

EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA DE UN TANQUE CILÍNDRICO DE ACERO CON AISLADORES FPS MEDIANTE UN MODELO FÍSICO A ESCALA REDUCIDA.

J. P. Cordone (1); M. Tornello (2); F. Calderón (3); G. Gioacchini (4).

- (1) Dr. Ingeniero civil, CEREDETEC – Universidad Tecnológica Nacional – F.R. Mendoza
juanpablo.cordone@frm.utn.edu.ar
- (2) Dr. Ingeniero civil, CEREDETEC – Universidad Tecnológica Nacional – F.R. Mendoza
miguel.tornello@docentes.frm.utn.edu.ar
- (3) Ingeniero civil, CEREDETEC – Universidad Tecnológica Nacional – F.R. Mendoza
francisco.calderon@frm.utn.edu.ar
- (4) Dr. Ingeniero civil, CEREDETEC – Universidad Tecnológica Nacional – F.R. Mendoza
ggioacchini@frm.utn.edu.ar

Resumen

El objetivo de este trabajo es determinar la eficiencia de los sistemas de aislamiento de base en la reducción de la respuesta sísmica de tanques cilíndricos apoyados que almacenan líquidos peligrosos. Para esto, se realizaron ensayos a escala reducida con el objeto de modelar experimentalmente el comportamiento hidrodinámico de un tanque contenedor de líquidos, frente a diversas excitaciones sísmicas, evaluando la variación de algunos parámetros de respuesta representativos, al modificar la condición de apoyo del tanque mediante la colocación de distintos aisladores sísmicos. Con la finalidad anterior, se diseñó y construyó un tanque característico de un parque petroquímico emplazado en zonas de alto riesgo sísmico, combinado con cinco configuraciones de apoyo, una de base fija y cuatro de base aislada con dispositivos de aislamiento sísmico de tipo FPS, con distintos períodos de vibración y coeficientes de fricción. Como input sísmico se utilizó un conjunto de registros de terremotos de campo cercano y lejano, que fueron reproducidas por una mesa vibradora donde se montó el tanque. Además, se colocaron dos piezómetros para registrar las respuestas en el tiempo de la presión hidrodinámica. A partir de los resultados obtenidos, se concluye que los sistemas de aislamiento sísmico han sido efectivos en la disminución de la respuesta, respecto al caso de base fija, en términos de presión hidrodinámica total y presión impulsiva.

Palabras-Clave: tanques, presión hidrodinámica, aisladores sísmicos.

Abstract

The objective of this work is to determine the efficiency of base insulation systems in reducing the seismic response of supported cylindrical tanks that store hazardous liquids. For this, small-scale tests were carried out in order to experimentally model the hydrodynamic behavior of a liquid-containing tank, in the face of various seismic excitations, evaluating the variation of some representative response parameters, by modifying the support condition of the tank through the placement of different seismic isolators. With the above purpose, a characteristic tank of a petrochemical park located in areas of high seismic risk was designed and built, combined with five support configurations, one with a fixed base and four with an isolated base with FPS-type seismic isolation devices, with different periods of vibration and coefficients of friction. As seismic input, a set of near and far field earthquake records were used, which were reproduced by a vibrating table where the tank was mounted. In addition, two piezometers were placed to record the responses over time of the hydrodynamic pressure. From the results obtained, it is concluded that the seismic isolation systems have been effective in reducing the response, compared to the fixed base case, in terms of total hydrodynamic pressure and impulsive pressure.

Keywords: tanks, hydrodynamic pressure, seismic isolators.

1 Introducción

La presión total de un líquido sobre las paredes de un tanque tiene dos partes, una hidrostática, producto del peso del líquido en reposo debido a la aceleración de la gravedad, y otra hidrodinámica, fruto de las aceleraciones del suelo transmitidas al sistema tanque-líquido durante un sismo.

La presión hidrodinámica tiene a su vez dos componentes, una impulsiva, debida a los efectos de inercia del líquido que se mueve en sincronía con las paredes, y otra convectiva, asociada al movimiento de oleaje en la superficie libre. La presión convectiva resulta de la suma de las presiones asociadas a cada uno de los modos de oleaje.

Las proporciones de líquido que participan en cada componente dependen de las dimensiones y geometría del tanque. En los tanques esbeltos es más importante la componente impulsiva, mientras que en los tanques anchos lo es la convectiva. En cuanto a la distribución en altura, la presión impulsiva es máxima en la base y está asociada a oscilaciones de alta frecuencia, mientras que la presión convectiva es máxima en la superficie libre del líquido y está asociada a oscilaciones de baja frecuencia [1],[2].

