



CAPÍTULO 3

VULNERABILIDAD SÍSMICA DE LOS SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA

Este capítulo describe los componentes del sistema de agua, su vulnerabilidad frente a los sismos y las medidas de mitigación. Se divide en cuatro secciones:

- fuentes;
- plantas de tratamiento y estaciones de bombeo;
- tuberías, y
- tanques de almacenamiento y reservorios.

Estas cuatro secciones se dividen a su vez en tipos de componentes del sistema dentro de su grupo respectivo. Se describe cada componente del sistema, incluido el daño sísmico y las alternativas de mitigación.

Fuentes

Esta sección trata sobre las fuentes de abastecimiento de agua, incluidas las cuencas hidrográficas, represas y pozos.

Cuencas hidrográficas

Descripción. Las cuencas hidrográficas son áreas donde se recolecta el agua superficial generada por la lluvia y el deshielo. Generalmente alimentan a un arroyo natural o a un río. Luego, el agua es retenida en una presa o es desviada para su uso inmediato.

Daño sísmico y alternativas de mitigación. Los deslizamientos pueden incrementar en gran medida la turbiedad en las cuencas hidrográficas cuando los terrenos, que usualmente son estabilizados con vegetación, se encuentran sin protección y son afectados por la erosión. Es posible estabilizar las áreas vulnerables a los deslizamientos, pero ello podría ser muy costoso; además, en una situación de emergencia, el acceso a las áreas de deslizamientos suele ser muy difícil.

Las cuencas hidrográficas también están expuestas a la contaminación por materiales peligrosos. Las tuberías que transportan productos del petróleo algunas veces atraviesan cuencas hidrográficas y pueden romperse durante un sismo. Las carreteras o vías férreas también pueden atravesar cuencas

hidrográficas. Los camiones o camiones cisterna pueden transportar sustancias químicas peligrosas que podrían derramarse, ya sea durante eventos sísmicos o no sísmicos. La manera más eficaz de controlar la descarga de materiales peligrosos es mantenerlos fuera de la cuenca hidrográfica. El monitoreo cercano y los planes de respuesta a emergencias son cruciales en caso de derrames.

Foto: D.B. Ballantyne



Figura 14. La cuenca hidrográfica que suministraba agua a la planta de tratamiento de Limón, Costa Rica, fue afectada por un fuerte deslizamiento que incrementó la turbiedad a 2.400 NTU en el río Banano.

Cuando ya no se puede utilizar el agua de una cuenca hidrográfica, la flexibilidad operativa del sistema se convierte en un factor importante. Se pueden usar las fuentes o bocatomas alternas (aguas arriba de la fuente de contaminación). Por ejemplo, la ciudad de Everett, Washington, puede extraer agua directamente del río, o tomarla de un gran embalse fuera de su fuente. La ciudad de Limón en Costa Rica reactivó el suministro de aguas subterráneas luego de que el terremoto de 1991 incrementara la turbiedad en la cuenca hidrográfica (figura 14).

coagulantes, o se emplean otros reactivos, la planta podría producir agua de bebida de calidad aceptable. Si bien estas alternativas pueden ser más costosas que la operación "normal", ayudarán al proveedor a superar el desastre.

La flexibilidad en el tratamiento puede permitir el procesamiento de agua cruda más turbia que lo habitual. Si se opera la planta con tasas de carga menores o si se añaden mayores dosis de

Además de Costa Rica, los deslizamientos producidos por causas diferentes a los sismos han creado situaciones de emergencia tanto en la cuenca hidrográfica Bull Run en Portland, Oregon, como en la cuenca de Centralia en Washington. Los planes de respuesta frente a emergencias fueron cruciales en ambas situaciones. Las fuentes alternas de agua hubieran sido beneficiosas en ambos casos.



Figura 15. Torre de captación que colapsó en San Fernando, California.

Represas y bocatomas

Descripción. Las represas que contienen agua para sistemas de abastecimiento generalmente son represas de tierra, de enrocado o de concreto con compuertas, vertederos, conductos, túneles y estructuras de captación. Las represas de tierra tienen un núcleo impermeable (generalmente, material arcilloso), zonas de transición, drenajes y filtros de arena adyacentes al núcleo. Con frecuencia, se inyecta concreto líquido debajo del núcleo en el material de cimentación y en los empotramientos para prevenir que el agua penetre a través de las grietas y fisuras en el lecho rocoso, o fluya a través de suelos naturales permeables. Por lo general, las represas de enrocado tienen revestimientos de concreto para prevenir la penetración de agua y son de dos tipos: de gravedad y en arco.

Las obras de captación asociadas a los reservorios de almacenamiento generalmente son de tipo torre y son vulnerables a los efectos de las fuerzas de inercia, al asentamiento y al deslizamiento de los reservorios en la parte inferior (figura 15). En un caso, el análisis preliminar de un reservorio de principios de los sesenta demostró que las prácticas de diseño con concreto reforzado no cumplían las normas vigentes. El volcamiento de estas torres hizo que el sedimento más grueso ingresara al sistema de distribución, lo

cual tapó las tuberías y causó daños serios a las válvulas, soportes de bombas y sellos. También puede ocasionar que no se controle debidamente el caudal proveniente del reservorio.

Daño sísmico y alternativas de mitigación.

La mayoría de las represas de tierra compactadas mecánicamente han respondido bien en casos de sismos, como lo han hecho las represas de tierra construidas predominantemente con suelos arcillosos.

Las represas de tierra que han sufrido fallas en terremotos pasados incluyen:

- represas construidas con material de relleno saturado, no cohesivo, de grano fino y mal compactado;
- represas construidas sobre depósitos naturales no cohesivos que no son tan densos como los terraplenes, y
- represas con terraplenes demasiado empinados.

Las fallas del suelo en el terraplén de las represas pueden incluir grietas, asentamientos, licuefacción o desprendimientos (figura 16 y 17).

Cuando se abren grietas en el terraplén o en los cimientos, las tuberías pueden resultar afectadas si las grietas permanecen abiertas.

La licuefacción puede ocurrir en zonas saturadas con materiales no cohesivos que se encuentran sueltos o marginalmente compactados, tales como terraplenes de sedimento hidráulico.

Los vertederos y los conductos de salida en todos los tipos de represas pueden tener obstrucciones, compuertas y montacargas dañados, o revestimientos mal colocados.

Las represas se deben inspeccionar inmediatamente después del sismo y se deben implementar procedimientos de detección de fallas en caso de incremento del caudal o de caudal nuevo aguas abajo. De otro modo, se debe realizar una inspección visual general de todo el sitio. Si ha ocurrido algún daño, observe la naturaleza, ubicación y magnitud del daño, tales como deslizamientos, derrumbes, asentamiento y agua infiltrada, y reporte los resultados inmediatamente. Luego, con ayuda del personal, realice una inspección minuciosa de lo siguiente:

- grietas en las caras de la represa, asentamiento o infiltraciones;
- desplazamientos, grietas o nuevos brotes de agua;
- drenaje o infiltraciones por aumento del flujo;
- desplazamiento o deformación en las estructuras de los vertederos y compuertas;
- deslizamientos en el reservorio;
- grietas, desmoronamientos o desplazamientos en las estructuras de concreto complementarias;
- plantas de energía, y
- suministro de electricidad de emergencia.

Foto: M. Otero



Figura 16. Daño en muro de represa.

Foto: William Gates



Figura 17. Represa del reservorio Lower Van Norman (California) que estuvo a punto de colapsar.

Para mitigar los daños en las represas de tierra, utilice un núcleo amplio hecho de un material resistente al agrietamiento. Se pueden añadir zonas para detener el avance de las grietas en las represas. Proporcione una mayor altura entre el nivel de agua y el borde de la represa a fin de disminuir el nivel operativo al máximo. Reduzca las pendientes de los taludes o añada bermas o contrafuertes para minimizar los desprendimientos.

El material licuable se puede excavar y reemplazar para mitigar el agrietamiento superficial. La densificación o el fortalecimiento *in situ* se pueden usar para reducir la amenaza de licuefacción. Otra alternativa es aplicar inyecciones de concreto líquido para retardar el movimiento de agua o el drenaje por los cimientos.

El diseño actual de las represas de tierra generalmente usa análisis dinámicos para todas las represas, excepto las pequeñas. Estos análisis se usan para determinar el potencial de licuefacción o deformación de los terraplenes o cimientos, y para estimar el grado de asentamiento de los terraplenes. Se deben realizar investigaciones para garantizar cimientos sólidos.

Para todos los tipos de represas, los deslizamientos provocados por sismos pueden bloquear las salidas de agua o los vertederos, o causar ondas que sobrepasen la represa y causen erosión. Los deslizamientos también pueden deteriorar la calidad del agua.

Los cimientos de suelo y roca pueden dañarse debido a rupturas por fallas, lo cual puede afectar la continuidad o integridad de los componentes internos (por ejemplo, drenajes y zonas impermeables) y de descarga de agua (por ejemplo, vertederos y túneles). Un sismólogo o ingeniero geotécnico debe realizar una investigación minuciosa para identificar las estructuras de las fallas y su actividad.

Las represas de enrocado han respondido bien y han soportado el daño a materiales cerca de la corona de la represa. El asentamiento de las represas de enrocado también es una posibilidad.

Las represas de concreto también han respondido bien y no han resultado muy dañadas. El agrietamiento de las represas y las fallas en los cimientos son posibles. El diseño resistente a los sismos de las represas de concreto incluye la exploración y tratamiento minuciosos de los cimientos y la selección de una buena configuración geométrica.

Los análisis dinámicos similares a los usados para las represas de tierra pueden ser utilizados para revisar los diseños y determinar los esfuerzos y el potencial de agrietamiento de las represas y sus accesorios. Las represas de concreto se pueden estabilizar mediante contrafuertes, drenajes o la reducción del almacenamiento del reservorio.

Foto: A. Leal, 2001



Figura 18. Campo de pozos afectado por el terremoto de El Salvador del año 2001; entre otros daños, hubo rotura de tuberías y desacople de uniones.

Pozos

Descripción. Las aguas subterráneas se extraen mediante pozos o galerías de infiltración. Generalmente, un sistema de pozos está compuesto de siete elementos:

- acuífero;
- tubería de revestimiento y tamiz del pozo;
- bomba y motor;
- suministro de energía;
- equipo y controles eléctricos;
- tuberías de conexión, válvulas y accesorios, y
- estructura de la caseta del pozo.

El sistema de pozos puede o no estar ubicado en la caseta del pozo. Los últimos cuatro se discutirán más adelante en el acápite "Plantas de tratamiento y estaciones de bombeo".

Por lo general, los pozos constan de tuberías de revestimiento de acero que penetran los acuíferos de aguas subterráneas. Las tuberías de revestimiento modernas se instalan con sellos de pozos hechos con una mezcla aguada de concreto alrededor de su periferia para evitar que el agua superficial drene hacia el espacio anular entre la tubería de revestimiento y el suelo. Los pozos más antiguos algunas veces no han sido sellados. Las tuberías de revestimiento están acondicionadas con tamicos en la formación acuífera para permitir que el agua ingrese a la tubería de revestimiento. Algunos pozos más antiguos tienen ranuras en la tubería de revestimiento en lugar de tamicos.

Generalmente, los pozos municipales usan bombas de turbina vertical instaladas por debajo del nivel de agua. Las bombas pueden ser operadas por motores sumergibles sujetos directamente a la parte inferior de la bomba o por ejes de transmisión conectados al motor en el cabezal del pozo. Las bombas para pozos profundos también pueden usar propulsores verticales y pueden ser activadas por motores de combustión interna.

Daño sísmico y alternativas de mitigación.

La geohidrología de los acuíferos puede cambiar la capacidad de producción de los pozos a causa de un movimiento sísmico. Los acuíferos poco profundos parecen estar más afectados que los acuíferos más profundos (figura 19), como ocurrió en los pozos privados en las montañas de Santa Cruz en el terremoto de Loma Prieta. Los acuíferos pueden ser contaminados por aguas negras no tratadas provenientes del alcantarillado cercano (como fue el caso del terremoto de San Fernando de 1971), por efluentes de tanques sépticos o materiales peligrosos que llegan al acuífero a través de las capas permeables o por una tubería de revestimiento no sellada del pozo.

