



Ciencia en su PC

ISSN: 1027-2887

manuela@megacen.ciges.inf.cu

Centro de Información y Gestión Tecnológica de Santiago
de Cuba

Cuba

Saint Felix-López, Nelson; Calderín-Mestre, Francisco; Álvarez-Deulofeu, Eduardo Rafael
PROCEDIMIENTO PARA EL ANÁLISIS SÍSMICO DE TANQUES CILÍNDRICOS DE ACERO

Ciencia en su PC, vol. 1, núm. 4, 2018, Octubre-, pp. 27-41

Centro de Información y Gestión Tecnológica de Santiago de Cuba
Cuba

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181358509003>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

UDEM  redalyc.org

Sistema de Información Científica Redalyc

Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso
abierto

PROCEDIMIENTO PARA EL ANÁLISIS SÍSMICO DE TANQUES CILÍNDRICOS DE ACERO

PROCEDURE FOR SEISMIC ANALYSIS OF LIQUID STORAGE STEEL TANKS

Autores:

Nelson Saint Felix-López, nelsonsaint@uo.edu.cu¹

Francisco Calderín-Mestre, calderin@uo.edu.cu¹

Eduardo Rafael Álvarez-Deulofeu, ealvarez@uo.edu.cu¹

¹Universidad de Oriente. Santiago de Cuba, Cuba.

RESUMEN

Los tanques verticales, cilíndricos de acero, emplazados en instalaciones industriales, son susceptibles de sufrir algún nivel de daño debido a la ocurrencia de fuertes movimientos sísmicos y por la ausencia en la República de Cuba de un código de diseño que permita el análisis dinámico de este tipo de estructuras. En el presente artículo se muestra un procedimiento para el análisis hidrodinámico de los mismos, basado en el código de diseño API-650 del 2013 (American Petroleum Institute), al cual, para fines prácticos, se le realizan adecuaciones que permiten la utilización de la normativa NC.46:2017, que rige los requisitos básicos para el diseño y construcción de construcciones sismorresistentes en Cuba.

Palabras clave: comportamiento, masa, impulsiva, convectiva.

ABSTRACT

Keeping in mind the susceptibility that possess the vertical tanks, cylindrical of steel, located in industrial facilities, of suffering some level of damage owed to the occurrence of seismic strong movements; and considering the absence in the Republic of Cuba of a design code that allows the dynamic analysis of this type of structures. Presently article shown a procedure, for the hydrodynamic analysis of tanks; based on the design code API-650 of the 2013 (American Petroleum Institute), to the one which, for practical ends they are carried out adaptations that allow the use of normative NC.46:2017, which governs the basic requirements for the design and construction of constructions sismorresistentes in Cuba.

Key words: behavior, mass, impulsive, convective.

INTRODUCCIÓN

El conocimiento adquirido respecto al comportamiento de depósitos, frente a sismos reales, ha corroborado su debilidad ante magnitudes sísmicas medias y altas. Así, se ha registrado un gran número de fallos que, no siendo siempre desastrosos, indican que el proyecto típico estructural de este tipo de estructuras no incluye siempre márgenes adecuados para resistir sismos (García y Fernández, 2000). En las últimas décadas se han observado numerosas fallas en tanques contenedores de petróleo y sus derivados, debido a eventos sísmicos severos, tales como los ocurridos en 1994 en Northridge; 1995, California; 1995 Kobe; 1999, Taiwán; 2010, en Haití; entre otros.

Se ha evidenciado la susceptibilidad que presenta este tipo de estructuras ante la ocurrencia de un sismo de elevada magnitud, a lo que se suma la ausencia de un código de diseño propio de Cuba, que permita el análisis dinámico de las mismas. En este trabajo se determinan los parámetros fundamentales que caracterizan la respuesta dinámica de un tanque cilíndrico vertical de acero, sometido a excitación sísmica horizontal, a partir de la aplicación del código de diseño API-650, 2013, en el que se han incorporado los parámetros que caracterizan el peligro sísmico de la provincia Santiago de Cuba, de acuerdo con el código de diseño NC.46:2017 (Cuba. Comité Estatal de Normalización, 2017). Dichos resultados son comparados con los obtenidos, a partir de la elaboración de un modelo matemático basado en el uso de los elementos finitos, a partir de lo cual es posible validar los resultados.

