



Notas Técnicas

Crterios para el análisis de vulnerabilidad de tanques de almacenamiento de agua



Financiado por



Australian Government
Department of Foreign Affairs and Trade

© 2016 Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento/Banco Mundial
1818 H St. NW
Washington DC, 20433 EE.UU.
Teléfono: 202-473-1000
Sitio web: www.worldbank.org

Esta obra ha sido realizada por el personal del Banco Mundial con contribuciones externas. Las opiniones, interpretaciones y conclusiones aquí expresadas no son necesariamente reflejo de la opinión del Banco Mundial, de su Directorio Ejecutivo ni de los países representados por este.

El Banco Mundial no garantiza la exactitud de los datos que figuran en esta publicación. Las fronteras, los colores, las denominaciones y demás datos que aparecen en los mapas de este documento no implican juicio alguno, por parte del Banco Mundial, sobre la condición jurídica de ninguno de los territorios, ni la aprobación o aceptación de tales fronteras.

Derechos y autorizaciones

El material contenido en este trabajo está registrado como propiedad intelectual. El Banco Mundial alienta la difusión de sus conocimientos y autoriza la reproducción total o parcial de este informe para fines no comerciales en tanto se cite la fuente.

Cualquier consulta sobre derechos y licencias, incluidos los derechos subsidiarios, deberá enviarse a la siguiente dirección: World Bank Publications, The World Bank Group, 1818 H Street NW, Washington, DC 20433, EE. UU.; fax: 202-522-2625; correo electrónico: pubrights@worldbank.org.

Foto de la portada: Getty Images
Diseño de la portada: FCI Creative

ANTECEDENTES

Como natural consecuencia del estudio de riesgo sísmico realizado a la infraestructura del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA) dentro de la Gran Área Metropolitana de San José, se tiene previsto el desarrollo de estudios específicos sobre algunos componentes del sistema que han mostrado valores muy altos de riesgo. Los reservorios de agua son uno de esos elementos, por lo que la presente Nota Técnica tiene el objetivo de recopilar los aspectos más importantes a tomar en consideración en los análisis estructurales que sean necesarios realizar dentro de un estudio formal de vulnerabilidad.

Este documento ha sido elaborado por Antonio Zeballos, Consultor Sénior en Vulnerabilidad Estructural y Análisis del Riesgo, bajo la dirección y supervisión de Fernando Ramirez-Cortés y Oscar A. Ishizawa, Especialistas Sénior en Gestión del Riesgo de Desastres, como parte de las Notas Técnicas desarrolladas en el marco del Programa para América Latina y el Caribe de Evaluación Probabilística del Riesgo (CAPRA por sus siglas en inglés) del Banco Mundial.

Revisión técnica del texto realizada por Juan Carlos Lam, Especialista en Gestión del Riesgo de Desastres.

OBJETIVO DE LOS ESTUDIOS DE VULNERABILIDAD

La vulnerabilidad es la propensión al daño que tiene un sistema o parte de un sistema. En particular, si hablamos únicamente de la amenaza sísmica, la vulnerabilidad (sísmica) es la propensión a sufrir daño de un sistema sometido a movimientos intensos del suelo. Para efectos del cálculo de pérdidas (o riesgo) la vulnerabilidad debe tomar una forma matemática que permita estimar las pérdidas ante movimientos sísmicos caracterizados por su intensidad; esta representación matemática es la función de vulnerabilidad. Las funciones de vulnerabilidad relacionan el daño con una medida técnica de la intensidad del movimiento del suelo, por ejemplo, la aceleración máxima del suelo, o la aceleración espectral.

Determinar una función de vulnerabilidad no es una tarea sencilla de realizar. En la edición más reciente del Congreso Mundial de Ingeniería Sísmica realizado en Lisboa el 2012, más de 70 trabajos fueron presentados sobre el tema de vulnerabilidad, lo que da una idea de lo actual que resulta esta materia dentro de los ambientes académicos. Estrictamente hablando, una función de vulnerabilidad se podría determinar, de manera teórica, haciendo un modelado no lineal de todo el elemento, y analizando las respuestas de este modelo a distintos registros con distintas intensidades y contenido de frecuencias. Este proceso, además de largo, requiere de una gestión ordenada de gran cantidad de información, mucho mayor que la que normalmente se utiliza en análisis estáticos o dinámicos (modal espectral).