La distribución de presiones hidrodinámicas en altura responde a funciones que dependen de la relación altura del líquido/radio del tanque (H/R). En la Figura 1 se presenta una distribución esquemática de las presiones impulsiva y convectiva.

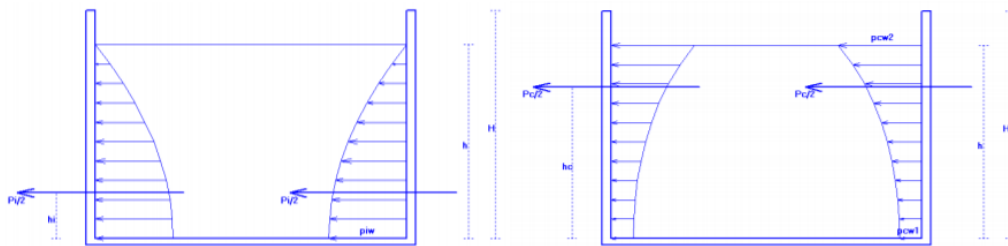


Figura 1. Distribución de presiones en altura: impulsiva (izq.) y convectiva (der.).

La magnitud de la presión hidrodinámica puede determinarse como la contribución de una parte impulsiva y otra parte convectiva, que resulta de la suma de la participación de cada modo de oleaje, mediante la Ecuación (1):

$$p(z, \theta, t) = \left[c_0(z)\ddot{x}(t) + \sum_{k=1}^{\infty} c_k(z)A_k(t) \right] \rho H \cos\theta \quad (1)$$

donde:

p = presión hidrodinámica total [Pa]

z = altura respecto a la base del tanque donde se desea obtener la presión [m]

θ = ángulo en planta, respecto al eje diametral que coincide con la dirección de la aceleración del suelo, donde se desea obtener la presión [°]

t = tiempo respecto al comienzo de la aceleración del suelo para el que se desea conocer la presión [s]

$c_0(z)$ = valor correspondiente a la altura z de la función adimensional que define la distribución en altura de la presión impulsiva, y que depende de la relación altura/radio del tanque.

$\ddot{x}(t)$ = aceleración del suelo correspondiente al tiempo t [m/s^2]

k = modo de vibración de oleaje de la parte convectiva. El número de modos a considerar depende de los factores de participación modal, mientras más alto sea el tanque más incidencia en la respuesta total tendrán los modos superiores. Veletsos y Yang (1976) [2] recomiendan emplear sólo el primer modo para tanques con relación $H/R \leq 1.50$ y entre 2 y 4 modos para $H/R > 1.50$.

$c_k(z)$ = valor para el modo de vibración de oleaje k , correspondiente a la altura z de la función adimensional que define la distribución en altura de la presión convectiva, y que depende de la relación altura/radio del tanque.

$A_k(t)$ = pseudo-aceleración correspondiente al tiempo t de un sistema de un grado de libertad con la misma frecuencia y el mismo amortiguamiento que el modo de vibración de oleaje k [m/s^2]

ρ = densidad del líquido contenido [kg/m^3]

H = altura total del líquido contenido [m]

R = radio del tanque [m]

La obtención de las funciones $c_0(z)$ y $c_k(z)$ puede consultarse en el trabajo de Veletsos y Yang de 1976 [2]. Aquí sólo se presentará la Ecuación (2) que permite obtener en forma aproximada la función $c_0(z)$, y que para tanques anchos resulta muy precisa, y la Ecuación (3) que permite obtener la función $c_1(z)$, correspondiente al primer modo de oleaje.

$$c_0(z) \cong \frac{\sqrt{3}}{2} \left[1 - \left(\frac{z}{H} \right)^2 \right] \tanh \frac{\sqrt{3}}{H/R} \quad (2)$$

$$c_1(z) = \frac{2}{(1.8412^2 - 1)} \frac{R}{H} \frac{\cosh(1.8412 \frac{z}{R})}{\cosh(1.8412 \frac{H}{R})} \quad (3)$$

Con la expresión de la Ecuación (2) y el registro de aceleración en la base del tanque, puede calcularse la presión impulsiva en el tiempo y posición de la pared del tanque deseados. Adicionalmente, conociendo la presión hidrodinámica total, que puede obtenerse mediante un registro piezométrico, puede despejarse de la Ecuación (1) la parte convectiva de la misma. La obtención en forma directa de dicha parte es más laboriosa, puesto que implica el cálculo de las frecuencias de vibración de oleaje, y la determinación del espectro de aceleración para el tanque bajo el registro sísmico analizado.