La geohidrología de los acuíferos es casi imposible de controlar. Se recomienda usar fuentes de agua alternativas. La contaminación de los acuíferos se puede controlar mediante el sello de los pozos y un programa de protección de bocas de pozo. Los sistemas sépticos no deben estar ubicados cerca de los pozos.

El diseño de los alcantarillados cercanos debe ser sismorresistente.

Las tuberías de revestimiento y las bombas expuestas a la propagación de la onda sísmica se moverán con los suelos que se encuentren alrededor del pozo. Este movimiento puede causar la rotura o desconexión de bombas, motores y líneas de descarga que no tengan acoplamientos flexibles (figura 20). Los suelos alrededor del pozo pueden consolidarse y asentarse, lo cual haría extenderse el encamisado del pozo por sobre el nivel del suelo. Las tuberías de conexión pueden romperse.

Las bombas deben ser de acero en lugar de hierro fundido a fin de que puedan absorber la energía de la vibración. La tubería de descarga de la

Foto: C. Osorio, 2001



Figura 19. Pérdida de la fuente de agua de vertiente después de un sismo intenso en el Salvador.

Foto: M.J. O'Rourke

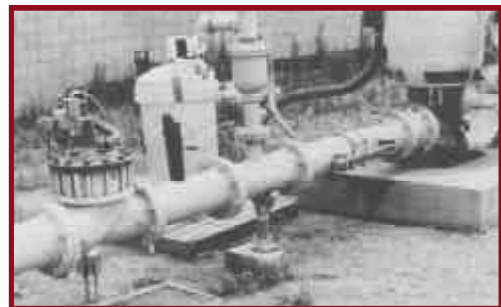


Figura 20. El asentamiento alrededor de la tubería de revestimiento del pozo produjo fugas en la tubería de descarga del pozo durante el terremoto de Landers, California.

Foto: D.B. Ballantyne



Figura 21. La tubería de revestimiento del pozo que se dobló 15° de la vertical como resultado del flujo lateral en Dagupan, Filipinas.

bomba (en la parte superior del pozo) también debe ser de acero en lugar de hierro fundido. Se debe proporcionar cierta flexibilidad entre la tubería de revestimiento y la losa de la construcción que la rodea, y entre la tubería de revestimiento y las de conexión.

La tubería de revestimiento, la tubería de descarga de la bomba y el eje de transmisión se pueden doblar, aplastar o romper debido al desplazamiento del terreno o la vibración (figura 21). Las bombas sumergibles no dependen del eje de transmisión y, por tanto, son más confiables. Si la tubería de revestimiento se dobla, será imposible retirar la bomba, sea el tipo que sea.

Evite áreas donde podría ocurrir el flujo lateral, tales como áreas vulnerables a la licuefacción en una pendiente o cerca de una superficie libre. Si no se pueden evitar, estabilice el área o refuerce la tubería de revestimiento del pozo para que resista el desplazamiento lateral del terreno. El uso de tuberías de revestimiento pesadas o tuberías dobles a la profundidad donde se espera que se produzca la licuefacción, puede limitar el daño ya que permitiría el movimiento de la tubería exterior, pero no de la tubería interior, donde se encuentra instalado el equipo de bombeo.

El agua de pozo se puede volver turbia, pero generalmente solo por varias horas o menos. Los pozos pueden comenzar a emanar o bombear arena. Ello generalmente ocurre en pozos con tuberías de revestimiento ranuradas y sin tamices adecuadamente diseñados. El exceso de arena puede dañar la tubería o quemar el motor. Es importante usar tamices de pozos en lugar de tuberías de revestimiento ranuradas, una práctica común en muchos pozos municipales.

Los pozos también se pueden contaminar cuando se inunda la boca de pozo. Ello ocurrió en Nicaragua en 1992, cuando un tsunami inundó pozos con agua contaminada de las letrinas.

Plantas de tratamiento y estaciones de bombeo

Esta sección incluye plantas de tratamiento e instalaciones de bombeo, así como los componentes de las instalaciones de pozos similares a las estaciones de bombeo. Se describe cada tipo de instalación y se divide en los siguientes grupos de componentes:

- tanques y estructuras de tratamiento;
- equipos y tuberías;
- energía eléctrica e instrumentación, y
- edificaciones y estructuras.

Se define el daño sísmico esperado y se proponen alternativas de mitigación. Además, luego de la descripción de las instalaciones, se discuten las fallas geotécnicas y de cimentación. Esta sección concluye con una discusión sobre la flexibilidad y redundancia operativas de las instalaciones.

Descripción

Las plantas de tratamiento de agua se usan para mejorar la calidad del agua de bebida por razones estéticas y de salud pública, y se pueden diseñar para tratar aguas superficiales o subterráneas. Las plantas de tratamiento de aguas superficiales se diseñan para remover turbiedad, sustancias químicas y agentes patógenos, y generalmente, contribuyen a la desinfección y al control de la corrosión. La fuente de agua cruda generalmente son las cuencas hidrográficas, ríos o represas.

Las plantas de tratamiento de aguas subterráneas generalmente se usan para ablandar el agua o remover hierro o manganeso, u otros contaminantes orgánicos e inorgánicos. Su fuente de agua son los pozos o manantiales.

Las plantas de tratamiento a menudo usan sustancias químicas para la coagulación (por ejemplo, alumbre, cloruro férrico y polímeros), ajuste del pH o control de la corrosión (por ejemplo, cal), desinfección u oxidación (por ejemplo, cloro gaseoso, hipoclorito, ozono o permanganato de potasio) y otros (por ejemplo, fluoruro o carbón activado).

Los componentes típicos de una planta de tratamiento de agua se enumeran a continuación. Además, muchas plantas de tratamiento de agua incluyen estaciones de bombeo de agua tratada o no tratada.

Tanques y estructuras de tratamiento

- tanques de presedimentación;
- tanques de aireación;
- tanques de mezcla rápida;
- floculadores, paletas o deflectores;
- tanques de sedimentación y clarificadores;
- filtros de gravedad y de presión;
- tanques de almacenamiento de agua y pozos de aguas claras;
- tanques de agua de retrolavado y almacenamiento de lodos;
- canales y galerías de tubos, e
- instalaciones para la disposición de lodos.

Equipos y tuberías

- tuberías enterradas;
- tuberías descubiertas;
- bombas de agua, ventiladores y compresores;
- bombas y equipos de dosificación de sustancias químicas;
- tanques de productos químicos;
- tanques pequeños de agua o combustible;
- equipo para calefacción, ventilación y aire acondicionado;
- equipo de laboratorio y oficina, y
- estanterías de almacenamiento.

Energía eléctrica e instrumentación

- subestaciones;
- transformadores;
- armario de mandos de control;
- paso de cables y conductos;
- computadoras y falsos pisos para computadoras;
- equipo de telemetría;
- grupo electrógeno (sistema de arranque, combustible, enfriamiento y escape);

- centro de control, e
- iluminación.

Edificios

- edificios de operaciones;
- edificios de mantenimiento;
- edificios de almacenamiento de cloro;
- edificios que albergan otras unidades de tratamiento, y
- edificios de almacenamiento de equipos y materiales.

Las estaciones de bombeo incluyen aquellas adyacentes a los reservorios y ríos, y las estaciones de impulsión cuyo propósito es incrementar la carga. Generalmente, las estaciones de bombeo típicas son edificios con muros de corte que incluyen unidades de bomba/motor, tuberías, válvulas y equipo eléctrico, mecánico y de control. Las bombas horizontales de cámara partida y las bombas de turbina vertical son los dos tipos principales de bombas utilizadas. A menudo, un suministro de electricidad de emergencia que consta de un generador diesel de reserva, un banco de baterías y tanques de almacenamiento de combustible diesel, se incluye en las estaciones de bombeo para operar en casos de emergencia cuando se produce una falla en la energía eléctrica.

Las instalaciones de pozos incluyen equipos y tuberías, equipo de instrumentación y energía eléctrica, y las estructuras descritas en esta sección.

Fallas geotécnicas y de cimentación. Alternativas de mitigación

Las estructuras de los tanques, los canales y los conductos grandes de las plantas de tratamiento de agua son vulnerables al asentamiento diferencial, al incremento de las presiones laterales del suelo y a la flotación (figura 22). Los deslizamientos también pueden ser un problema en algunos sitios.

El asentamiento diferencial tiene mayor probabilidad de ocurrir cuando se construye una estructura sobre suelos sujetos a la densificación o sobre suelos o cimientos variables a lo largo de la estructura. Los diferentes grosores del relleno de soporte o los diversos tipos de cimientos que atraviesan una estructura incrementan el riesgo del asentamiento diferencial.

Las estructuras deben ubicarse sobre cimientos totalmente consistentes, lejos de suelos que podrían densificarse. De lo contrario, las estructuras deben ser diseñadas de manera que resistan las fallas del suelo o el movimiento diferencial esperado.

Los sismos incrementarán las presiones laterales del terreno sobre las estructuras. Los métodos desarrollados por Mononobe y Okabe (Seed 1970) brindan pautas de diseño en caso de que se incrementen las presiones activas del terreno. Las presiones pasivas del suelo pueden activarse cuando se produce el flujo lateral debido a la licuefacción.

La licuefacción puede hacer que las estructuras subterráneas en áreas con gran cantidad de aguas subterráneas floten o se hundan diferencialmente. Mantener los tanques llenos es una medida que puede mitigar la flotación. El capítulo 2 ofrece más información sobre medidas que pueden mitigar la licuefacción.



Figura 22. Tanque de aguas residuales que flotó debido a la licuefacción en Niigata, Japón.

Foto: D.B. Ballantyne

El daño por impacto entre dos estructuras o el movimiento permanente entre estructuras adyacentes, pero que no se encuentran adosadas o están adosadas inadecuadamente, también puede producir la apertura de las juntas de expansión. Se debe proporcionar flexibilidad entre dichas estructuras.

Tanques y estructuras de tratamiento

En los Estados Unidos, las estructuras de los tanques de tratamiento de concreto reforzado han soportado bien los sismos que no se debían a fallas geotécnicas. En varios sismos fuera de los Estados Unidos, los deflectores de concreto ligeramente reforzado han resultado dañados (figura 23). Las nuevas estructuras de concreto que se construyen en los Estados Unidos deben ser diseñadas en conformidad con la última Norma ACI 350 del *American Concrete Institute, Concrete environmental engineering structures* (estructuras de ingeniería ambiental hechas de concreto). Es deseable que los países expuestos a riesgo sísmico que carezcan de normas especiales para el diseño de estos componentes, revisen y adapten una norma existente en otro país.



Figura 23. Los deflectores del floculador y las placas inclinadas del clarificador que resultaron dañados en la planta de tratamiento de agua de Limón, Costa Rica.

Foto: Kennedy/Jenks Consultants



Figura 24. Reactor-clarificador de la planta de tratamiento de agua de Rinconada, California, dañado seriamente por la presión hidráulica.

Foto: Kennedy/Jenks Consultants



Figura 25. Deflectores dañados en el clarificador secundario debido al terremoto de Loma Prieta, California.

Los deflectores del tanque de tratamiento y otros elementos sumergidos y flotantes resultaron afectados debido a la presión hidráulica sobre el componente (figura 24). Un daño similar sufrieron los deflectores de clarificadores secundarios y los digestores flotantes de lodos en las plantas de tratamiento de aguas residuales (figuras 25, 26 y 27). El movimiento oscilatorio del agua empujó las compuertas de acceso rectangulares fuera de sus pórticos lo cual hizo que cayeran al fondo del tanque.

Foto: Kennedy/Jenks Consultants

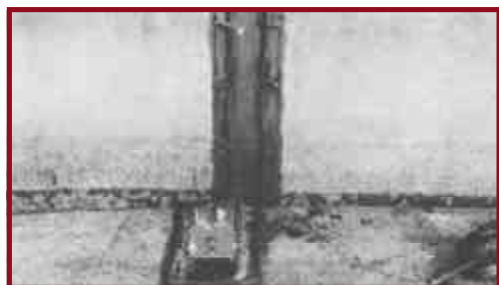


Figura 26 y 27. Tapa flotante del digestor de lodos que se movió, dobló el riel de guía y rompió la rueda de guía en el terremoto de Loma Prieta, California.

