

Diseño basado en desempeño de estanques de almacenamiento de fluido de pared delgada: una alternativa para cumplir con los requerimientos de la propuesta de norma pr-NCh2369

Performance-based design of thin-walled fluid storage tanks: an alternative to meet the requirements of the proposed standard pr-NCh2369

Fecha de entrega: 23 de octubre 2023

Fecha de aceptación: 6 de marzo 2024

José Luis Almazán^{1,2}, Nicolás Tapia¹, José Ignacio Colombo² y Sergio Reyes³

¹ Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Vicuña Mackenna 4860, Santiago, Chile, jlalmaza@ing.puc.cl, nftapia@uc.cl

² Pontificia Universidad Católica de Chile, Centro Nacional de Excelencia para la Industria de la Madera CENAMAD, Vicuña Mackenna 4860, Santiago, Chile

² Universidad Diego Portales, Departamento de Ingeniería Civil, jose.colombo@udp.cl

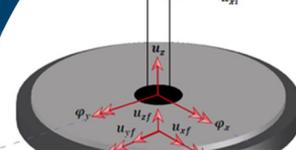
³ ETH Zurich, Department of Civil, Environmental and Geomatic Engineering, Institute of Structural Engineering, Chair of Seismic Design and Analysis, Stefano-Franscini-Platz 5, 8093 Zürich, Switzerland, sergio.reyes@ibk.baug.ethz.ch

Durante el año 2021 concluyó el plazo de consulta pública del proyecto de modificación de la norma chilena de Diseño Sísmico de Estructuras e Instalaciones Industriales. Este proyecto, denominado pr-NCh2369, reemplazaría próximamente la actualmente vigente NCh2369 (2003). En este artículo se evalúan las implicancias que tendrán estas modificaciones en el análisis y diseño de estanques de pared delgada para el almacenamiento de fluidos. Entre los aspectos más destacables podemos mencionar: (1) se define un espectro elástico de referencia (que no existía en la versión anterior), el cual puede utilizarse para realizar análisis especiales y también para incorporar sistemas de protección sísmica, ya sea disipación de energía o aislamiento sísmico; (2) se establece que el corte de diseño de la versión anterior es un corte mínimo, por lo tanto, los estanques nuevos con sistema de anclaje convencionales tendrían una demanda de corte basal igual o superior; (3) cuando corresponda, la interacción suelo-fundación-estanque debe incluirse explícitamente en el modelo; y (4) las estructuras susceptibles de falla prematura por pandeo (elástico o elasto-plástico) deben analizarse con el espectro elástico de referencia ($R = 1$). Con el propósito de facilitar la aplicación de esta propuesta de modificación normativa, se presenta una metodología general basada en criterios de desempeño, que se puede aplicar a estanques anclados y no anclados, como también a estanques con anclajes disipativos, considerando además fundación de tipo circular y anular.

Palabras clave: estanques de pared delgada, pandeo en régimen elástico, anclajes disipativos

In 2021, the public consultation period for the modification project of the Chilean Standard for Seismic Design of Industrial Structures and Facilities ended. This project, called pr-NCh2369, will soon replace the currently valid NCh2369 (2003). This article evaluates the implications that these modifications will have on the analysis and design of thin-walled fluid storage tanks. Among the most noteworthy aspects we can mention: (1) an elastic reference spectrum is defined (which did not exist in the previous version), which can be used to carry out special analyses and also to incorporate seismic protection systems, either energy dissipation or seismic isolation; (2) it is established that the design base shear of the previous version is a minimum base shear; therefore, the new tanks with conventional anchoring system would have an equal or higher base shear demand; (3) where applicable, soil-foundation-tank interaction should be explicitly included in the model; and (4) structures susceptible to premature failure due to buckling (elastic or elasto-plastic) must be analysed with the reference elastic spectrum ($R = 1$). In order to facilitate the application of this proposed regulatory amendment, a general methodology based on performance based criteria is presented, which can be applied to anchored and unanchored tanks, as well as to tanks with dissipative anchors, also considering circular and annular type foundations.

Keywords: thin-walled tanks, elastic buckling, dissipative anchors



Introducción

Los estanques cilíndricos de pared delgada (ECPD) son muy utilizados en instalaciones industriales, especialmente para el almacenamiento de líquidos como agua, vino, petróleo, y nitrógeno. En casi todos los grandes terremotos ocurridos en el mundo, muchos de estos estanques han sufrido daños importantes, como durante los terremotos de 1960 en Chile (Steinbrugge y Flores, 1963), Alaska 1964 (Hanson, 1973), San Juan Argentina 1977 (Manos, 1991), Northridge EEUU 1994 (Hall, 1995), Maule Chile 2010 (Cruz y Valdivia, 2011), Seddon Nueva Zelanda 2013 (Morris *et al.*, 2013), y Kaikoura Nueva Zelanda 2016 (Dizhur *et al.*, 2017). Los modos de falla más comunes son: pandeo del manto por compresión y/o corte, arrancamiento o fractura de anclajes, fractura de la unión soldada entre la placa base y el manto, indentación de anclajes en el manto, rotura del piping, y fallas en estructura de techo por oleaje excesivo.

Los ECPD pueden estar mecánicamente anclados a su base o bien simplemente apoyados. Durante un sismo intenso ambas tipologías pueden experimentar levantamiento parcial de la base, lo que implica la ocurrencia de muchos mecanismos de comportamiento difíciles de modelar con precisión, como el contacto variable de la placa base con la cimentación, las deformaciones plásticas de la placa base debida al levantamiento, fluencia de los pernos de anclaje, y levantamiento de la fundación.

