

La porción relativa de agua que trabaja en las modalidades de impulsión y convección, respectivamente, cambia dependiendo de la geometría del tanque. Mientras más pequeña sea la proporción de diámetro con relación a altura del tanque (es decir, tanques altos y delgados), más agua trabajará en la modalidad de impulsión. Mientras más grande sea la proporción de diámetro con relación a altura (es decir, tanques pequeños y anchos), más agua trabajará en la modalidad de convección. Las porciones relativas de agua que trabajan en cada modalidad se muestran en la figura 3-56 (AWWA 1984).

El desplazamiento oscilatorio del agua debe ser tomado en cuenta en el diseño del tanque, ya que puede impartir cargas sobre el techo del tanque. El techo puede o no estar diseñado para resistir estas cargas. Para mitigar este tipo de daño, proporcione una mayor altura entre el nivel de agua y el borde del tanque para resistir este desplazamiento oscilatorio (Kennedy/Jenks/Chilton 1990a). Las pruebas empíricas y análisis dinámicos recientes han mostrado que las alturas reales del oleaje pueden exceder las alturas calculadas por un factor de hasta 1,8.

Historia de las normas de diseño de tanques de acero

En 1935 se estableció por primera vez una norma para el diseño de tanques de acero en el *Journal AWWA*, pero no incluía disposiciones para sismos.

A finales de 1950 y comienzos de 1960, Housner (1963) realizó análisis dinámicos del movimiento oscilatorio de tanques para la industria de energía nuclear.

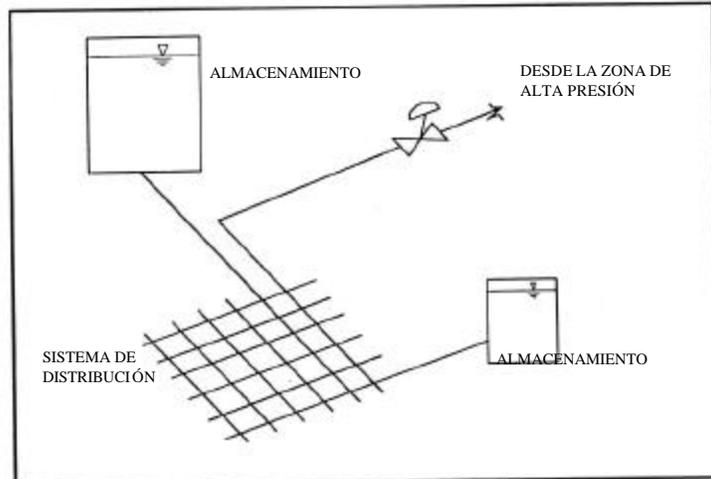
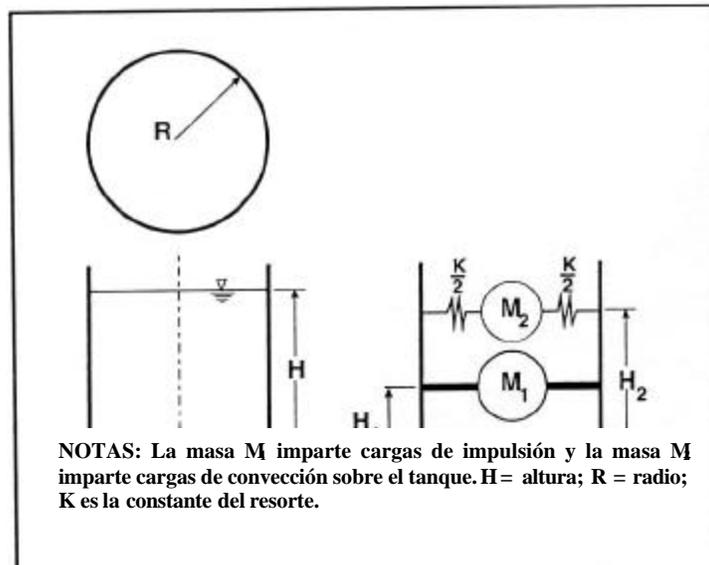


Figura 3-54 La evaluación del almacenamiento/abastecimiento a una zona de presión debe considerar el número, capacidad y ubicación de los tanques de almacenamiento.