2 Metodología

Se diseñaron y construyeron a escala reducida, un tanque y 16 aisladores sísmicos del tipo FPS, correspondientes a conjuntos de cuatro aisladores por cada una de las cuatro alternativas de aislamiento de base (simple curvatura con deslizador de teflón, simple curvatura con deslizador de teflón con bronce, doble curvatura con deslizador de teflón y doble curvatura con deslizador de teflón con bronce).

También se seleccionaron como señales de entrada seis registros sísmicos reales, que fueron reproducidas por una mesa vibradora donde se montó el tanque. Además, se colocaron acelerómetros en la mesa vibradora y en la base del tanque, para registrar las respuestas en el tiempo de estas variables.

Los ensayos fueron realizados en el laboratorio del Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, dependiente de la Escuela de Ingeniería, de la Pontificia Universidad Católica de Chile.

El tanque usado corresponde a un tanque real de un parque petroquímico de la provincia de Mendoza en Argentina. Se trata de un tanque cilíndrico a escala 1:25, construido en acero, de diámetro 1.86 m, altura 0.60 m y lleno de agua hasta 0.47 m. Por el espesor usado en sus paredes se considera un depósito rígido. Su relación H/R es 0.505. A continuación, en la Tabla 1, se resumen las características del tanque.

Tabla 1. Comparación de las características del tanque real y el modelo a escala.

CARACTERÍSTICAS	TANQUE REAL	MODELO ESCALA
Factor de escala geométrica de reducción	1	25
Altura pared [m]	12.46	0.60
Altura de líquido [m]	11.75	0.47
Diámetro nominal [m]	46.60	1.86
Relación de aspecto (altura líquido/radio tanque)	0.50	0.50
Espesor real de la pared en la base [mm]	15.80	1.60
Espesor real del fondo [mm]	7.93	2.00
Densidad de líquido contenido [kg/m ³]	885.00	1000.00
Módulo elasticidad material tanque [MPa]	210000.00	210000.00

Respecto al sistema de aislación, se construyeron cuatro modelos de aisladores de péndulo de fricción a escala (1:25). El objetivo fue realizar ensayos con dos períodos de vibración diferentes y con dos coeficientes de fricción distintos.

La elección de aisladores FPS frente a otros dispositivos, responde fundamentalmente al hecho de que su efectividad no se ve alterada por la variación de la carga axial, debido a los cambios en el nivel de líquido dentro del tanque [3].

La variación del período del aislador se obtuvo diseñando dos dispositivos de acero con distinto radio de curvatura, uno simple y otro doble. Mientras que el cambio en el coeficiente de fricción se logró usando diferentes materiales para el deslizador, uno de teflón y otro de teflón con bronce. Para obtener un bajo rozamiento, se pulieron al espejo las superficies de deslizamiento de acero.

En resumen, los cuatro dispositivos fabricados fueron:

- Aislador de simple curvatura con deslizador de teflón (SC-T);
- Aislador de simple curvatura con deslizador de teflón con bronce (SC-TB);
- Aislador de doble curvatura con deslizador de teflón (DC-T) como se muestra en Figura 2;
- Aislador de doble curvatura con deslizador de teflón con bronce (DC-TB).

En la Tabla 2 se describen los principales parámetros de los dispositivos (período T , radio de curvatura R , coeficiente de fricción μ , amortiguamiento efectivo ξ_{ef} , desplazamiento máximo de diseño $x_{m\acute{a}x}$, desplazamiento admisible x_{adm} y rigidez efectiva k_{ef}).

En cuanto al input, se seleccionaron seis registros sísmicos de acuerdo con la Tabla 3.

Tabla 2. Parámetros de diseño de los aisladores sísmicos.

Parámetros	SC-T		SC-TB		DC-T		DC-TB	
	Real	Modelo	Real	Modelo	Real	Modelo	Real	Modelo
T [s]	3.20	0.64	3.20	0.64	4.53	0.91	4.53	0.91
R [mm]	2544.54	101.78	2544.54	101.78	5087.99	203.52	5087.99	203.52
μ	0.10	0.10	0.12	0.12	0.10	0.10	0.12	0.12
ξ_{ef} [%]	19.95	19.95	23.19	23.19	26.23	26.23	29.66	29.66
$x_{m\acute{a}x}$ [mm]	557.57	22.30	532.96	21.32	726.32	29.05	700.00	28.00
x_{adm} [mm]	557.25	22.29	557.25	22.29	1059.25	42.37	1059.25	42.37
k_{ef} [kN/mm]	0.067	0.067	0.072	0.072	0.039	0.039	0.043	0.043

Tabla 3. Registros sísmicos usados.