De manera experimental, una función de vulnerabilidad se puede determinar construyendo muchos especímenes del elemento, para ser sometidos en una mesa vibradora, a una gran colección de registros representativos de los movimientos que realmente se esperan en el lugar. Este procedimiento es prácticamente imposible de ejecutarse ya que, para no tener resultados sesgados, los elementos deben ser todos iguales, y deberían desecharse apenas haya alguna incursión en el comportamiento no lineal.

Entre estos dos extremos, hay una gama de posibilidades que pueden ser implementadas. En este documento se expondrán algunos criterios que permitan establecer algunas características del comportamiento de tanques ante movimientos con tres niveles distintos de intensidad, y la manera en que esto puede emplearse para determinar funciones de vulnerabilidad.

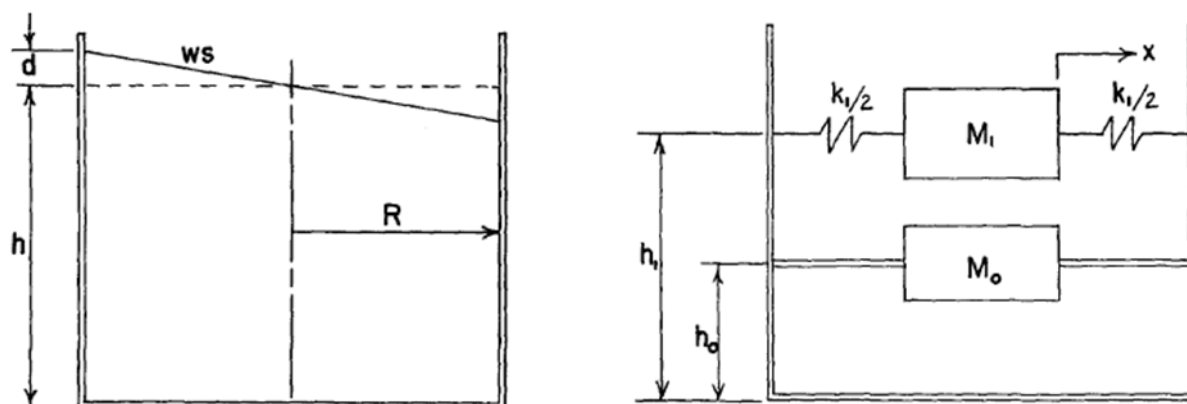
COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE TANQUES

Los tanques son estructuras que almacenan grandes volúmenes de agua, por lo tanto las cargas que deben ser consideradas en el diseño están relacionadas directamente con la existencia de estas masas de agua.

Tanques apoyados sobre el terreno

Desde el punto de vista dinámico, para los tanques apoyados sobre el terreno se debe considerar que la aceleración del suelo causa en el volumen de agua contenida un comportamiento que se modela como dos masas conectadas a las paredes de los tanques a diversas alturas.

Figura tomada de “The Dynamic Behavior of Water Tanks” (George W. Housner, 1963), disponible:



<ftp://ftp.ecn.purdue.edu/ayhan/Amer/The%20dynamic%20behavior%20of%20water%20tanks%20%20Housner.pdf>

La masa M_o es una masa de agua rígidamente unida a las paredes del tanque, es conocida como Masa Impulsiva, se localiza a una altura h_o medido desde la base del tanque. La otra parte de la masa, M_1 , es una masa que está unida mediante elementos elásticos de rigidez total k_1 , localizada a una altura h_1 . Esta masa, conocida como Masa Convectiva, y la rigidez con que se une a las paredes del tanque, ocasionan un movimiento de periodo largo.

