ Kg/m}^3$  y módulo de elasticidad  $E_s = 2E+11 \text{ Pa}$ ; el líquido conteniendo es agua con densidad  $\rho_w = 1000 \text{ Kg/m}^3$  y módulo de Bulk  $\beta = 2,2E+09$ .

Las dimensiones de los depósitos analizados son las que se muestran a continuación:

Tanque	Radio R (m)	Altura tanque H (m)	Altura líquido $H_w$ (m)	Altura libre $H - H_w$ (m)	S $H_w/R$
Tanque A	0,325	0,200	0,162	0,038	0,5
Tanque B	0,325	0,540	0,487	0,053	1,5

Tabla 1: Características de los tanques.

### 5. ANÁLISIS MODAL Y VIBRACIONES LIBRES

Se llevaron a cabo análisis modales de los tanques con ambos modelos numéricos y se contrastaron los resultados con el ensayo experimental. Se obtuvieron diferencias en las frecuencias menores del 1%. Las formas del modo fundamental de cada tanque se observan en las Figura 4 y Figura 5.

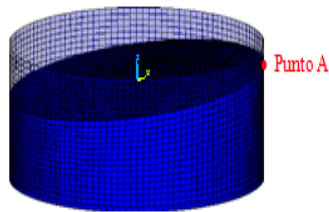


Figura 4: Tanque A, (S=0,5).

Frecuencia modo convectivo 1,01 Hz.

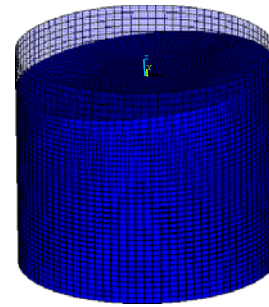


Figura 5: Tanque B, (S=1,5).

Frecuencia modo convectivo 1,18 Hz.