Sismo	Fecha	Estación	Falla	PGA [g]
Chi-Chi, Taiwán	21-09-1999	TCU 045	Oblicua Inv.	0.36
Kobe, Japón	17-01-1995	Kakogawa 90	Transcurrente	0.35
Kocaeli, Turquía	17-08-1999	Yarimca 330	Transcurrente	0.35
Landers, EE. UU.	28-06-1992	SCE 24	Transcurrente	0.78
Maule, Chile	27-02-2010	Constitución	Inversa	0.53
Northridge, EE. UU.	17-01-1994	24278	Inversa	0.57

Para que los resultados obtenidos en el modelo a escala reducida sean extrapolables al tanque real, se deben satisfacer dos criterios: la similitud geométrica y la similitud dinámica. Para ello, las magnitudes de estudio deben tener las mismas razones (proporciones) en los dos sistemas. Esto se logra mediante el uso de leyes de escala.

Dado que los ensayos se realizaron sobre un modelo a escala geométrica reducida, se adecuaron los registros a una escala de tiempo compatible. Lo anterior implica que los registros escalados en el tiempo se “comprimen” en abscisas, reduciendo la duración 5 veces. La aceleración no se ve afectada, la velocidad disminuye 5 veces y el desplazamiento se reduce 25 veces. Sin embargo, la forma en que se distribuyen aceleraciones, velocidades y desplazamientos no cambia respecto a los registros originales, ya que es una propiedad intrínseca del registro correspondiente.

Se colocaron además dos transductores sumergibles de presión: P1 a una altura desde el fondo del tanque de 25 cm (22 cm sumergido respecto al nivel de agua) y P2 a una altura desde el fondo del tanque de 3 cm (44 cm sumergido respecto al nivel de agua). La elección de la ubicación de los piezómetros, responde al objetivo de contar con la lectura de presiones en un punto donde la componente impulsiva sea mayor (P2) y otro donde la componente convectiva sea más importante (P1). La altura de P1 coincide con el centro de aplicación de la resultante convectiva de acuerdo al modelo de Housner. Dicho sensor podría haberse colocado en una zona superior de la pared, donde las presiones convectivas son aún mayores, pero en caso de fuerte oleaje podía quedar al descubierto, por lo que se eligió mantener esta ubicación donde siempre permanece sumergido. Por otro lado, la altura de P2 coincide prácticamente con el fondo del tanque, donde las presiones impulsivas son máximas.



Figura 2. Detalle de aislador de doble curvatura con deslizador de teflón: posición inicial (izquierda) y posición desplazada (derecha).

3 Resultados

La presión constituye la principal respuesta de un depósito contenedor de líquidos. Su determinación y distribución puede analizarse mediante dos componentes, impulsiva y convectiva, cuya suma representa la presión hidrodinámica total, que puede ocasionar pandeo u otros daños.

La presión impulsiva se relaciona con la aceleración en la base, por lo que se infiere que, si la introducción de un sistema de aislamiento es capaz de reducir dicha aceleración, ocurrirá lo propio con la presión impulsiva [4].

Respecto a la presión convectiva, su análisis no es tan simple, ya que la respuesta depende del espectro de aceleración de cada registro modificado por el sistema de aislamiento, y de la frecuencia y participación de los modos de oleaje que son excitados. De acuerdo a la bibliografía consultada, la introducción de un sistema de aislamiento no reduce la respuesta en términos de presiones convectivas, dado que la zona de frecuencias donde los modos de éstas vibran, no se ve mayormente afectada por la flexibilización del sistema debida al aislamiento [4],[5],[6],[7].

La reducción de la presión impulsiva implica un decremento de la presión hidrodinámica total del tanque, disminuyendo su posibilidad de daño, por lo que representa una ventaja significativa. Además, las presiones impulsivas son, en general, de mayor magnitud que las convectivas, dado que las aceleraciones que provocan las primeras son mayores, por corresponder a frecuencias de vibración más altas que las últimas [4], [5].

La reducción adicional de la presión convectiva trae aparejada la ventaja de un menor oleaje y por ende evita daños en el techo del tanque y derrame de líquidos [7].