De acuerdo con Jacobsen, para tanques circulares de radio R y tirante de agua h :

$$M_o = M \frac{\tanh 1.7R/h}{1.7R/h}$$

$$M_o = M(0.6) \frac{\tanh 1.8h/R}{1.8h/R}$$

$$k_1 = 5.4 \frac{(M_1^2)}{M} \frac{gh}{R^2}, \text{ donde } g \text{ es la aceleración de la gravedad}$$

$$h_0 = \frac{3}{8} h \left\{ 1 + a \left[\frac{M}{M_1} \left(\frac{R}{h} \right)^2 - 1 \right] \right\}, \text{ donde } a = 1.33$$

$$h_1 = h \left[1 - 0.185 \frac{M}{M_1} \left(\frac{R}{h} \right)^2 - 0.56\beta \frac{R}{h} \sqrt{\left(\frac{MR}{3M_1 h} \right)^2 - 1} \right], \text{ donde } b = 2.0$$

$T_w = 2\pi \sqrt{\frac{M_1}{k_1}}$ es el periodo de vibración, y M es la masa total del volumen de agua.

Para tanques rectangulares de longitud 2L y tirante de agua h:

$$M_0 = M \frac{\tanh 1.7h/L}{1.7h/L}$$

$$M_1 = M \frac{(0.83)\tanh 1.6h/L}{1.6h/L}$$

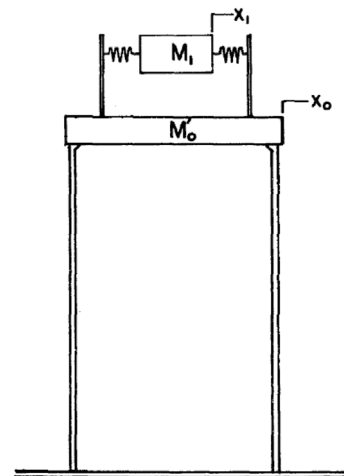
$$k_1 = 3 \frac{(M_1^2) gh}{M L^2}$$

$$h_0 = \frac{3}{8} h \left\{ 1 + a \left[\frac{M}{M_1} \left(\frac{L}{h} \right)^2 - 1 \right] \right\}, \text{ con } a = 1.33$$

$$h_1 = h \left[1 - \frac{1}{3} \frac{M}{M_1} \left(\frac{L}{h} \right)^2 - 0.63\beta \frac{L}{h} \sqrt{0.28 \left(\frac{ML}{M_1 h} \right)^2 - 1} \right], \text{ con } b = 2.0$$

Tanques elevados

Los tanques elevados cuentan con una estructura vertical que permite ubicar el volumen de agua a una altura considerable respecto del terreno, principalmente con el objeto de tener un tirante hidráulico que permita la distribución del agua por gravedad. Desde el punto de vista dinámico, los sistemas de tanques elevados pueden representarse de la manera mostrada en la figura que sigue, en donde M1 es la masa convectiva calculada para el volumen del tanque (como si estuviera asentado sobre el terreno), y M'0 es la masa del sistema de soporte del tanque más la masa impulsiva del tanque M0 (calculada para el volumen del tanque como si estuviera asentado sobre el terreno). El modelo simplificado mostrado en la figura se reduce a un sistema de 2 grados de libertad.



PROPUESTA DEL ACI350

El comité 350 del American Concrete Institute desarrolló el documento Seismic Design of Liquid-Containing Concrete Structures que contiene consideraciones técnicas específicas para el diseño de estructuras de concreto que contienen o transportan líquidos en general, agua en particular.

Sobre la base del desarrollo teórico de Housner, el comité 350 del ACI propone procedimientos específicos de análisis y diseño, que difieren en algunas consideraciones numéricas con el planteamiento original (producto de los avances en la investigación sobre el tema) mostrado en la sección anterior. Para poder realizar un análisis y diseño de un tanque bastaría con consultar los documentos emanados de este comité, sin embargo para comprender el comportamiento dinámico de estas estructuras es recomendable remitirse a la publicación de Housner.

Este documento deberá ser la base de los análisis y revisiones estructurales que se hagan a los tanques de concreto, aunque muchas de estas consideraciones pueden ser aplicables a tanques de otros materiales, principalmente lo que se refiere a la determinación de las acciones sísmicas sobre las estructuras a partir de la sismicidad de la zona.