Los deflectores dañados que cayeron al fondo del tanque tuvieron que ser removidos antes de poner en funcionamiento los colectores de lodo.

Los deflectores y otros elementos sumergidos deben diseñarse de manera que resistan cargas fuertes y que puedan ser reemplazados inmediatamente en caso de desprendimiento. Los elementos que se desprenden deben asegurarse para evitar que caigan al fondo del tanque y obstruyan los colectores de lodo (Kennedy, Jenks, Chilton 1990a). No existe todavía una alternativa simple para evitar el movimiento oscilatorio en las cubiertas de los digestores flotantes.

Foto: D.B. Ballantyne



Figura 28. Agrietamiento debido al asentamiento diferencial del terreno alrededor de la estructura soportada por pilotes de la planta de tratamiento.

Equipos y tuberías

Las tuberías enterradas son vulnerables cuando están en contacto con estructuras, particularmente, si ocurre un asentamiento diferencial. Esto representa un gran problema cuando las estructuras están soportadas por pilotes y las tuberías se encuentran enterradas directamente (figura 28). Se debe brindar flexibilidad en los puntos de contacto mediante acoplamientos flexibles dobles en series o uniones flexibles patentadas.

Las tuberías descubiertas soportadas por varillas se balancean y pueden romperse en sus puntos débiles, tales como conexiones roscadas y válvulas de hierro fundido. En los Estados Unidos, las tuberías descubiertas se deben apoyar en tres direcciones ortogonales en conformidad con los requisitos del Código Uniforme de Construcción y de la *Sheet Metal and Air Conditioning Contractor's National Association* (SMACNA) (figura 29).

Se deben proporcionar conexiones flexibles porque el equipo y las conexiones de las tuberías se mueven en relación con cada componente y pueden hacer que el sistema se rompa en sus puntos débiles (figura 30). También se debe dar flexibilidad a las conexiones y tuberías que atraviesan juntas de expansión o estructuras que se encuentran sobre diferentes cimientos (figuras 31 y 32).

Foto: D.B. Ballantyne



Figura 29. Tuberías apoyadas en tres direcciones ortogonales.

Los accesorios de los tubos, tales como válvulas de descarga de aire, responden como péndulos invertidos, que se rompen cuando los movimientos del terreno se amplifican (figura 33). Deben tener un soporte lateral.

El equipo apoyado sobre ambos lados de una junta de expansión de un edificio está sujeto al movimiento diferencial. Proporcione flexibilidad o, si fuese posible, apoye el equipo sobre uno de los lados de la junta de expansión.

En general, el equipo anclado funciona bien, aun si el anclaje no ha sido diseñado para soportar el nivel de carga sísmica esperada. El equipo no anclado o mal anclado puede deslizarse o volcarse, lo cual podría dañar el equipo o hacer que las tuberías y los conductos adosados se rompan. Hay que inspeccionar el equipo para determinar si tiene posibilidad de volcarse. El equipo con un bajo centro de gravedad tiene menos tendencia a volcarse, pero aun así puede deslizarse. Es necesario anclar el equipo de acuerdo con los criterios de carga establecidos

Foto: Federal Emergency Management Agency



Figura 30. Tuberías descubiertas en el hospital Olive View que se rompieron en el terremoto de San Fernando, California.

Foto: D.B. Ballantyne



Figura 31. Acoplamientos flexibles en la succión y descarga de la bomba de aguas residuales.

Foto: Kennedy/Jenks Consultants



Figura 32. Unión flexible en una tubería que cruza una junta en la estructura del edificio.

Foto: D.B. Ballantyne.



Figura 33. Válvula pesada de descarga de aire apoyada sobre una tubería de pequeño diámetro que se partió durante el terremoto de Loma Prieta, California.

en la normativa nacional. El equipo anclado ha respondido bastante bien en terremotos, aun cuando los anclajes estaban mal diseñados.

En la medida de lo posible se deben usar anclajes fabricados en la localidad. Los anclajes perforados y unidos químicamente son aceptables para anclajes en la base, pero pueden desprenderse en caso de incendio. No deben ser usados en techos.

Los anclajes de cuña perforada son aceptables para pisos y paredes, pero no deben ser usados en techos, ni para equipo giratorio porque pueden soltarse. No se deben utilizar anclajes autoperforables, de tuerca perforada o mecánicos.

Foto: D.B. Ballantyne

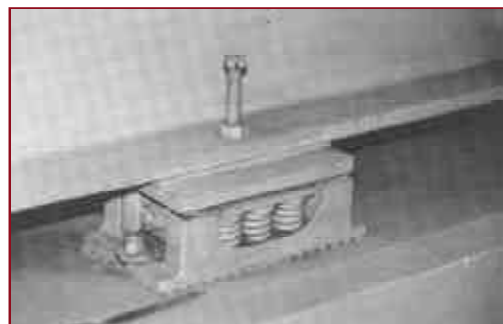


Figura 34. Aislador de vibraciones tipo resorte.

Las bombas horizontales y sus motores, máquinas y generadores deben instalarse sobre un solo cimiento para prevenir el desplazamiento diferencial. Se debe evitar el uso de bombas de turbina vertical que se sostienen sobre tanques o deben ser diseñadas para soportar cargas sísmicas.

Los grupos electrógenos requieren el funcionamiento de una serie de sistemas de apoyo. Los aisladores de vibraciones no diseñados para resistir la carga sísmica son vulnerables (figuras 34, 35 y 36). Se usan amortiguadores en equipos aisladores de vibraciones (figuras 37 y 38). Hay que revisar la vulnerabilidad (anclaje, soporte y flexibilidad) de los sistemas de arranque (baterías o aire comprimido), combustible, enfriamiento y escape.

Foto: Michael Mehrain



Figura 35. Aislador dañado en un grupo electrógeno.

Foto: William Gates



Figura 36. Vibración de resorte en un grupo electrógeno dañado durante el terremoto de Whittier, California.

Foto: D.B. Ballantyne



Figura 37 y 38. Amortiguadores diseñados en Nueva Zelanda (37) y fabricados en Estados Unidos (38) para aislar vibraciones.

Los movimientos sísmicos del terreno son amplificados por las estructuras de las edificaciones. Mientras más alto esté ubicado el equipo en el edificio, más fuerte será la carga sísmica que experimente. Consulte el código de construcción nacional para ver los métodos de diseño de anclajes. En el diseño del edificio se deben considerar las cargas del equipo pesado.

El equipo pesado, como el equipo de procesamiento de lodos, debe ubicarse en la parte más baja posible del edificio.

El equipo y tuberías que contengan sustancias químicas peligrosas deben protegerse de los escombros que pudieran desprenderse.

Los cilindros de cloro (150 lb [68 kg]) pueden volcarse y romper las tuberías de conexión (figura 39). Hay que sujetarlos por arriba y por abajo (figura 40). Los cilindros de cloro (1 tonelada [907 kg]) pueden rodar o deslizarse, rompiendo las tuberías de conexión y los cables de conexión flexibles (figura 41). Es necesario anclarlos con cadenas o correas de nylon (figura 42). Como alternativa, se utilizan sistemas de hipoclorito de sodio. Si no existe una reglamentación nacional o propia de la empresa, se recomienda consultar las medidas de contención y estabilización de cloro gaseoso descritas en el *Uniform Fire Code, UFC*, (Código Uniforme de Incendios) de 1991. Proporcione equipos de reparación del Instituto del Cloro⁶ y almacénelos fuera del área potencialmente peligrosa.

Deje los montacargas aéreos en una posición "segura" después de usarlos de modo que si empiezan a balancearse no romperán una línea de cloro.

Foto: William Gates



Figura 39. Cilindros de gas comprimido sujetos con una sola cadena que se cayeron.

Foto: D.B. Ballantyne



Figura 40. Cilindros de gas comprimido sujetos con cadenas por arriba y por abajo en la instalación de Seattle Metro, Washington.

Foto: D.B. Ballantyne

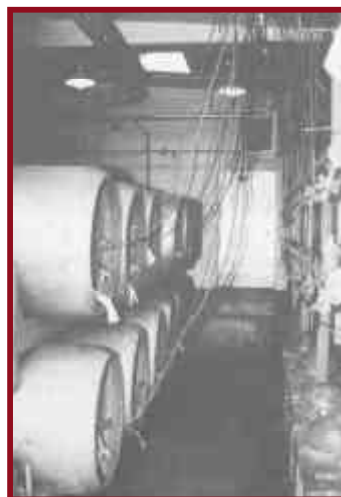


Figura 41. Los cilindros de cloro de una tonelada que no están bien amarrados pueden zafarse de la pila y cortar el cable de conexión.

⁶ Chlorine Institute, 2001 L St. N. W., Washington, DC 20036.

Foto: D.B. Ballantyne



Figura 42. Los cilindros de cloro de una tonelada amarrados con doble cadena se sostuvieron bien durante el terremoto de Loma Prieta en Santa Cruz, California.

Foto: D.B. Ballantyne



Figura 43. Los tanques grandes de propano pueden resbalarse longitudinalmente y romper las tuberías de conexión.

Los grandes tanques horizontales, tales como tanques de cloro, de gas natural líquido, de propano, de diesel o tanques compensadores, pueden deslizarse y romper las tuberías de conexión (figura 43). Se debe brindar una transferencia de carga adecuada desde el tanque hasta los cimientos, particularmente de manera longitudinal (figura 44). Sujételos con abrazaderas para prevenir que las tuberías se resbalen y se rompan.

Los evaporadores de cloro son particularmente pesados. Generalmente no se instalan con un anclaje adecuado y no se aprovechan los agujeros roscados proporcionados por el fabricante. Asegúrese de que se encuentren firmemente anclados.

Foto: D.B. Ballantyne



Figura 44. Tanques de combustible horizontales que colapsaron por no contar con estructuras adecuadas de apoyo longitudinal con abrazaderas en Limón, Costa Rica.

Foto: D.B. Ballantyne



Figura 45. Los tanques con sustancias químicas no anclados pueden deslizarse y romper las tuberías de conexión.

Proporcione una contención secundaria para sustancias químicas peligrosas e instale dispositivos de control fiables en los sistemas de dosificación de sustancias químicas. Coloque las válvulas de control de vacío lo más cerca posible a los tanques de cloro.

Los tanques con sustancias químicas pueden resbalarse o volcarse, romper las tuberías de conexión y vaciar sus contenidos (figura 45). Anclelos según las instrucciones de un ingeniero civil familiarizado con las normas de diseño sísmico.

Foto: D.B. Ballantyne



Figura 46. Tanques de combustible enterrados en Dagupan, Filipinas, que flotaron en suelo licuado.

Foto: D.B. Ballantyne



Figura 47. Soportes del tanque no arriostrados que se torcieron en el terremoto de San Fernando, California.

Foto: D.B. Ballantyne



Figura 48. Soportes arriostrados en estructura de apoyo de tanques en Japón.

Foto: William Gates



Figura 49. Soporte de la unidad de calefacción, ventilación y aire acondicionado que colapsó en el terremoto de Loma Prieta, California.

Ancle firmemente los tanques enterrados y los buzones porque pueden flotar en suelo licuable (figura 46).

Los soportes del equipo y de tanques pequeños sin arriostramiento transversal pueden doblarse y colapsar (figura 47). Proporcione arriostramiento transversal en los soportes (figura 48).

Sujete lateralmente el equipo de calefacción, ventilación y aire acondicionado porque podría caer al piso y bloquear las rutas de salida (figura 49). Este sistema puede ser importante para la ventilación de áreas con atmósfera peligrosa.

Equipo de oficina y laboratorio

El equipo de laboratorio, productos químicos y otros insumos deben estar asegurados. Ancle el equipo de oficina y las computadoras al escritorio ya que podrían resbalarse y caer al piso. Debido a que los cajones de los archivadores pueden abrirse y volcarse, utilice archivadores con seguros y amarre los archivadores contiguos.

Foto: D.B. Ballantyne



Figura 50. Falsos pisos para computadoras vulnerables al colapso.

Foto: D.B. Ballantyne



Figura 51. Estantes de almacenamiento de repuestos de autos que se volcaron en el terremoto de Erzincan, Turquía.

