

Vulnerabilidad sísmica de los sistemas de abastecimiento de agua

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

- fuentes
- plantas de tratamiento y estaciones de bombeo
- tuberías
- 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 incluyendo el daño sísmico y las alternativas de mitigación.

Fuentes

Esta sección cubre fuentes de abastecimiento de agua, incluidas 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. El agua es luego retenida en una presa o 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. Puede ser posible estabilizar las áreas vulnerables a los deslizamientos, pero ello podría ser una tarea muy costosa; además, en una situación de emergencia, el acceso a las áreas de deslizamientos puede 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.

Si 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 su suministro de aguas subterráneas luego de que el terremoto de 1991 incrementará la turbiedad en la cuenca hidrográfica (ver figura 3-1).



Fuente: D.B. Ballantyne

Figura 3-1 La cuenca hidrográfica que suministraba agua a la planta de tratamiento de Limón, Costa Rica, fue afectada por un fuerte deslizamiento, lo cual incrementó la turbiedad a 2400 NTU en el Río Banano.



Figura 3-2 Torre de captación que colapsó en San Fernando, California

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

Además de Costa Rica, los deslizamientos producidos por causas diferentes a sismos han causado 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.

Represas y bocatomas

Descripción. Las represas que contiene 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 incluyen 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 con los reservorios de almacenamiento generalmente son obras de tipo torre que son vulnerables a los efectos de las fuerzas de inercia, al asentamiento y al deslizamiento en las partes inferiores de los reservorios (ver figura 3-2). En un caso, el análisis preliminar de un reservorio de principios de los sesenta demostró que había diseños que no cumplían con las normas actuales. El volcamiento de estas torres hace que el sedimento más grueso ingrese al sistema de distribución, lo cual taponan las tuberías y causa daños serios a las válvulas, soportes de bombas y sellos. También puede prevenir el control adecuado del caudal proveniente del reservorio.

Daño sísmico y alternativas de mitigación. La mayoría de represas de tierra mecánicamente compactadas 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 de terraplenes de sedimento hidráulico usando material saturado, no cohesivo, de grano fino y mal compactado
- represas construidas sobre depósitos naturales no cohesivos que no son tan densos como los terraplenes
- represas con terraplenes inusualmente empinados.

Las fallas del suelo en el terraplén de las represas pueden incluir agrietamiento, asentamiento, licuefacción o desprendimientos (ver figura 3-3).

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.



Fuente: William Gates.

Figura 3-3 Represa del Reservorio Lower Van Norman (Calif.) que estuvo a punto de colapsar.

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 haya incrementado el caudal o haya 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, asentamiento o agua infiltrada en las caras de la represa
- desplazamientos, grietas o nuevos brotes de agua en los estribos
- incremento del caudal en los lechos de infiltración
- desplazamiento o deformación estructural 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
- suministro de electricidad de emergencia.

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 existentes. 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 la 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 ser dañados por la ruptura de 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 sismorresistente 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 aquellos usados para represas de tierra pueden ser utilizados para revisar los diseños y determinar los esfuerzos y el potencial de agrietamiento de las represas y de los accesorios de las represas. Las represas de concreto

se pueden estabilizar usando contrafuertes, drenajes o reduciendo el almacenamiento del reservorio.

Pozos

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

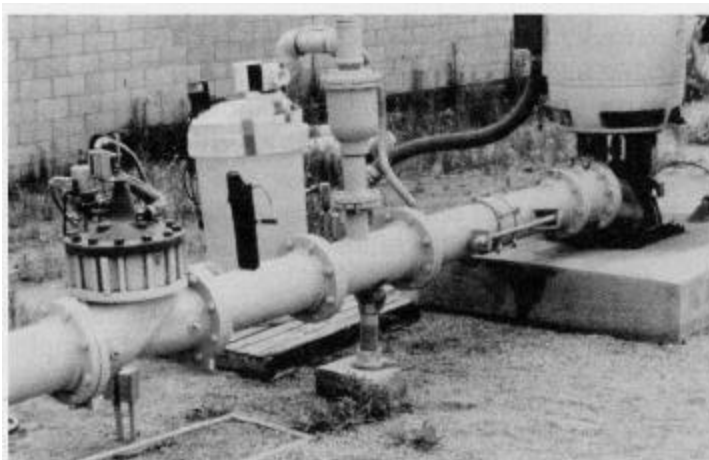
- acuífero
- tubería de revestimiento y tamiz del pozo
- bomba y motor
- suministro de energía
- equipo y controles eléctricos
- tuberías de conexión, válvulas y accesorios
- estructura de la caseta del pozo.