En general, las fuerzas de sismo deben determinarse de acuerdo a lo establecido en la normativa local (ver Análisis Sísmico), tanto en lo referente a las demandas elásticas como inelásticas (en general no es recomendable determinar espectros con una norma y usar, por ejemplo, factores de reducción por ductilidad de otra norma). Es decir, para el caso específico de Costa Rica, las fuerzas de sismo deben determinarse con estricto apego a lo indicado en el Código Sísmico 2010 o versiones posteriores.

El Código Sísmico de Costa Rica contiene los criterios y procedimientos completos para determinar el Coeficiente Sísmico, C , que representa la fracción de la masa (o peso) de la estructura y contenidos que actúa horizontalmente (fuerza de sismo). En el caso de tanques, la determinación de esta masa, tal como se mostro en el título anterior, debe considerar el comportamiento dinámico del contenido de agua, para lo cual el ACI 350 propone lo siguiente:

Tanques rectangulares

$$\frac{W_i}{W_L} = \frac{\text{Tanh}[0.866(L/H_L)]}{0.866(L/H_L)}$$

$$\frac{W_c}{W_L} = 0.264(L/H_L)\text{tanh}[3.16(H_L/L)]$$

Donde W_i es la masa impulsiva, W_c es la masa convectiva y W_L es la masa total del líquido contenido. En las ecuaciones anteriores, L es la dimensión interior del tanque, medido en el sentido paralelo a la acción del sismo, y H_L es la altura del tirante de agua.

La altura (h_c la masa convectiva, y h_i la masa impulsiva) en que se sitúa cada una de estas masas (y por lo tanto, donde se debe ubicar la fuerza de sismo) se determina con las siguientes fórmulas:

Para tanques donde

$$\frac{L}{H_L} < 1.333, \frac{h_i}{H_L} = 0.5 - 0.09375 \left(\frac{L}{H_L} \right)$$

Para tanques donde

$$\frac{L}{H_L} \geq 1.333, \frac{h_i}{H_L} = 0.375$$

$$\frac{h_c}{H_L} = 1 - \frac{\cosh[3.16(H_L/L)] - 1}{3.16(H_L/L)\sinh[3.16(H_L/L)]}$$

La rigidez que conecta la masa convectiva con las paredes del tanque se asocia a un periodo T_c igual a:

$$T_c = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{L}$$

Donde

$$\lambda = \sqrt{3.16g \tanh[3.16(H_L/L)]}$$

Tanques circulares

En tanques circulares de diámetro D , las masas convectiva, impulsiva y sus correspondientes alturas se calculan de la siguiente manera:

$$\frac{W_i}{W_L} = \frac{\tanh[0.866(D/H_L)]}{0.866(D/H_L)}$$

$$\frac{W_c}{W_L} = 0.230(D/H_L) \tanh[3.68(D/L)]$$

Para tanques donde

$$\frac{D}{H_L} < 1.333, \frac{h_i}{H_L} = 0.5 - 0.09375 \left(\frac{D}{H_L} \right)$$

Para tanques donde

$$\frac{L}{H_L} \geq 1.333, \frac{h_i}{H_L} = 0.375$$

$$\frac{h_c}{H_L} = 1 - \frac{\cosh[3.68(H_L/D)] - 1}{3.68(H_L/D)\sinh[3.68(H_L/D)]}$$