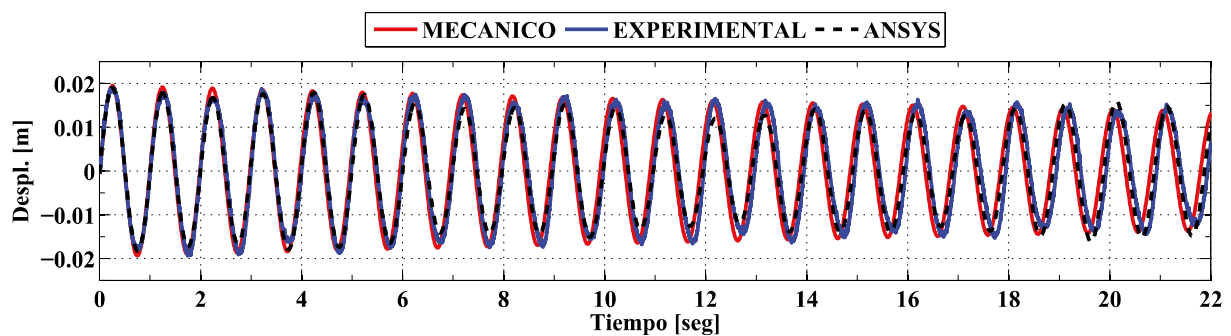


Figura 6: Tanque A, (S=0,5). Vibraciones Libres

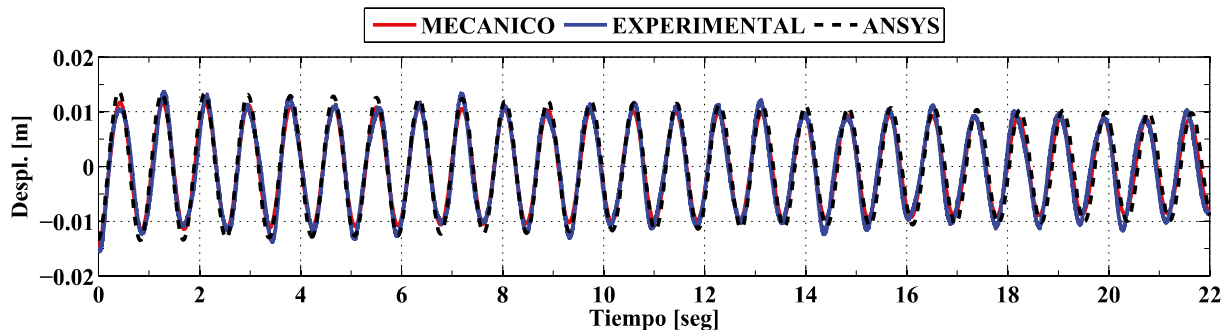


Figura 7: Tanque B, (S=1,5). Vibraciones Libres

## 6. EXCITACIÓN

Con el fin evaluar el grado de aproximación en la respuesta estructural con los modelos considerados, se emplearon dos registros sísmicos:

1. Caucete, San Juan, Argentina. Terremoto del 23 de noviembre de 1977. Aceleración pico 0,047g.
2. Llolleo, Valparaiso, Chile. Terremoto del 03 de marzo de 1985. Componente N10E. Aceleración pico 0,059g.

## 7. ANALISIS DE LOS RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados de los análisis sísmicos de los dos tanques considerados. Es de interés conocer la respuesta de los sistemas estudiados en términos de: 1) desplazamiento de la masa convectiva y 2) corte en la base del tanque.

Determinar el desplazamiento de la masa convectiva es necesario para definir la altura del tanque y conocer el corte en la base es importante para dimensionar el tanque.

### 7.1. Desplazamiento de la masa convectiva

En las figuras a continuación se compara el desplazamiento a lo largo del tiempo en la superficie del líquido medido en el punto A (Figura 4) para ambos modelos numéricos (modelo mecánico simplificado y modelo de elementos finitos).

#### Tanque A - $S=0,5$

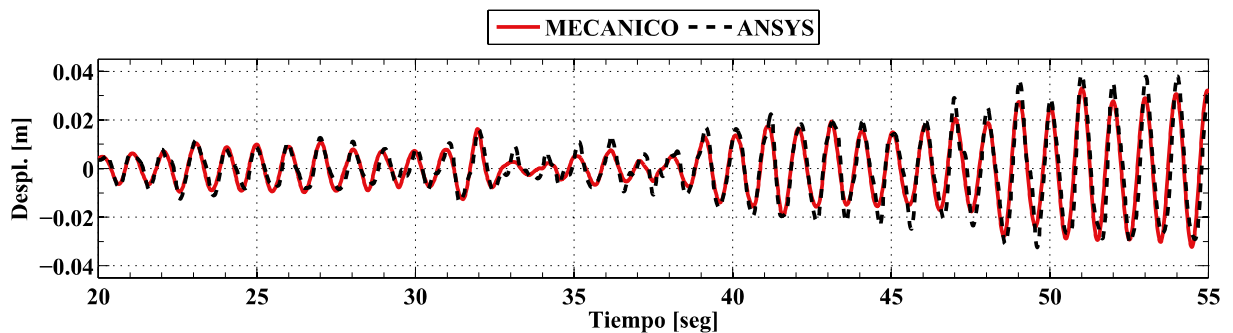


Figura 8: Desplazamiento de la superficie libre. Tanque A. Sismo 1.