Se han llevado a cabo numerosos estudios analíticos para estimar el comportamiento sísmico de ECPD. Los primeros se realizaron suponiendo estanque rígido perfectamente anclado a una base rígida (Jacobsen, 1949; Housner, 1957, 1963). Más tarde, algunos estudios consideraron la flexibilidad de la pared del estanque y revelaron su considerable influencia sobre la magnitud y las características de la respuesta (Veletsos, 1974; Veletsos y Yang, 1977; Haroun y Housner, 1981). Luego, Malhotra y Veletsos (1994a,b,c) desarrollaron un método simplificado de análisis dinámico para tanques no anclados sujetos a excitación unidimensional, que considera levantamiento de la placa base y flexibilidad de las paredes del estanque.

De forma similar, se han realizado investigaciones utilizando el método de elementos finitos. En los primeros trabajos, Barton y Parker (1987) analizaron la respuesta

sísmica de estanques anclados y sin anclar con un modelo 3D que no tuvo en cuenta grandes deformaciones ni fluencia del material. Más tarde, Peek y Jennings (1988) investigaron estanques no anclados utilizando modelos lineales de elementos finitos para la pared del estanque, y resortes uniaxiales no lineales en la periferia para considerar las fuerzas restitutivas verticales de la placa base. Virella *et al.* (2006) estudiaron el pandeo elástico en la parte superior de los tanques cilíndricos perfectamente anclados en la base. Sin embargo, no se conocían investigaciones numéricas detalladas sobre la distribución de tensiones en estanques cilíndricos de pared delgada con anclajes. En los últimos años se han publicado estudios numéricos que han traído importantes descubrimientos en relación a la manera como se produce la falla por pandeo en estanques de apoyo continuo anclados mecánicamente (Colombo y Almazán, 2019; Jaramillo *et al.*, 2022; Moreno *et al.*, 2023). En este artículo se aplican las nuevas herramientas desarrolladas por los autores para evaluar los distintos tipos de falla de estas complejas estructuras, que resultan apropiadas para aplicar las nuevas disposiciones de pr-NCh2369. Se enfatiza la posibilidad de mejorar sustancialmente el comportamiento de estas estructuras por medio de anclajes disipativos (Tapia *et al.*, 2023).

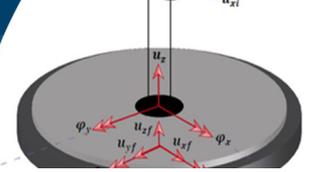
Modelo estructural

En la Figura 1 se muestra esquemáticamente el modelo estructural empleado en esta investigación (Colombo y Almazán, 2019; Jaramillo *et al.*, 2022). El modelo tiene 12 grados de libertad, 7 corresponden al estanque (q_1) y 5 a la fundación (q_2):

$$q_1 = [u_{xi}, u_{yi}, u_{xc}, u_{yc}, u_z, \phi_x, \phi_y] \quad (1)$$

$$q_2 = [u_{xf}, u_{yf}, u_{zf}, \theta_x, \theta_y] \quad (2)$$

donde u_{xi} y u_{yi} son los desplazamientos horizontales de la masa impulsiva en dirección X e Y, respectivamente; u_{xc} y u_{yc} son los desplazamientos horizontales de la masa convectiva en dirección X e Y, respectivamente; ϕ_x y ϕ_y corresponden a las rotaciones del anillo basal del estanque en las direcciones X e Y, respectivamente; u_z es el desplazamiento vertical del centro geométrico del anillo basal con respecto a la base; u_{xy} , u_{yf} y u_{zf} son los



desplazamientos horizontales y vertical de la fundación en las direcciones X, Y y Z, respectivamente; θ_x y θ_y corresponden a las rotaciones de la fundación en las direcciones X e Y, respectivamente. Las ecuaciones bilineales del movimiento se pueden encontrar en Jaramillo *et al.* (2022).

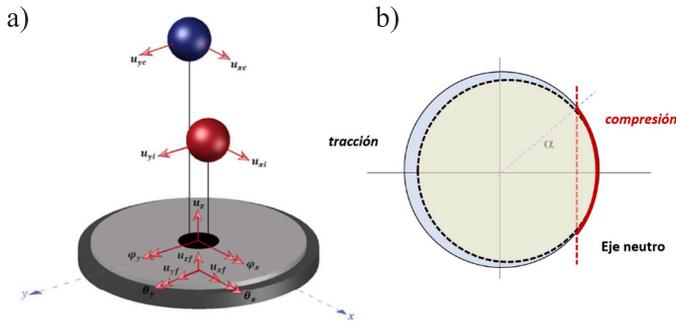


Figura 1: a) Representación esquemática del modelo estructural de 12 grados de libertad considerado y b) esquema de las zonas traccionada y comprimida del anillo de contacto

Metodología de análisis y casos de estudio

El método de análisis que se presenta a continuación es una adaptación del conocido Método Capacidad-Demanda. Consiste en encontrar los parámetros de respuesta sísmica por medio de un proceso iterativo en que la Demanda Sísmica se representa por medio de un espectro de respuesta de un sistema lineal-equivalente de un grado de libertad, y la Capacidad Estructural se representa por medio de la relación constitutiva global obtenida de un análisis no lineal monotónico. Se han considerado 4 casos de estudio, que corresponden a estanques con distintas propiedades geométricas. Tres de ellos son estanques de acero inoxidable para almacenamiento de vino, mientras que el cuarto es un estanque de acero al carbono cuyas propiedades se obtuvieron de Malhotra (2000). La Tabla 1 presenta las propiedades básicas de los cuatro estanques considerados, los que poseen no solamente distintos tamaños y espesores de placa, sino principalmente diferentes relaciones de esbeltez H/D . Como se mostrará más adelante, esta relación de esbeltez tiene una influencia determinante en el comportamiento sísmico. A su vez, para cada estanque se han considerado dos condiciones de anclaje (Figura 2): (i) con anclajes convencionales (tipo silla); y (ii) con anclajes disipativos.