A los fines de evaluar el comportamiento de las presiones, se colocaron dos sensores (P1 y P2), alineados en planta con la dirección de aplicación de la fuerza sísmica. La presión P1 se midió a una altura de 25 cm desde la base y la presión P2 a una altura de 3 cm de la misma. Ambas lecturas de presiones son puramente hidrodinámicas, ya que mediante el software de adquisición se tomó como base cero de referencia la presión hidrostática presente, que para P1 era de 220 mm y para P2 de 440 mm. Todas las presiones están expresadas en unidades de [mm] de columna de agua, equivalentes a 9.81 [Pa].

En la Tabla 4 se enumeran los seis registros sísmicos con las cinco condiciones de ensayo para cada uno (base fija BF, base aislada con aisladores de simple curvatura y deslizador de teflón BA-SC-T, base aislada con aisladores de simple curvatura y deslizador de teflón con bronce BA-SC-TB, base aislada con aisladores de doble curvatura y deslizador de teflón BA-DC-T, y base aislada con aisladores de doble curvatura y deslizador de teflón con bronce BA-DC-TB), y las respectivas presiones en la parte

superior P1 y en la parte inferior P2, con sus correspondientes porcentajes de cambio respecto a la condición de base fija, además del porcentaje de amplificación de una presión frente a la otra. Por último, se promedian los porcentajes obtenidos para los seis registros para tener una idea global del comportamiento del sistema de aislamiento.

Del análisis de la Tabla 4, se observa que todos los sistemas de aislamiento sísmico ensayados han sido efectivos en la reducción de la respuesta del tanque en términos de presiones hidrodinámicas.

Los picos de presión en la parte superior (P1) han disminuido, respecto al tanque de base fija, hasta un 81%, como en el caso del registro de Maule con aisladores de doble curvatura y deslizador de teflón con bronce, según se aprecia en la Figura 3.

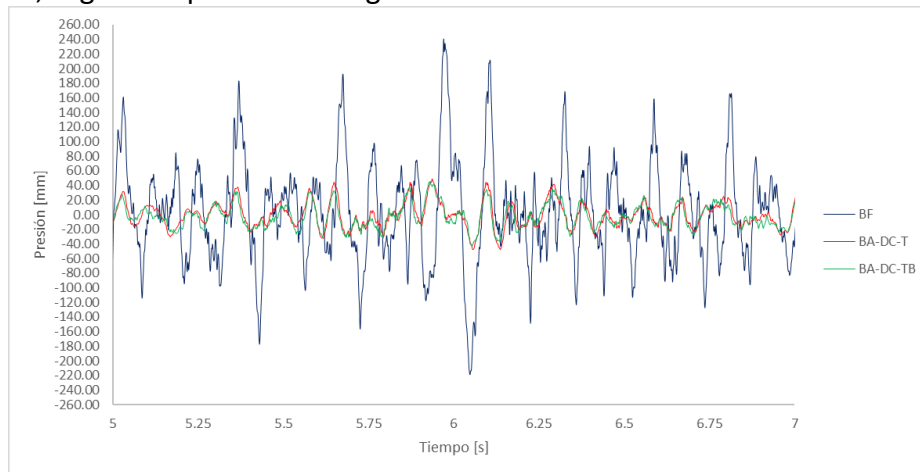


Figura 3. Maule - Presión P1 - Comparación base fija (azul) con base aislada doble curvatura con deslizador de teflón (rojo) y teflón bronce (verde) - Tiempo entre 5 y 7 s (fase intensa).

La menor reducción de la presión P1 lograda fue del 23%, y se produjo para el registro de Kocaeli con aisladores de simple curvatura y deslizador de teflón.

Se aprecia que el decremento de la presión P1 es mayor para el caso de aisladores de doble curvatura, promediando para los seis registros ensayados una disminución de alrededor del 61%, mientras que en el caso de los aisladores de simple curvatura se alcanza un 52%. Además, la reducción es ligeramente mayor para el caso de aisladores con deslizador de teflón con bronce que con deslizador de teflón.

En cuanto a la presión en la parte inferior de la pared del tanque (P2), los sistemas de aislamiento sísmico también fueron efectivos en reducirla respecto a la condición de base fija.

La mayor reducción de la presión P2 fue del 84% para el registro de Maule con aisladores de doble curvatura y deslizador de teflón con bronce.

La reducción de la presión P2 es mayor para el caso de aisladores de doble curvatura que los de simple curvatura, obteniendo mejoras de entre un 6 y un 11% en promedio.

Al analizar la relación entre la presión P2 y la presión P1, se observa que, salvo para el registro de Kocaeli con base aislada, la presión P2 siempre es mayor. Esto se debe a que en la parte inferior del tanque la incidencia de la presión impulsiva es mayor, y, como ya se mencionó, la magnitud de esta presión es más importante que la convectiva.