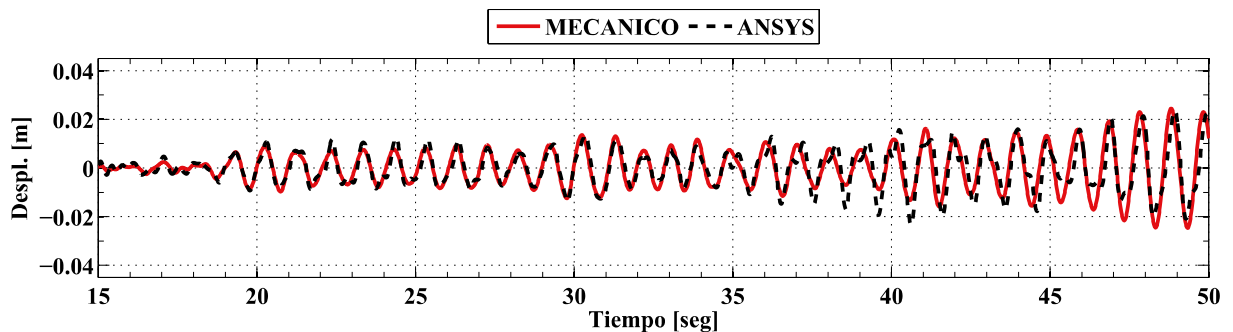


Figura 9: Desplazamiento de la superficie libre. Tanque A. Sismo 2.

Como se observa en los gráficos precedentes (Figura 8 y Figura 9) para el tanque A, las diferencias máximas obtenidas en el desplazamiento de la superficie del líquido han sido del 13% para el sismo 1, y 5% para el sismo 2.

#### Tanque B - $S = 1,5$

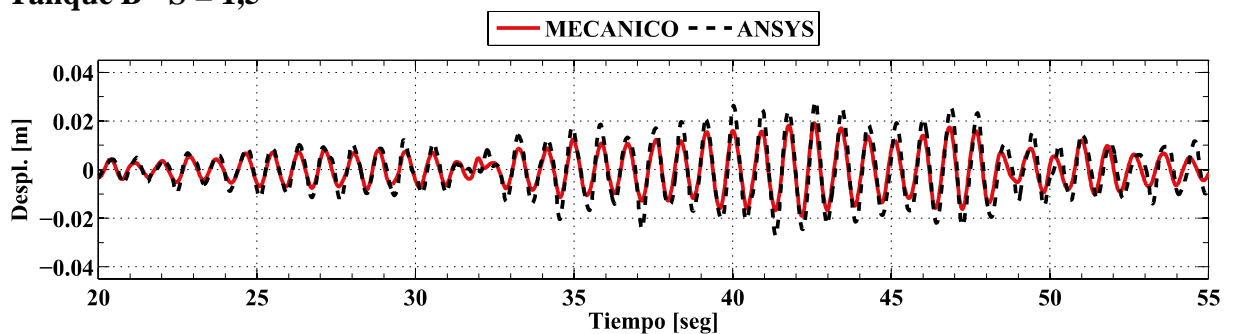


Figura 10: Desplazamiento de la superficie libre. Tanque B. Sismo 1.



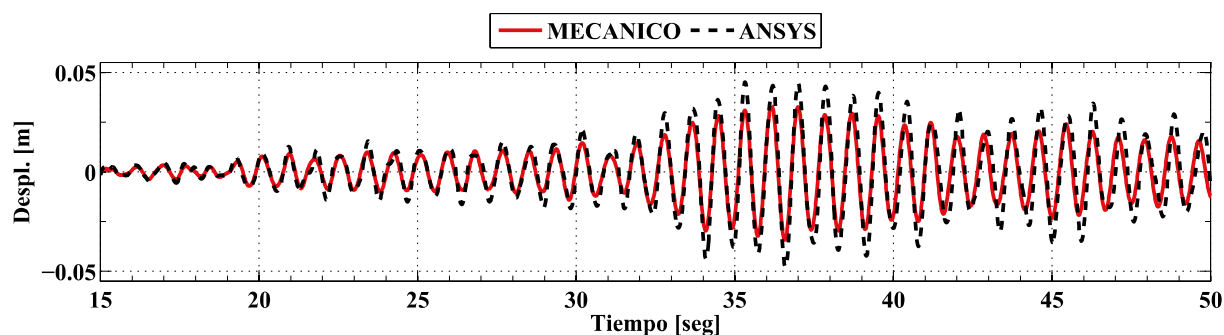


Figura 11: Desplazamiento de la superficie libre. Tanque B. Sismo 2.

