

Respuesta Sísmica de Tanques de Concreto Armado para Almacenamiento de Agua con Sistema de Aislación del Tipo Elastomérico con Núcleo de Plomo

E. J. Mamani⁽¹⁾ y V. I. Fernández-Dávila⁽²⁾

Resumen

Se muestran las respuestas sísmicas de tanques de Concreto Armado (CA) para almacenamiento de agua con sistema de aislación del tipo Elastomérico con Núcleo de Plomo (*lead rubber bearing*, LRB) bajo solicitación sísmica bi-direccional. Para el análisis sísmico se consideró que el tanque posee comportamiento lineal elástico, además se empleó un modelo mecánico equivalente para representar la interacción tanque-agua, y se utilizó un modelo histerético del tipo bi-axial para representar el comportamiento del sistema de aislación. Los parámetros de estudio son: la razón altura de agua-radio interior del tanque, la razón espesor de la pared del tanque-radio interior del tanque, el periodo de vibración objetivo del sistema de aislación, y la razón de resistencia del sistema de aislación. Se utilizaron 21 pares de registros sísmicos del movimiento del suelo. Las respuestas sísmicas del sistema de base aislada muestran una efectividad en la reducción de los valores de la fuerza cortante basal en comparación con el sistema de base fija del orden de 17% a 74% para $H/R = 0.5$; de 50% a 83% para $H/R = 1.0$; de 75% a 91% para $H/R = 2.0$ (H/R = razón altura de agua-radio interior del tanque).

Palabras Clave: sistema de aislación, tanque para almacenamiento de agua, análisis de la respuesta sísmica en el tiempo

⁽¹⁾ Ingeniero Civil, Facultad de Ing. Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, emamani@uni.pe

⁽²⁾ Profesor de Ing. Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, vifdavila@uni.edu.pe

1. Introducción

Los tanques para almacenamiento de agua son parte fundamental del sistema de red de abastecimiento de agua para la población, sin embargo, los eventos sísmicos severos ocasionan graves daños estructurales tales como excesivos desplazamientos laterales, pandeo, y el colapso (Zareian et al., 2012). En países altamente sísmicos como Perú, donde muchos tanques son construidos en la zona sísmica 4 ($Z = 0.45$), sobre suelos tipo S_1 (V_{S30} entre 500 m/s a 1 500 m/s) y tipo S_2 (V_{S30} entre 180 m/s a 500 m/s), siendo Z la aceleración máxima horizontal en suelo rígido con una probabilidad de 10% de ser excedida en 50 años normalizada a la aceleración de la gravedad y V_{S30} la velocidad promedio de propagación de ondas de corte para los 30 m superiores del perfil del suelo (MVCS, 2016), es muy importante que estas estructuras permanezcan operacionales después de un evento sísmico severo. Por otro lado, las técnicas de aislación sísmica han demostrado su efectividad para mejorar el desempeño sísmico de tanques para almacenamiento de agua (Malhotra, 1997; Wang et al., 2001). Sin embargo, existe relativa escasez de investigaciones sobre la respuesta sísmica de los sistemas tanque-agua de base con sistema de aislación del tipo elastomérico con núcleo de plomo (Robinson, 1982) sometido a sollicitación sísmica bi-direccional compatible con un espectro de diseño normativo. Es una práctica común estimar las respuestas sísmicas de los sistemas tanque-agua de base fija utilizando el modelo mecánico equivalente de Housner, o uno de sus derivados (Housner, 1957; Veletsos, 1984; Wang et al., 2001). El principal objetivo de este trabajo es contribuir al estado del arte del conocimiento de la respuesta sísmica de tanques circulares de CA para almacenamiento de agua apoyados sobre sistemas de aislación del tipo LRB sollicitados por acciones sísmicas bi-direccionales compatibles con un espectro de diseño normativo. El objetivo específico de este trabajo es estudiar los efectos de los parámetros del sistema tanque-agua de base aislada, sobre las respuestas sísmicas.

2. Metodología

2.1 Modelo Estructural

Para estimar las respuestas sísmicas de interés (fuerza cortante basal, momento volcante de las paredes, desplazamiento vertical del oleaje, y desplazamiento lateral de la base del tanque), se utilizó un modelo estructural tanque-agua de base fija y de base aislada con LRB (Figuras 1 y 2), donde H , R y e son la altura de agua, el radio interior del tanque y el espesor de la pared del tanque, respectivamente.