Los pisos falsos para computadoras que no han sido diseñados específicamente para soportar la carga sísmica lateral pueden colapsar (figura 50). Ancle firmemente el piso falso a la losa de concreto que se encuentra debajo y ancle fijamente las computadoras al piso falso.

Los estantes de almacenamiento pueden volcarse y los materiales almacenados pueden caer al piso durante el sismo (figura 51). Diseñe o evalúe estantes de ángulos ranurados que estén en conformidad con los requisitos del código de construcción de su país. Proporcione cuerdas de sujeción para mantener el material almacenado en los estantes. El cielo raso y los dispositivos de iluminación también pueden colapsar. Sujete los dispositivos de iluminación directamente del techo fijo y refuerce el cielo raso según sea necesario.

Foto: D.B. Ballantyne



Figura 52. Transformador no anclado vulnerable a fuerzas sísmicas.

Energía eléctrica e instrumentación

Considere que la energía eléctrica estará fuera de servicio en todas las regiones y proporcione suministro de emergencia para elementos críticos del sistema. Las plantas de energía eléctrica con frecuencia requieren que se realicen pruebas bajo carga; por tanto, trabaje con la planta de energía local a fin de obtener un servicio prioritario para las instalaciones críticas.

Los transformadores no anclados pueden deslizarse o volcarse (figura 52). Los transformadores sobre postes que no han sido anclados también pueden caerse (figura 53 y 54), o el poste mismo puede desplomarse debido a la licuefacción del suelo (figura 55). Trabaje con la empresa de energía local para anclar los transformadores (figura 56) y evalúe la amenaza que representa la licuefacción.

Foto: ANDA, 2001



Figura 53. Transformadores que servían a un campo de pozos y estación de bombeo dañados a causa del terremoto de El Salvador, 2001.

Foto: D.B. Ballantyne



Figura 54. Transformador sobre un poste no anclado que se desplomó en Erzincan, Turquía.

Foto: D.B. Ballantyne



Figura 55. Poste con transformador que se volcó como resultado de la licuefacción de su base en Costa Rica.

Foto: D.B. Ballantyne



Figura 56. Transformador anclado en la planta de tratamiento del distrito municipal de servicios públicos de East Bay, California.

Foto: D.B. Ballantyne

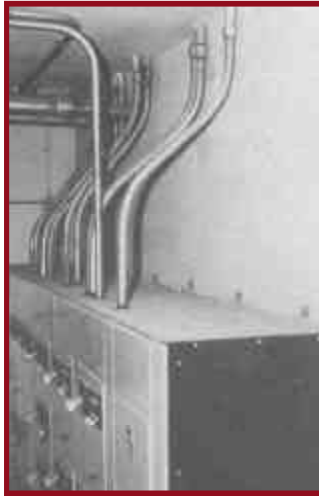


Figura 57. Panel instalado con abrazaderas angulares que lo fijan a la pared.

Foto: ANDA, 2001



Figura 58. Paneles eléctricos de la estación de bombeo de El Salvador afectados por los terremotos de 2001.

Foto: D.B. Ballantyne



Figura 59. Motor de bomba grande que se quemó debido a la oscilación de voltaje en la estación de impulsión de Baguio, Filipinas.

Foto: Federal Emergency Management Agency



Figura 60. Baterías no ancladas que se desplomaron.

Los paneles eléctricos no anclados pueden volcarse o deslizarse. Áncelos al piso o adóselos a la pared con abrazaderas angulares (figura 57 y 58).

Los motores eléctricos pueden resultar dañados debido a la oscilación de voltaje (figura 59). Proporcione un sistema de monitoreo y apagado automático para motores más grandes.

Asegure las baterías usadas para operar acumuladores de reserva y para arrancar grupos electrógenos porque podrían volcarse si no se encuentran ancladas (figura 60).

Los sistemas de telemetría que usan sistemas dedicados o cableado estructurado pueden tener cables rotos. Los sistemas de líneas telefónicas no dedicadas no tendrán una línea telefónica disponible. Utilice un sistema de radio con suficiente energía de reserva.

Asegúrese de que las válvulas y los equipos operados eléctricamente o aquellos activados por señales de telemetría no se comporten de manera inesperada en caso de que se interrumpa la energía

eléctrica o se pierda la señal. Planifique con antelación formas de determinar la condición de las bombas, válvulas o niveles de los tanques en caso de que falle la energía eléctrica o la señal de telemetría.

Edificaciones y estructuras

Las normas de diseño de edificaciones sismo-resistentes de los diferentes países se centran en mantener el edificio erguido por razones de seguridad humana después de un terremoto severo o de diseño, independientemente de la función del edificio. La función del edificio puede ser importante en la implementación de los planes de operación y respuesta frente a emergencias del sistema de agua luego de un evento sísmico. Los edificios que albergan el equipo requerido para hacer frente a una emergencia y los materiales de reparación deberán ser accesibles. Evalúe los edificios teniendo en mente su función y operación después de un sismo. Los edificios que muestren señales de peligro luego de un sismo deben ser declarados ruinosos y se debe prohibir el ingreso a ellos.

Foto: William Gates



Figura 62. Ruptura en la columna no dúctil de concreto, San Fernando, California.

Foto: D.B. Ballantyne



Figura 63. Edificaciones resistentes a los sismos de pórticos arriostrados de acero.

Foto: National Oceanic and Atmospheric Administration



Figura 61. Edificación de mampostería no reforzada que colapsó parcialmente.

Las estaciones de bombeo son estructuras simétricas pequeñas que usan un diseño de muros de corte, que generalmente soportan bien los eventos sísmicos. Asegúrese de que las paredes estén firmemente ancladas al piso y que el techo esté anclado a las paredes. Los edificios de plantas de tratamiento más grandes usan una variedad de diseños, algunos de los cuales son vulnerables.

Las edificaciones de mampostería no reforzada (MNR) son las más vulnerables (figura 61). Los parapetos en edificaciones de mampostería no reforzada son particularmente vulnerables y deben ser arriostrados o removidos.

Las estructuras de concreto no dúctil para pórticos y las edificaciones con paneles muy esbeltos no han soportado bien los terremotos (figura 62). Las edificaciones con paneles esbeltos construidas antes de mediados de los setenta son particularmente vulnerables; la unión techo-pared se ha desplomado en sismos recientes.

Las construcciones tipo Butler (nave industrial) con pórticos de acero arriostrados (figura 63) son resistentes a los sismos. Sin embargo, las edificaciones algunas veces se modifican, lo cual debilita su resistencia sísmica.

No retire los elementos de arriostramiento (figura 64); reemplace aquellos que hayan sido removidos.

Para evaluar las edificaciones existen varias metodologías para diferentes materiales y tipos de construcción; se puede consultar el documento *Rapid visual screening of buildings for potencial seismic hazards: A handbook* (FEMA, 1988).

Las estaciones de bombeo y las plantas de tratamiento de agua deben diseñarse de acuerdo con las disposiciones sísmicas especificadas por los códigos locales o nacionales de construcción. Como mínimo, el diseño del edificio debe cumplir los requisitos sísmicos del código local o nacional de construcción.

Foto: D.B. Ballantyne

Flexibilidad y redundancia en la operación

El diseño sísmico debe incluir las medidas necesarias para que eventualmente se pueda prescindir (*by-pass*) del tratamiento en la planta y brindar cloración de emergencia en caso de que los sismos dañen las estructuras de tratamiento.

Tuberías

Introducción

Históricamente, el daño a las tuberías durante los sismos a menudo ha afectado todo el sistema de abastecimiento de agua. Las roturas de tuberías causan la pérdida rápida de agua y producen el vaciado del reservorio. Cuando el servicio público de energía está fuera de servicio, los reservorios no se pueden volver a llenar y el sistema puede quedarse sin agua por varios días.

Las tasas de falla de las tuberías (en reparaciones por unidad de longitud) son más altas en áreas que tienen fallas en el terreno o licuefacción. El mapeo de amenazas se ha convertido en una herramienta importante para mitigar los efectos de los sismos sobre las tuberías (figura 65).

Por lo general, las tuberías de conducción y distribución del sistema de agua están enterradas a 2,5 a 6 pies (0,75 a 1,8 m) de profundidad o más en regiones frías. Las tuberías de conducción algunas veces se colocan en forma elevada sobre pilotes de apoyo.

En el cuadro 2 se incluyen los materiales de las tuberías y los tipos de uniones para la mayoría de las tuberías que se usan actualmente, así como sus respectivas normas AWWA. El cuadro también muestra las categorías de vulnerabilidad sísmica (refiérase a la sección sobre deformación permanente del suelo más adelante en este capítulo). El hierro fundido, el acero remachado y el acero soldado con gas no tienen designaciones de la AWWA porque han dejado de fabricarse. Sin embargo, existe un amplio número de instalaciones inventariadas.

Las tuberías pueden incluir accesorios como válvulas de compuerta, de mariposa o de descarga de aire/vacío; hidrantes; y tubos de expulsión. Las válvulas de compuerta o de mariposa se usan para aislar segmentos de tuberías. Las válvulas de descarga de aire/vacío se usan para descargar el aire atrapado y ventilar las tuberías a fin de prevenir la formación de vacíos. Los hidrantes se usan para obtener agua para la extinción de incendios. Los tubos de expulsión se ubican en puntos bajos para permitir la remoción de sedimentos y poder vaciar la tubería.



Figura 64. Edificio de pórticos arrios-trados de acero en Moin, Costa Rica, donde un arriestre fue removido. El sismo dejó el edificio permanentemente torcido.

Fuente: CISMID/FIC/UNI

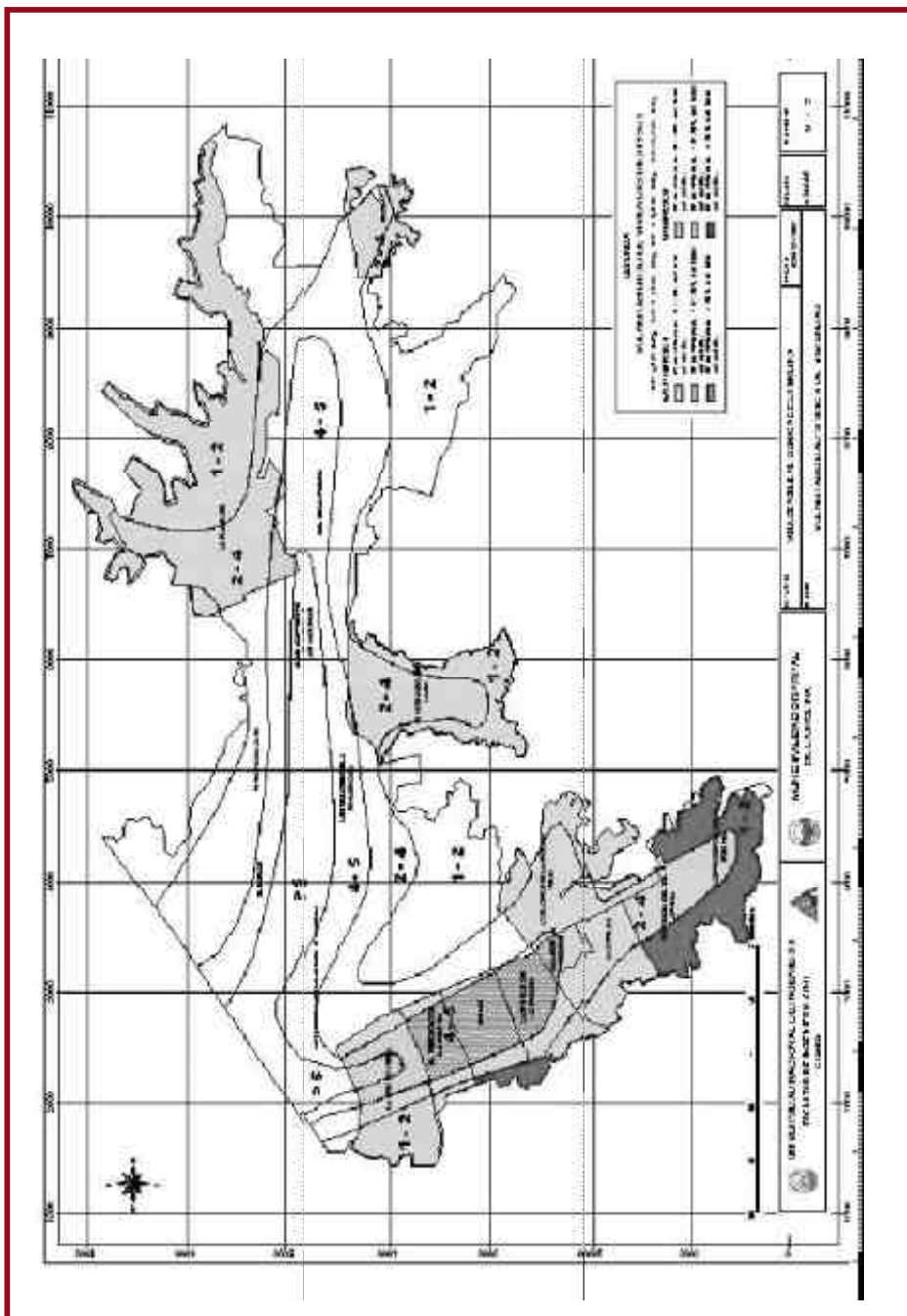


Figura 65. Diagnóstico de vulnerabilidad sísmica en el distrito de La Molina, Lima, usando el sismo de Lima del 17 de octubre de 1966, para viviendas de albanilería de dos pisos.