METODOLOGÍA

La investigación comprendió las siguientes fases:

- Análisis de la evolución histórica y tendencias del comportamiento sísmico de tanques cilíndricos verticales de acero, basado en la interacción fluido-estructura.
- Análisis crítico de diferentes normativas para evaluar los efectos de interacción fluido-estructura en tanques cilíndricos verticales de acero. Identificación y selección de los parámetros que caracterizan el

comportamiento dinámico de tanques cilíndricos verticales de acero ante carga sísmica.

- Propuesta de procedimiento para el análisis hidrodinámico de tanques cilíndricos verticales de acero. (Método sistémico estructural funcional) (Método de elementos finitos).

RESULTADOS

A partir de la revisión crítica realizada a diferentes códigos de diseño que abordan el análisis hidrodinámico de tanques cilíndricos de acero y la posterior identificación de aquellos parámetros que caracterizan la respuesta dinámica de los mismos, ante la acción sísmica, se realiza la propuesta de un procedimiento de análisis, basado en el código de diseño API-650, al cual se le hicieron adecuaciones, debido a la introducción, en el análisis, del código de diseño NC.46:2017.

La respuesta sísmica de un tanque es un fenómeno complejo, dado que la interacción paredes-líquido y las fuerzas inerciales del líquido deben ser consideradas. Sin embargo, esta interacción puede ser simplificada con el concepto generalizado de sistemas de un grado de libertad (SDOF), representando sus modos de vibración principales (Meskouris, Holtschoppen & Butenweg, 2011). Basado en este concepto, el código de diseño API-650 utiliza el modelo mecánico equivalente, establecido por Housner en 1963, el cual considera que la parte media e inferior del contenido líquido (masa impulsiva) se mueve rígidamente con el depósito y que la porción superior restante (masa convectiva) actúa como una masa sujeta a las paredes por medio de resortes, representando la acción del oleaje del líquido, (Ver Figura 1).

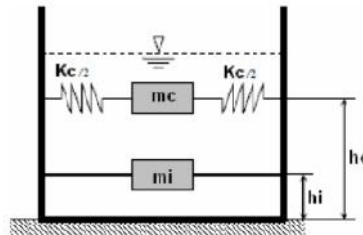


Figura 1. Modelo Mecánico Equivalente según Housner (1963). Fuente: Vidal, 2007

Propiedades del modelo

Los períodos, tanto del modo impulsivo (T_i), como convectivo (T_c), se determinan de acuerdo con las ecuaciones 1 y 2.

$$T_i = (C_1 H / \sqrt{t_u / D}) \cdot (\sqrt{\rho} / \sqrt{E}) \quad (1)$$

$$T_c = 1.8 (0.578 / \sqrt{\tanh(3.68 H / D)}) \sqrt{D} \quad (2)$$

Donde, t_u es el espesor uniforme equivalente de pared del tanque, ρ la densidad del fluido, C_1 el coeficiente para determinar el período impulsivo (Figura 2), K_s el coeficiente de oleaje del período convectivo, D el diámetro nominal del tanque y H el nivel máximo de diseño del líquido.

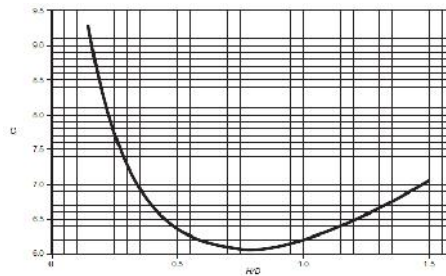


Figura 2. Curva utilizada para determinar el coeficiente C_1 . Fuente: API 650, 2013

Pesos efectivos

Los pesos efectivos W_i y W_c , correspondientes a la contribución del modo impulsivo y convectivo respectivamente, pueden determinarse multiplicando el peso total del líquido (w_p) por las relaciones w_i/w_p y w_c/w_p .