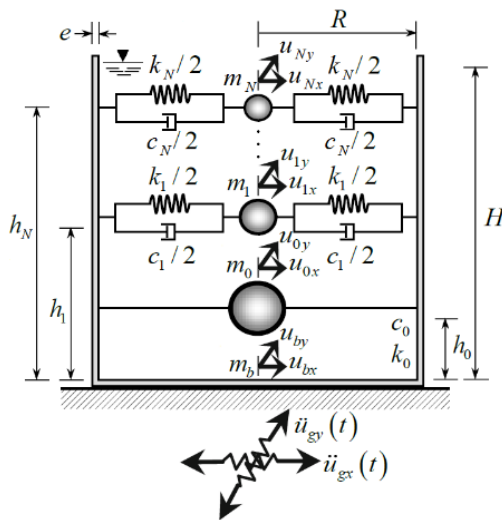


Figura 1 – Modelo estructural de base fija

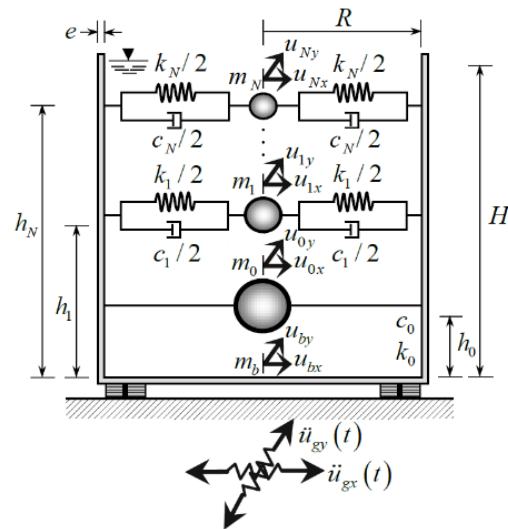


Figura 2 – Modelo estructural de base aislada

La masa total de agua almacenada en el tanque se representa como una serie de masas concentradas que producen fuerzas y momentos equivalentes en las paredes del tanque debido al movimiento lateral que experimenta el suelo por la acción del sismo. Las masas que producen el oleaje de la superficie libre del agua se llaman masas convectivas, y la que se mueve de manera solidaria con el tanque se le conoce como masa impulsiva (Figuras 1 y 2); k_j , c_j , h_j y u_j son la rigidez, el amortiguamiento, la altura, y el desplazamiento lateral relativo a la base del tanque, asociada a la j -ésima masa convectiva m_j ; k_0 , c_0 , h_0 y u_0 son la rigidez, el amortiguamiento, la altura, y el desplazamiento lateral relativo a la base del tanque, asociada a la masa impulsiva m_0 ; u_b es el desplazamiento lateral de la base del tanque relativo al suelo, asociada a la masa propia del tanque

m_b ; y $\ddot{u}_g$ es la aceleración del suelo; y m_a (Ecuación 1) es la masa total de agua (Wang et al., 2001). Para tener en cuenta la flexibilidad del tanque, sus paredes (Figuras 1 y 2) fueron representadas por elementos cáscara (Haroun, 1983).

$$m_a = m_0 + \sum_{j=1}^{\infty} m_j \quad (1)$$

El peso total del sistema tanque-agua se puede expresar como $W = m_t g$, donde $m_t = m_a + m_b$ es la masa total del sistema tanque-agua y g es la aceleración de la gravedad. Además se consideró la razón de amortiguamiento igual a $\zeta_a = 0.5\%$ para el agua y $\zeta_c = 5\%$ para el concreto armado, el módulo de elasticidad igual a $E_c = 21\,300$ MPa y la razón de Poisson $\nu_c = 0.20$ para el concreto armado, la densidad de masa igual a $\rho_a = 1,000\text{kg/m}^3$ para el agua y $\rho_c = 2,400\text{kg/m}^3$ para el concreto armado (ACI, 2006).

Se tuvo especial cuidado en representar el sistema tanque-agua con una cantidad suficiente de modos convectivos de vibración (N) con la finalidad de representar el 90% o más de masa participativa; la Figura 3 muestra los porcentajes de masa participativa acumulada y se puede observar que considerando tres masas convectivas se logra representar más del 99% de masa participativa para valores H/R (razón altura de agua-radio interior del tanque) mayores a 0.5.

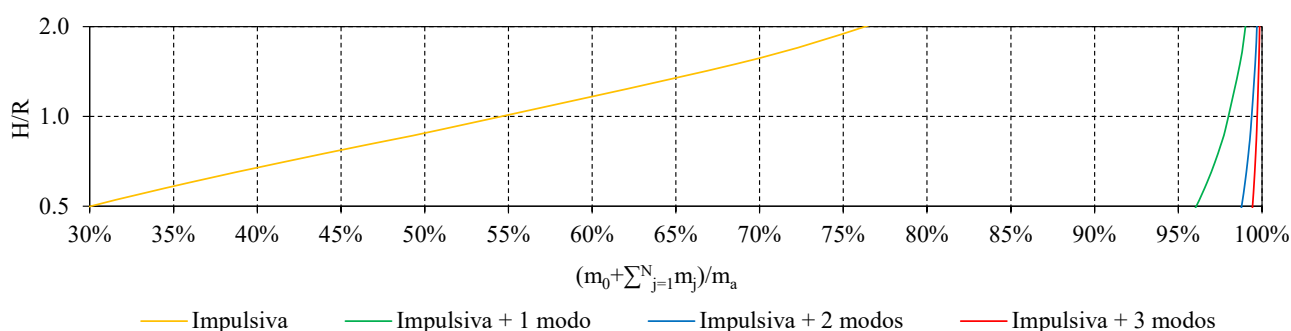


Figura 3 Porcentajes de masas participativas modales acumuladas

Para representar el comportamiento del sistema de aislación se utilizó un modelo histerético del tipo bi-axial (Park et al., 1986). La Figura 4 muestra el modelo matemático del sistema de aislación

del tipo LRB, donde las fuerzas de restitución están descritos en las Ecuaciones 2 y 3, en las direcciones x e y , respectivamente, siendo α la razón entre la rigideces laterales de post- y pre-fluencia del sistema de aislación, F_y la resistencia a la fluencia del sistema de aislación.

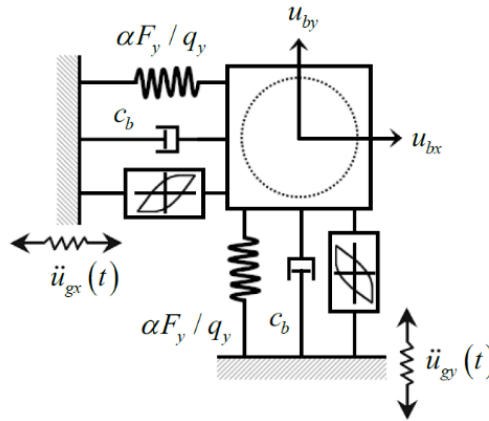


Figura 4 – Modelo histerético del sistema de aislación del tipo LRB

El amortiguamiento viscoso proporcionado por la goma natural del sistema de aislación, c_b , es bajo; por lo tanto, para este estudio, la razón de amortiguamiento del sistema de aislación, $\zeta_b = c_b / (2m_t \omega_b)$ sera igual a 5% (Soneji y Jangid 2006).

$$F_{bx} = c_b \dot{u}_{bx} + \alpha \left(F_y / q_y \right) u_{bx} + (1 - \alpha) F_y Z_{hx} \quad (2)$$

$$F_{by} = c_b \dot{u}_{by} + \alpha \left(F_y / q_y \right) u_{by} + (1 - \alpha) F_y Z_{hy} \quad (3)$$

Además, Z_{hx} y Z_{hy} representan las componentes histeréticas de las fuerzas de restitución, u_{bx} y u_{by} son los desplazamientos laterales de la base del tanque relativo al suelo en las direcciones x e y , respectivamente, y se consideró un valor fijo para el desplazamiento de fluencia igual a $q_y = 0.02$ m.