Las diferencias máximas obtenidas en desplazamiento de la superficie libre del líquido han sido del 19% para el sismo1, y de 23% para el sismo 2. Como se puede observar las mayores diferencias se presentan en los intervalos de mayor intensidad de las aceleraciones del sismo.

A partir de estos resultados se puede concluir que, para tanques con  $S=0.5$  y  $1.5$ , la estimación con el modelo simplificado del desplazamiento de la superficie libre del líquido en frecuencia es muy buena, pero en algunos casos se subestima las altura máxima de ola durante la fase de intensa del sismo..

## 7.2. Corte en la base del tanque

Las siguientes figuras se muestran el corte basal de los distintos tanques a lo largo del tiempo, para las excitaciones consideradas.

### Tanque A - $S = 0,5$

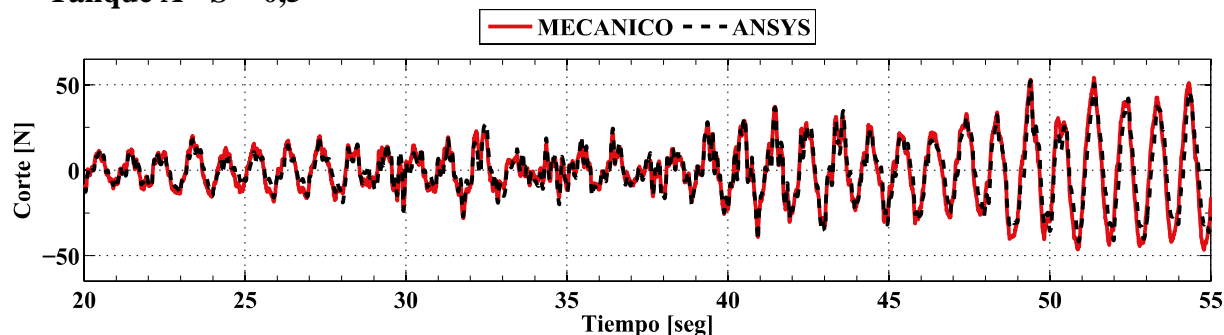


Figura 12: Corte basal. Tanque A. Sismo 1.

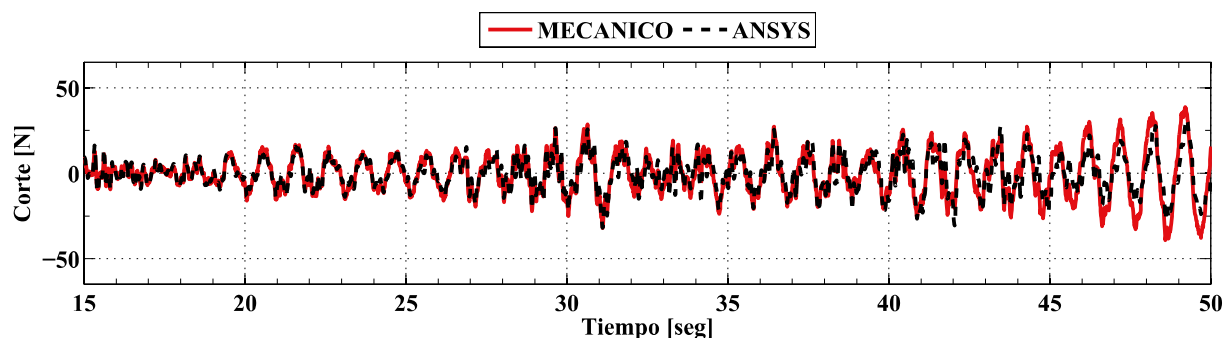


Figura 13: Corte basal Tanque A. Sismo 2.

Como se puede apreciar en la [Figura 12](#) y [Figura 13](#) la diferencia en el corte basal máximo es de 3% para el sismo 1 y 15% para el sismo 2.

