

ANÁLISIS SÍSMICO DE TANQUE CILÍNDRICO VERTICAL DE ACERO, CONFORME A LOS CÓDIGOS NORTEAMERICANO Y NEOZELANDÉS

Nelson Saint-Felix López⁽¹⁾, Eduardo Rafael Álvarez Deulofeu⁽²⁾ y Darío Candebat Sánchez⁽³⁾

RESUMEN

Teniendo en cuenta la susceptibilidad que poseen los tanques cilíndricos verticales de acero, ubicados en instalaciones industriales, de sufrir algún nivel de daño ante la ocurrencia de sismos de gran magnitud; y dada la ausencia en la República de Cuba de un código de diseño que permita el análisis hidrodinámico de este tipo de estructuras, se emplean los criterios de diseño que establecen algunas normas vigentes, reconocidas por la comunidad científica internacional. En el presente trabajo se evalúan los resultados del análisis realizado a un tanque cilíndrico vertical de acero, ubicado en la zona suroriental de Cuba, específicamente, en la provincia de Santiago de Cuba; el cual es sometido a excitación sísmica horizontal, tomando como referencia los códigos de diseño API-650 (2020) y SDST NZSEE (2009), a partir de los parámetros que caracterizan la peligrosidad sísmica de la República de Cuba, establecidos en la NC 46 (2017). Dicho análisis se realiza con el objetivo de poder comparar las variaciones que se producen entre los parámetros fundamentales de diseño, permitiendo concluir que, las principales diferencias observadas, se deben en lo fundamental a: (1) modelo mecánico utilizado, (2) filosofía de diseño, (3) fracción de amortiguamiento respecto al crítico de los modos, (4) coeficientes de aceleración espectral de diseño, (5) combinación de los efectos convectivos e impulsivos, entre otros aspectos.

Palabras clave: tanques; análisis; espectro de respuesta; comportamiento

SEISMIC ANALYSIS OF A VERTICAL CYLINDRICAL STEEL TANK, ACCORDING TO THE NORTH AMERICAN AND NEW ZEALAND CODES

ABSTRACT

Considering the susceptibility of vertical cylindrical steel tanks, located in industrial facilities, to suffer some level of damage in the occurrence of earthquakes of great magnitude; and given the

Artículo recibido el 24 de enero de 2022 y aprobado para su publicación el 8 de diciembre de 2024. Se aceptarán comentarios y/o discusiones hasta cinco meses después de su publicación.

- (1) Facultad de Construcciones, Universidad de Oriente, Ave. Las Américas s/n esquina L, Santiago de Cuba, Cuba. C.P. 90100. nelsonsaint@uo.edu.cu
- (2) Facultad de Construcciones, Universidad de Oriente, Ave. Las Américas s/n esquina L, Santiago de Cuba, Cuba. C.P. 90100. ealvarez@uo.edu.cu
- (3) Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas, Calle 17 No. 61 e/ 4 y 6. Vista Alegre. Santiago de Cuba, Cuba. C.P. 90100. dario@cenais.cu

[DOI: 10.18867/ris.113.610](https://doi.org/10.18867/ris.113.610)

absence in the Republic of Cuba of a design code that allows the hydrodynamic analysis of this type of structures, the design criteria established by some current standards, recognized by the international scientific community, are applied. In the present work, the results of the analysis performed to a vertical cylindrical steel tank, located in the southeastern area of Cuba, specifically, in the province of Santiago de Cuba; which is subjected to horizontal seismic excitation, taking as reference the design codes API-650 (2020) and SDST NZSEE (2009), from the parameters that characterize the seismic hazard of the Republic of Cuba, established in NC 46 (2017), are evaluated. Such analysis is carried out with the objective of being able to compare the variations that occur between the fundamental design parameters, allowing to conclude that, the main differences observed, are fundamentally due to: (1) mechanical model used, (2) design philosophy, (3) damping fraction with respect to the critical of the modes, (4) design spectral acceleration coefficients, (5) combination of the impulsive and convective components, among others aspects.