Tabla 1: Propiedades básicas de los cuatro estanques analizados

	Estanque			
	A	B	C	D
Fluido almacenado	Vino	Vino	Vino	Petróleo
Altura H , m	9.75	7.76	9.02	11.30
Diámetro D , m	4.44	4.20	8.00	12.20
Esbeltez geométrica H/D	2.20	1.85	1.13	0.93
Volumen de fluido almacenado V_w , m ³	150	100	400	1300
Porcentaje de masa impulsiva, %	100	100	100	75
Espesor placa de fondo, mm	4.00	3.50	5.00	4.00
Espesor basal de pared del estanque, mm	4.00	3.50	5.00	8.00
Tensión admisible al pandeo, MPa	108	98	86	94

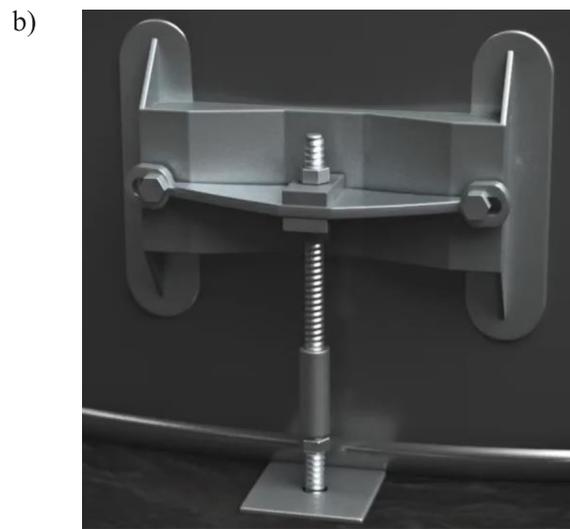
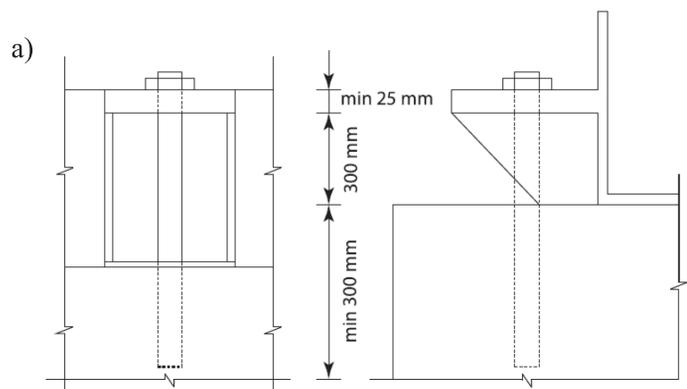
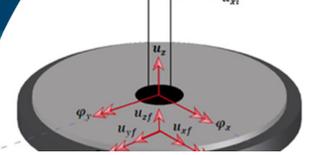


Figura 2: a) Típico anclaje tipo silla resistente sólo a tracción (Jaramillo *et al.*, 2022) y b) anclaje disipativo tipo TADAS resistente a tracción y compresión (Tapia *et al.*, 2023)



Resultados obtenidos

Los resultados que se muestran a continuación consideran como demanda el denominado espectro de referencia propuesto en pr-NCh2369, para Suelo Tipo III y Zona Sísmica 2. Se evalúa solamente la falla por pandeo en compresión del manto, usando el valor de tensión admisible al pandeo propuesto por la norma neozelandesa (NZSEE, 1986). Interesa fundamentalmente mostrar los efectos de la esbeltez H/D , el tipo de anclaje, y su cantidad.

Se presentan en primer lugar los resultados obtenidos para el estanque A, el más esbelto de los estanques analizados. En la Figura 3 se muestran los resultados para el caso del estanque con anclajes convencionales. En la Figura 3(a) se presentan las Curvas Capacidad-Demanda (CCD), con el correspondiente punto de desempeño, para un número variable de anclajes de 200 kN de capacidad. En las

Figuras 3(b) y 3(c) se muestran el periodo efectivo T_{eff} y el amortiguamiento efectivo E_{eff} . Notar que a medida que el número de anclajes aumenta, la pseudo-aceleración S_a disminuye, acercándose al caso ideal de estanque perfectamente anclado ($T_{eff} = 0.19$ s, $\xi_{eff} = 0.032$). Por su parte en las Figuras 3(d) y 3(e) se muestran las relaciones entre levantamiento máximo w , tensión máxima de compresión σ_c y la pseudo-aceleración S_a . En un formato distinto, en la Figura 3(f) se presenta la misma información, agregando el ángulo de contacto α (ver Figura 1(b)). Se observa que a medida que aumenta el número de anclajes disminuye la tensión σ_c , lo cual se debe a dos efectos simultáneos: (i) aumenta α ; y (ii) disminuye S_a .