2.2 Ecuaciones del movimiento

La ecuación diferencial del movimiento para el sistema tanque-agua (superestructura) se expresa por la Ecuación 4, en donde se asume que la base del tanque se comporta como un diafragma

rígido en su plano apoyado sobre el sistema de aislación y la base del sistema de aislación se encuentran en contacto directo con la cimentación.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = -\mathbf{M}\mathbf{R}(\ddot{\mathbf{u}}_b + \ddot{\mathbf{u}}_g) \quad (2)$$

Siendo $\mathbf{M}$, $\mathbf{C}$ y $\mathbf{K}$ las matrices de masa (diagonal), de amortiguamiento y de rigidez de la superestructura; $\mathbf{R}$ es la matriz de influencia del sismo; $\ddot{\mathbf{u}}$, $\dot{\mathbf{u}}$, y $\mathbf{u}$ representan los vectores de aceleración, velocidad y desplazamiento asociados a los grados de libertad (Figuras 1 y 2) relativos a la base del tanque, $\ddot{\mathbf{u}}_b$ es el vector de aceleración de la base del tanque relativo al suelo; y $\ddot{\mathbf{u}}_g$ es el vector de aceleración del suelo. Además, la ecuación diferencial del movimiento de la base del tanque correspondiente al sistema aislado se expresa por la Ecuación 5.

$$\mathbf{R}^T \mathbf{M} \left[\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{R}(\ddot{\mathbf{u}}_b + \ddot{\mathbf{u}}_g) \right] + \mathbf{M}_b(\ddot{\mathbf{u}}_b + \ddot{\mathbf{u}}_g) + \mathbf{C}_b \dot{\mathbf{u}}_b + \mathbf{K}_b \mathbf{u}_b + \mathbf{f} = \mathbf{0} \quad (5)$$

Donde $\mathbf{M}_b$ es la matriz de masa (diagonal) de la base rígida del tanque, $\mathbf{K}_b$ es la matriz de rigidez elástica del sistema de aislación, $\mathbf{C}_b$ la matriz de amortiguamiento viscoso del sistema de aislación, y $\mathbf{f}$ el vector que contiene las fuerzas de restitución no lineales del sistema de aislación (Nagarajaiah et al., 1991).

2.3 Casos paramétricos

Se usaron dos parámetros que consideran las características geométricas del sistema tanque-agua: la razón entre la altura del agua y el radio interior del tanque (H/R), y la razón entre el espesor de la pared del tanque y el radio interior del tanque (e/R) (Priestley et al., 1986) y se usaron dos parámetros que consideran las características geométricas y físicas del sistema de aislación: el periodo de vibración objetivo del sistema de aislación $T_b = 2\pi\sqrt{(m_t/(\alpha k_b))}$, y la razón de resistencia del sistema de aislación ($F_0 = F_y/W$), donde F_y es la resistencia a la fluencia del sistema de aislación y W es el peso total del sistema tanque-agua (Shrimali y Jangid, 2002).

Este estudio se limita al análisis de la respuesta sísmica. Sin embargo, para el diseño de los elementos del sistema de aislación existen procedimientos simples dentro de la literatura en base a los parámetros del sistema de aislación (Naeim y Kelly, 1999).

La Tabla 1 muestra los periodos de vibración natural de los modos impulsivo (T_0) y convectivos (T_1 , T_2 , y T_3) correspondientes a los parámetros del sistema tanque-agua, los cuales fueron obtenidos con el programa computacional SAP2000 (CSI, 2014). Además, se consideraron dos tipos de análisis (base fija y aislada), obteniéndose un total de 6 casos paramétricos de base fija y 36 casos paramétricos de base aislada (Tablas 2 y 3). Finalmente, se adoptó emplear un valor de radio interior del tanque igual a $R = 10$ m, para todos los casos.

Tabla 1 – Periodos de vibración natural de los modos impulsivo y convectivos

Parametros del sistema tanque-agua		Periodo impulsivo	Periodos convectivos		
H/R	e/R		Modo 1	Modo 2	Modo 3
		T_0 (s)	T_1 (s)	T_2 (s)	T_3 (s)
0.5	0.02	0.03	5.49	2.76	2.17
0.5	0.04	0.02	5.49	2.76	2.17
1.0	0.02	0.08	4.80	2.75	2.17
1.0	0.04	0.06	4.80	2.75	2.17
2.0	0.02	0.18	4.68	2.75	2.17
2.0	0.04	0.13	4.68	2.75	2.17

Tabla 2 – Parámetros utilizados

ID	Sistema tanque-agua		Sistema de aislación del tipo LRB	
	H/R	e/R	T_b (s)	F_0
1	0.5	0.02	2	0.05
2	1.0	0.04	3	0.15
3	2.0	---	4	---

(---) No hay valor.

Tabla 3 – Número de casos por analizar

Tipo de análisis	Casos
Base fija	6
Base aislada	36

2.4 Solicitaciones sísmicas

Se utilizaron un total de 21 pares de registros de movimientos sísmicos severos con magnitudes de momento, $M_w \geq 6.5$, medidos en suelos tipo S_2 y S_1 . Los espectros de respuesta de cada par de registros seleccionados fueron escalados (Figura 5). El escalamiento se hizo de tal manera que el espectro resultante (SR) promedio, definido como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados (SRSS), del conjunto seleccionado de pares de registros se ajuste al espectro de diseño objetivo correspondiente a la zona sísmica 4 y suelo tipo S_2 para el sismo de diseño propuesto para el diseño de sistemas con aislación sísmica en el Perú (Mendo, 2015) en el dominio de periodos de vibración comprendido entre 0.01 s a 5.00 s, tal que el error cuadrático medio (MSE) entre el SR promedio de la combinación SRSS de los pares de registros sísmicos empleados y el espectro de diseño objetivo sea mínimo (Hachem 2008). Los registros seleccionados y los factores de escala resultantes de aplicar éste procedimiento se muestran en la Tabla 4.