Keywords: tanks; analysis; response spectrum; behavior

INTRODUCCIÓN

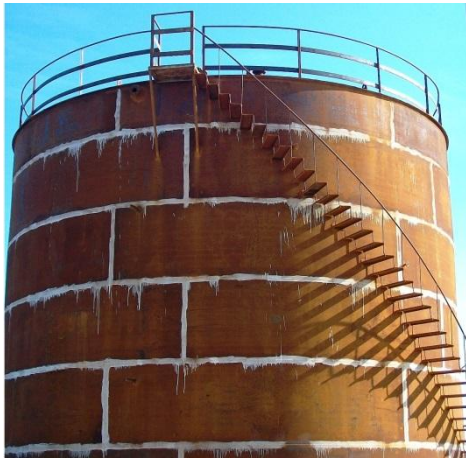
El comportamiento de depósitos cilíndricos verticales de acero, ante la ocurrencia de terremotos de gran magnitud, ha confirmado la susceptibilidad de los mismos ante tales acciones. Según Hernández y Heredia (2000), Compagnoni *et al.* (2012 y 2013), Compagnoni y Martínez (2013), Rivera (2013) y Ascarza *et al.* (2017) en las últimas décadas se han producido numerosas fallas catastróficas de tanques contenedores de líquido, debido a eventos sísmicos severos, tales como, los ocurridos en: 1960 (Chile), 1964 (Alaska), 1994 (California), 1995 (Japón), 1999 (Taiwán), 1999 (Turquía), 2010 (Haití y Chile).

El análisis sísmico de tanques de almacenamiento de líquidos, requiere consideraciones específicas, debido a las fuerzas hidrodinámicas ejercidas por el fluido sobre la pared del tanque, ya que, se ha demostrado que la respuesta sísmica de estos, se ve afectada significativamente por la interacción entre el líquido contenido y la estructura (Livaoglu y Dogangun, 2006), por lo que, dicha interacción debe ser considerada durante el proceso de diseño, a través de la utilización de modelos mecánicos adecuados, capaces de predecir la respuesta de este tipo de estructuras.

El desarrollo de modelos mecánicos, que aproximan la respuesta de tanques, ha simplificado considerablemente el análisis de este tipo de estructuras, ya que, dichos modelos representan el sistema de tanque-líquido mediante un sistema masa-resorte equivalente, lo cual simplifica la evaluación de las fuerzas hidrodinámicas, así como, permite predecir la respuesta en términos de fuerzas resultantes y altura máxima de las olas. Esto ha permitido que algunos códigos de diseño, tales como, API 650 (2020), SDST NZSEE (2009) y Eurocode 8 (2021), adopten dichos modelos mecánicos, para el análisis de tanques de almacenamiento. Aunque las características generales para determinar las fuerzas sísmicas, se mantienen muy similares por los diversos códigos de la práctica ingenieril, su estrategia de aplicación es bastante diferente entre sí, dando como resultado fuerzas sísmicas de diseño diferentes.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para poder establecer una comparación, entre los códigos de diseño escogidos como referencia; se toma como objeto de estudio un tanque cilíndrico vertical de acero, de aproximadamente 2000 m³ de capacidad, con cubierta cónica soportada y anclado mecánicamente a la cimentación. El tanque posee un diámetro de 12.2 m y una altura total de pared igual a 19.3 m. Las paredes cuentan con espesor equivalente de 16 mm, el fondo de 8 mm y el techo de 6 mm (figura 1).



a)



b)



c)

Figura 1. Vistas del tanque objeto de estudio. a) Pared. B) Cubierta cónica. c) Anclaje a cimentación de hormigón armado. Fuente: Fotos del autor