Cuando $D/H \geq 1.33$, el peso efectivo impulsivo se determina de acuerdo con la ecuación 3.

$$W_i = \left(\tanh\left(0.866 \frac{D}{H}\right) / \left(0.866 \frac{D}{H}\right) \right) w_p \quad (3)$$

Cuando $D/H < 1.33$, el peso efectivo impulsivo se determina de acuerdo con la ecuación 4.

$$W_i = \left[1.0 - 0.218 \frac{D}{H} \right] W_p \quad (4)$$

El peso efectivo convectivo se determina de acuerdo con la ecuación 5.

$$W_c = 0.230 \frac{D}{H} \tanh \left(\frac{3.67H}{D} \right) W_p \quad (5)$$

Alturas efectivas

Las alturas efectivas desde el fondo de la base al centro de acción horizontal de las fuerzas sísmicas, originadas por los pesos efectivos, se calculan multiplicando la altura del nivel del líquido (H) por la relación X_i/H y X_c/H , respectivamente.

Cuando $D/H \geq 1.33$, la altura X_i se determina de acuerdo con la ecuación 6.

$$X_i = 0.375H \quad (6)$$

Cuando $D/H < 1.33$, las alturas X_i y X_c se determinan de acuerdo con las ecuaciones. 7 y 8.

$$X_i = \left[0.5 - 0.094 \frac{D}{H} \right] H \quad (7)$$

$$X_c = \left[1.0 - \frac{\cosh \left(\frac{3.67H}{D} \right) - 1.0}{\frac{3.67H}{D} \sinh \left(\frac{3.67H}{D} \right)} \right] H \quad (8)$$

Momento de vuelco

El momento de vuelco debido a la acción sísmica, en la base de la pared del tanque, se determina como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las componentes impulsiva y convectiva multiplicado por los brazos de los respectivos momentos (ver ecuación 9). Dichos brazos de momentos incluyen las alturas efectivas asociadas al modo impulsivo, convectivo y las alturas desde el fondo del tanque al centro de gravedad de las masas de la pared y el techo del tanque.

$$M_{rw} = \sqrt{[A_i(W_i X_i + W_s X_s + W_r X_r)]^2 + A_c(W_c X_c)^2} \quad (9)$$

Donde, A_i es el coeficiente de aceleración del espectro de respuesta de diseño para el modo impulsivo y A_c es el coeficiente de aceleración del espectro de respuesta de diseño para el modo convectivo.

Cortante en la base

El Apéndice E de este código permite calcular el cortante basal sísmico como la combinación de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados (SRSS) de las componentes impulsivas y convectivas. Ver ecuación 10.

$$V = \sqrt{(A_i(W_s + W_r + W_f + W_i))^2 + (A_c W_c)^2} \quad (10)$$

Se observa que la componente impulsiva del cortante incluye efectos, tales como el peso de las paredes (W_s), techo (W_r) y fondo (W_f) del tanque, además de los respectivos pesos impulsivo (W_i) y convectivo (W_c).

Coeficientes de aceleración espectral

Las ecuaciones que se aplican al cálculo de los parámetros de aceleración espectral deben ser aquellas utilizadas para los métodos probabilísticos o métodos mapeados, mostrados en el Apéndice E de la norma API.650 (2013). Por lo tanto, el parámetro de aceleración espectral impulsiva se expresa según las ecuaciones 11 y 12.

$$A_i = S_{DS}(I/R_{wi}) \geq 0.007 \quad (11)$$

Si, $S_1 \geq 0.6$

$$A_i \geq 0.5S_1(I/R_{wi}) \quad (12)$$

El parámetro de aceleración espectral convectiva se expresa según las ecuaciones 13 y 14.

Cuando, $T_c \leq T_L$

$$A_c = KS_{D1}(1/T_c)(I/R_{wc}) \leq A_i \quad (13)$$

Cuando, $T_c > T_L$

$$A_c = KS_{D1}(T_L/T_c^2)(I/R_{wc}) \leq A_i \quad (14)$$

Donde K , es el coeficiente utilizado para ajustar la aceleración espectral de un amortiguamiento del 5 % al 0.5 % ($K = 1.5$, según API-650), S_{DS} es la ordenada de aceleración espectral para períodos cortos, S_{D1} la ordenada de aceleración espectral para períodos largos y T_L el período de transición.