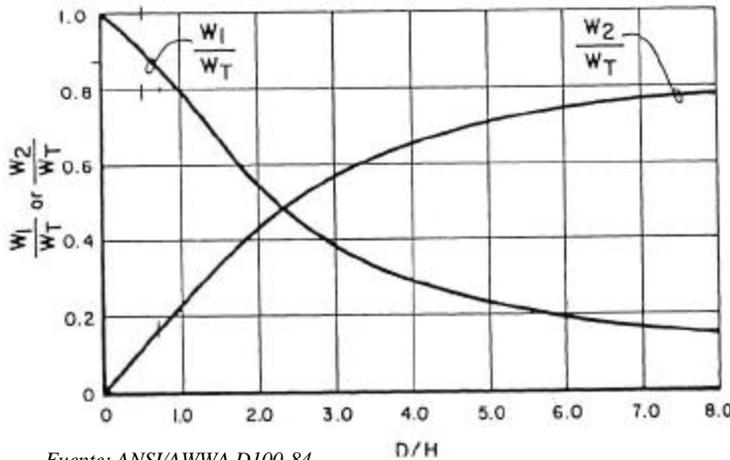
NOTAS: La masa M_1 imparte cargas de impulsión y la masa M_2 imparte cargas de convección sobre el tanque. H_1 = altura; R = radio; K es la constante del resorte.

Figura 3-55 Esquema del modelo de un tanque que muestra su respuesta en caso de sismos.

Antes de la versión de 1979 de la norma AWWA D100, *Standard for Welded Steel Tanks for Water Storage* (Norma para tanques de acero soldado para el almacenamiento de agua), el diseño sísmico era tomado en cuenta por el comprador especificando cargas laterales estáticas. La norma AWWA D100-79 incluía disposiciones opcionales para el

diseño sísmico en el Apéndice A, las cuales fueron incorporadas a la norma en 1984 y se volvieron obligatorias para la zona sísmica 4 (designada por el UBC), y opcionales para las zonas sísmicas 1, 2 y 3.

En 1991, el UBC incluyó requisitos para el diseño de tanques que, en algunos casos, son más exigentes que la norma AWWA.



Fuente: ANSI/AWWA D100-84

Figura 3-56 La distribución del peso (w) del tanque entre las cargas de impulsión y convección está en función del diámetro (D) y altura (H) del tanque.

Mecanismos de falla y alternativas de mitigación

Mecanismos de falla generales. Los mecanismos descritos en esta sección se aplican a todos los tipos de tanques descritos.

Las conexiones rígidas de tuberías son vulnerables si un tanque se mueve o si ocurre movimiento diferencial entre el tanque y el suelo o la tubería enterrada. Los tanques pueden estar anclados o se puede añadir mayor flexibilidad a la tubería. Los tanques de acero no anclados o anclados inadecuadamente pueden girar completamente (ver figuras 3-57 y 3-58). Si la conexión al tanque se hace por uno de sus lados, brinde flexibilidad en la conexión usando dos uniones flexibles fijadas en serie, o sistemas patentados de tuberías flexibles.

Si la conexión es en la base del tanque, la pared del tanque y la conexión deben estar a una distancia suficiente para que la base del tanque no se flexione. Los tanques de acero son flexibles y cuando la pared del tanque se levanta la base del tanque se flexiona. Sólo se moverá la sección de la base más cercana a la pared. También se puede



Fuente: D.B. Ballantyne.

Figura 3-57 Empalme que se rompió en tanque no anclado en Scotts Valley (Calif.) luego del terremoto de Loma Prieta.

brindar flexibilidad a la conexión de la base al añadir una banda de expansión para resistir el levantamiento. Para más información, consulte la norma AWWA D100-84.

En suelos flexibles, puede ocurrir asentamiento diferencial entre el tanque y las tuberías de conexión por lo que debe brindarse flexibilidad a la unión entre ambos.

Los techos y las columnas de soporte pueden sufrir daños debido al efecto oscilatorio del agua (figura 3-59). Este movimiento oscilatorio impartirá cargas laterales sobre las columnas de soporte, y fuerzas de empuje vertical sobre los techos de los tanques, particularmente alrededor de la periferia. Además, los techos de concreto pesados pueden sufrir daños si la estructura no ha sido diseñada para transferir las fuerzas laterales del techo a las paredes y cimientos del tanque.