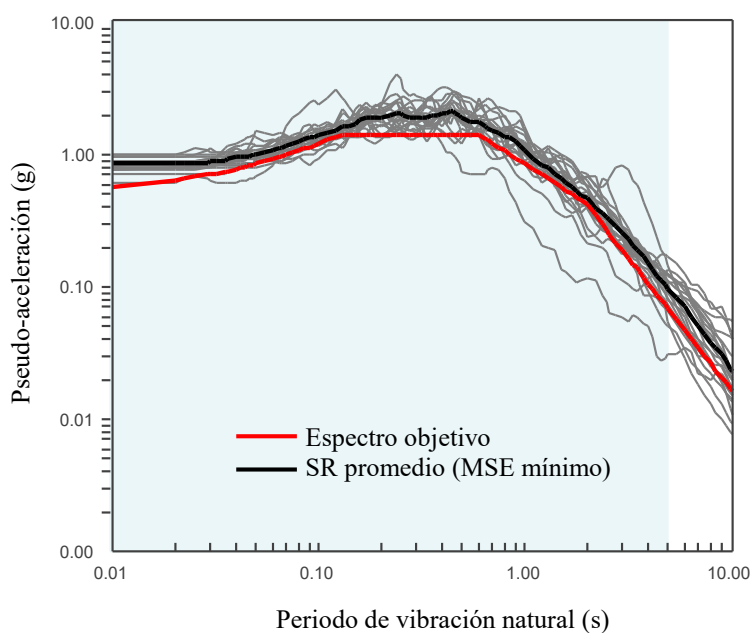


Figura 5 – Promedio del SR escalado en amplitud para minimizar el MSE con respecto al espectro de diseño objetivo

Tabla 4 – Movimientos sísmicos seleccionados y los factores de escala

Terremoto	Año	Estación	M _w	PGA ¹ (g)	PGA ² (g)	Factor de escala
Imperial Valley-02	1940	El Centro Array #9 [†]	6.9	0.28	0.21	2.27
Kern Country	1952	Taft Lincoln School [†]	7.3	0.18	0.16	3.68
Ancash	1970	Parque de la Reserva [§]	7.9	0.11	0.10	4.00
Lima	1974	Parque de la Reserva [§]	8.1	0.18	0.17	4.00
Montenegro	1979	Ulcinj - Hotel Albatros [†]	7.1	0.23	0.18	2.63
Imperial Valley-06	1979	Chihuahua [†]	6.5	0.27	0.25	2.36
Corinth	1981	Corinth [†]	6.6	0.30	0.24	2.58
Superstition Hills-02	1987	Poe Road (temp) [†]	6.5	0.48	0.29	1.79
Spitak	1988	Gukasian [†]	6.7	0.20	0.17	3.31
Loma Prieta	1989	Gilroy Array #4 [†]	6.9	0.42	0.22	2.02
Cape Mendocino	1992	Centerville Beach, Naval Fac [†]	7.0	0.48	0.32	1.47
Landers	1992	Desert Hot Springs [†]	7.2	0.17	0.15	3.67
Northridge-01	1994	Canoga Park - Topanga Can [†]	6.6	0.39	0.36	1.50
Kobe	1995	Takarazuka [†]	6.9	0.70	0.61	0.95
Chi-Chi	1999	TCU072 [†]	7.6	0.48	0.38	1.23
Chuetsu-oki	2007	Sanjo Shinbori [†]	6.8	0.32	0.26	2.01
Pisco	2007	UNICA [†]	8.0	0.34	0.29	1.60
Sur del Perú	2001	César Vizcarra Vargas [†]	8.4	0.30	0.23	2.29
Darfield	2010	OXZ [†]	7.0	0.15	0.13	4.00
El Mayor-Cucapah	2010	Michoacan de Ocampo [†]	7.2	0.54	0.41	1.22
Maule	2010	Constitución [†]	8.8	0.65	0.53	0.97

(PGA¹) Aceleración máxima de la componente 1 del movimiento del suelo.

(PGA²) Aceleración máxima de la componente 2 del movimiento del suelo.

(§) Suelo muy rígido S₁ (V_{S30} entre 500 m/s a 1 500 m/s)

(†) Suelo intermedio S₂ (V_{S30} entre 180 m/s a 500 m/s)

3. Análisis de resultados

Para la excitación sísmica bi-direccional, se aplicaron simultáneamente las dos componentes horizontales del movimiento del suelo previamente escaladas, la componente horizontal 1 se aplicó en la dirección x y la componente horizontal 2 se aplicó en la dirección y , siendo $\ddot{u}_{gx}$ y $\ddot{u}_{gy}$ las aceleraciones sísmicas del suelo en las direcciones x e y respectivamente (Figuras 1 y 2).

En la figura 6 se muestra, la variación en el tiempo de las respuestas sísmicas del sistema de base fija y aislada para el caso de estudio ($H/R = 1.0$, $e/R = 0.02$; $T_b = 4$ s y $F_0 = 0.05$) solicitado por el terremoto de Pisco 2007 cuyos registros sísmicos fueron escalados, siendo S_x la fuerza cortante basal en la dirección x ; u_{bx} el desplazamiento lateral de la base del tanque relativo al suelo en la

dirección x ; M_{yx} el momento volcante de las paredes en la dirección y debido a las fuerzas laterales producidas en la dirección x ; y d_{cx} (Ecuación 6) el desplazamiento vertical del oleaje de la superficie libre del agua en el contacto con la pared del tanque a lo largo de la dirección x , donde u_{jx} es el desplazamiento lateral relativo a la base del tanque asociado a m_j en la dirección x , $\varepsilon_j = 2/(\lambda_j^2 - 1)$, λ_j es la j -ésima raíz de $J'_1(\lambda) = 0$, y J_1 es la función de Bessel de primera clase y de primer orden (Wang et al., 2001). Se observa que el sistema de aislación del tipo LRB es efectivo en la reducción de la fuerza cortante basal máxima, y el momento volcante de las paredes máximo.

$$d_{cx} = \sum_{j=1}^N u_{jx} \lambda_j \varepsilon_j \tanh(\lambda_j H / R) \quad (3)$$

Para estimar la respuesta sísmica de diseño asociada a un caso de estudio, se utilizó el valor promedio de las respuestas sísmicas máximas obtenidas de los análisis de la historia de la respuesta en el tiempo (CSI, 2014) empleando los 21 pares de registros seleccionados y escalados (Mendo, 2015; ASCE, 2010). Las Figuras 7 y 8 muestran las respuestas sísmicas de diseño normalizadas en la dirección x para los casos paramétricos estudiados (Tablas 2 y 3) correspondientes a los sistemas de base fija y de aislada con LRB.