Tabla 4. Presiones medidas en los ensayos.

Registro	Ensayo	P1 [mm]	% P1 vs BF	P2 [mm]	% P2 vs BF	% P2 vs P1
Chi-Chi	BF	68		89		31%
	BA-SC-T	30	-56%	37	-58%	23%
	BA-SC-TB	27	-60%	31	-65%	15%
	BA-DC-T	28	-59%	33	-63%	18%
	BA-DC-TB	27	-60%	30	-66%	11%
Kobe	BF	97		125		29%
	BA-SC-T	46	-53%	58	-54%	26%
	BA-SC-TB	40	-59%	52	-58%	30%
	BA-DC-T	40	-59%	55	-56%	38%
	BA-DC-TB	36	-63%	49	-61%	36%
Kocaeli	BF	52		68		31%
	BA-SC-T	40	-23%	37	-46%	-8%
	BA-SC-TB	38	-27%	37	-46%	-3%
	BA-DC-T	35	-33%	36	-47%	3%
	BA-DC-TB	30	-42%	29	-57%	-3%
Landers	BF	66		84		27%
	BA-SC-T	40	-39%	42	-50%	5%
	BA-SC-TB	35	-47%	55	-35%	57%
	BA-DC-T	49	-26%	60	-29%	22%
	BA-DC-TB	39	-41%	50	-40%	28%
Maule	BF	241		396		64%
	BA-SC-T	83	-66%	128	-68%	54%
	BA-SC-TB	82	-66%	141	-64%	72%
	BA-DC-T	49	-80%	71	-82%	45%
	BA-DC-TB	46	-81%	64	-84%	39%
Northridge	BF	137		176		28%
	BA-SC-T	44	-68%	66	-63%	50%
	BA-SC-TB	42	-69%	56	-68%	33%
	BA-DC-T	39	-72%	50	-72%	28%
	BA-DC-TB	32	-77%	42	-76%	31%
Promedio de %	BF					38%
	BA-SC-T		-51%		-56%	27%
	BA-SC-TB		-53%		-55%	33%
	BA-DC-T		-58%		-62%	28%
	BA-DC-TB		-63%		-66%	25%

La particularidad de Kocaeli indica que P1 no se redujo en la misma proporción que P2, ello puede deberse a que la parte convectiva sea mayor a la impulsiva en P1, y el aislamiento reduzca sólo la parte impulsiva.

Este último análisis requiere conocer cuál es la proporción de cada parte en la presión hidrodinámica total. Para ello, se calculó la presión impulsiva mediante el procedimiento indicado en la Introducción, y se restó de la presión hidrodinámica total medida con los piezómetros, para obtener la presión convectiva. El valor de aceleración $\ddot{x}(t)$ usado en la Ecuación (1) para el cálculo de la presión impulsiva, es el correspondiente a la aceleración en la base del tanque, para el instante en que se desarrolla la presión máxima medida, tanto en P1 como en P2.

En la Tabla 5 se enumeran los seis registros sísmicos con las cinco condiciones de ensayo para cada uno (base fija BF, base aislada con aisladores de simple curvatura y deslizador de teflón SC-T, base aislada con aisladores de simple curvatura y deslizador de teflón con bronce SC-TB, base aislada con aisladores de doble curvatura y deslizador de teflón DC-T, y base aislada con aisladores de doble curvatura y deslizador de teflón con bronce DC-TB), y las respectivas presiones impulsivas (P imp) y convectivas (P con), tanto en la parte superior P1 como en la parte inferior P2, con sus correspondientes porcentajes de cambio respecto a la condición de base fija. Por último, se promedian los porcentajes obtenidos para los seis registros para tener una idea global del comportamiento del sistema de aislamiento.

Del análisis de la Tabla 5, se observa que, en promedio, todos los dispositivos de aislamiento sísmico utilizados en los ensayos reducen la presión impulsiva, pero incrementan la convectiva, respecto a la condición de base fija.

La reducción de la presión impulsiva es uniforme en los dos puntos medidos (P1 y P2) y varía entre el 67 y el 82%, obteniendo los mejores resultados con el uso del aislador de doble curvatura y deslizador de teflón con bronce.

Por otro lado, la amplificación de la presión convectiva resulta superior para el punto P1 (zona superior del tanque) que para el punto P2 (zona inferior). La menor amplificación se da con el aislador de simple curvatura y deslizador de teflón con bronce.