### Tanque B - $S = 1,5$

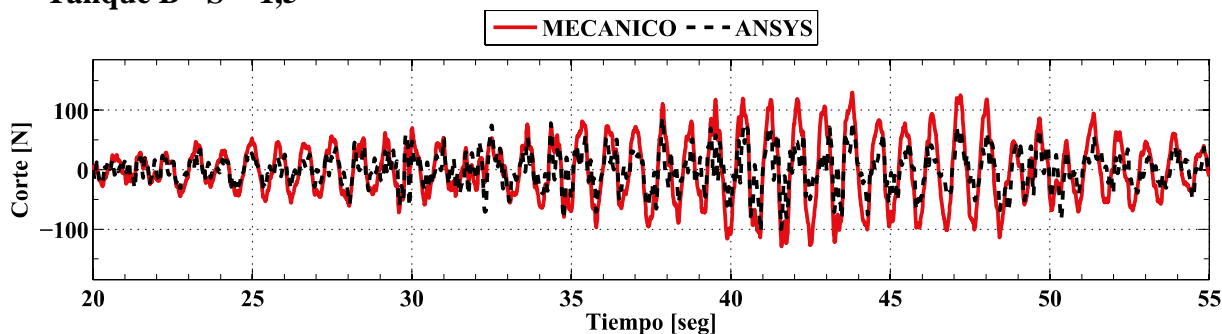


Figura 14: Corte basal Tanque B. Sismo 1.

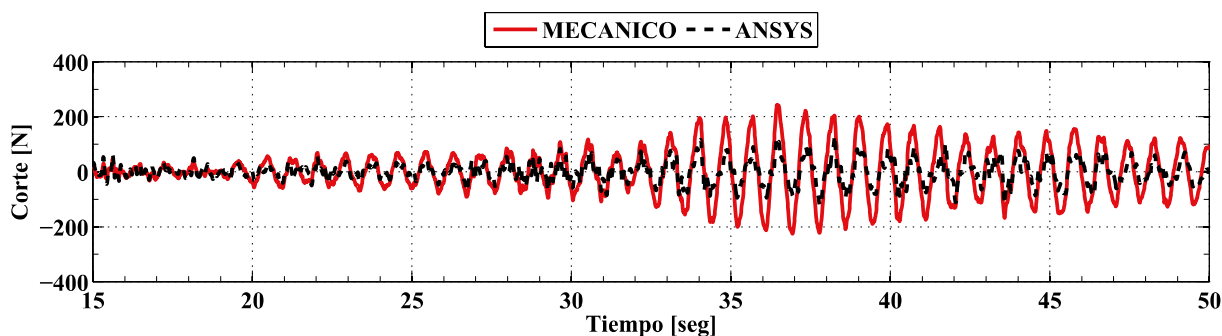


Figura 15: Corte basal Tanque B. Sismo 2.

Las diferencias máximas obtenidas han sido del 37% para el sismo 1 y 40% para el sismo 2.

A partir de estos resultados se puede concluir que, para ambos tanques estudiados, con  $S=0,5$  y  $1,5$ , el modelo simplificado sobrestima el corte basal máximo.

## 8. CONCLUSIONES

En este trabajo, se presenta una evaluación de los modelos simplificados que han sido desarrollados para análisis y diseño de los tanques mediante un estudio comparativo entre los modelos simplificados en los cuales el comportamiento del líquido se representa por sistemas masa-resorte de tres grados de libertad (modelo de Housner posteriormente modificado por Haroun) y modelos más complejos basados en una aproximación lagrangiana del fluido mediante elementos finitos (MEF). Las simulaciones se llevaron a cabo en tanques con diferentes niveles de líquido ( $S=0,5$  y  $S=1,5$ ) y bajo la excitación de diferentes registros sísmicos (Caucete y Llolleo). A partir de los resultados del análisis comparativo se puede concluir que:

- Las frecuencias del movimiento de la superficie del líquido en ambos modelos fueron casi idénticas con un error inferior al 1% en todos los casos.
- Las amplitudes de los desplazamientos verticales de la superficie libre fueron determinados con una aproximación aceptable dentro de un error promedio del 15%. Las diferencias varían de acuerdo a las características de la excitación sísmica.