3.1 Efectos de los parámetros de diseño

En los sistemas tanque-agua de base aislada con e/R de 0.02 (Figura 6) a 0.04 (Figura 7), F_0 de 0.05 a 0.15, y T_b de 2 s a 4 s, se pueden desprender las siguientes observaciones:

1. La reducción de la fuerza cortante basal, con respecto al sistema de base fija es del orden de 24% a 74% para $H/R = 0.5$; 53% a 83% para $H/R = 1.0$; 75% a 91% para $H/R = 2.0$.
2. La reducción del momento volcante de las paredes, con respecto al sistema de base fija es del orden de 24% a 71% para $H/R = 0.5$; 55% a 83% para $H/R = 1.0$; 77% a 91% para $H/R = 2.0$.

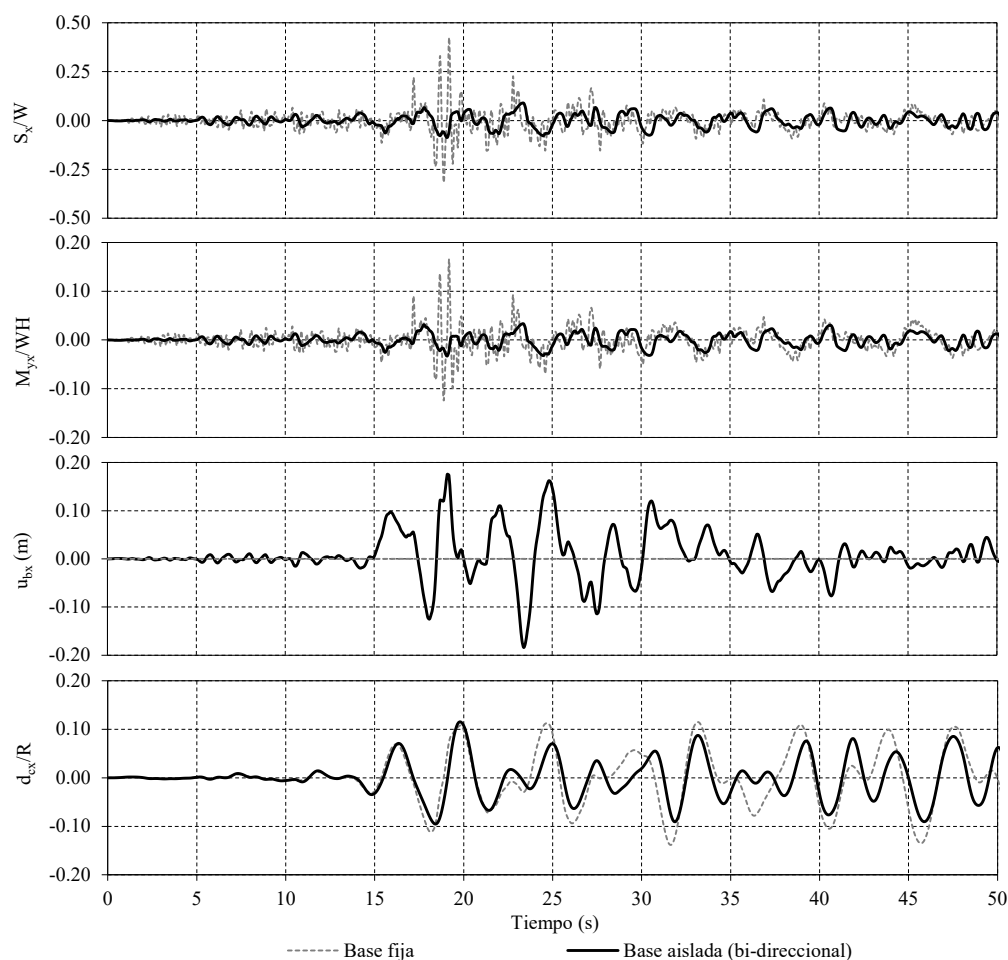


Figura 6 – Respostas sísmicas en el tiempo, de los sistemas de base fija y aislada ($H/R = 1.0$, $e/R = 0.02$; $T_b = 4$ s y $F_0 = 0.05$) solicitado por el terremoto de Pisco 2007 (registros escalados)

3. La variación del desplazamiento vertical del oleaje, con respecto a los sistemas de base fija es del orden de -20% a 5% para $H/R = 0.5$; -15% a 15% para $H/R = 1.0$; -3% a 27% para $H/R = 2.0$.
4. La variación del parámetro e/R , tiene un efecto al orden de 8% en la variación de la fuerza cortante basal, 6% en la variación del momento volcante de las paredes, 6% en la variación del desplazamiento del oleaje, y 18% en la variación del desplazamiento lateral de la base del tanque.
5. La variación del parámetro H/R , tiene un efecto al orden de 18% en la variación de la fuerza cortante basal, 33% en la variación del momento volcante de las paredes, 38% en la variación

del desplazamiento del oleaje, y 34% en la variación del desplazamiento lateral de la base del tanque.