El factor modificador de la respuesta impulsiva R_i , varía entre 3.5 y 4.0 para tanques autosoportados y mecánicamente anclados respectivamente, mientras que el factor modificador de la respuesta convectiva R_{wc} se mantiene constante con un valor igual a 2.0.

Espectro de respuesta

El espectro elástico de respuesta de aceleraciones referido en el código de diseño sismorresistente de Cuba, NC46:2017, muestra la aceleración como fracción de la gravedad para diferentes valores de períodos estructurales, el cual reconoce los efectos de la zonificación sísmica de Cuba y la influencia del perfil de suelo donde se ubica el proyecto. Adicionalmente, este espectro representa al sismo de diseño y obedece a una fracción de amortiguamiento respecto al crítico del 5 %, normalmente aceptado para el hormigón. Las ordenadas espectrales $S_a(T)$ de dicho espectro, para cualquier período de vibración T , se definen por las ecuaciones 15 a la 18.

$$S_a = S_{DS} \left(0.4 + 0.6 \frac{T}{T_0} \right) \quad \text{para } T \leq T_0 \quad (15)$$

$$S_a = S_{DS} \quad \text{para } T_0 < T \leq T_L \quad (16)$$

$$S_a = \frac{S_{D1}}{T} \quad \text{para } T_S < T \leq T_L \quad (17)$$

$$S_a = \frac{S_{D1} \cdot T_L}{T^2} \quad \text{para } T > T_L \quad (18)$$

Para el análisis sísmico de tanques de acero es necesario obtener un espectro de aceleraciones para un amortiguamiento del 2 %, que se utiliza para la masa del líquido, considerada como impulsiva; de igual manera, se debe determinar el espectro de aceleraciones para un amortiguamiento del 0.5 %, que es utilizado

para el resto de la masa del líquido llamada masa convectiva. Para obtener los espectros con amortiguamientos del 2 y 0.5 % se recomienda utilizar los factores de amplificación desarrollados por Newmark y Hall en 1982.

Factor de importancia

De acuerdo con el código de diseño de Cuba, NC.46:2017, el espectro de diseño sísmico es calibrado según la probabilidad de ocurrencia del sismo, seleccionada o requerida. Luego, el factor de importancia se encuentra implícito al seleccionar la probabilidad de ocurrencia de $S_a(T)$. Por tal razón, en el procedimiento que se presenta no se utiliza de forma explícita el factor de importancia.

Combinación de acciones

Para la determinación de las fuerzas resultantes en la base del tanque se recomienda el método de la Raíz cuadrada de la suma de los cuadrados, (SRSS. *Square Root of the Sum of the Squares*), de las componentes impulsivas y convectivas. Esto se justifica debido a la gran diferencia existente entre los períodos principales impulsivo y convectivo.

Modificación de los coeficientes de aceleración de espectro de respuesta

Teniendo en cuenta que el factor de importancia utilizado para determinar el coeficiente de aceleración de espectro de respuesta de diseño, tanto impulsivo (A_i), como convectivo (A_c), se encuentra implícito al seleccionar la probabilidad de ocurrencia de $S_a(T)$, de acuerdo con el código de diseño NC.46: 2017, se proponen las siguientes modificaciones:

Para la determinación del coeficiente de aceleración de espectro de respuesta de diseño impulsivo (A_i), sustituir las ecs. 11 y 12, por las ecuaciones 19 y 20.

$$A_i = K_i \cdot S_{DS} \left(\frac{1}{R_{wi}} \right) \geq 0.007 \quad (19)$$

$$\text{Si } S_1 \geq 0.6 \quad A_i \geq K_i \cdot 0.5 S_1 \left(\frac{1}{R_{wi}} \right) \quad (20)$$

Al analizar las ecuaciones 11 y 12, se puede observar que a diferencia de las ecuaciones 13 y 14 no se incluye ningún coeficiente para ajustar la aceleración espectral; esto sucede porque el código norteamericano utiliza el espectro de aceleraciones con un amortiguamiento del 5 % y por lo tanto el factor K es igual a 1. Luego, de acuerdo con la propuesta realizada en esta investigación, se sugiere utilizar un amortiguamiento del 2 %, basado en la baja capacidad de disipación de energía que poseen los tanques, lo cual implica la necesidad de ajustar la aceleración espectral mediante un factor denominado K_i (ver ecuaciones 19 y 20); para ello se recomienda utilizar los factores de amplificación desarrollados por Newmark y Hall en 1982.