El material del tanque posee un módulo de elasticidad igual a $1.999\text{E}+08 \text{ kN/m}^2$ y el líquido almacenado cuenta una densidad de 800 kg/m^3 (Petróleo). Dicho tanque se sitúa en el municipio Santiago de Cuba (zona 5) de la provincia Santiago de Cuba, de acuerdo con la figura 2, en un suelo tipo D. Los pesos de los distintos componentes del tanque se muestran en la tabla 1

Tabla 1. Pesos

Pesos	u/m	Valor
Cubierta	kN	211.269
Pared	kN	1810.34
Fondo	kN	280.59
Total	kN	2302.20
Fluido	kN	2256.14

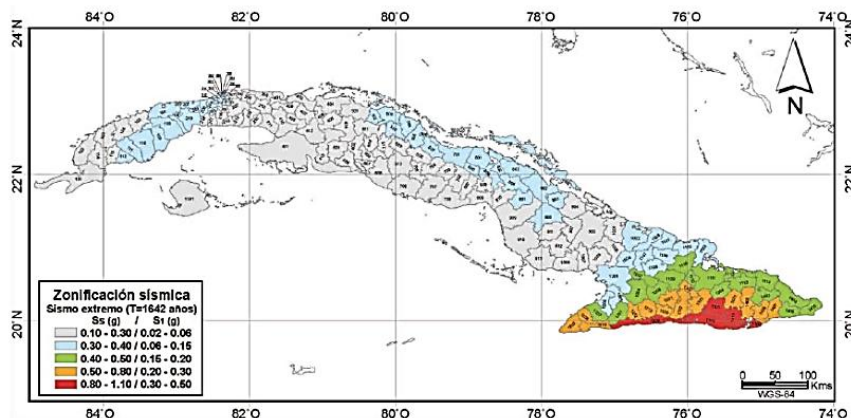


Figura 2. Zonificación sísmica para la República de Cuba. Fuente: NC.46 (2017)

Para la evaluación de la respuesta del tanque objeto de estudio, se elabora una hoja de cálculo, soportada en Excel, en la que se consignan las formulaciones descritas en cada código; permitiendo así, la obtención de los parámetros de respuesta del tanque, de manera rápida y segura, al reducir el tiempo de cómputo y los errores de cálculo. En los cálculos que se realizan, se tienen en cuenta las siguientes consideraciones: (1) los parámetros que caracterizan al peligro sísmico, son los correspondientes al municipio Santiago de Cuba de la provincia Santiago de Cuba, de acuerdo con la tabla 2, (2) se considera, un factor reductor de respuesta igual a dos para el modo convectivo y cuatro para el modo impulsivo, y (3) el coeficiente de importancia es igual a uno.

Tabla 2. Parámetros de peligro sísmico establecidos para el municipio, Santiago de Cuba (NC 46: 2017)

Provincia	Municipio	Cód. municipio	$S_0(g)$	$S_S(g)$	$S_1(g)$	$T_L(s)$	Zona
Santiago de Cuba	Santiago de Cuba	1306	0.513	1.035	0.428	6.0	5

Dónde: $S_0(g)$ es igual a la aceleración pico del suelo para $T=0$ en función de la aceleración g de la gravedad ($g=9,81 \text{ m/s}^2$). $S_S(g)$ es la aceleración espectral para periodo corto (0,2 s) y $S_1(g)$ aceleración espectral para periodo largo (1,0 s), valores obtenidos para una probabilidad de excedencia del 3 % y 50 años de vida útil correspondiente a un periodo de retorno de 1642 años. $T_L(s)$ es el período de transición del periodo largo.

Para realizar el análisis del tanque objeto de estudio, es preciso incorporar las características del sismo local, a los distintos procedimientos de diseño, propuestos en cada código; por lo que se hace necesario la construcción de un espectro elástico de aceleraciones, el cual se representa en la figura 3, que permita caracterizar el sismo en función de parámetros, tales como, zona sísmica, tipo de suelo, periodos de vibración, entre otros. Para ello, se define primeramente un espectro de respuesta, el cual se representa en la figura 3, con un porcentaje de amortiguamiento crítico del 5 %, reducido posteriormente al 2 % para el modo impulsivo y al 0.5 % para el modo convectivo, mediante los factores de amplificación desarrollados por Newmark y Hall (1982).