Cuadro 2. Materiales más usados en las tuberías de agua, normas aplicables y su vulnerabilidad frente a la deformación del suelo

Tipo de material y diámetro	Norma AWWA	Tipo de unión
Vulnerabilidad baja		
Hierro dúctil	Series C1xx*	Campana y espiga con empaque de caucho, fija
Poliétileno	C906	Fundida
Acero	Series C2xx	Soldada con arco voltaico
Acero	Sin designación	Remachada
Acero	Series C2xx	Campana y espiga con empaque de caucho, fija
Vulnerabilidad baja a media		
Cilindro de concreto	C300, C3003	Campana y espiga, fija
Hierro dúctil	Series C1xx*	Campana y espiga con empaque de caucho, suelta
Policloruro de vinilo	C900, C905	Campana y espiga, fija
Vulnerabilidad media		
Asbesto-cemento > 8 pulgadas (203 mm) de diámetro	Series C4xx*	Acoplada
Hierro fundido > 8 pulgadas (203 mm) de diámetro	Sin designación	Campana y espiga con empaque de caucho
Policloruro de vinilo	C900, C905	Campana y espiga, suelta
Acero	Series C2xx	Campana y espiga con empaque de caucho, suelta
Vulnerabilidad media a alta		
Asbesto-cemento > 8 pulgadas (203 mm) de diámetro	Series C4xx	Vulnerabilidad media a alta
Hierro fundido > 8 pulgadas (203 mm) de diámetro	Sin designación	Acoplada
Cilindro de concreto	C300, C303	Campana y espiga con empaque de caucho
Acero	Sin designación	Campana y espiga, suelta
		Soldada con gas
Vulnerabilidad alta		
Hierro fundido	Sin designación	Campana y espiga, galvanizada o de mortero

* Se refiere a las series de las normas AWWA indicadas por la letra y el primer dígito de su número de tres dígitos. C1xx se refiere a las series C100s (tubería de hierro dúctil y accesorios), C2xx se refiere a las series C200s (tubería de acero) y C4xx se refiere a las series C400s (tubería de asbesto-cemento).

Foto: D.B. Ballantyne



Figura 66. La señal en el poste marca la ubicación de los hidrantes a ras del suelo en Tokio, Japón.

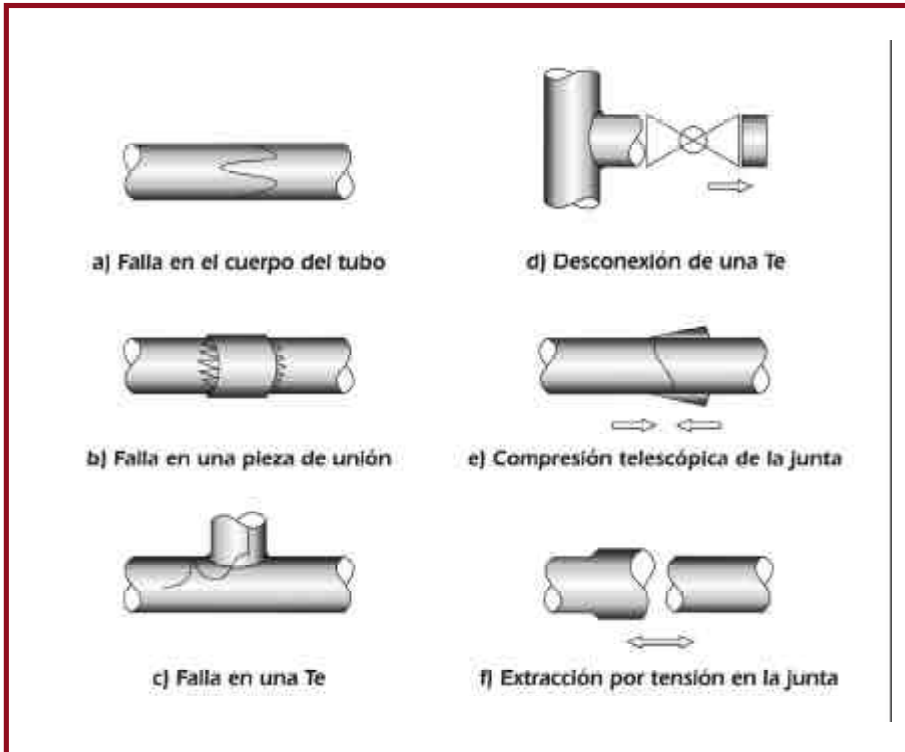
Mecanismos de falla

Los mecanismos de las fallas que afectan a las tuberías pueden incluir la propagación de ondas, la deformación permanente del suelo (DPS) y la ruptura por fallas.

Las tasas de fallas de las tuberías en áreas donde no se produce licuefacción pero sí hay fallas del terreno (IMM de VIII o menos) (es decir, pequeños deslizamientos, grietas y terreno húmedo) equivalen aproximadamente a ocho veces las fallas debido a la propagación de ondas. Las tasas de fallas de las tuberías en áreas donde sí ocurre la licuefacción son de aproximadamente 12 veces las tasas de falla por propagación de ondas.

El daño a los hidrantes es un caso especial. Los hidrantes o grifos de incendio han resultado afectados por el colapso de edificaciones, lo cual ha causado el vaciado del reservorio y un caudal no controlado. Se debe considerar el uso de hidrantes a ras del suelo, como aquellos usados en Tokio y Londres (figura 66).

Figura 67: Tipo de fallas en tuberías debido a efectos sísmicos



Fuente: O'Rourke, D.B. Ballantyne. Observations on water systems and pipelines performance in the Limon area of Costa Rica due to the april 22, 1991 earthquake

Propagación de ondas. Las tuberías se rompen debido al paso de la onda sísmica como resultado del movimiento diferencial a lo largo del eje longitudinal de la tubería (figura 68). La tracción y compresión producen el movimiento diferencial primario. Como se mencionó, la tasa de falla (reparación por unidad de longitud) es pequeña comparada con otros mecanismos de fallas. La flexión o rotación de las uniones es insignificante. Se puede usar la propuesta presentada en *Pressure pipeline design for water and wastewater* (ASCE, 1992) para estimar el movimiento diferencial entre las secciones contiguas de una tubería para una "unión típica". Sin embargo, el daño generalmente no ocurre en una unión típica. La velocidad apropiada de propagación de la onda debe ser proporcionada por un ingeniero geotécnico que esté trabajando con un sismólogo.

En casi todos los casos, las tuberías de acero soldado por arco voltaico o las tuberías de polietileno son lo suficientemente dúctiles para soportar sin daño alguno las deformaciones del terreno debido a la propagación de ondas.

La corrosión también puede romper las tuberías debido a la propagación de ondas o a la deformación permanente del suelo (figura 69). Se deben evaluar las tuberías que tienen un historial de mantenimiento excesivo debido a fugas causadas por la corrosión. Proporcione tuberías con un revestimiento o una protección catódica apropiada para el control de la corrosión.

Foto: Seattle Water Department



Figura 68. Tubería de 20 pulgadas (510 mm) de diámetro que colapsó en el centro de Seattle luego del terremoto de 1965.

Foto: Duane Ford



Figura 69. Tubería corroída que colapsó en el terremoto de Coalinga, California.

Deformación permanente del suelo. Las tuberías se mueven con el suelo durante la licuefacción o el flujo lateral (figuras 70 y 71), el asentamiento diferencial, el agrietamiento y el deslizamiento. Las tuberías fallan porque se doblan, se someten a esfuerzos de corte, a tracción y a compresión (figura 72). Este mecanismo de daño incrementa las tasas de falla en comparación con la propagación de ondas. Las tuberías parcialmente vacías (principalmente alcantarillados de gravedad) pueden flotar debido a la licuefacción si la profundidad a la que se encuentra enterrada la tubería está dentro de la capa licuada. Asimismo, las conexiones pueden romper la tubería y afectar los servicios.

Foto: D.B. Ballantyne



Figura 70. El flujo lateral produjo el agrietamiento del terreno en Agoo, Filipinas.

Foto: Los Ángeles Department of Water and Power



Figura 71. Rotura por compresión en la unión de la tubería de PVC causada por el flujo lateral.

Foto: D.B. Ballantyne



Figura 72. Tubería de acero que se rompió debido a la compresión en el terremoto de San Fernando, California.

Es importante elaborar mapas de las amenazas de la licuefacción y de otros tipos de deformación permanente del suelo para comprender la vulnerabilidad de la tubería dentro de un sistema de agua y para diseñar nuevas tuberías que podrían atravesar áreas con deformación permanente del suelo. Esta deformación provocada por la licuefacción se puede cuantificar con el índice de intensidad de la licuefacción desarrollado por Youd y Perkins (1987) y, más recientemente, con el análisis de regresión lineal múltiple (RLM) desarrollado por Bartlett y Youd (1992). Se han elaborado mapas de deformación permanente del suelo para algunas áreas.

La deformación permanente del suelo produce una combinación de desplazamiento longitudinal y transversal en relación con el eje axial de la tubería. Para uniones sueltas, como la de espiga y campana, el movimiento longitudinal es soportado principalmente por la extensión y compresión axial en la unión. Dependiendo del tipo de unión, específicamente la profundidad de la campana o la distancia del empalme y la ubicación de la espiga dentro de la campana, una unión simple en extensión axial puede resistir $1\frac{1}{2}$ pulgadas (40 mm) de desplazamiento antes de que se produzcan fugas y la tubería se desprenda de la unión. Una unión simple en compresión, para uniones sueltas o fijas, puede resistir posiblemente $\frac{3}{4}$ de pulgada (20 mm) de desplazamiento antes de que se produzca contacto entre la espiga y la campana. Dependiendo de la resistencia y la ductilidad de la tubería, la espiga puede empujar la campana y la tubería longitudinalmente transfiriendo parte de la deformación unitaria por compresión. También puede partir la campana, haciendo que se rompa. Para uniones fijas, la deformación permanente del suelo longitudinal en tracción causa una deformación axial en el segmento de la tubería.

La deformación permanente del suelo transversal produce una combinación de flexión del segmento de la tubería, rotación de las uniones y extensión axial. La cantidad relativa de flexión y rotación de las uniones está en función de la proporción de longitud con relación al diámetro de la tubería (L/D), la rotación máxima permisible de las uniones y la resistencia y ductilidad de la tubería. Si la proporción de L/D es alta y la tubería tiene una baja ductilidad, como las de hierro fundido y de asbesto-cemento, puede ser vulnerable a la rotura por flexión (figuras 12 y 13). La tubería con una alta ductilidad, como la de hierro dúctil, polietileno y acero, se puede doblar. La rotación máxima permisible de las uniones se puede estimar basada en la recomendación del fabricante para el radio mínimo de instalación de tuberías. Generalmente, mientras más grande sea el diámetro de la tubería, mayor será el radio mínimo de instalación y menor será la rotación permisible de las uniones. Cuando se excede la rotación permisible de las uniones, algunos diseños de uniones sueltas de campana-espiga se romperán al separarse y algunos transferirán un momento de flexión al segmento de la tubería. Algunos sistemas de uniones fijas permiten que las uniones roten después de haber sido instaladas.