Todos los tanques y reservorios pueden estar expuestos a fallas geotécnicas y de cimentación. El asentamiento irregular es un problema, particularmente cuando una parte del tanque está apoyada sobre suelo inalterado y la otra sobre un relleno. Los deslizamientos también representan una situación a ser considerada.

La licuefacción puede ser un problema si el sitio es susceptible a la licuefacción. Esto es inusual ya que los tanques y reservorios generalmente están ubicados en terrenos altos donde la amenaza de la licuefacción es, por lo general, baja.

Los reservorios de tierra construidos con bermas de tierra pueden ser susceptibles a la licuefacción, particularmente si se filtra agua del reservorio, lo cual incrementará el nivel freático. La adición de un revestimiento puede detener las filtraciones, reducir el nivel freático y disminuir la amenaza de la licuefacción.

Mallas de acero y concreto post-tensado. Los tanques revestidos de mallas de acero y concreto post-tensado son vulnerables a los sismos si la armadura se ha corroído, o si las uniones de techo-pared o pared-base no han sido diseñadas para resistir las cargas sísmicas.



Fuente: D.B. Ballantyne.

Figura 3-58 Conexión reparada en el tanque de Scotts Valley.



Fuente: Holly Cornell.

Figura 3-59 Daño al techo del tanque de acero debido al movimiento oscilatorio del contenido producido por el terremoto de Loma Prieta.

La malla de acero de los tanques de concreto ha mostrado una tendencia a corroerse, lo cual ha producido la ruptura del tanque. Esto ha ocurrido principalmente en tanques de principios de los sesenta (figuras 3-60_A y 3-60_B), pero también se ha producido en construcciones más modernas. Los indicios de deterioro de un tanque son agrietamiento vertical o desmoronamiento del concreto, o decoloración debido a las filtraciones del tanque. Para mitigar estos problemas, primero se detuvieron las fugas usando revestimientos, luego se volvió a envolver el tanque con mallas metálicas o bandas de acero, y finalmente, se lo cubrió con un revestimiento protector.

Las juntas de techo-pared y de pared-base del tanque deben ser diseñadas para transferir cargas laterales de corte sísmico. Los diseños modernos, que toman en cuenta las cargas sísmicas, usan cables sísmicos entre la pared y la base. Estos cables permiten que las paredes se muevan para soportar las deformaciones producidas por el llenado del tanque y para soportar la expansión y contracción térmicas. Asimismo, limitan el movimiento en un terremoto. Los tanques diseñados antes de los setenta no usaron cables sísmicos y su conexión de pared-base puede romperse en caso de sismo. Para tanques parcialmente enterrados, la presión pasiva del terreno debe prevenir este tipo de ruptura por corte. Una solución es colocar una viga collar armada alrededor de la periferia para limitar el deslizamiento.

Tanques de acero a nivel del suelo. Esta categoría de tanques generalmente no se encuentra anclada. Cuando su proporción de altura con relación a diámetro es menor que 0,5, usualmente no serán vulnerables a daños en las paredes, pero es más probable que sufran daños al techo debido al movimiento oscilatorio del agua. Los tanques pequeños no anclados pueden deslizarse (ver figuras 3-61 y 3-62).

Cámaras de presión de acero. Estos tanques pueden o no estar anclados. Generalmente, las cámaras de presión tienen una proporción de altura con relación a diámetro mayor que los tanques a nivel del suelo ya descritos. Dichos tanques pueden ser vulnerables al pandeo tipo “pie de elefante” causado por las fuerzas hidráulicas de impulsión y convección (ver figuras 3-63 y 3-64). Los tanques no anclados pueden comenzar a girar y fallar por compresión al sufrir un impacto. En casos extremos, los tanques pueden fallar en o cerca de la base (figura 3-65).

Los anclajes adecuados evitarán el levantamiento (figura 3-66) y los anclajes inadecuados pueden estirarse. Los pernos de los anclajes especialmente diseñados para deformarse absorben energía y reducen el daño adicional.