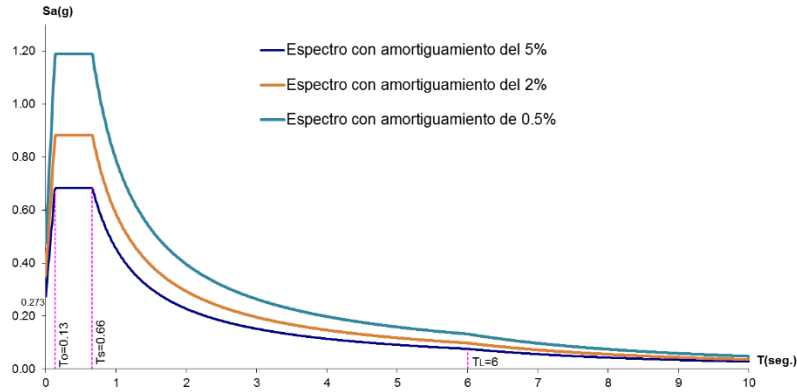


Figura 3. Espectros de aceleraciones

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir de la aplicación de los procedimientos simplificados descritos en los códigos tomados como referencia, en la tabla 3 se muestran los parámetros de respuesta calculados, en términos de, períodos (convectivo e impulsivo), fuerzas resultantes, esfuerzos y altura de la ola.

Tabla 3. Parámetros de respuesta del tanque analizado

Propiedad	Variable	u/m	API-650	SDST NZSEE
Masa impulsiva	m_i	$\text{kN s}^2/\text{m}$	1586.33	1508.70
Altura impulsiva	h_i	m	8.50	8.69
Período impulsivo	T_i	s	0.2	0.2
Masa convectiva	m_c	$\text{kN s}^2/\text{m}$	267.49	275.98
Altura convectiva	h_c	m	16.00	16.212
Período convectivo	T_c	s	3.63	3.63
Altura de la Ola	h_o	m	0.96	0.44
Cortante en la base	V	kN	4284.27	3647.28
Momento de vuelco	M	kN-m	37219.73	28966.73
Esfuerzo de compresión	S_C	kN/m^2	25776.94	15487.10
Esfuerzo tangencial	S_T	kN/m^2	62612.57	57850.68

Al analizar los resultados mostrados en la Tabla 3, se observa que, existen diferencias apreciables, tanto en las fuerzas resultantes (cortante y momento), como en los esfuerzos que se producen en las paredes del tanque, y en la altura máxima de la ola, no ocurriendo de igual manera con el resto de los parámetros, cuyos valores numéricos no difieren de forma sustancial.

Las diferencias observadas, en cuanto a las fuerzas resultantes, se debe fundamentalmente a que, el código de diseño API 650 (2020) se basa en el método de diseño de esfuerzo permisible (ASD), mientras que NZSEE (2009), especifica fuerzas sísmicas de diseño, en el nivel de diseño por resistencia. En el diseño por resistencia, se utilizan cargas factorizadas que corresponden al nivel máximo, es por ello que, en este trabajo, para comparar los parámetros de respuesta sísmica de los tanques evaluados, a través de los códigos, API 650 (2020) y NZSEE (2009), se utiliza un factor de escala de 1.4 (Jaiswal *et al.*, 2007) para convertir fuerzas de diseño sísmico, del nivel de diseño de esfuerzo permisible, al nivel de diseño de resistencia. Otro elemento importante que influye en los valores observados de las fuerzas resultantes, son

los coeficientes de aceleración utilizados por los distintos códigos, en este sentido debemos recordar que el código SDST NZSEE utiliza un valor de amortiguamiento para el modo impulsivo, respecto al crítico del 2 %, en tanto que el código norteamericano API 650 (2020), utiliza un 5 %.