En la Figura 4 se muestran los resultados para el caso del estanque con anclajes disipativos de 40 kN de capacidad. Se puede observar una notable disminución de la S_a como

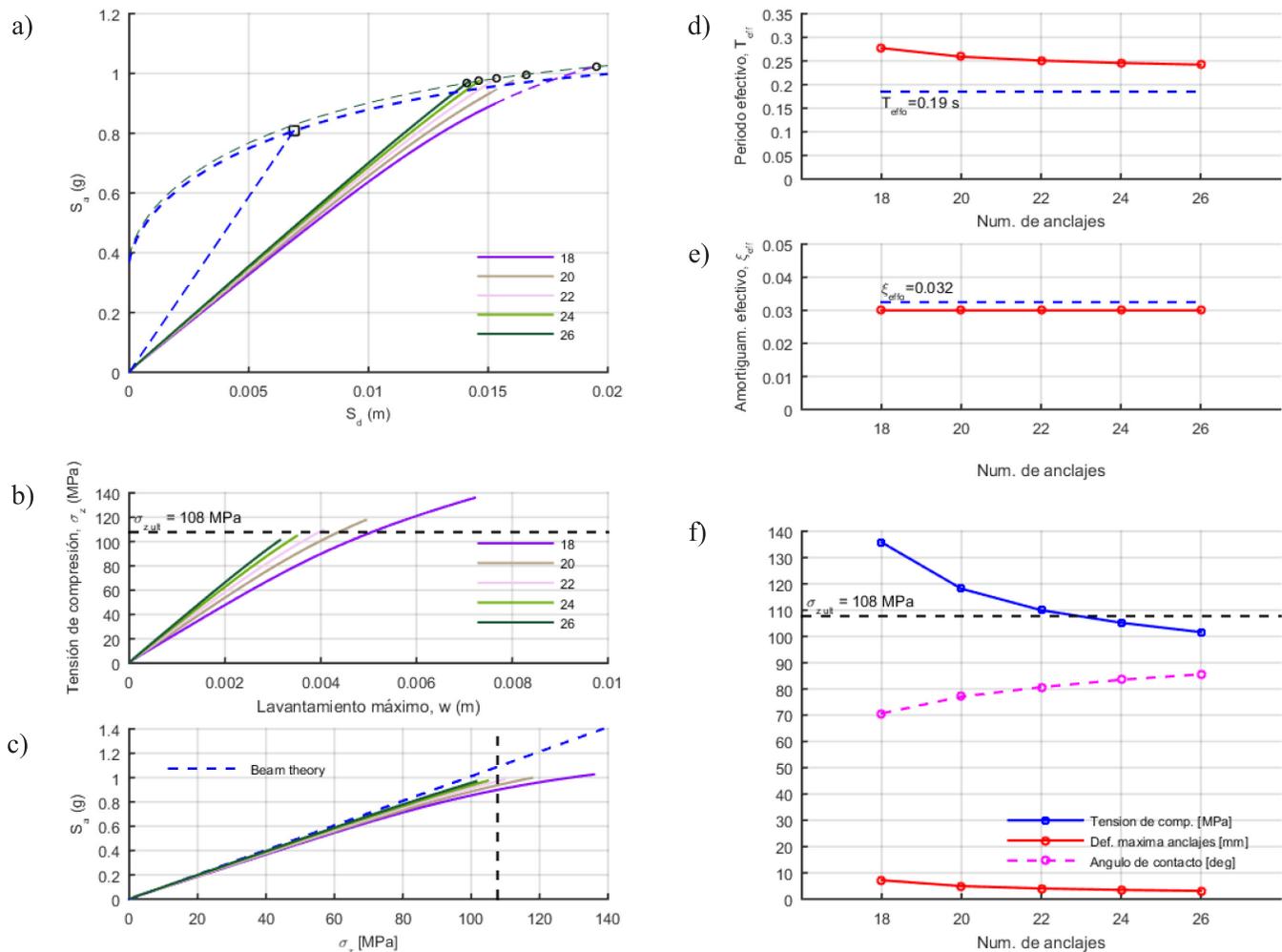


Figura 3: Resultados estanque A con anclajes convencionales ($F_u = 200$ kN)