Las soluciones estructurales incluyen agregar o reforzar el sistema de cimentación con anclajes para que resista el levantamiento, o fortalecer la base del tanque. La figura 3-67 muestra una alternativa para reforzar el sistema de cimentación con anclajes. Asegúrese de revisar que la estructura del tanque tenga la capacidad suficiente para transferir cargas y resistir el pandeo local. Asimismo, limite el movimiento de flexión en la conexión con anclajes de la cáscara. Los costos para reforzar tanques que tienen una estructura accesible varían entre US\$75.000-\$200.000 por tanque para tanques con una capacidad de entre 0,5 a 5 mil gal (1,9 a 18,9 m³). La adecuación de tanques especiales que tienen una fachada arquitectónica puede ser más costosa.

El reforzamiento de la base hace que el tanque trabaje más como un cuerpo rígido en lugar de flexionarse cuando ocurre un sismo. El tanque luego puede depender del peso del agua contenida para evitar que se voltee. Esto se puede lograr al instalar una losa de concreto fuertemente reforzado dentro de la base del tanque para permitir la transferencia de carga desde la pared del tanque hasta la losa.

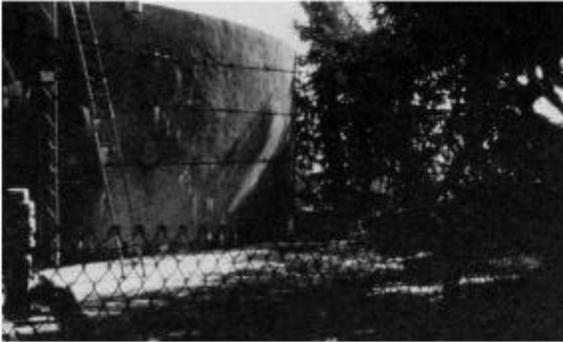
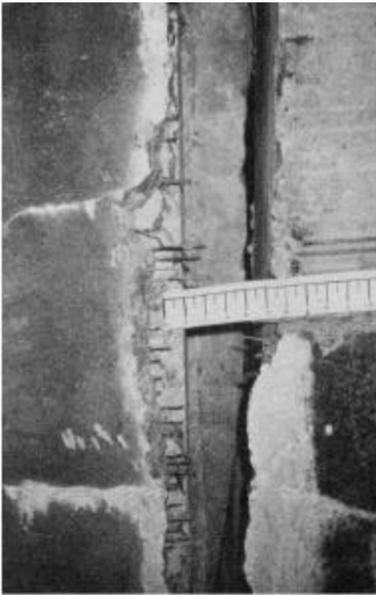


Figura 3-60a



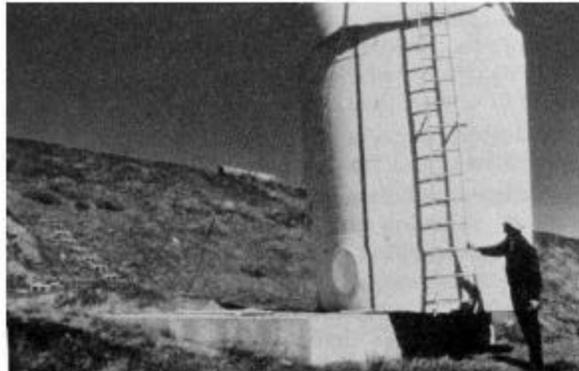
Fuente: Anshel Schiff.

Figura 3-60b Tanque con malla de acero de la década de los sesenta que falló en el terremoto de Loma Prieta.



Fuente: D.B. Ballantyne.

Figura 3-61 Tanque no anclado que se deslizó en Moin, Costa Rica.



Fuente: Los Angeles Department of Water and Power.

Figura 3-62 Tanque de productos químicos no anclado que se deslizó en San Fernando, California.



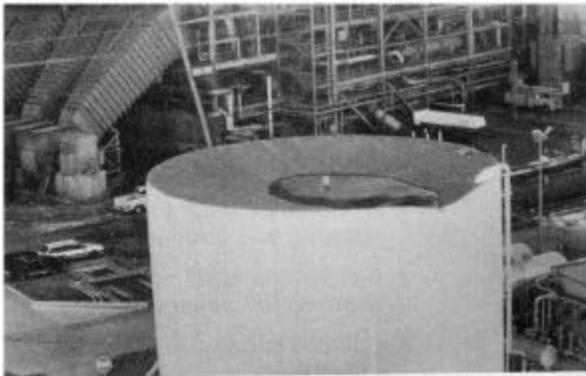
Fuente: M.J. O'Rourke.