Para el parámetro de aceleración espectral convectiva (A_c) se deben sustituir las ecuaciones 13 y 14, por las ecuaciones 21 y 22.

Cuando, $T_c \leq T_L$

$$A_c = K_c S_{D1} \left(\frac{1}{T_c} \right) \left(\frac{1}{R_{wc}} \right) \leq A_i \quad (21)$$

Cuando, $T_c > T_L$

$$A_c = K_c S_{D1} \left(\frac{T_L}{T_c^2} \right) \left(\frac{1}{R_{wc}} \right) \leq A_i \quad (22)$$

Esfuerzo máximo de compresión en la pared

Para tanques mecánicamente anclados, el esfuerzo máximo de compresión en la base de la pared del tanque se determina de acuerdo con la ecuación 23.

$$\sigma_c = \left(w_t (1 + 0.4 A_v) + \frac{1.273 M_{rw}}{D^2} \right) \left(\frac{1}{1000 t_s} \right) \leq F_c \quad (23)$$

Para tanques autosoportados, en los que se considera que no ocurre levantamiento, el esfuerzo máximo de compresión en la base de la pared del tanque se determina igualmente de acuerdo con la ecuación 23. Si se tiene en cuenta que hay levantamiento, entonces el esfuerzo máximo de compresión se determina a través de la ecuación 24.

$$\sigma_c = \left(\frac{w_t(1 + 0.4A_v) + w_a}{0.607 - 0.18667|J|^{2.3}} - w_a \right) \left(\frac{1}{1000 t_s} \right) \leq F_c \quad (24)$$

Donde, w_t : Peso del tanque y la cubierta actuando en la base, A_v : Parámetro sísmico de aceleración vertical del terreno, M_{rw} : Momento actuante en la base de la pared del tanque, D : Diámetro nominal del tanque, t_s : Espesor nominal de la base del tanque, sin corrosión, J : Proporción de anclaje, (ecuación 25).

$$J = M_{rw}/D^2 [w_t(1 - 0.4A_v) + w_a - 0.4w_{int}] \quad (25)$$

Si, $J \leq 0.785$, (levantamiento no calculado bajo el momento de vuelco sísmico de diseño); $0.785 < J \leq 1.54$ (el tanque se levanta, pero el mismo es estable para la carga de diseño, siempre que se satisfagan los requerimientos de compresión. Tanque autosoportado); $J > 1.54$ (el tanque no es estable y no puede ser autosoportado para las cargas de diseño).

Luego, la tensión de compresión permisible (F_c) se determina de acuerdo con las siguientes consideraciones.

Cuando $(GHD^2)/t^2 \geq 44$, $F_c = 83t_s/D$;

Si, $(GHD^2)/t^2 < 44$, $F_c = 83t_s/(2.5D) + 7.5\sqrt{GH} < 0.5F_{ty}$

Siendo, G : Gravedad específica del líquido, F_{ty} : Límite elástico del material, t_s : Espesor del anillo en contacto con el fondo sin incluir corrosión.

Esfuerzo tangencial

Para este esfuerzo se determinan las fuerzas tangenciales dinámicas impulsiva y convectiva además de la componente hidrostática. Ver ecuaciones 26 a 29.