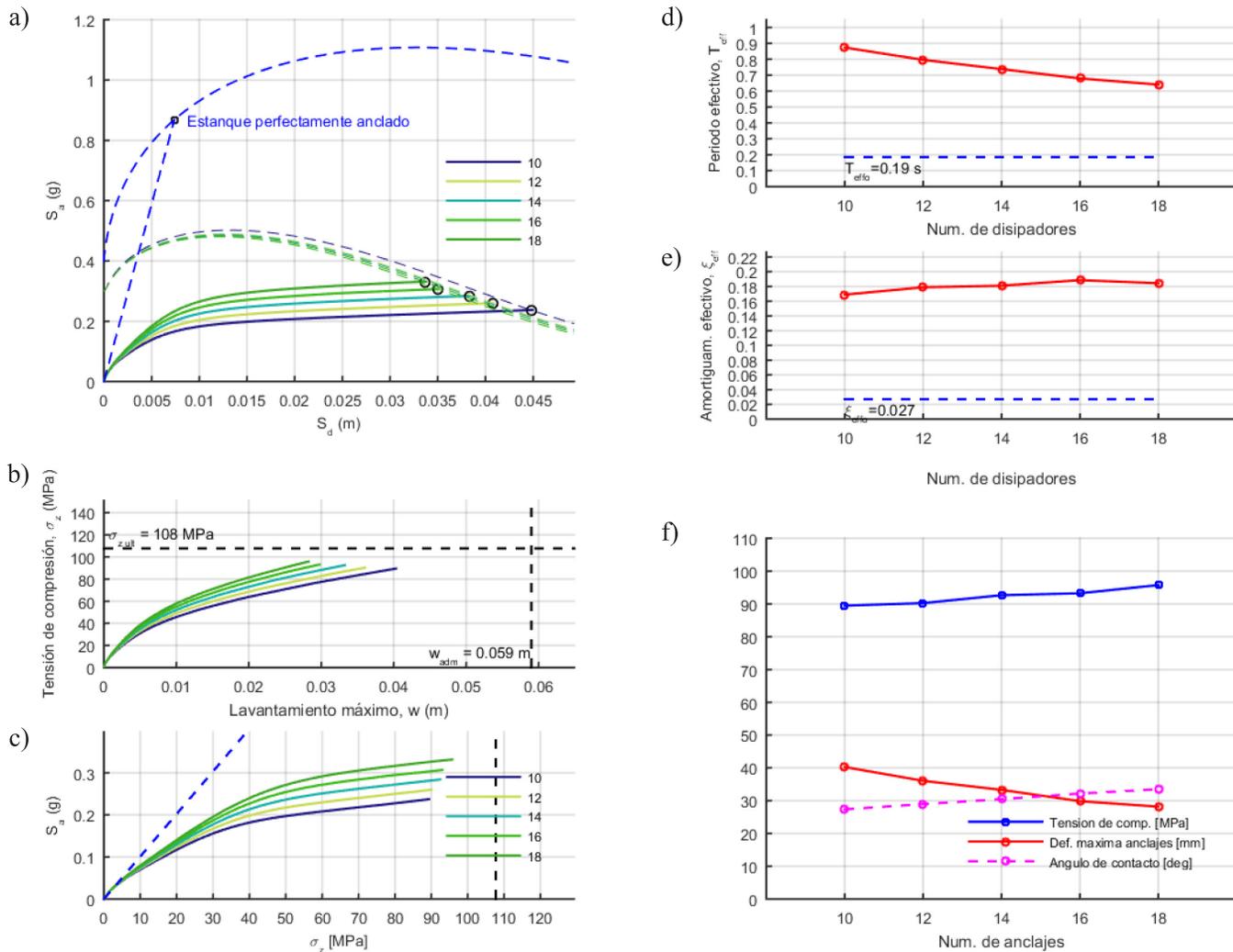
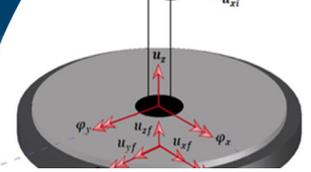


Figura 4: Resultados estanque A con anclajes disipativos ($F_u = 40$ kN)

consecuencia de dos efectos simultáneos: flexibilización por rocking y aumento de amortiguamiento. Como era de esperar, a medida que aumenta el número de disipadores disminuye el levantamiento y aumenta el ángulo de contacto. Sin embargo, ξ_{eff} y σ_c permanecen relativamente uniformes. Los resultados obtenidos para el estanque D, el menos esbelto de los estanques analizados, se presentan en las Figuras 5 y 6. Aunque de diferente magnitud, las tendencias son similares a las obtenidas para el estanque A.

En la Tabla 2 se muestra un resumen con los resultados relevantes obtenidos, donde se han seleccionado aquellas soluciones en que no se produce falla por pandeo. Las filas 3 a 5 de la Tabla 2 presentan parámetros de respuesta global (periodo efectivo, factor de amortiguamiento efectivo, y pseudo-aceleración efectiva). La fila 6 muestra el denominado Factor de Reducción Efectivo R_{eff} , obtenido como el cociente entre la $S_{a,eff}$ del estanque con anclajes

convencionales y la correspondiente al estanque con anclajes disipativos. Las filas 7 a 9 de la tabla presentan parámetros de respuesta local (levantamiento máximo, tensión de compresión máxima, y ángulo de contacto mínimo). La fila 10 muestra el denominado Factor de Seguridad al pandeo, obtenido como el cociente entre la tensión de compresión máxima y la tensión admisible al pandeo.

Se puede observar que los anclajes disipativos son muy eficientes para reducir la demanda de pseudo-aceleración y, por lo tanto, los esfuerzos internos en el estanque y fundación. Dicha eficiencia aumenta a medida que aumenta la esbeltez del estanque. Esto es consecuencia de que el efecto de flexibilización por rocking e incremento de amortiguamiento que producen los anclajes disipativos, es mayor cuando los estanques son más esbeltos.