Respecto a las tensiones que se producen en las paredes del tanque, el procedimiento de diseño API 650 (2020) ofrece una forma concisa de determinar las tensiones axiales máximas aplicadas para tanques anclados, en función de la relación de anclaje mínima, además de considerar una parte del contenido del tanque para resistir el momento de vuelco, en tanto, el SDST NZSEE (2009) emplea la teoría de considerar que las paredes del tanque se comportan como una viga en flexión. En cuanto a las tensiones tangenciales (circunferenciales), el código SDST-NZSEE (2009) emplea gráficos para determinar dichas tensiones, así como, para la distribución de momento de flexión a lo largo de la altura del tanque, debido a componentes de presión hidrostática, impulso-rígida y convectiva en función de la relación H/R y R/t, en tanto, el código API 650 (2020) proporciona la distribución de tensiones circunferenciales a lo largo de la pared del tanque, de forma proporcional a la distribución de la presión a lo largo de su altura, la cual se obtiene mediante el método de Housner (1954).

En cuanto a la altura de la ola, las directrices API 650 (2020) y NZSEE (2009) brindan expresiones explícitas para evaluar dicha altura, que se deriva de la suposición de un movimiento de onda de pequeña amplitud. Estos códigos definen la altura máxima de oleaje en función del diámetro del tanque y el coeficiente de cortante en la base en el modo convectivo, que incluye los efectos del período de chapoteo, clasificación del suelo y aceleración máxima del terreno. A diferencia de los otros códigos, NZSEE (2009) recomienda que la contribución de los primeros dos modos de chapoteo, sea considerado en la evaluación de la altura de las olas y se combinen a través del método SRSS (raíz cuadrada de la suma de cuadrados). En términos generales, las diferencias observadas en los valores numéricos obtenidos, radica fundamentalmente en el coeficiente de aceleración utilizado para calcular la altura de derrame.

Al analizar los gráficos que se muestran en las figuras 4-8; los cuales representan el comportamiento de parámetros, tales como, masas efectivas, alturas efectivas y período convectivo; en base a los códigos SDST-NZSEE (2009) y API-650 (2020), es posible constatar la similitud entre los valores obtenidos, a pesar de utilizar diferentes expresiones matemáticas, para su obtención. Los gráficos se han elaborado en función de la relación entre la altura del líquido (H) y el radio del tanque (R). Cuando la relación H/R supera la unidad, se clasifican estas estructuras como tanques altos (Hernández *et al.*, 2018).