La vulnerabilidad relativa de los materiales de las tuberías de agua a la deformación permanente del suelo se presenta en el cuadro 2. Sin embargo, para una tubería de material y un tipo de unión determinados, es difícil establecer qué cantidad de movimiento de la deformación permanente del suelo va a producir una ruptura sin antes saber el tipo, modo y extensión espacial de los movimientos de la deformación permanente del suelo. Por ejemplo, una tubería de hierro fundido con una unión sellada con plomo tendría probabilidad de romperse debido a una desviación transversal abrupta de cuatro pulgadas (102 mm) en el margen de la zona de flujo lateral. Sin embargo, la misma tubería probablemente soportaría una deformación permanente del suelo transversal sinusoidal distribuida de cuatro pulgadas (102 mm) sobre un ancho de 160 pies (50 m).

Es decir, para una deformación permanente del suelo transversal, las desviaciones abruptas son más peligrosas que las desviaciones distribuidas “en escalones”. De manera similar, para tuberías con uniones sueltas, la deformación permanente del suelo longitudinal abrupta tiene mayor posibilidad de producir una ruptura que la deformación permanente del suelo longitudinal distribuida. Para tuberías con uniones fijas o sueltas, la deformación permanente del suelo longitudinal distribuida tiene mayor probabilidad de producir rupturas que la deformación permanente del suelo transversal distribuida.

La dirección de la deformación permanente del suelo es casi siempre cuesta abajo o hacia una superficie libre, como el margen de un río o una zanja de drenaje. Actualmente, no se cuenta con información suficiente para estimar la configuración de la deformación permanente del suelo; es decir, desviaciones abruptas versus movimiento distribuido.

Rupturas por fallas. Las tuberías que atraviesan fallas se cortarán o serán expuestas a tracción o compresión cuando la falla se mueva. Las tuberías pueden experimentar el mismo tipo de movimiento del suelo que producen los otros tipos de deformación permanente del suelo. Por ejemplo, los movimientos abruptos del suelo pueden ocurrir en los márgenes de una zona de flujo lateral similar a la del desplazamiento horizontal de una falla. Las tuberías que están dentro de la categoría de vulnerabilidad baja serán las que mejor resistan el movimiento de una falla.

Tuberías elevadas y cruces a través de puentes. La tubería elevada, a menudo apoyada sobre pilotes, está expuesta a la carga sísmica lateral y longitudinal. El sistema de apoyo de tuberías debe estar diseñado para resistir las cargas sísmicas. Una alternativa de mitigación, dependiendo del sitio, es enterrar la tubería en una berma de tierra. De lo contrario, evalúe la estructura de soporte que se apoya en pilotes y refuércela según sea necesario (figura 73).



Foto: A. Rodriguez

Figura 73. Ampliación de apoyos y base deslizante de tubería de conducción en el acueducto de Orosi, Costa Rica, que aseguran su correcto comportamiento en caso de sismos

Las tuberías apoyadas sobre puentes dependen de la estructura del puente, así como de la conexión de entrada y salida a la estructura del puente. Las tuberías deben estar adosadas a la estructura del puente para soportar las cargas sísmicas amplificadas por la estructura del puente. Además, la tubería debe diseñarse para resistir el movimiento diferencial causado por el sismo y por la dilatación y contracción térmicas a lo largo de la estructura del puente. Por lo general, la flexibilidad longitudinal puede ser contenida usando una banda de expansión o una tubería de campana-espiga diseñada e instalada para permitir el desplazamiento longitudinal. Proporcione un par de uniones flexibles que permitan la rotación de las uniones junto con una unión que brinde desplazamiento longitudinal para permitir la desviación a cada lado del puente. Dos uniones esféricas en serie con una banda de expansión brindan esa flexibilidad.

Las tuberías que pasan a través de estribos de puentes están sujetas a roturas por corte cuando se consolida el relleno detrás del estribo del puente. Tome las medidas necesarias para desviar las tuberías en caso de que atraviesen estribos (figura 74).

Consideraciones para el diseño de tuberías

La vulnerabilidad sísmica de las tuberías se basa en las siguientes consideraciones:

Resistencia y ductilidad.

- Se prefiere la tubería dúctil de pared gruesa sobre la tubería frágil de pared delgada.
- Las tuberías de hierro dúctil, de acero y de polietileno son muy dúctiles y se deformarán considerablemente antes de romperse.
- El policloruro de vinilo (PVC) es moderadamente dúctil.
- La tubería cilíndrica de asbesto-cemento y de concreto es algo dúctil.
- La tubería de acero revestida o forrada con mortero tiene un cilindro de acero que es dúctil.
- La tubería de hierro dúctil a menudo tiene un revestimiento de mortero. Cuando la tubería ceda, el mortero se cuarteará y se astillará. Esto deteriorará el revestimiento anticorrosivo y hará que el acero se empiece a corroer. Los problemas de corrosión pueden representar un problema en el futuro.
- Los sistemas de revestimiento o recubrimiento de tubos deberán brindar protección continua contra la corrosión.

Tipo de uniones.

- Los sistemas de tuberías dúctiles con uniones fijas segmentadas o soldadas resistirán el movimiento del terreno y producirán un daño mínimo.
- Las uniones segmentadas (es decir, de espiga y campana) con empaques de caucho permitirán el movimiento de las uniones, pero se separarán fácilmente.
- La tubería segmentada con uniones de plomo o mortero se vuelve rígida y no permitirá el movimiento de las uniones, lo cual incrementará la deformación de las tuberías y su posterior ruptura.
- El diseño moderno de la tubería de espiga y campana emplea empaques elastoméricos para sellar las uniones de las tuberías. Estas tuberías pueden ser flexibles a la expansión y rotación, dependiendo de la práctica de instalación. Son flexibles a la compresión hasta tener un contacto de metal sobre metal. Por lo general, el grado de flexibilidad se muestra en las normas para materiales de tuberías o puede ser proporcionado por el fabricante.
- La tubería de menor tamaño permite una mayor rotación de las uniones que las tuberías de mayor diámetro.
- Se pueden fabricar campanas especiales para dar a las tuberías mayor flexibilidad de expansión, compresión y rotación.
- Las campanas dúctiles estándares pueden ser torneadas para permitir una mayor rotación.
- Las secciones más cortas de tuberías con un mayor número de uniones incrementan la curvatura disponible del sistema de tuberías.
- Cuando se instala la tubería es una práctica común introducir la espiga de la tubería en la campana. Esto elimina la flexibilidad de la tubería a la compresión. La tubería de hierro dúctil se envía desde la fábrica con un anillo pintado en el extremo de la espiga para indicar la distancia correcta a la que ha sido introducida a la campana, lo cual deja un pequeño espacio entre el

Foto: OPS/OMS



Figura 74. Colapso de un puente debido a un sismo que puso en riesgo las tuberías de conducción de agua potable.

extremo de la espiga y la campana. Si se respetara el límite del anillo pintado durante la instalación, la tubería tendría cierta flexibilidad a la compresión. De manera similar, las uniones deben diseñarse de tal manera que puedan moverse antes de que se desacoplen del todo.

- Generalmente, las uniones de espiga y campana de tuberías cilíndricas de acero y concreto se revisten de mortero después de haber sido unidas para evitar la corrosión de la campana y espiga de acero. Esto le da mayor rigidez a la unión. Se debe considerar alguna alternativa para controlar la corrosión sin que la unión deje de ser flexible.
- La mayoría de las tuberías de acero utiliza uniones soldadas, mientras que la tubería de polietileno tiene uniones fundidas al calor. Ambas dependen de la ductilidad de la tubería para poderse unir.

Resistencia, rigidez y diámetro de la tubería.

- Incluso la tubería no dúctil resistirá el daño sísmico si es lo suficientemente fuerte para resistir la rotura por flexión, tracción y compresión.
- Se recomienda una tubería con una proporción de longitud con relación a diámetro de menos de 12 (para acero fundido) ya que será más resistente a la flexión. Para ese caso, la resistencia de la tubería generalmente es lo suficientemente fuerte para resistir las cargas de flexión.
- Las uniones deben estar empalmadas para que resistan el movimiento fuerte del terreno que podría producir la separación de las uniones.
- Las secciones grandes de las tuberías están sujetas a esfuerzos de flexión mayores que las secciones cortas. Los esfuerzos de flexión se disipan en las uniones de las tuberías. Las tuberías diseñadas con longitudes nominales de tuberías más cortas están sujetas a menores niveles de esfuerzos de flexión. Las secciones de las tuberías de gran diámetro son más resistentes a la flexión que las secciones de las tuberías de pequeño diámetro.

Restricción de las uniones.

- La restricción de las uniones de una tubería es un aspecto importante en la vulnerabilidad sísmica de las tuberías porque permite la transferencia de cargas y el desplazamiento a través de las uniones.
- Las uniones fijas también se usan comúnmente para resistir los empujes hidráulicos axiales, lo que elimina la necesidad de macizos de apoyo.
- Las uniones soldadas, usadas para tuberías de polietileno y algunas veces para tuberías de acero, están inherentemente empalmadas.

A continuación se presentan cuatro métodos para mejorar la restricción de las uniones:

1. Mantener la flexibilidad de las uniones en extensión longitudinal, compresión y rotación.

Si se usa un sistema de restricción para resistir el empuje axial, no puede ser instalado para brindar mayor flexibilidad a la extensión (separación de uniones sin que se desprendan). Puede ser diseñado para permitir la compresión o rotación. Si el sistema utiliza varillas para sujetar la espiga y campana, pero no para contener el empuje hidráulico, las varillas se deben aflojar para permitir la extensión y rotación de las uniones. La distensión permisible debe ser limitada de manera que las varillas permanezcan algo ajustadas y no se produzca la separación de las uniones a tal punto que el sello de la unión se rompa cuando ocurra la deformación del terreno. Los sistemas de restricción de uniones incorporados en la unión o junta no permitirán ninguna extensión. Este método no es recomendable porque coloca toda la deformación unitaria de la tracción sobre la tubería. Se prefieren los sistemas de restricción de uniones que permitirían que la unión se comprima aún más después de la instalación (figura 75). El uso de pernos para fijar las uniones (es decir, pernos de fricción, soldadura de penetración con elementos de conexión) con diseños de cuña permiten la compresión porque posibilitan que la conexión unida por pernos se afloje (suponiendo que la espiga no ha sido empujada hacia la campana). Algunos diseños no permiten la compresión y, por tanto, no se recomiendan.

2. **Redistribuir las cargas uniformemente a través del sistema de restricción después de que la unión se haya movido luego de la instalación original.** La mayoría de sistemas de restricción impartirán cargas puntuales si las uniones se mueven (rotan) después de la instalación y causarán fallas. Se prefieren los sistemas de restricción que permiten la redistribución de la carga. Los sistemas de tubos soldados continuos ofrecen la ventaja de brindar una distribución uniforme de la carga en la tubería y en la unión.

Foto: D.B. Ballantyne

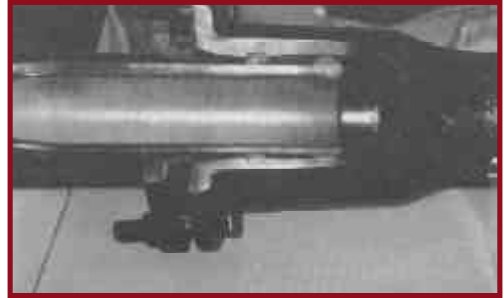


Figura 75. El diseño japonés de uniones de tuberías sismorresistentes permite flexibilidad en términos de extensión, compresión y rotación.

3. **Transferir un alto porcentaje de la capacidad de carga de la tubería.**

Durante un sismo, puede ser importante transferir grandes cargas longitudinales a través de la unión para resistir el desplazamiento diferencial significativo en una tubería. Esto limitaría la deformación del sistema de tuberías ya que el desplazamiento relativo se distribuiría sobre una amplia longitud "no anclada". Se puede desarrollar una longitud no anclada máxima de aproximadamente 600 pies (180 m). Esto requiere diseñar un sistema de restricción que transfiera cargas a fin de reducir las cargas de fricción de la tubería o del suelo desarrolladas en 600 pies (180 m) de tubería (ASCE 1984).