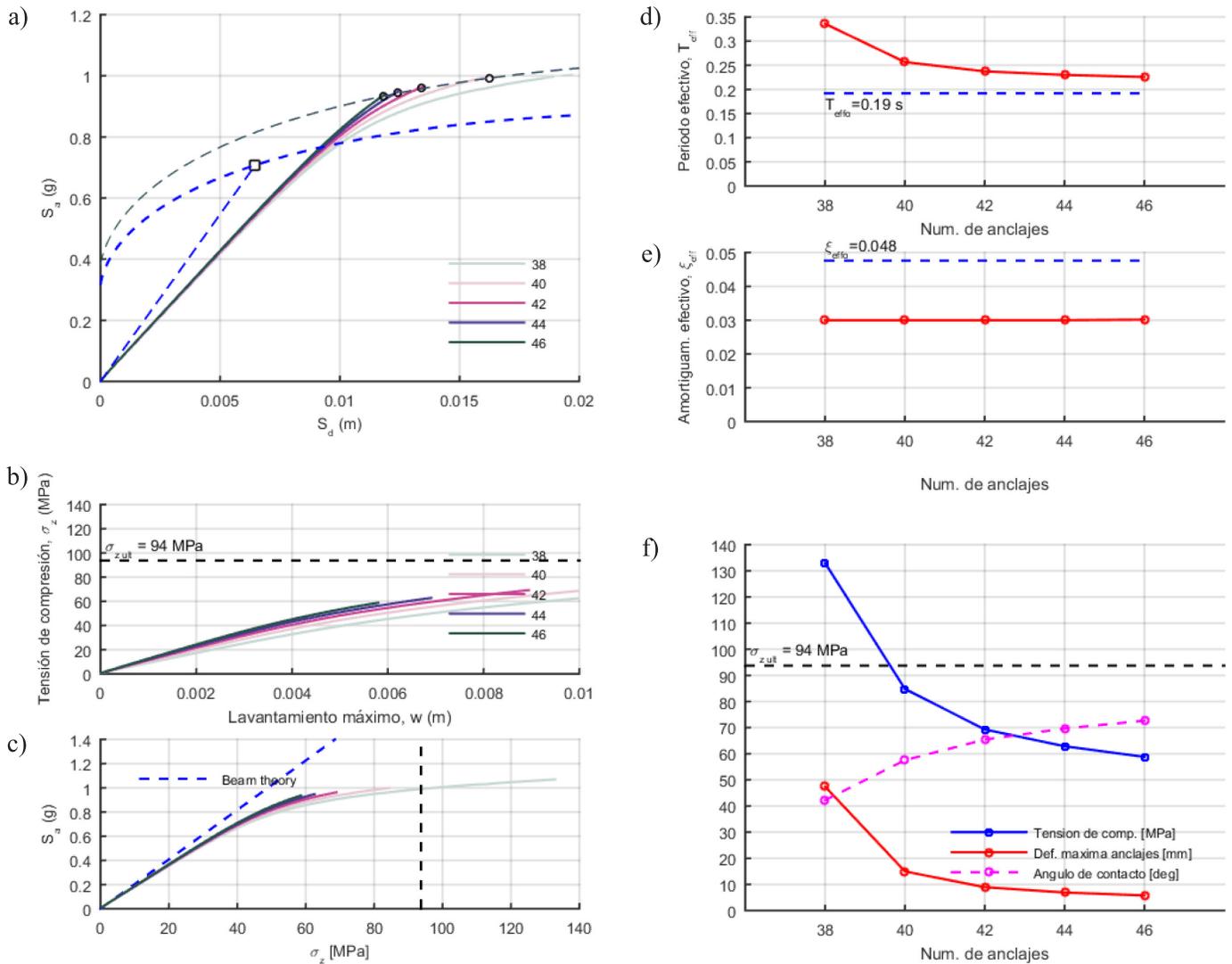
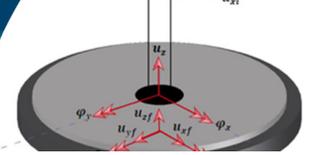


Figura 5: Resultados estanque D con anclajes convencionales ($F_u = 200$ kN)

Tabla 2: Resumen de resultados

		Estanque A		Estanque B		Estanque C		Estanque D	
		Anclaje Silla	Anclaje Disipador						
1	Num. de anclajes	26	14	14	12	20	18	40	26
2	F_u , kN	200	40	145	40	192	70	200	90
3	T_{eff} , s	0.24	0.74	0.20	0.53	0.20	0.40	0.26	0.48
4	ξ_{eff}	0.03	0.18	0.03	0.18	0.03	0.17	0.03	0.18
5	$S_{a,eff}$, g	0.97	0.28	0.88	0.40	0.88	0.48	0.99	0.43
6	R_{eff}	-	3.46	-	2.20	-	1.83	-	2.30
7	w_{max} , mm	3.16	33.3	4.00	28.7	5.15	31.8	15.00	51.8
8	σ_c , MPa	101.62	92.64	80.34	90.40	67.2	80.97	84.80	70.51
9	α , °	85.55	30.47	68.84	30.3	66.82	32.44	57.56	30.14
10	FS_{pandeo}	1.06	1.16	1.22	1.08	1.28	1.06	1.11	1.33