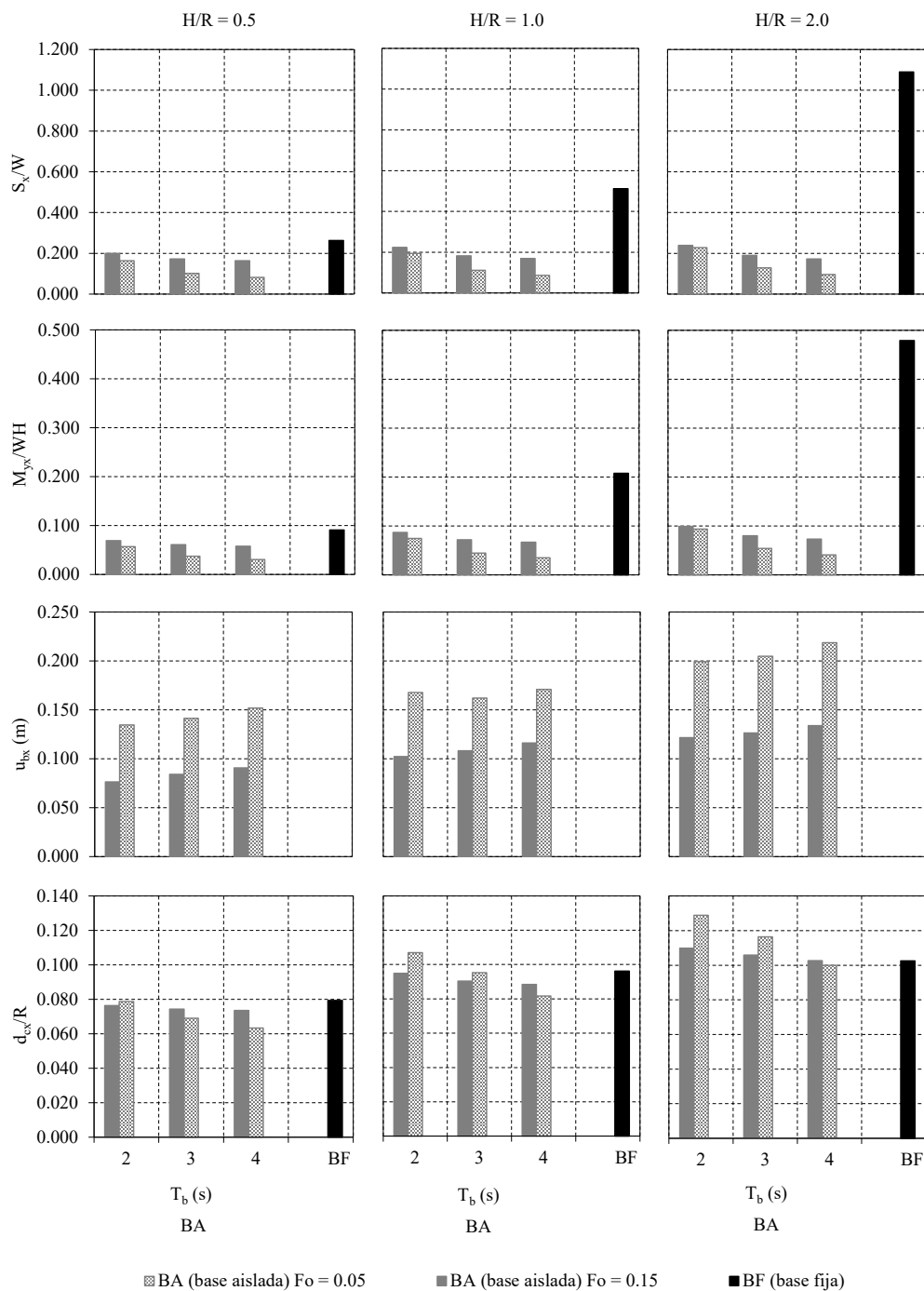


Figura 7 – Efecto de los parámetros F_0 , y T_b sobre las respuestas sísmicas asociadas a un espectro de diseño objetivo para el sistema de base aislada con $e/R = 0.02$; $H/R = 0.5$, $H/R = 1.0$, $H/R = 2.0$

6. La variación del parámetro T_b , tiene un efecto al orden de 44% en la variación de la fuerza cortante basal, 42% en la variación del momento volcante de las paredes, 14% en la variación

del desplazamiento del oleaje, y 10% en la variación del desplazamiento lateral de la base del tanque.