En general, excepto para el registro de Kocaeli, y algunos casos particulares de los registros de Chi-Chi, Kobe, Landers y Maule, se verifica lo expresado más arriba, respecto a que la presión impulsiva es de mayor magnitud que la convectiva.

Los grandes valores de presión convectiva registrados para Kocaeli, confirman el análisis preliminar de la Tabla 4, y concuerdan con lo observado durante los ensayos, en cuanto a un intenso movimiento de oleaje en la superficie libre, como se aprecia en la Figura 4.



Figura 4. Captura de filmación para registro Kocaeli durante ensayo con base aislada simple curvatura con deslizador de teflón.

Tabla 5. Presiones impulsivas y convectivas calculadas para los registros ensayados.

Registro	Ensayo	P1 - h=25 cm (superior)				P2 - h=3 cm (inferior)			
		P imp [mm]	P con [mm]	% P imp vs BF	% P con vs BF	P imp [mm]	P con [mm]	% P imp vs BF	% P con vs BF
Chi-Chi	BF	64	4			88	1		
	SC-T	7	23	-89%	439%	25	12	-72%	1132%
	SC-TB	15	12	-76%	181%	17	14	-80%	1261%
	DC-T	8	20	-87%	371%	32	1	-64%	0%
	DC-TB	5	22	-92%	423%	19	11	-78%	958%
Kobe	BF	77	20			108	17		
	SC-T	29	17	-62%	-15%	38	20	-65%	15%
	SC-TB	20	20	-74%	0%	25	27	-77%	55%
	DC-T	23	17	-70%	-16%	42	13	-61%	-28%
	DC-TB	18	18	-77%	-8%	24	25	-77%	42%
Kocaeli	BF	49	3			61	7		
	SC-T	14	26	-71%	674%	15	22	-75%	232%
	SC-TB	11	27	-77%	701%	14	23	-77%	251%
	DC-T	1	34	-97%	898%	14	22	-77%	235%
	DC-TB	4	26	-92%	680%	5	24	-91%	265%
Landers	BF	64	2			72	12		
	SC-T	12	28	-82%	1180%	26	16	-64%	30%
	SC-TB	30	5	-53%	126%	28	27	-62%	122%
	DC-T	19	30	-71%	1270%	32	28	-56%	129%
	DC-TB	14	25	-78%	1016%	21	29	-70%	130%
Maule	BF	220	21			328	68		
	SC-T	45	38	-79%	78%	65	63	-80%	-6%
	SC-TB	54	28	-75%	30%	73	68	-78%	0%
	DC-T	24	25	-89%	19%	22	49	-93%	-27%
	DC-TB	30	16	-86%	-23%	22	42	-93%	-38%
Northridge	BF	73	64			157	19		
	SC-T	27	17	-63%	-74%	65	1	-58%	-95%
	SC-TB	22	20	-70%	-69%	55	1	-65%	-95%
	DC-T	27	12	-63%	-81%	26	24	-83%	24%
	DC-TB	19	13	-74%	-80%	40	2	-74%	-92%
Promedio de %	BF								
	SC-T			-71%	469%			-67%	286%
	SC-TB			-67%	148%			-69%	200%
	DC-T			-81%	652%			-74%	347%
	DC-TB			-82%	510%			-79%	305%

5 Discusión de resultados

Los resultados experimentales, con los seis registros ensayados, muestran que todos los sistemas de aislamiento sísmico han sido efectivos en la disminución de la respuesta, respecto al caso de base fija, en términos de presión hidrodinámica total y presión impulsiva.

Para las presiones totales medidas, la reducción promedio fue, para todos los registros y todos los sistemas, entre el 51% y el 66%. Para las presiones impulsivas calculadas, la reducción promedio fue, para todos los registros y todos los sistemas, entre el 67% y el 82%. En ambos casos, la reducción en los dos puntos considerados (P1 superior y P2 inferior) fue bastante uniforme.

Respecto al sistema de aislamiento, el más efectivo fue el aislador de doble curvatura con deslizador de teflón con bronce, mientras que el mismo aislador con deslizador de teflón, presentó una reducción levemente inferior (aproximadamente un 5% menos).

Por otro lado, los sistemas de aislamiento de simple curvatura fueron menos efectivos, con diferencias de alrededor del 9.5 % en promedio, respecto a los de doble curvatura.

En cuanto al registro analizado, las mayores reducciones se produjeron en el registro vibratorio de Maule (84% para la presión total en el punto P2) y las menores en el registro impulsivo de Kocaeli (23% para la presión total en el punto P1).