Para $D/H \geq 1.333$

$$N_i = 8.48 A_i G D H \left[\frac{Y}{H} - 0.5 \left(\frac{Y}{H} \right)^2 \right] \tanh \left(0.866 \frac{D}{H} \right) \quad (26)$$

Para $D/H < 1.333$ y $Y < 0.75D$

$$N_i = 5.22 A_i G D^2 \left[\frac{Y}{0.75D} - 0.5 \left(\frac{Y}{0.75D} \right)^2 \right] \quad (27)$$

Para $D/H < 1.333$ y $Y \geq 0.75D$

$$N_i = 2.6 A_i G D^2 \quad (28)$$

Para cualquier relación D/H

$$N_c = \frac{1.85 A_c G D^2 \cosh \left[\frac{3.68(H-Y)}{D} \right]}{\cosh \left[\frac{3.68H}{D} \right]} \quad (29)$$

La fuerza tangencial en la membrana debido a la componente hidrostática del fluido en la base del tanque se determina de acuerdo con la ecuación 30.

$$N_h = 2.6 (H-1) DG \quad (30)$$

Cuando la aceleración vertical del terreno no necesite ser considerada, el esfuerzo tangencial puede determinarse de acuerdo con la ecuación 31. En caso de ser necesario considerar la aceleración vertical del terreno, se utiliza la ecuación 32.

$$\sigma_T = \sigma_h \pm \sigma_s = \frac{N_h \pm \sqrt{N_i^2 + N_c^2}}{t} \quad (31)$$

$$\sigma_T = \sigma_h \pm \sigma_s = \frac{N_h \pm \sqrt{N_i^2 + N_c^2 + (A_v N_h / 2.5)^2}}{t} \quad (32)$$

Existen dos condiciones que los esfuerzos combinados (σ_T) deben cumplir, no debiendo superar el menor de los siguientes valores:

$$\sigma_T \leq \begin{cases} 1.33 \cdot (0.6 F_y) \\ (0.9 F_y) \cdot 0.85 \end{cases}$$

Altura de la ola

La altura del oleaje se determina a través de la ecuación 33.

$$\delta_s = 0.42 D A_f \quad (33)$$

Para tanques pertenecientes Grupo de uso sísmico I y II, las ecuaciones 34 y 35.

$$\text{Cuando } T_c \leq 4 : A_f = K S_{D1} \left(\frac{1.0}{T_c} \right) \quad (34)$$

$$\text{Cuando } T_c > 4 : A_f = K S_{D1} \left(\frac{4.0}{T_c^2} \right) \quad (35)$$

Para tanques pertenecientes a Grupo de uso sísmico III, las ecuaciones 36 y 37.

$$\text{Cuando } T_c \leq T_L : A_f = K S_{D1} \left(\frac{1.0}{T_c} \right) \quad (36)$$

$$\text{Cuando } T_c > T_L : A_f = K S_{D1} \left(\frac{T_L}{T_c^2} \right) \quad (37)$$

Validación de resultados

Para validar los resultados se toma como objeto de estudio un tanque cilíndrico vertical de acero, con cubierta cónica soportada, anclado mecánicamente a la base, con un diámetro de 36.5 m y una altura de la columna del líquido de 11.608 m. Las paredes cuentan con espesor equivalente de 0.016 m (16 mm) y el fondo y el techo de 0.008 m (8 mm). El material del tanque posee un módulo de elasticidad igual a $2.00E+09 \text{ kN/m}^2$ y el líquido almacenado posee una densidad de 8 kN/m^3 . Como parámetros de peligro sísmico se utilizan los correspondientes a la provincia Santiago de Cuba para un perfil de suelo tipo E. Ver tabla 1. Con dichos parámetros se construye el espectro de respuesta mostrado en la Figura 3, el cual se calcula para amortiguamientos del 2 y 0.5 %, los cuales corresponden a las masas, impulsiva y convectiva, respectivamente. En este sentido se recomienda utilizar los factores de amplificación desarrollados por Newmark y Hall en 1982, para la obtención de dichos espectros.