4. **Mantener la integridad de la tubería cuando sea instalada.** Es importante no dañar la integridad de la tubería cuando se instale el sistema de restricción. Las juntas unidas por pernos que desarrollan esfuerzo a través de la fricción no deben dañar la tubería. Soldar anillos de fijación a la tubería puede debilitar la pared de la tubería. Si se ranura la tubería, la sección transversal donde se ha ranurado queda debilitada frente a los esfuerzos de tracción. Los tornillos de presión colocan cargas puntuales sobre las paredes de la tubería, lo cual ha ocasionado la ruptura de tuberías de hierro fundido, pero pueden ser usados con materiales de tuberías dúctiles. Los sistemas de cuña parecen limitar la degradación de la tubería. Los accesorios de las espigas hechos en fábrica no dañan la integridad de la tubería, pero limitan la flexibilidad porque acortan las longitudes de tubería requeridas durante la instalación en el campo.

Empalmes y accesorios de las tuberías. Los empalmes y válvulas instalados en las tuberías a menudo son de materiales diferentes de los de las tuberías. Por ejemplo, muchos empalmes (es decir, codos, tubos en "T" y "T" dobles) para tuberías de hierro dúctil de pequeño diámetro, de PVC (de

Foto: Los Ángeles Department of Water and Power



Figura 76. Colapso de la válvula de hierro fundido en una tubería de San Fernando, California.

acuerdo con la norma AWWA C900) y de polietileno son de hierro fundido. El hierro fundido es frágil y se romperá más fácilmente que el hierro dúctil. Los empalmes deben ser tan fuertes y dúctiles como el material de la tubería. En los Estados Unidos, la norma ANSI/AWWA C153/A21.53, *American National Standard for ductile-iron compact fittings* (Norma nacional estadounidense para empalmes compactos de hierro dúctil) es relativamente nueva y su aplicación se está generalizando para reemplazar el uso de empalmes de hierro fundido. Se deben usar válvulas de acero o hierro dúctil en lugar de hierro fundido (figura 71).

Diseño sismorresistentes de tuberías y recomendaciones para la mitigación de sismos

Esta sección incluye recomendaciones para el diseño de tuberías nuevas resistentes a los sismos y cómo mitigar el efecto de los sismos en las tuberías existentes. Se centra principalmente en tuberías ubicadas en áreas susceptibles a la licuefacción. También se discute el cruce de fallas.

Tuberías nuevas. Utilice cualquier tubería moderna de campana-espiga o una tubería continua que resista el paso de la onda sísmica.

En áreas susceptibles a la licuefacción:

- Evite el área licuable – reubique las tuberías o colóquelas a mayor profundidad (perforación direccional).
- Utilice sistemas de tuberías dúctiles y flexibles, tales como tuberías de hierro dúctil, de acero soldado o de polietileno con uniones fijas. Diseñe la estructura de la tubería para que resista la deformación permanente del suelo (DPS).
- Proporcione conexiones especiales que soporten el movimiento longitudinal de la tubería sin causar daños.
- Utilice como restricción juntas fijas en lugar de macizos de apoyo para resistir las fuerzas del empuje. Los macizos de apoyo pueden moverse si se produce la licuefacción.
- Minimice las presiones del suelo (vea las recomendaciones para el cruce de fallas más adelante en este capítulo).
- Brinde flexibilidad y redundancia en la operación del sistema.
- Incorpore un programa de respuesta frente a emergencias e incluya válvulas de corte alrededor del área vulnerable.
- Establezca los suelos con métodos tales como la vibroflotación, columnas de piedra o inyección con concreto líquido (esto generalmente es muy costoso).

Sistemas existentes. Céntrese en los elementos más vulnerables del sistema:

- Refuerce los segmentos críticos y vulnerables en conformidad con las nuevas recomendaciones de diseño.
- Implemente un programa integral de reforzamiento o reemplazo (como parte de un plan integral), cuyas prioridades se basen en la amenaza sísmica, sistema de tuberías y criticidad.
- Proporcione flexibilidad y redundancia en la operación del sistema.
- Instale un programa de respuesta frente a emergencias que incluya válvulas de corte.

Diseño general para el cruce de fallas. Minimice los requisitos de desplazamiento o capacidad de carga del sistema de tuberías (ASCE 1984).

- Si las restricciones del derecho de paso lo permiten, oriente la tubería de manera que sea colocada en tracción por la falla.
- Incremente el grosor de la pared de la tubería para evitar que la tubería se deforme debido a las cargas de fricción del suelo. La reducción del diámetro de la tubería tiene un impacto mucho menor sobre la deformación de la tubería.
- Reduzca las cargas de fricción del suelo al minimizar la profundidad de entierro o el peso del relleno. El relleno liviano con bloques de isopor (poliestireno expandido) es una posibilidad y se recomienda instalarlo de manera elevada. Este es el mejor método desde una perspectiva de carga del suelo, pero es probable que no sea aceptable por otras razones (figura 77).

- Reduzca el coeficiente de fricción del suelo mediante el uso de tuberías con paredes externas lisas o pulidas. Observe que la envoltura de plástico que comúnmente se usa para la protección contra la corrosión no reducirá el coeficiente de fricción para rellenos de arena porque los granos se incrustan en el plástico.
- Utilice juntas de dilatación a ambos lados donde se espera que se produzca la ruptura de la falla.
- Ubique la tubería en un canal o túnel de espera que sea lo suficientemente ancho para resistir el movimiento esperado de la falla.
- No utilice anclajes, tales como macizos de apoyo, codos o conexiones, a menos de 600 pies (180 m) de la zona de falla. Se requieren conexiones especiales para soportar el movimiento a lo largo de la longitud no anclada.
- Proporcione componentes alternos siempre que sea posible; utilice tuberías más pequeñas en lugar de una tubería grande. Ubique los cruces alternos en diferentes lugares.

Fuente: A. Rodríguez

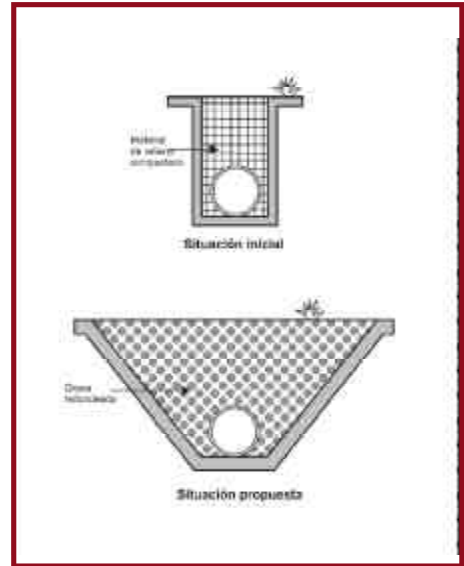


Figura 77. Solución adoptada en el acueducto de Orosi para reducir la vulnerabilidad de la tubería en la zona próxima a la falla sísmica.

Tanques de almacenamiento y reservorios

Descripción

Esta sección discute la vulnerabilidad y mitigación de sismos de los tanques de almacenamiento de agua y los reservorios. Incluye una descripción de algunos reservorios típicos, así como las consecuencias de las fallas.

Generalmente, los tanques de almacenamiento y los reservorios de un sistema promedio satisfacen la demanda de agua de uno a tres días. Esta capacidad de almacenamiento cubre los requerimientos de caudales para la demanda diurna y para los sistemas contra incendios.

Por lo general, los tanques de almacenamiento y los reservorios aquí descritos incluyen reservorios de tierra revestidos, tanques de concreto moldeados en el lugar y postensados, tanques de acero apoyados, cámaras de presión de acero, tanques de acero elevados y tanques hechos con elementos verticales de madera.

Los reservorios de tierra a menudo son estructuras de tierra con revestimiento de concreto y techos apoyados en columnas de acero, madera o concreto.

Los tanques de concreto moldeados en el lugar generalmente se encuentran enterrados o apoyados. Por lo general, los tanques postensados se encuentran enterrados o apoyados y su refuerzo primario es provisto por una malla de acero o tendones de postensado. Generalmente, los techos de ambos se apoyan en columnas.

Usualmente, los tanques de acero apoyados y las cámaras de presión se encuentran cimentados sobre un muro circular o losa de cimentación. Los tanques que tienen proporciones mayores de altura en relación con el diámetro, a menudo se anclan a un muro circular. Sus techos de acero se apoyan sobre un lado de la pared o utilizan columnas interiores, dependiendo del diámetro del tanque. Los tanques elevados se pueden apoyar sobre un solo pedestal o sobre una estructura arriostrada con múltiples soportes.

Los tanques de madera se construyen con elementos de madera verticales cubiertos de anillos o zunchos.

Consecuencias de las fallas

Los tanques de almacenamiento y los reservorios tienen una función vital en la operación del sistema después de un sismo. El sistema generalmente depende del agua almacenada para la extinción de incendios. Los sistemas de conducción por lo general no han sido diseñados para suministrar caudales suficientes para las tareas de extinción de incendios.

La evaluación sísmica de los tanques, como otros componentes del sistema, debe tomar en cuenta las consecuencias de las rupturas o fallas. El funcionamiento adecuado de los tanques es un aspecto importante porque el agua almacenada en éstos es crucial para las tareas de extinción de incendios. Asimismo, el colapso de tanques, a diferencia de muchas otras estructuras de los sistemas de agua, puede convertirse en una amenaza para la seguridad humana. La evaluación de las consecuencias de la falla o ruptura de un tanque también debe incluir el número de tanques o fuentes que abastecen a una zona de presión y la capacidad relativa de cada uno (como se muestra en la figura 78). Un tanque de gran tamaño que brinda almacenamiento únicamente a una zona de presión es más crítico que varios tanques más pequeños que abastecen a una zona.

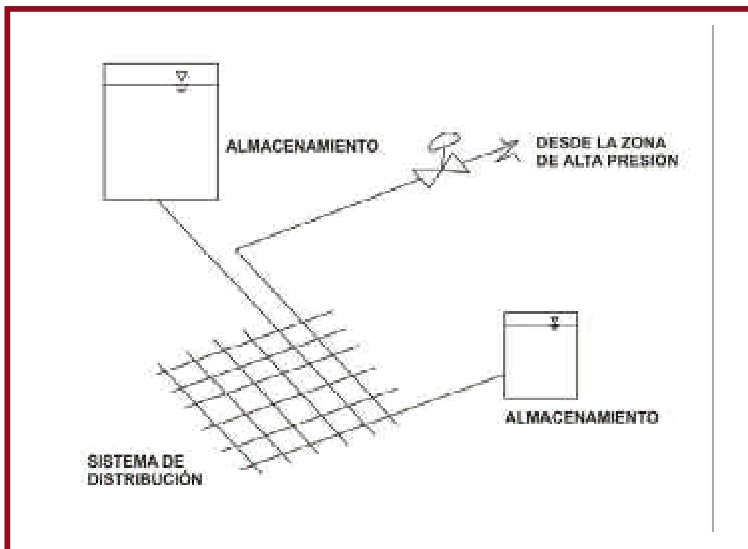


Figura 78. La evaluación del almacenamiento y abastecimiento en una zona de presión debe considerar el número, capacidad y ubicación de los tanques de almacenamiento.

Respuesta sísmica del contenido de un tanque

El agua de los tanques responde de manera diferente que una masa rígida. Housner (1963) modeló una porción de agua como si estuviera rigidamente unida a la pared del tanque impartiendo fuerzas de impulsión. La otra porción de agua fue unida al tanque mediante resortes, lo cual produce un efecto ondulatorio o de convección. La carga resultante en realidad es menor que si toda el agua fuese modelada como una masa rígida. La figura 79 muestra el modelo de un tanque.