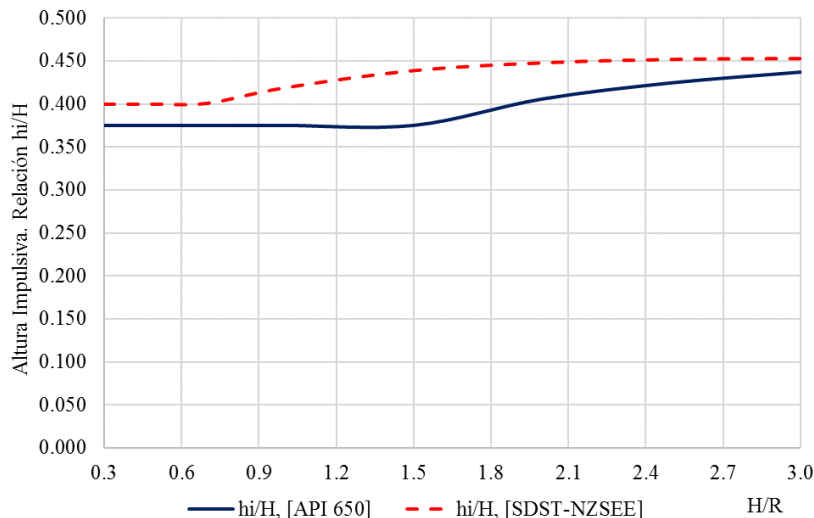


Figura 4. Comparación de las relaciones de altura impulsiva

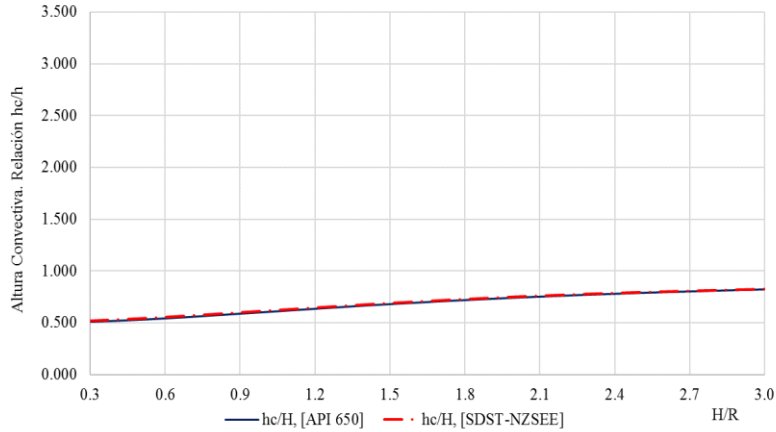


Figura 5. Comparación de las relaciones de altura convectiva

En las figuras 4 y 5 se observa que tanto la relación de altura impulsiva como de altura convectiva manifiestan incrementos a medida que aumenta la relación de aspecto del tanque (H/R). Este comportamiento es consistente con los criterios de ambas normas empleadas y es coherente, por cuanto el incremento de esbeltez del tanque ($H/R > 1$) conlleva a un aumento de ambas alturas impulsiva y convectiva. La relación H/R es significativa en el análisis del comportamiento de estas estructuras. Hernández *et al.* (2018) afirma que:

... se obtuvieron las distribuciones de la presiones hidrodinámicas, presión convectiva y presión impulsiva en tanques altos donde $H/R > 1$, esta relación, modifica el comportamiento de los contenedores con respecto a los tanques anchos $H/R < 1$, dado que la respuesta hidrodinámica convectiva muestra una mayor respuesta en la parte superior del tanque, generando una mayor fuerza horizontal, que reflejaría la contribución de los modos superiores, que debe tomarse en cuenta en el análisis y diseño de estas estructuras, cuando se encuentra totalmente llena... (p. 13).