Con relación a la presión convectiva, se observó una amplificación respecto al caso de base fija, que resulta superior para el punto P1 (máxima promedio de 652%) que para el punto P2 (máxima promedio de 347%). La menor amplificación se produjo con el aislador de simple curvatura y deslizador de teflón con bronce. Los sistemas con deslizador de teflón con bronce amplificaron menos la presión convectiva que los sistemas con deslizador de teflón. Además, se comprobó que, en general, la presión impulsiva es de mayor magnitud que la convectiva, excepto para el registro de Kocaeli.

Se obtuvieron mayores presiones en la zona inferior del tanque (P2) que en la parte superior (P1). Además, se observó que si bien, en general, las presiones impulsivas son de mayor magnitud que las convectivas, la participación de las últimas es mayor en la zona superior que en la zona inferior del tanque.

Los sistemas de aislamiento son muy eficientes en la reducción de la presión impulsiva, dado que ésta se relaciona directamente con la aceleración en la base del tanque.

Por otra parte, dichos sistemas no son efectivos en la reducción de la presión convectiva, e incluso la aumentan, debido a que ésta depende del espectro de aceleración de cada registro modificado por el sistema de aislamiento, y de la frecuencia y participación de los modos de oleaje que son excitados. La zona de frecuencias donde estos modos vibran, no se ve mayormente afectada por la flexibilización del sistema debida al aislamiento.

5 Conclusiones

En función de la discusión de resultados anterior, pueden enunciarse las siguientes conclusiones:

- a) La técnica de aislamiento sísmico de base, aplicada a tanques anchos ($H/R = 0.50$) para almacenamiento de líquidos, resulta efectiva en la reducción de la respuesta, en términos de presiones totales e impulsivas.
- b) Un aumento en el período de aislamiento del sistema, conduce a una mayor reducción de la presión impulsiva.

- c) Una pequeña variación del coeficiente de fricción del sistema de aislamiento, no es incidente en la reducción de la presión impulsiva.
- d) La presión convectiva experimenta un incremento en los tanques con base aislada respecto a la condición de base fija. Sin embargo, la magnitud de esta presión, en general, es menor que la impulsiva, por lo que igualmente se aprecia una reducción de la presión hidrodinámica total.
- e) Un aumento del coeficiente de fricción del sistema de aislamiento, en general, disminuye la amplificación de la presión convectiva, por lo que la introducción de amortiguamiento complementario podría atenuar sus efectos negativos.

En resumen, se ha comprobado que el aislamiento sísmico disminuye la componente impulsiva, pero no afecta, e incluso aumenta, la componente convectiva, en concordancia con lo expresado previamente por otros autores [4], [5], [6], [7], [8].

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al Dr. Ing. José Luis Almazán y el asistente de laboratorio Camilo Guzmán por la inestimable ayuda prestada para la ejecución de los ensayos.

Referencias

- [1] Housner G. W., 1954, "Earthquake pressures on fluid containers", Office of Naval Research, California Institute of Technology, Technical Report no. 8.
- [2] Veletsos A. S., Yang J. Y., 1977, "Earthquake response of liquid-storage tanks", Advances in Civil Engineering through Engineering Mechanics, pp. 1-24.
- [3] Zhang R., Weng D., Ren X., 2011, "Seismic analysis of a LNG storage tank isolated by a multiple friction pendulum system", Earthquake Engineering and Engineering Vibration, vol. 10, no. 2, pp. 253-262.
- [4] Chalhoub M. S., Kelly J. M., 1990, "Shake table test of cylindrical water tanks in base - isolated structures", Journal of Engineering Mechanics, vol. 116, no. 7, pp. 1451-1472.
- [5] Wang Y. P., Teng M. C., Chung K. W., 2001, "Seismic isolation of rigid cylindrical tanks using friction pendulum bearings", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol. 30, pp. 1083-109.
- [6] Christovasilis I. P., Whittaker A. S., 2008, "Seismic analysis of conventional and isolated LNG tanks using mechanical analogs", Earthquake Spectra, vol. 24, no. 3, pp. 599-616.
- [7] De Angelis M., Giannini R., Paolacci F., 2010, "Experimental investigation on the seismic response of a steel liquid storage tank equipped with floating roof by shaking table tests", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol. 39, pp. 377-396.
- [8] Saha S. K., Matsagar V. A., Jain A. K., 2015, "Reviewing dynamic analysis of base - isolated cylindrical liquid storage tanks under near - fault earthquakes", The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering, vol. 8, no. 1, pp. 41-61.