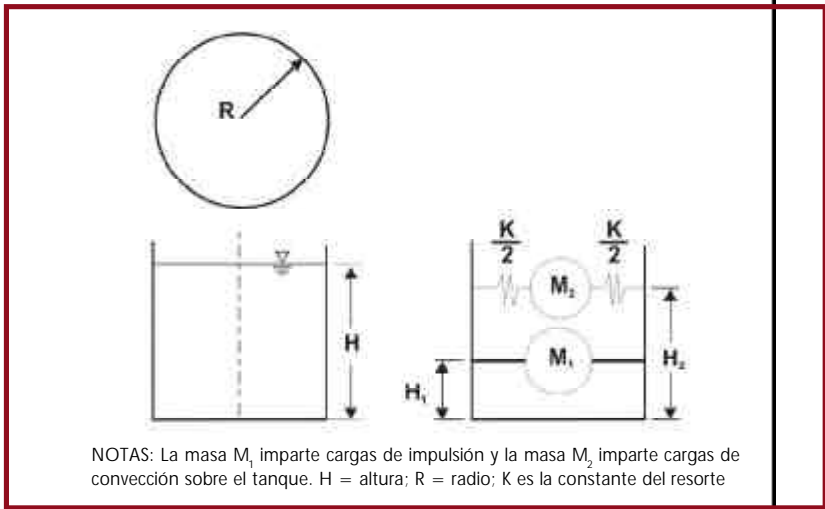


Figura 79. Esquema del modelo de un tanque que muestra su respuesta en caso de sismos.

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 del diámetro en relación con la 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 80 (AWWA 1984).

En el diseño del tanque se debe tomar en cuenta el desplazamiento oscilatorio del agua porque puede impartir cargas sobre el techo del mismo. El techo puede o no estar diseñado para resistir esas cargas. Para mitigar ese tipo de daño, proporcione una mayor altura entre el nivel del agua y el borde del tanque para resistir ese 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.

Fuente: ANSI/AWWA D100-84

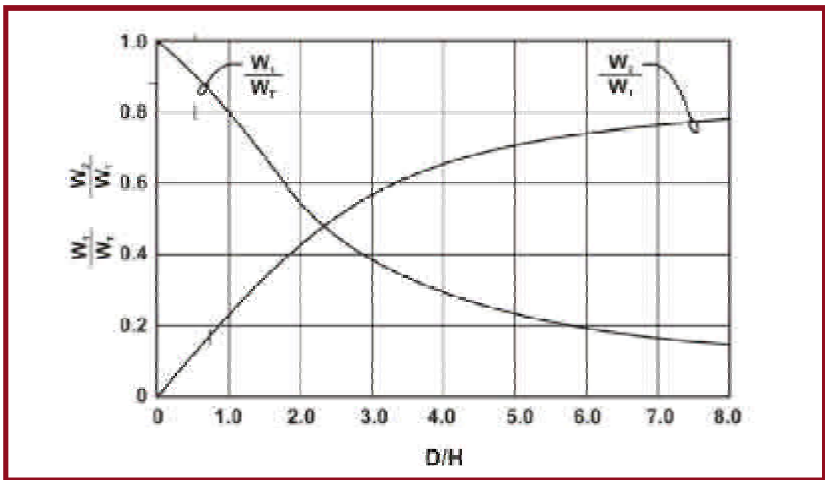


Figura 80. La distribución del peso (w) del tanque entre las cargas de impulsión y convección está en función del diámetro (D) y altura (H) del tanque.

Historia de las normas de diseño de tanques de acero

En 1935 se estableció por primera vez en los Estados Unidos 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 los tanques para la industria de energía nuclear.

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, quien especificaba cargas laterales estáticas. La norma AWWA D100-79 en el Apéndice A incluía disposiciones opcionales para el diseño sísmico, las cuales fueron incorporadas a la norma en 1984 y se volvieron obligatorias para la zona sísmica 4 (designada por el Código Uniforme de Construcción), y opcionales para las zonas sísmicas 1, 2 y 3.

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

Mecanismos de las fallas y alternativas de mitigación

Mecanismos de fallas generales. Los mecanismos de 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 (figuras 81 y 82). Si la conexión al tanque se hace por uno de sus lados, brinde flexibilidad a la conexión mediante 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. Solo se moverá la sección de la base más cercana a la pared. También se puede brindar flexibilidad a la conexión de la base al añadir una banda de expansión que resista 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 se debe brindar flexibilidad a la unión entre ambos.

Los techos y las columnas de soporte pueden sufrir daños debido al efecto oscilatorio del agua (figura 83). 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 pesados de concreto pueden sufrir daños si la estructura no ha sido diseñada para transferir las fuerzas laterales del techo a las paredes y cimientos del tanque.

Foto: D.B. Ballantyne



Figura 81. Empalme roto en un tanque no anclado en Scotts Valley, California, luego del terremoto de Loma Prieta.

Foto: D.B. Ballantyne



Figura 82. Conexión reparada en el tanque de Scotts Valley, California.

Foto: Holly Cornell



Figura 83. Daño al techo del tanque de acero debido al movimiento oscilatorio del contenido producido por el terremoto de Loma Prieta, California

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 porque 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 postensado. Los tanques revestidos de mallas de acero y concreto postensado 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.

La malla de acero de los tanques de concreto ha mostrado una tendencia a corroerse, lo que ha producido rupturas de tanques. Esto ha ocurrido principalmente en tanques de principios de los sesenta (figuras 84 y 85), pero también en construcciones más modernas. Los indicios de deterioro de un tanque son agrietamiento vertical, desmoronamiento del concreto o decoloración debido a las filtraciones del tanque. Para mitigar esos problemas, primero se detienen las fugas con revestimientos, luego se envuelve nuevamente el tanque con mallas metálicas o bandas de acero y, finalmente, se lo cubre con un revestimiento protector.

Las juntas de techo-pared y de pared-base del tanque deben diseñarse 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. Esos 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.

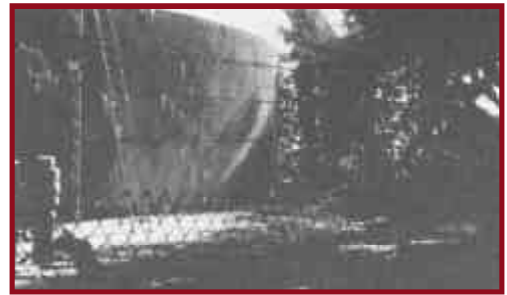


Figura 84.

Foto: Anshel Schiff



Figura 85. Tanque con malla de acero de la década de los sesenta que falló en el terremoto de Loma Prieta, California.

Foto: D.B. Ballantyne



Figura 86. Tanque no anclado que se deslizó en Moin, Costa Rica.

Foto: Los Ángeles Department of Water and Power



Figura 87. Tanque de productos químicos no anclado que se deslizó en San Fernando, California.

Tanques de acero a nivel del suelo. Esta categoría de tanques generalmente no se encuentra anclada. Cuando la proporción de la altura en relación con el diámetro es menor que 0,5, usualmente no serán vulnerables a daños en las paredes, pero es más probable que sufran daños en el techo debido al movimiento oscilatorio del agua. Los tanques pequeños no anclados pueden deslizarse (figuras 86 y 87).

Cámaras de presión de acero. Estos tanques pueden o no estar anclados. Generalmente, las cámaras de presión tienen una proporción de altura en relación con el 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 (figuras 88 y 89). 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 90).

Los anclajes adecuados evitarán el levantamiento (figura 91) 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 92 muestra

Foto: D.B. Ballantyne



Figura 89. Tanques no anclados que desarrollaron pandeo de tipo "pie de elefante" al extremo que la cáscara se dobló hacia atrás sin romperse en Moin, Costa Rica.

Foto: M.J. O'Rourke



Figura 88. Tanque no anclado de 400.000 galones (1,5 m³) que giró y se partió; desarrolló pandeo tipo "pie de elefante" y se rompió en la discontinuidad entre las placas únicas y dobles en la cáscara (terremoto de Landers, California).

Foto: Alan Porush



Figura 90. Perno de anclaje que se extendió luego del terremoto de San Francisco.

Foto: William Gates



Figura 91. Conexión de pared-base de tanque no anclado con rotura y vaciado de su contenido tan rápidamente que implosionó la parte superior.

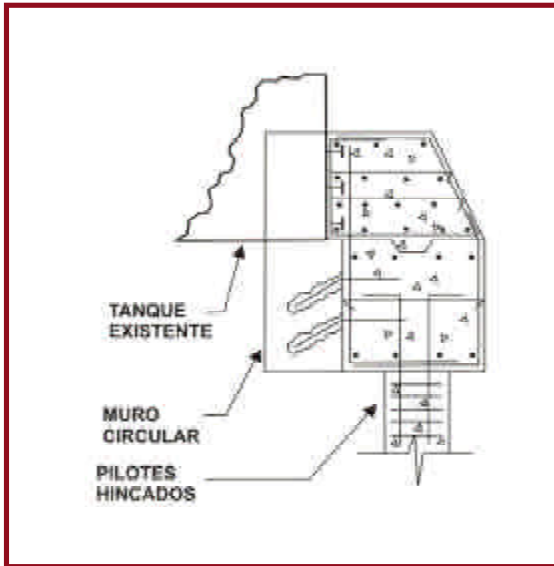


Figura 92. Diseño mejorado para tanques de concreto con pilotes hincados.

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 a US\$ 200.000 por tanque con una capacidad entre 0,5 a 5 mil galones (1,9 a 18,9 m³). Mejorar los tanques especiales que tienen una fachada arquitectónica puede resultar más costoso.

El reforzamiento de la base hace que el tanque trabaje más como un cuerpo rígido en lugar de flexionarse cuando ocurre un sismo. El peso del agua contenida en el tanque evitará que se voltee. Esto se puede lograr mediante la instalación de 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.

Foto: National Oceanic and Atmospheric Administration



Figura 93. Colapso de un tanque elevado.

Tanques elevados. Los tanques elevados pueden ser vulnerables como resultado de cimientos inapropiados, dimensión inadecuada de las columnas o arriostramiento transversal deficiente

(figura 93). Los tres elementos mencionados conforman la estructura de apoyo de los tanques elevados y deben ser diseñados para que cada uno tenga una capacidad de carga similar.

Los tanques mismos por lo general son confiables. Generalmente, los tanques elevados que han sido dañados sufren 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 94).

Los cimientos deben diseñarse de tal manera que resistan el volcamiento. Las varillas que emplean conexiones roscadas deben utilizar roscas de seguridad. Para funcionar como un sistema, las columnas de los cimientos deben estar conectadas con vigas de cimentación.

Las conexiones de los arriostres deben estar diseñadas para ser más fuertes que los arriostros mismos. Esto permitirá que el arrioste se estire, desarrolle su fluencia y absorba energía; de esa 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 arrioste 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, y
- las columnas se pandean.

Una alternativa inicial es ajustar el arriostamiento transversal. Las soluciones de mitigación tradicionales incluyen reforzar los cimientos, columnas y arriostamientos. 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 arriostamientos. Se deben implementar algunas mejoras para equilibrar el sistema de cimientos, columnas y arriostamientos.

También se pueden realizar intervenciones parciales con alternativas de bajo costo, como el uso de vigas de conexión y la instalación de un arriostamiento 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 muy grandes en relación con el espesor de la pared, con capacidades de pandeo muy por debajo de su fluencia. A menos que sean arriostradas para resistir el pandeo, las columnas constituyen un eslabón débil en la estructura.

Los diseños innovadores para tanques elevados pueden incluir el aislamiento de la base, el arriostamiento 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 puede reducir el costo global del proyecto.

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

Foto: Federal Emergency Management Agency



Figura 94. Tanque elevado colapsado que cayó dentro del perímetro de sus cimientos en Imperial Valley, California.

Normas para el diseño de tanques nuevos

Los tanques nuevos deben ser diseñados de acuerdo con los criterios sísmicos que estén en conformidad con la versión vigente de las normas nacionales. Si no existiera una norma nacional, se sugiere la consulta 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 pretensado con dosificador helicoidal*)
- Código Uniforme de Construcción
- American Concrete Institute 350, Concrete Environmental Engineering Structures
- American Petroleum Institute 650, Welded steel tanks for oil storage*
- American Lifelines Alliance. Seismic fragility formulation for water systems. Part 1 – Guideline, abril 2001. ASCE, FEMA**

Se debe considerar 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 que a la vez brinde una protección adicional.

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

**www.americanlifelinesalliance.org