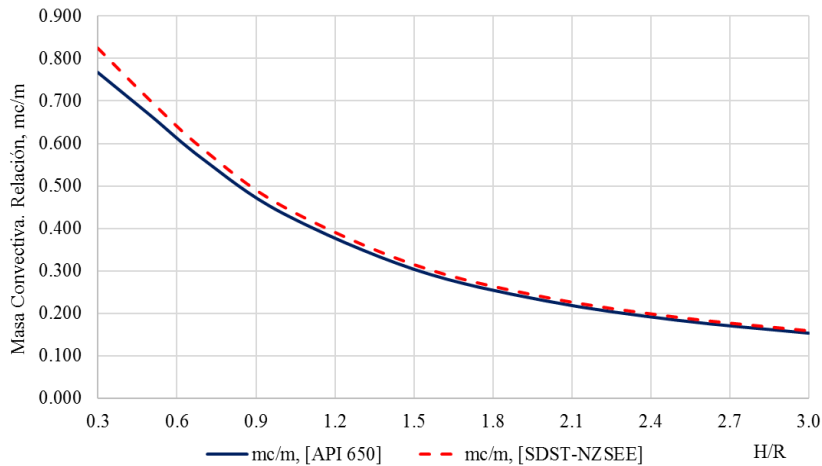


Figura 6. Comparación de las relaciones de masa convectiva

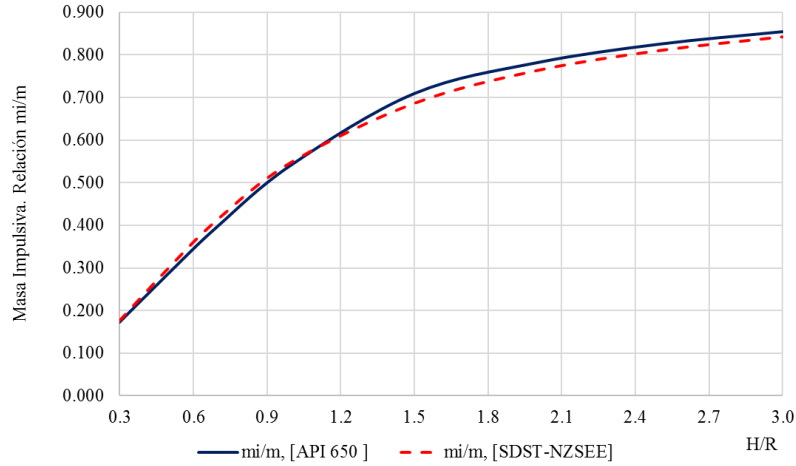


Figura 7. Comparación de las relaciones de masa impulsiva

En las figuras 6 y 7, se puede apreciar que, la porción del contenido del tanque que actúa de forma convectiva, disminuye a medida que aumenta la relación de aspecto del tanque H/R, a la par que el modo impulsivo se vuelve más dominante.

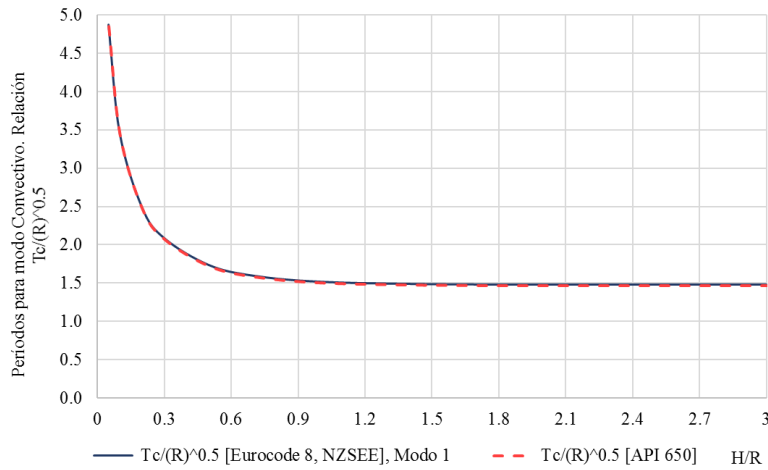


Figura 8. Comparación de la relación de período convectivo

En la figura 8 se representa la variación de la relación del período del modo convectivo respecto a la relación H/R. Al analizar el comportamiento de la curva asociada al período del modo convectivo, se observa que, para un radio de tanque dado, el período del modo convectivo no es sensible a aumentar con la profundidad del fluido, después de que la profundidad del fluido excede el radio del tanque. Además, se ha demostrado que, el período de modo convectivo decrece con el decrecimiento del número de modos.

CONCLUSIONES

Se evaluaron los resultados del análisis realizado a un tanque cilíndrico vertical de acero, ubicado en la zona suroriental de Cuba, específicamente, en la provincia de Santiago de Cuba; el cual se sometió a excitación sísmica horizontal, tomando como referencia los códigos de diseño API-650 (2020) y SDST

NZSEE (2009), a partir de los parámetros que caracterizan la peligrosidad sísmica de la República de Cuba, establecidos en la NC 46 (2017). Se observa que, a pesar de que ambos códigos de diseño, utilizan el mismo método para combinar las componentes hidrodinámicas (SRSS), las diferencias observadas en las fuerzas resultantes en la base del tanque, se atribuyen fundamentalmente al método de diseño empleado y a los coeficientes de aceleración empleados.