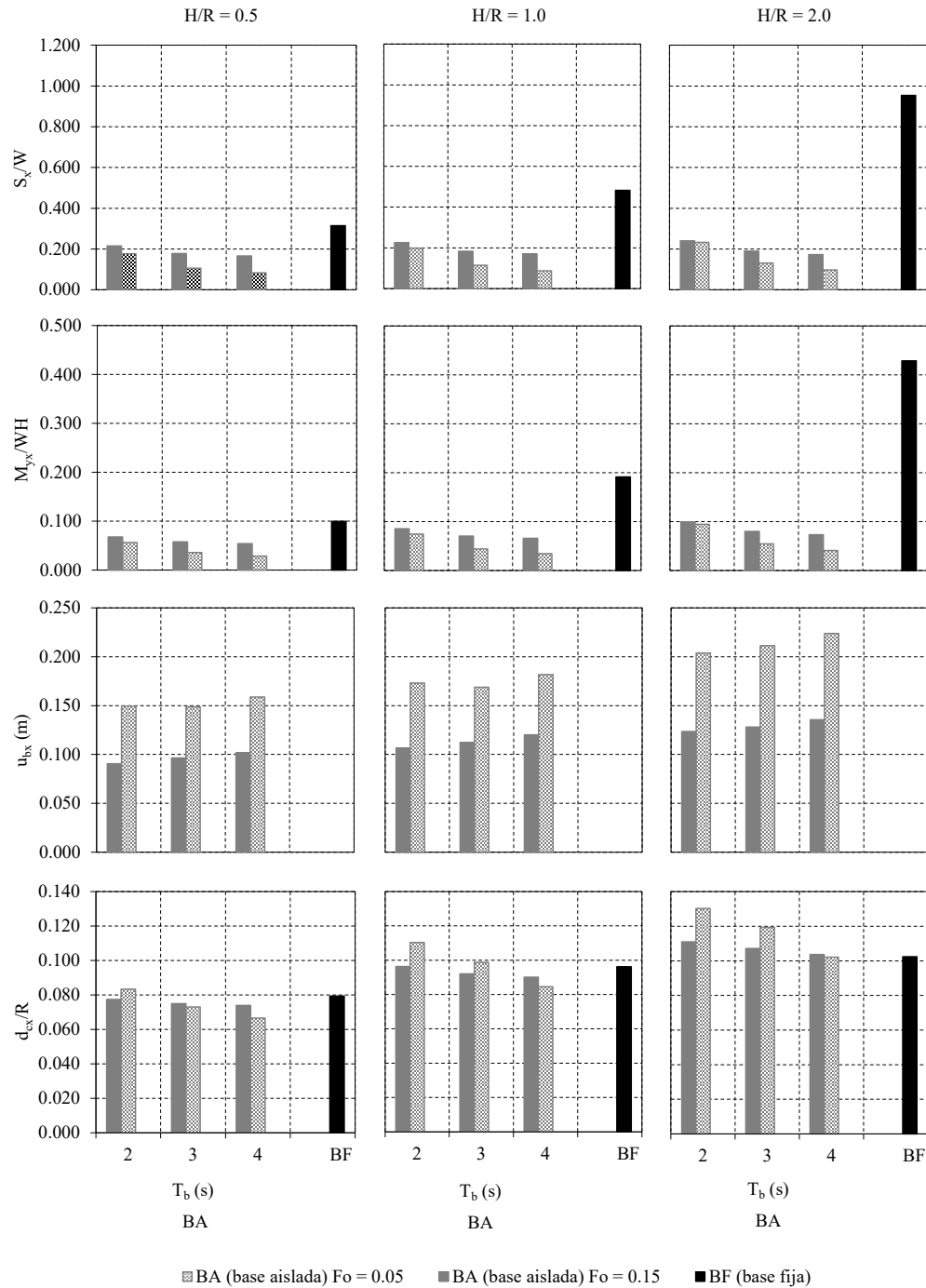


Figura 8 – Efecto de los parámetros F_0 , y T_b sobre las respuestas sísmicas asociadas a un espectro de diseño objetivo para el sistema de base aislada con $e/R = 0.04$; $H/R = 0.5$, $H/R = 1.0$, $H/R = 2.0$

7. La variación del parámetro F_0 , tiene un efecto al orden de 99% en la variación de la fuerza cortante basal, 92% en la variación del momento volcante de las paredes, 16% en la variación del desplazamiento del oleaje, y 43% en la variación del desplazamiento lateral de la base del tanque.

4. Conclusiones

Las siguientes conclusiones de la investigación son válidas para el conjunto de casos definidos paramétricamente de los sistemas tanque-agua de base aislada con LRB:

1. La reducción de la fuerza cortante basal y el momento volcante de las paredes, con respecto a los sistemas de base fija es del orden de 17% a 74% para $H/R = 0.5$; de 50% a 83% para $H/R = 1.0$; de 75% a 91% para $H/R = 2.0$.
2. La variación del desplazamiento vertical del oleaje (*sloshing*), con respecto a los sistemas de base fija es del orden de -21% a 7% para $H/R = 0.5$; de -18% a 20% para $H/R = 1.0$; de -4% a 35% para $H/R = 2.0$.
3. El parámetro H/R tiene un mayor efecto que el parámetro e/R en la reducción de la fuerza cortante basal y del momento volcante de las paredes con respecto a los sistemas de base fija.
4. El parámetro F_0 tiene un mayor efecto que el parámetro T_b en la reducción de la fuerza cortante basal y del momento volcante de las paredes con respecto a los sistemas de base fija.
5. Existe un valor ideal de la razón de resistencia del sistema de aislación en el que la fuerza cortante basal y el momento volcante de las paredes es mínima, este valor es igual a $F_0 = F_y / W = 0.05$.

5. Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento a la Facultad de Ing. Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería.

6. Referencias

- American Society of Civil Engineers (2010). Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. ASCE/SEI 7-10. Reston.
- American Concrete Institute (2006). Seismic Design of Liquid-Containing Concrete Structures and Commentary. ACI 350.3-06. Farmington Hills.
- CSI (2014): SAP2000 v17 Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures. Computers and Structures Inc. Berkeley.
- Hachem MM (2008). Quakemanager: a Software Framework for Ground Motion Record Management, Selection, Analysis and Modification. 14th World Conference on Earthquake Engineering WCEE, Beijing, China.
- Haroun MA, Housner GW (1981). Seismic Design of Liquid Storage Tanks. Journal of Technical Councils ASCE, v. 107, p. 191-207.
- Haroun MA (1983). Vibration Studies and Tests of Liquid Storage Tanks. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, v. 11, p. 179-206.
- Housner GW (1957). Dynamic Pressures on Accelerated Fluid Containers. Bulletin of Seismological Society of America, v. 47, p. 15-35.
- Malhotra PK (1997). New Methods for Seismic Isolation of Liquid-Storage Tanks. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, v. 26, p. 839-847.
- Mendo AR (2015). Bases para la Implementación de la Norma Peruana de Análisis y Diseño de Edificios con Aislación Sísmica. Pontificia Universidad Católica del Perú PUCP, Lima, Perú.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2016). Diseño Sismorresistente. NTE E.030. Lima.
- Naeim F, Kelly J. (1999). Design of Seismic Isolated Structures from Theory and Practice. Jhon Wiley & Sons, p. 185-202.
- Nagarajaiah S, Reinhorn AM, Constantinou MC (1991). Nonlinear Dynamic Analysis of Three-Dimensional Base Isolated Structures. Journal of Structural Engineering, ASCE, v. 117, p. 2035-2054.
- Park YJ, Wen YK, Ang AHS (1986). Random Vibration of Hysteretic System Under Bi-Directional Ground Motions. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, v. 14, p. 543-557.
- Priestley MJN, Wood JH, Davidson BJ (1986). Seismic Design of Storage Tanks. Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, v. 19, p. 272-284.
- Robinson WH (1982) Lead Rubber Hysteretic Bearing Suitable for Protecting Structures During Earthquakes. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, v. 10, p. 593-604.
- Shrimali MK, Jangid RS (2002). Non-Linear Seismic Response of Base-Isolated Liquid Storage Tanks to Bidirectional Excitation. Nuclear Engineering and Design, v. 217, p. 1-20.
- Soneji BB, Jangid RS (2006). Passive Hybrid Systems for Earthquake Protection of Cable-Stayed Bridge. Engineering Structures, v. 29 p. 57-70.