Figura 3-63 Tanque no anclado de 400.000 gal (1,5 m³) que giró y se partió, desarrollando pando tipo “pie de elefante” y rompiéndose en la discontinuidad entre las placas únicas y dobles en la cáscara (terremoto de Landers, California).



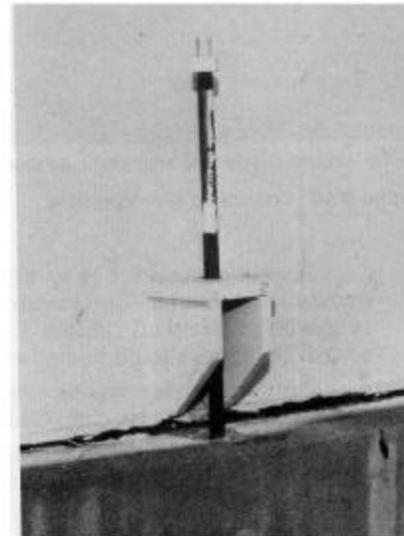
Fuente: D.B. Ballantyne.

Figura 3-64 Tanques no anclados que desarrollaron pando de tipo “pie de elefante” al extremo que la cáscara se dobló hacia atrás sin romperse en Moin, Costa Rica.



Fuente: Alan Porush.

Figura 3-65 Conexión de pared-base de tanque no anclado con rotura y vaciado de su contenido tan rápidamente que la parte superior implosionó.



Fuente: William Gates.

Figura 3-66 Perno de anclaje que se extendió luego del terremoto de San Francisco.

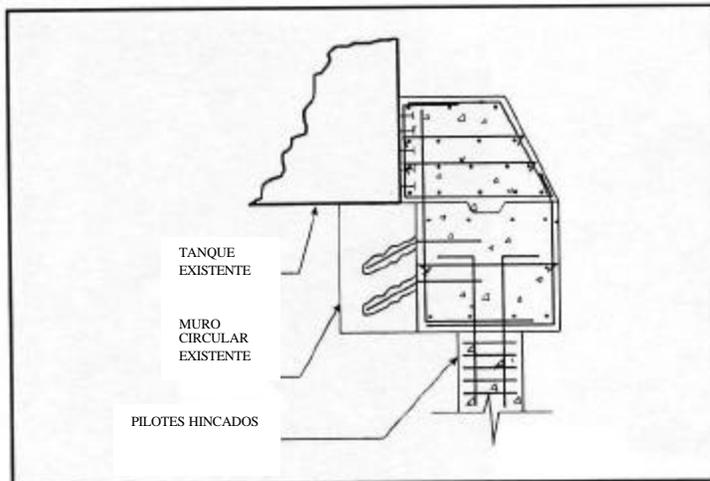
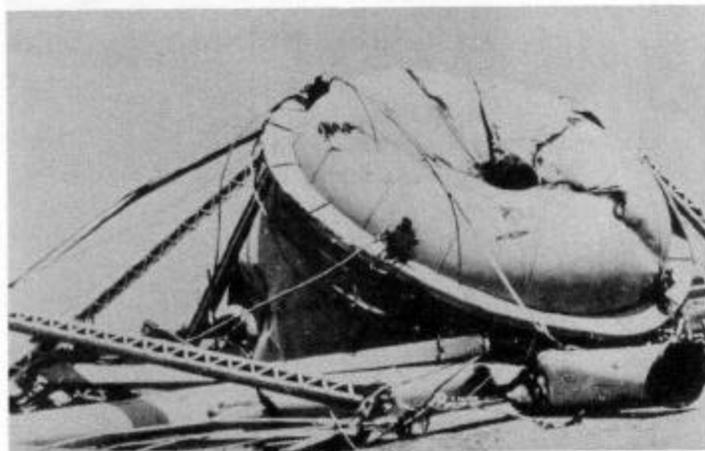


Figura 3-67 Diseño para tanque de concreto que se reforzó usando pilotes hincados



Fuente: National Oceanic and Atmospheric Administration

Figura 3-68 Tanque elevado que colapsó

Tanques elevados. Los tanques elevados pueden ser vulnerables como resultado de cimientos inapropiados, dimensión inadecuada de las columnas o arriostamiento transversal deficiente (ver figura 3-68). Los tres elementos mencionados conforman la estructura de apoyo de los tanques elevados y deben ser diseñados para tener una capacidad de carga que sea aproximadamente igual.