El estudio confirma que los valores de períodos convectivos, en tanques cilíndricos verticales, son altos. En este sentido la Asociación de Ingenieros de Nueva Zelanda (NZSEE, 2009), estima que los mismos suelen oscilar entre 4 y 10 segundos.

Las diferencias observadas en los valores de tensiones calculadas, radica en que los códigos de diseño utilizados, emplean diferentes procedimientos para determinar las tensiones de compresión axial y circunferencial.

Independientemente que los códigos analizados utilizan expresiones distintas para la obtención de parámetros, tales como, períodos, altura de la ola, masas y alturas efectivas, las diferencias numéricas no son significativas.

REFERENCIAS

- API Standard 650 (2020)., “Welded Steel Tanks for Oil Storage”, American Petroleum
- Compagnoni, M. E. y Martínez, C. A. (2013)., “Mitigación de daños en tanques contenedores de líquido bajo excitación sísmica, con optimización de costos”, [Microsoft Word - COINI-2013_1 \(utn.edu.ar\)](https://www.utn.edu.ar).
- Compagnoni, M. E., Curadelli, R. O. y Martínez, C. A. (2013)., “Análisis del comportamiento dinámico de tanques cilíndricos bajo excitación sísmica”, Mecánica Computacional, Vol XXXII, 2005-2020.
- Compagnoni, M. E., Curadelli, R. O. y Martínez, C. A. (2012)., “Análisis del comportamiento dinámico de tanques cilíndricos bajo excitación sísmica”, Mecánica Computacional, Vol XXXI, 2219-2230.
- Eurocode 8, UNE EN 1998-4:2021, (2021). Design of structures for earthquake resistance, Part 4: Silos, tanks, and pipelines. Institute, USA. Standard, API 650 (2013), “Welded Steel Tanks for Oil Storage”, American Petroleum Institute, USA.
- G. Ascarza, M. Enzo, R. Pérez, and A. Vladimir (2017)., “Análisis del comportamiento dinámico del agua en tanques apoyados rectangulares y cilíndricos bajo acción sísmica,” Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC).
- Hernández, H. y Heredia, E. (2012)., “Respuesta sísmica de tanques cilíndricos para almacenamiento de líquidos”, Revista de Ingeniería Sísmica”, No. 62, 63-88.
- Hernández, V. M., Sánchez, H y del Valle, C (2018), “Evaluación de presión convectiva en tanques de almacenamiento sujetos a sismos”, XXI Congreso Nacional de Ingeniería Estructural. Campeche, Campeche. Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural.
- Housner, G. W., (1954), “Earthquake Pressures on Fluid Containers”, Eighth Technical Report under Office of Naval Research, Project designation NR-081-095. <https://authors.library.caltech.edu/records/eewgr-ay603>
- Jaiswal, O. R., D. C. Rai and y S. K. Jain, (2007), “Review of Seismic Codes on Liquid-Containing Tanks”, Earthquake Spectra, Vol. 23, No. 1.

- Livaoğlu, R. Dogangun, A, (2006)., “Simplified seismic analysis procedures for elevated tanks considering fluid–structure–soil interaction”, *Journal of Fluids and Structures* 22(3), 421–439.
- Newmark N. M. and y Hall W. J., (1982), “Earthquake spectra and design”, M. S. Agbatian, Ed., Berkley, California: Earthquake Engineering Research Institute, pp. 33-37.
- Norma Cubana NC.46 (2017), “Construcciones Sismo-resistentes. Requisitos básicos para el diseño y construcción”. La Habana, Comité Estatal de Normalización.
- NZSEE, (2009), “Seismic Design of Storage Tanks, Recommendations of a Study Group of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering”
- Rivera, J. (2013), “Cálculo por sismos de recipientes atmosféricos de techo flotante de 200 000 barriles”, Tesis en opción al título de Ingeniero Mecánico electricista. Universidad Nacional Autónoma de México. 157 pp.