Tabla 1. Parámetros de peligro sísmico establecidos para Santiago de Cuba

$S_0(g)$	$S_s(g)$	$S_1(g)$	$T_L(seg)$
0.513	1.035	0.428	6.00

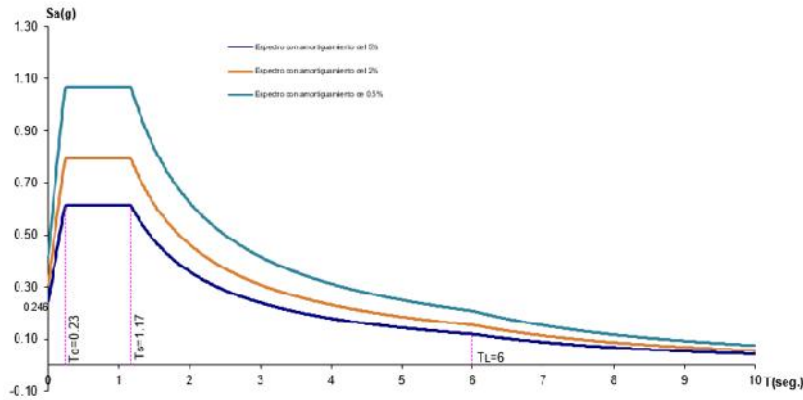


Fig. 3. Espectros de diseño de respuesta sísmica modificados. Fuente:
Elaboración propia

La tabla 2 muestra un resumen de los parámetros globales de comportamiento dinámico, como resultado de la aplicación de los procedimientos simplificados de diseño. También se muestran los resultados derivados del análisis del tanque objeto de estudio, basado en un modelo complejo, desarrollado mediante el método de los elementos finitos, con la ayuda del *software* profesional SAP 2000, en el cual se han introducido los valores de masas convectiva e impulsiva (ligada mediante resortes), a sus respectivas alturas.

Tabla 2. Parámetros de respuesta. Modelo simplificado

Descripción	u/m	API 650	Propuesta	MEF
Masa impulsiva	kN.s ² /m	3540.97	3540.97	ídem
Altura impulsiva	m	4.31	4.31	ídem
Período impulsivo	Seg.	0.64	0.64	0.58
Masa convectiva	kN.s ² /m	5872.75	5872.75	ídem
Altura convectiva	m	6.32	6.32	ídem
Período convectivo	Seg.	7.7	7.7	6.93
Altura oleaje	m	1.12	1.29	-
Cortante en la base	kN	8168.59	9199.74	8095.7712
Momento en la base	kN-m	40353.5	44031.89	44877.70032
Esfuerzo de compresión máximo	kN/m ²	3553.88	3773.55	3396.195
Esfuerzo tangencial máximo	kN/m ²	92814.54	96073.45	105680.795

CONCLUSIONES

1. La similitud observada en los cortantes basales y momentos de vuelco calculados radica en la utilización del mismo método para combinar las componentes hidrodinámicas (SRSS), cuyo empleo se justifica, ya que los valores modales máximos se encuentran lo suficientemente alejados (período convectivo varias veces más grande que el impulsivo).
2. El estudio confirma que los valores de períodos del comportamiento dinámico de tanques son altos (estimados de 4 a 10 segundos por la Asociación de Ingenieros de Nueva Zelanda).
3. Se consideran como ventajas del código API.650 las que se relacionan a continuación:
 - Permite la utilización de los parámetros que caracterizan el peligro sísmico de Cuba (NC.46:2017).
 - Diferencia factores modificadores de la respuesta dinámica del tanque (convectiva e impulsiva).

- Diferencia distintas condiciones de sustentación del tanque (mecánicamente anclados o autosoportados).
- Tiene en cuenta la máxima demanda de aceleración para amortiguamientos diferenciados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

API Standard 650 (2013). *Welded Steel Tanks for Oil Storage*, American Petroleum Institute, 1220 L Street, Washington D.C., USA.

Cuba. Comité Estatal de Normalización (2017). *Norma Cubana NC. 46-2017: Construcciones Sismo-resistentes. Requisitos básicos para el diseño y construcción*. La Habana: autor.

García, J. y Fernández, M., (2000). *Estructuras sometidas a acciones dinámicas*. Barcelona, España: Depósitos. E. Car, F. López Almanza y S. Oliver (Editores).

Meskouris, K., Holtschoppen, B. & Butenweg, C., (2011). *Seismic Analysis of Liquid Storage Tanks*. [aut. libro] C. Grutznig, y otros. Proceedings 2nd International Workshop on Active Tectonics, Earthquake Geology, Archaeology and Engineering. Corinto, Grecia: INQUA-IGCP.

Recibido: mayo de 2018

Aprobado: agosto de 2018