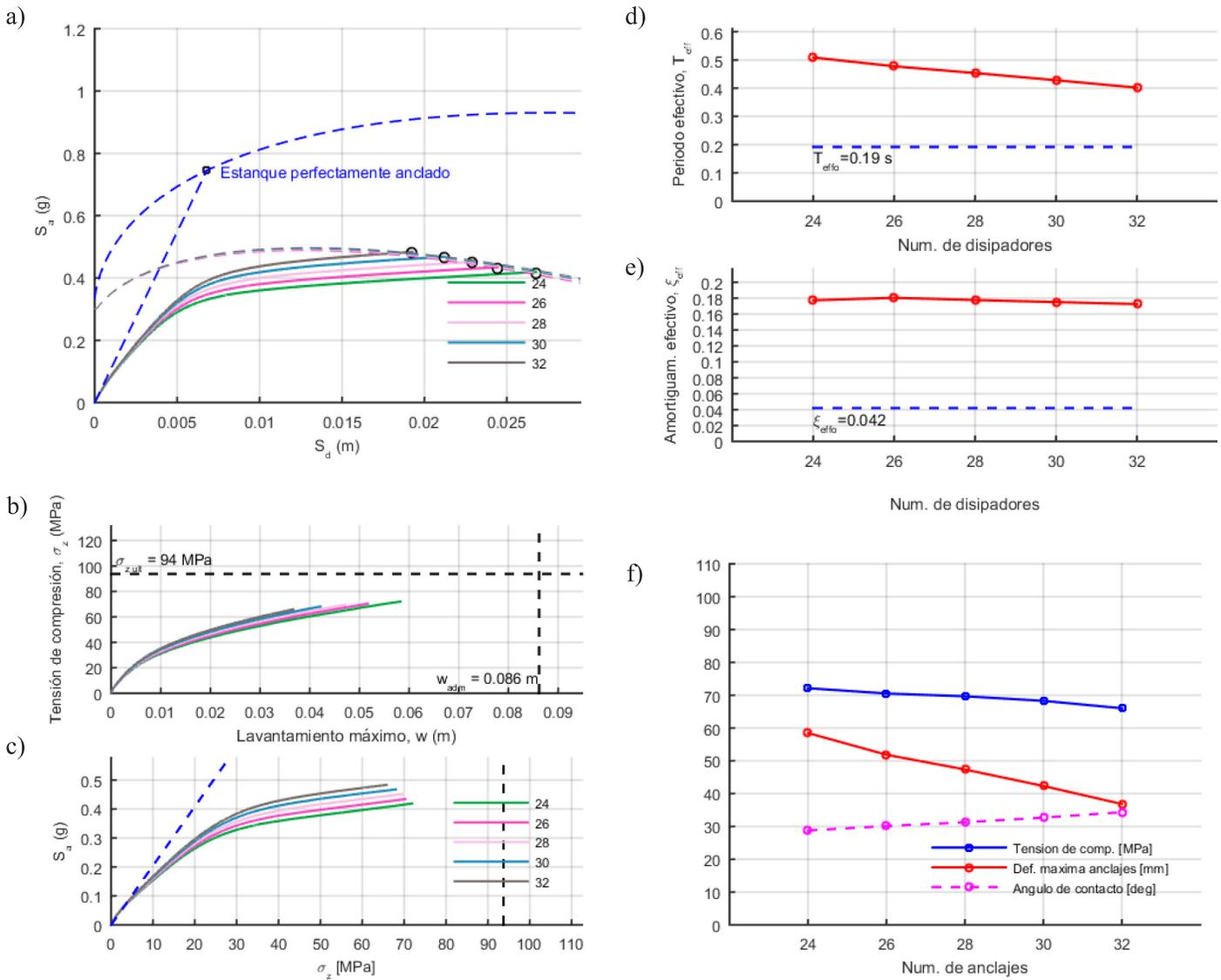
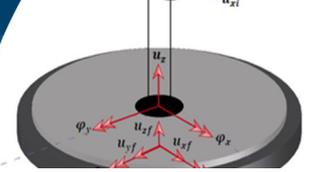


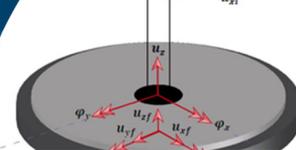
Figura 6: Resultados estanque D con anclajes disipativos ($F_u = 90$ kN)

Conclusiones

Esta investigación presenta una adaptación del conocido método de Capacidad–Demanda aplicado al análisis y diseño de Estanques Cilíndricos de Pared Delgada (ECPD). El método permite evaluar los parámetros de respuesta que controlan los dos modos de falla más comunes: (i) pandeo por compresión en la base del manto; y (ii) fractura de la conexión entre la placa de fondo y el manto por exceso de levantamiento. Se han analizado cuatro estanques, tres de ellos típicos de la industria del vino, y el restante de la industria petrolera, cubriendo un amplio rango de tamaños y relaciones de esbeltez geométrica. Para cada uno de ellos, a su vez, se han analizado bajo dos tipos de anclaje:

(i) anclajes convencionales (tipo silla); (ii) anclajes disipativos. Las conclusiones más importantes se pueden resumir como:

- (1) La metodología presentada permite aplicar satisfactoriamente los requerimientos de la pr-NCh2369, debido a que usa como demanda el denominado espectro elástico de referencia. Por otra parte, el modelo empleado incorpora los efectos de la interacción suelo-fundación-estructura.
- (2) Para los estanques con anclajes convencionales se observa que, a mayor número de anclajes, menor demanda de pseudo-aceleración y mayor ángulo de contacto. Como consecuencia, a mayor número de



anclajes disminuye la tensión máxima de compresión en el manto.

- (3) En general, para que los estanques con anclajes convencionales no fallen por pandeo, dichos anclajes deben desarrollar muy poca deformación inelástica. De lo contrario disminuye el ángulo de contacto produciendo concentración de tensiones.
- (4) Para los estanques con anclajes disipativos se observa una considerable reducción de demanda de pseudo-aceleración (en comparación con su contraparte con anclajes convencionales) debido a dos efectos simultáneos: flexibilización por rocking y aumento de amortiguamiento.
- (5) Para los estanques con anclajes disipativos se observa que la tensión máxima de compresión es poco sensible al número de disipadores. Esto es consecuencia de que el factor de amortiguamiento efectivo se mantiene relativamente constante (del orden del 18%) con el cambio en el número de disipadores. Esto facilita la toma de decisiones del diseñador, que puede elegir pocos disipadores de mayor capacidad de deformación, o bien muchos disipadores con poca capacidad de deformación.