Los tanques mismos por lo general son confiables. Generalmente, los tanques elevados que han sido dañados sufren ya sea un estiramiento menor de los arriostres o una falla catastrófica. Las consecuencias de las rupturas de los tanques elevados pueden ser particularmente graves debido al potencial de que caigan encima de alguien o de algo; sin embargo, se conoce que los tanques usualmente colapsan dentro del perímetro de sus cimientos (figura 3-69).

Los cimientos para tanques nuevos deben estar diseñados para resistir el volcamiento. Las varillas que emplean conexiones roscadas deben utilizar roscas de seguridad. Para funcionar como un sistema, las columnas de los cimientos deben ser conectadas con vigas de cimentación.

Las conexiones de los arriostres deben estar diseñadas para ser más fuertes que los arriostamientos mismos. Esto permitirá que el arriostre se estire, desarrolle su fluencia y absorba energía; de esta manera, se reducirá la carga global sobre la estructura.

En un tanque elevado típico apoyado sobre múltiples columnas arriostradas, el colapso se lleva a cabo en la siguiente secuencia:

- una barra de arriostre falla
- se redistribuye la carga a otros arriostres lo cual produce un momento de torsión

- el efecto dominó se extiende y las barras comienzan a romperse progresivamente
- las columnas se pandean.

Una alternativa inicial es ajustar el arriostramiento transversal. Las soluciones de mitigación tradicionales incluyen reforzar los cimientos, columnas y arriostramientos. Se pueden añadir vigas de conexión a los cimientos para conectar las zapatas de las columnas entre sí. Las columnas se pueden fortalecer o reemplazar, y se pueden añadir arriostramientos. Se deben implementar algunas mejoras para equilibrar el sistema de cimientos, columnas y arriostramientos.

También se pueden realizar intervenciones parciales al implementar alternativas de bajo costo como el uso de vigas de conexión y la instalación de un arriostramiento transversal adicional. Se debe tener cuidado de no sobrecargar los componentes que no hayan sido reforzados.

Las columnas tienden a tener relaciones de diámetro de la columna con relación a espesor de la pared muy grandes, con capacidades de pandeo muy por debajo de su fluencia. A menos que sean arriostradas para resistir el pandeo, las columnas constituyen un eslabón muy débil en la estructura.

Los diseños innovadores para tanques elevados pueden incluir el aislamiento de la base, el arriostramiento transversal para permitir la absorción de energía, o el uso de amortiguadores. El costo de ingeniería para estas propuestas innovadoras puede ser superior al de los diseños clásicos, pero se puede reducir el costo global del proyecto.

El costo para reforzar un tanque elevado completo puede variar entre US\$100.000 y \$500.000 para tanques de 0,1 a 1,0 mil gal (0,3 a 3 m³).

Normas para el diseño de tanques nuevos

Los tanques nuevos deben ser diseñados en base a criterios sísmicos que estén en conformidad con la última versión de los siguientes documentos:

- AWWA D100, Standard for Welded Steel Tanks for Water Storage (*Norma para tanques de acero soldado para el almacenamiento de agua*)
- AWWA D100, Standard for Wire-Wound Circular Prestressed-Concrete Water Tanks (*Norma para tanques de agua circulares de concreto pre-tensado con dosificador helicoidal*)
- UBC
- American Concrete Institute 350, Concrete Environmental Engineering Structures



Fuente: Federal Emergency Management Agency.

Figura 3-69 Tanque elevado que colapsó cayó dentro del perímetro de sus cimientos en Imperial Valley, California,

Versión Preliminar

- American Petroleum Institute 650^{*}, Welded Steel Tanks for Oil Storage.

Se debe considerar el uso de una carga lateral más conservadora que la exigida por las normas. Considere incrementar la carga de diseño lateral hasta un punto de equilibrio que resulte “económico” y a la vez brinde una protección adicional.

^{*} American Petroleum Institute, 1220 L St. N.W., Washington, DC 20005.