Queda demostrado que el modelo mecánico equivalente simplificado propuesto por Housner (1957) y modificado por Haroun (1983) bajo las hipótesis mencionadas, representa una buena aproximación para los desplazamientos verticales de olas.

- El corte basal fue sobreestimado con el modelo mecánico simplificado en todos los casos y crece a medida que aumenta la relación de aspecto de los tanques ( $S$ ). Estas diferencias, nos muestran que el MSM es más conservador.

Al comparar el esfuerzo computacional requerido y el grado de aproximación obtenido entre ambos modelos numéricos, el modelo simplificado podría ser usado con precaución en etapas de diseño preliminares de tanques.

## 9. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el soporte económico de CONICET y Universidad Nacional de Cuyo.

## REFERENCIAS

- API Standard 650. *Welded Steel Tanks for Oil Storage*. Publication of American Petroleum Institute. Washington, D.C., 2007.
- Chang James I. and Cheng-Chung Lin. A study of storage tank accidents, *Journal of Loss Prevention in the process industries Industries*, 19 : 51–59. 2006
- Graham, E.W. and Rodriguez, A.M., “Characteristics of fuel motion which affect airplane dynamics”, *J. Appl. Mech.*, 19:381-388,1952.
- Eurocode-8. Design of structures for earthquake resistance, Part 4: Silos, tanks, and pipelines. Final PT Draft. European Committee for Standardization. 2003.
- Event Report Chi-Chi, Taiwan Earthquake (1999). Risk Management Solution, Inc, USA, 2000.
- Haroun, M. A. and Housner, G. W., Seismic Design of Liquid Storage Tanks, *Journal of Technical Councils, ASCE*, 107:191-207, 1981.
- Haroun, M.A., Vibration studies and test of liquid storage tanks. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*,11:179–206, 1983.
- Housner, G. W., Earthquake Pressures on Fluid Containers, *Eighth Technical Report under Office of Naval Research*, Project Designation No. 081- 095, California Institute of Technology, Pasadena, California, 1954.
- Housner, G. W., Dynamic Pressures on Accelerated Fluid Containers. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 47, No. 1, pp. 15-35,1957.
- Knoy CE. Performance of elevated tanks during recent California seismic events. *AWWA Annual Conference & Exhibition*, 1995.
- Livaoglu, R. Dogangun, A. Simplified seismic analysis procedures for elevated tanks considering fluid–structure–soil interaction. *Journal of Fluids and Structures* 22, 421–439. 2006
- Malhotra, P. K., Wenk, T. and Wieland, M., Simple Procedures for Seismic Analysis of Liquid Storage Tanks, *Structural Engineering International, IABSE*, Vol. 10, No. 3, 197-201, 2000.
- Malhotra, P. K., Seismic Design of Liquid Storage Tanks, *American Society of Civil Engineers*,2006
- Sezen, et all. Sloshing response of the cylindrical elevated tanks with frame staging system on different soil conditions. *Flow Induced Vibration, Zolotarev & Horacek eds.* Institute of Thermomechanics, Prague, 2008
- Shrimali, M.K., and Jangid, R.S. Seismic analysis of base-isolated liquid storage tanks. *Journal of Sound and Vibration* 275- 59–75.2004
- Steinbrugge KV, Flores RA. The Chilean earthquakes of May 1960: A structural engineering viewpoint. *Bull Seism of America*;53(2):225–307.1963
- Veletsos, A. S. and Yang, J. Y., Dynamics of Fixed-Base Liquid Storage Tanks, *Proceedings of U.S. – Japan Seminar for Earthquake Engineering Research with Emphasis on*

Lifeline Systems, Tokyo, Japan, pp. 317-341. 1976

Yazici, G. and Cili, F. , Evaluation of the liquid storage tank failures in 1999 the Kocaeli earthquake. *World Conference on Earthquake Engineering Beijing, China* October 12-17, 2008.