La rigidez que conecta la masa convectiva con las paredes del tanque se asocia a un periodo T_c igual a:

$$T_c = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{D}$$

Donde

$$\lambda = \sqrt{3.68g \tanh[3.68(H_L/D)]}$$

Por lo general, el periodo de la masa convectiva, T_c , es bastante más largo que el periodo de la masa impulsiva, que suele ser bastante corto. Esta diferencia en los periodos de vibrar hace necesario el empleo de algún método de combinación para calcular fuerzas de diseño máximas. Para ello, luego de haber calculado las fuerzas de sismo para cada una de las masas de agua (P_i y P_c), además de la fuerza de sismos de la masa de las paredes del tanque y del techo (P_w y P_r) el cortante en la base de las paredes del tanque se puede obtener aplicando una variante de la regla de combinación modal de raíz cuadrada de suma de cuadrados (Square Root of Sum of Squares, en inglés):

$$V = \sqrt{(P_i + P_w + P_r)^2 + P_c^2}$$

CONSIDERACIONES GENERALES DE ANÁLISIS ESTRUCTURAL

El análisis estructural de tanque, sean apoyados o elevados, es en realidad un proceso teóricamente simple, pero que se complica por la forma y comportamiento del tanque. Sobre todo en tanques de pared delgada como los tanques metálicos, en donde debe tomarse en cuenta la posibilidad de fallas por inestabilidad de las paredes. Las cargas que deben considerarse en el análisis estructural son las siguientes:

1. Cargas muertas o permanentes. Son todas las cargas que actuarán de manera permanente en la estructura. Deben considerarse cargas muertas el peso propio de los elementos estructurales, el peso de elementos divisorios o de acceso, como barandas o muros que no cumplen funciones estructurales pero que permiten el funcionamiento del tanque, equipos permanentes en el tanque, rellenos y materiales de acabado superficial. El Código Sísmico de Costa Rica 2010, señala que el peso de los líquidos contenidos en depósitos debe considerarse carga permanente, aunque no es claro cómo considerar los empujes laterales que éste produce. Sin embargo, dado que los empujes existen en la misma medida en que existe el peso, se le debe considerar carga permanente.
2. Cargas vivas o temporales. Son cargas que se presentarán de manera variable en el tiempo sobre la estructura. Estas cargas, normalmente asociadas a la ocupación o funcionalidad del elemento, suelen estar normadas por los reglamentos para construcciones o elementos convencionales, que no es el caso de los tanques. Debe tenerse en cuenta que los tanques de agua no son construcciones dentro de las cuales se permitan actividades humanas, sin embargo siempre será necesario considerar algún valor de carga temporal para los techos en tanques cubiertos, y en andadores o pasillos.
3. Cargas eventuales. Son cargas que se presentan aleatoriamente durante la vida de las construcciones, y que normalmente están asociadas a fenómenos naturales extremadamente variables. Son cargas eventuales los sismos, los vientos extremos, las fuerzas causadas por deslizamientos de tierra, la caída de lluvia o granizo, etc. Para el caso del análisis de tanques de agua en Costa Rica, particularmente en la GAM, se deberá prestar especial atención a las fuerzas producidas por sismos. El Código Sísmico de Costa Rica especifica 3 niveles de amenaza para el análisis y diseño estructural:
 - a. Un sismo fuerte, que se manifiesta con una intensidad que tiene una probabilidad del 10% de ser excedida en 50 años, lo que corresponde a un periodo de retorno de 475 años.
 - b. Sismo extremo, es aquel que tiene una intensidad 25% mayor a la del sismo fuerte. No se especifica la probabilidad de excedencia ni el periodo de retorno, pero para lugares específicos y teniendo un estudio de amenaza sísmica bien desarrollado se puede determinar a qué periodo de retorno corresponde.
 - c. Sismo moderado, tiene una intensidad 25% menor a la del sismo fuerte, aunque tampoco se indica a que periodo de retorno corresponde.

En todos los casos, la intensidad a que hace referencia el Código Sísmico debe ser la aceleración máxima del terreno, o PGA, por sus siglas en inglés.

ANÁLISIS SÍSMICO

El Código Sísmico de Costa Rica proporciona información suficiente para hacer análisis y diseño estructural de tanques resistentes a sismos. De acuerdo con este código, los tanques se clasifican como Edificaciones o instalaciones esenciales, para las cuales se debe considerar un factor de importancia $I=1.25$. El incluir este factor dentro del análisis implica que el periodo de retorno para el cuales se diseñan estas estructuras ya no es 475 años, sino que es un periodo mayor indeterminado. Lo mismo ocurre con los sismos moderados y los sismos extremos, aunque para ellos tampoco estaba determinado el periodo de retorno.