Agradecimientos

Se agradece el apoyo brindado por el Centro Nacional de Excelencia para la Industria de la Madera ANID/BASAL/FB210015 (CENAMAD); y ANID/FONDECYT/Regular 1201841.

Referencias

Barton, D.C. and Parker, J.V. (1987). Finite element analysis of the seismic response of anchored and unanchored liquid storage tanks. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 15(3), 299-322

Colombo, J.I. and Almazán, J.L. (2019). Simplified 3D model for the uplift analysis of liquid storage tanks. *Engineering Structures* 196, 109278

Cruz, E.F. and Valdivia, D. (2011). Performance of industrial facilities in the Chilean earthquake of 27 February 2010. *The Structural Design of Tall and Special Buildings* 20(1), 83-101

Dizhur, D., Simkin, G., Giaretton, M., Loporcaro, G., Palermo, A. and Ingham, J. (2017). Performance of winery facilities during the 14 November 2016 Kaikōura earthquake. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering* 50(2), 206-224

Hall, J.F. (1995). Northridge earthquake January 17, 1994. Reconnaissance Report. EERI, Oakland, USA

Hanson, R.D. (1973). Behavior of liquid-storage tanks. The Great Alaska Earthquake of 1964, 331-339

Haroun, M.A. and Housner, G.W. (1981). Earthquake response of deformable liquid storage tanks. *Journal of Applied Mechanics* 48(2), 411-418

Housner, G.W. (1963). The dynamic behavior of water tanks. *Bulletin of the Seismological Society of America* 53(2), 381-387

Housner, G.W. (1957). Dynamic pressures on accelerated fluid containers. *Bulletin of the Seismological Society of America* 47(1), 15-35

Jacobsen, L.S. (1949). Impulsive hydrodynamics of fluid inside a cylindrical tank and of fluid surrounding a cylindrical pier. *Bulletin of the Seismological Society of America* 39(3), 189-204

Jaramillo, F., Almazán, J.L. and Colombo, J.I. (2022). Effects of the anchor bolts and soil flexibility on the seismic response of cylindrical steel liquid storage tanks. *Engineering Structures* 263, 114353

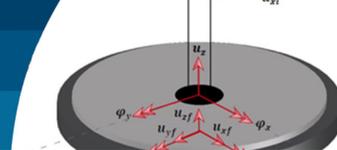
Malhotra, P. (2000). Practical nonlinear seismic analysis of tanks. *Earthquake Spectra* 16(2), 473-492

Malhotra, P.K. and Veletsos, A.S. (1994a). Beam model for base-uplifting analysis of cylindrical tanks. *Journal of Structural Engineering* 120(12), 3471-3488

Malhotra, P.K. and Veletsos, A.S. (1994b). Uplifting analysis of base plates in cylindrical tanks. *Journal of Structural Engineering* 120(12), 3489-3505

Malhotra, P.K. and Veletsos, A.S. (1994c). Uplifting response of unanchored liquid-storage tanks. *Journal of Structural Engineering* 120(12), 3525-3547

Manos, G.C. (1991). Evaluation of the earthquake performance of anchored wine tanks during the San Juan, Argentina, 1977 earthquake. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 20(12), 1099-1114



- Moreno, M., Colombo, J., Wilches, J., Reyes, S. and Almazán, J. (2023). Buckling of steel tanks under earthquake loading: Code provisions vs FEM comparison. *Journal of Constructional Steel Research* **209**, 108042
- Morris, G.J., Bradley, B.A., Walker, A. and Matuschka, T. (2013). Ground motions and damage observations in the Marlborough region from the 2013 Lake Grassmere earthquake. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering* **46**(4), 169-187
- NCh2369 (2003). Earthquake resistant design of industrial structures and facilities. Instituto Nacional de Normalización INN, Santiago, Chile
- NZSEE (1986). Seismic design of storage tanks. New Zealand National Society for Earthquake Engineering, Wellington, New Zealand
- Peek, R. and Jennings, P.C. (1988). Simplified analysis of unanchored tanks. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* **16**(7), 1073-1085
- Steinbrugge, K.V. and Flores, R. (1963). The Chilean earthquakes of May, 1960: A structural engineering viewpoint. *Bulletin of the Seismological Society of America* **53**(2), 225-307
- Tapia, N.F., Almazán, J.L., Valdebenito, N. and Reyes, S.I. (2023). Experimental validation of an energy-dissipating anchoring system for continuously-supported storage tanks. *Structures* **55**, 2324-2340
- Veletsos, A.S. (1974). Seismic effects in flexible liquid storage tanks. 5th World Conference on Earthquake Engineering, vol. 1, 630-639
- Veletsos, A.S. and Yang, J.Y. (1977). Earthquake response of liquid storage tanks. In *Advances in Civil Engineering through Engineering Mechanics*. Annual Special Conference, ASCE, Raleigh NC, USA, vol. 5, 1-24
- Virella, J.C., Godoy, L.A. and Suárez, L.E. (2006). Dynamic buckling of anchored steel tanks subjected to horizontal earthquake excitation. *Journal of Constructional Steel Research* **62**(6), 521-531