Veletsos AS (1984). Seismic Response and Design of Liquid Storage Tanks. Guidelines for the Seismic Design of Oil and Gas Pipeline Systems, Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering p. 255-370, 443-461, ASCE, New York.

Wang YP, Teng MC, Chung KW (2001). Seismic Isolation of Rigid Cylindrical Tanks Using Friction Pendulum Bearings. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, v. 30, p. 1083-1099.

Zareian F, Aguirre C, Beltrán JF, Cruz E, Herrera R, Leon R, Millan A, Verdugo A (2012). Reconnaissance Report of Chilean Industrial Facilities Affected by the 2010 Chile offshore Bío-Bío Earthquake. Earthquake Spectra, v. 28, p. S513-S532.

Seismic Response of Base-Isolated Reinforced Concrete Water Storage Tanks with Lead Rubber Bearings

Abstract

This paper shows the seismic response of base-isolated circular cylindrical reinforced concrete (RC) water storage tanks with lead rubber bearing (LRB) under bi-directional horizontal earthquake ground motions. For the seismic analysis, tanks were considered to have a linear elastic behavior, the tank-water interaction was represented by an equivalent mechanical model, and the hysteretic behavior of the isolation system was represented by a bi-axial hysteretic restoring force model. The parameters of this study are: the water-height/tank-inner-radius ratio, the tank-wall-thickness/tank-inner-radius ratio, the target vibration period of the isolation system, and the strength ratio of the isolation system. Twenty-one pairs of selected and scaled ground motions were used. Time-history analysis was used to study the effects of study parameters on seismic response of base-isolated RC water storage tanks. Seismic responses of base-isolated systems, when compared to fixed-base systems, show an effectiveness of LRB isolation system in the reduction of base shear values in the order of 17% to 74% for $H/R = 0.5$; of 50% to 83% for $H/R = 1.0$; of 75% to 91% for $H/R = 2.0$ (where H/R is the water-height/tank-inner-radius ratio).

Keywords Clave: lead rubber bearing, RC water storage tanks, time-history analysis

1. Introduction

Water storage tanks play a fundamental role in the water supply system; however, they are susceptible to severe seismic events that can significantly damage their structure, causing excessive lateral displacements, wall buckling, and collapse (Zareian et al., 2012). In seismic countries such as Peru, it is very important for these structures to remain operative after a severe seismic event. In Peru, many water storage tanks are built in seismic zone 4 ($Z = 0.45$), soil type S_1 (V_{S30} range between 500 m/s and 1 500 m/s), and soil type S_2 (V_{S30} range between 180 m/s and 500 m/s). Z is the zone factor interpreted as the maximum horizontal acceleration at stiff soil with a 10% probability of being exceeded in 50 years, normalized by the gravitational acceleration, and V_{S30} is the average shear wave velocity in the top 30 m of the soil profile (MVCS, 2016).

The main objective of this work is to contribute to the state-of-the-art knowledge of the seismic response of RC water storage tanks supported by LRB isolation system and subjected to bi-directional ground motions compatible with a normative design spectrum. The specific objective of this work are to analyze the effects of parameters of base-isolated tank-water system, on seismic response of base-isolated RC water storage tanks.

2. Analysis of the Results

In the present study, for bi-directional seismic excitation, the two components were applied simultaneously. The average value of the seismic responses obtained from the time-history analyses was used to estimate the design seismic response associated to a case study using the 21 selected and scaled pairs of ground motions.

The following observations can be extracted from the analysis of base-isolated tank-water systems with $e/R = 0.02$ to 0.04 , $F_0 = 0.05$ to 0.15 , and $T_b = 2$ s to 4 s:

1. The reduction in base shear when compared to fixed-base systems is 24% to 74% for $H/R = 0.5$; 53% to 83% for $H/R = 1.0$; and 75% to 91% for $H/R = 2.0$.
2. The reduction in overturning moment of the wall when compared to fixed-base systems is 24% to 71% for $H/R = 0.5$; 55% to 83% for $H/R = 1.0$; and 77% to 91% for $H/R = 2.0$.
3. The variation in vertical sloshing displacement when compared to fixed-base systems is -20% to 5% for $H/R = 0.5$; -15% to 15% for $H/R = 1.0$; and -3% to 27% for $H/R = 2.0$.
4. The effect of the parameter e/R variation in the normalized base shear is about 8%, in the normalized overturning moment of the wall is about 6%, in the normalized vertical sloshing displacement is about 6%, and in the lateral displacement of the tank's base is about 18%.
5. The effect of the parameter H/R variation in the normalized base shear is about 18%, in the normalized overturning moment of the wall is about 33%, in the normalized vertical sloshing displacement is about 38%, and in the lateral displacement of the tank's base is about 34%.

6. The effect of the parameter T_b variation in the normalized base shear is about 44%, in the normalized overturning moment of the wall is about 42%, in the normalized vertical sloshing displacement is about 14%, and in the lateral displacement of the tank's base is about 10%.
7. The effect of the parameter F_0 variation in the normalized base shear is about 99%, in the normalized overturning moment of the wall is about 92%, in the normalized vertical sloshing displacement is about 16%, and in the lateral displacement of the tank's base is about 43%.

3. Conclusions

The following research conclusions are valid for the group of parametric cases defined, corresponding to base-isolated tank-water systems:

1. The reduction in base shear and overturning moment of the wall when compared to fixed-base systems is 17% to 74% for $H/R = 0.5$; 50% to 83% for $H/R = 1.0$; and 75% to 91% for $H/R = 2.0$.
2. The variation in vertical sloshing displacement when compared to fixed-base systems is -21% to 7% for $H/R = 0.5$; -18% to 20% for $H/R = 1.0$; and -4% to 35% for $H/R = 2.0$.
3. The parameter H/R has a higher effect than the parameter e/R in the reduction of the base shear and overturning moment of the wall.
4. The parameter F_0 has a higher effect than the parameter T_b in the reduction of the base shear and overturning moment of the wall.
5. There is an ideal value of the strength ratio of the isolation system in which the basal shear force and overturning moment of the wall is minimal, this value is equal to $F_0 = F_y / W = 0.05$.