El Código establece que para estructuras de clase A, “...ante sismos extremos ($I=1.25$ según artículo 2.3 y tabla 4.1), además de protegerse la vida de ocupantes y transeúntes, se debe minimizar la ocurrencia de daños en la estructura y en aquellos componentes y sistemas no estructurales capaces de interrumpir seriamente los servicios y funciones propios de la edificación.” Esto quiere decir que el código limita seriamente la posibilidad de que los tanques incursionen en el rango de comportamiento no lineal. No es claro en el código la manera en que esto deba considerarse cuando se analiza un tanque pero puede tomarse alguna de estas dos alternativas:

1. Considerar en el análisis un límite de desplazamiento de la parte superior del tanque muy reducido, acorde con el comportamiento esperado cuando se trata de limitar la cantidad de daño en el elemento. Este sería el camino directo, sin embargo será necesario buscar en la literatura estos límites, apropiados a cada caso de análisis.
2. Considerar un valor de reducción por comportamiento no lineal bajo. Esto no implica que el sistema o material empleados en el tanque sean frágiles, sino que reduciendo la probabilidad de incursionar en el rango de comportamiento no lineal se reducirá, de manera indirecta, el daño en el elemento. Este sería un camino indirecto pero bastante intuitivo de seguir.

El código no especifica ninguna consideración especial para los sismos fuertes o sismos moderados, sin embargo, dado que para sismos extremos lo que se espera es un comportamiento no lineal moderado, para sismos fuertes el comportamiento debe ser prácticamente elástico lineal, con muy pocas incursiones en el comportamiento no lineal del material, mientras que para sismos moderados el comportamiento debe ser completamente elástico.

ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD SÍSMICA DE TANQUES

Como ya se discutió antes, aunque el objetivo de un estudio o análisis de vulnerabilidad debería ser obtener una función de vulnerabilidad o una de fragilidad, es complicado llegar a obtener este grado de precisión dentro de un proyecto de evaluación estructural. Por esta razón se propone que el estudio de evaluación estructural proporcione información al menos de tres estados límite de los tanques, y una descripción sucinta del estado de daños que se espera en cada uno de ellos. Los estados límite que se propone son los siguientes (ver FEMA 273 y HAZUS MR4 Technical Manual):

1. Evento con probabilidad de excedencia de 39% en 50 años, o 100 años de periodo de retorno.
2. Evento con probabilidad de excedencia de 10% en 50 años, ó 475 años de periodo de retorno (es lo usualmente especificado en los códigos de diseño sísmico).
3. Evento con probabilidad de excedencia de 2% en 50 años, ó 2475 años de periodo de retorno.

En particular, se espera que el estudio relacione los resultados de los análisis estructurales de cada uno de estos casos, con el comportamiento esperado y determinados en el mismo documento (HAZUS MR4 Technical Manual), que son:

- a. Daño mínimo. El tanque no pierde contenido ni funcionalidad. Pueden aparecer pequeñas grietas y algunos daños menores en el techo debido al “chapoteo” del agua.
- b. Daño moderado. El tanque puede tener daño considerable pero muy poca pérdida de su contenido. En tanques de acero se puede presentar inestabilidad de las paredes (pata de elefante) sin pérdida de contenido.
- c. Daño extenso. El tanque queda severamente dañado y debe ser puesto fuera de servicio. En tanques de acero puede haber fallas tipo pata de elefante y en tanques de concreto pueden presentarse agrietamientos grandes y fallas por corte.
- d. Daño total. El tanque colapsa y se pierde todo el contenido.

En todos los casos, el consultor debe hacer un esfuerzo por relacionar el estado de daño con un valor de pérdida relativa, β , representativo para estado límite.



GRUPO BANCO MUNDIAL
Desarrollo Social, Urbano y Rural y Resiliencia



CAPRA

Financiado por



GFDRR
Global Facility for Disaster Reduction and Recovery



Australian Government
Department of Foreign Affairs and Trade