El sistema de pozos puede o no estar ubicado en la caseta del pozo. Los últimos cuatro se discutirán más adelante en este capítulo bajo “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 de 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 tamices 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 usar tamices.

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, 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 de los alcantarillados cercanos (como fue el caso en el



Fuente: M.J. O'Rourke.

Figura 3-4 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.

terremoto de San Fernando de 1971), efluentes de tanques sépticos, o materiales peligrosos que llegan al acuífero a través de las capas permeables o por una tubería de revestimiento del pozo no sellada.

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 al proporcionar sellos del pozo e implementar un programa de protección de bocas de pozo. Los sistemas sépticos no deben ser ubicados cerca de los pozos. El diseño de los alcantarillados cercanos debe ser sismorresistente.

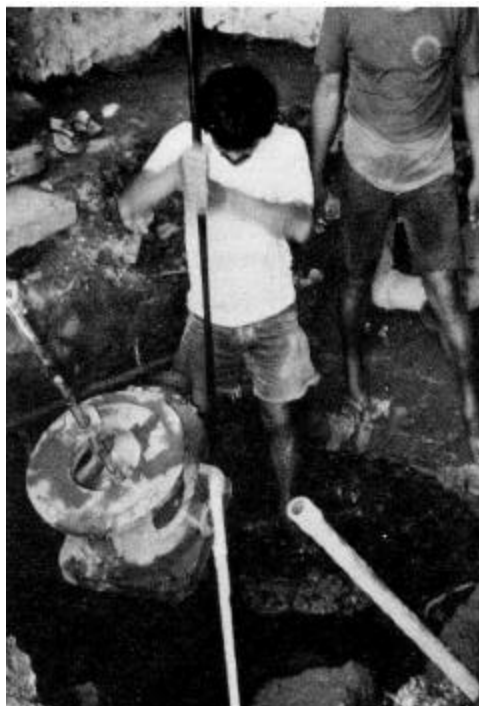
Las tuberías de revestimiento y las bombas expuestas a la propagación de la onda sísmica se moverán con los suelos que se encuentran alrededor del pozo. Este movimiento puede causar la rotura o desconexión de bombas, motores y líneas de descarga que no tienen acoplamientos flexibles (ver figura 3-4). 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 hechas de acero en lugar de hierro fundido a fin de que puedan absorber la energía de la vibración. La tubería de descarga de la 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 tuberías 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 (ver figura 3-5). 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, sin importar 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 sólo 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 enarenado puede dañar la tubería o quemar el motor. Es importante usar tamices de



Fuente: D.B. Ballantyne

Figura 3-5 La tubería de revestimiento del pozo que se dobló 15° de la vertical como resultado del flujo lateral en Dagupan, Filipinas.

pozos en lugar de tuberías de revestimiento ranuradas, una práctica común en la mayoría de pozos municipales en los Estados Unidos.

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
- 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. Su fuente de agua no tratada generalmente consta de cuencas hidrográficas, ríos o represas.

Las plantas de tratamiento de aguas subterráneas generalmente se usan para suavizar 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 coagulación (por ejemplo, alumbre, cloruro férrico y polímeros), ajuste del pH o control de la corrosión (por ejemplo, cáustico o cal), desinfección u oxidación (por ejemplo, cloro gaseoso, hipoclorito, ozono o permanganato de potasio), y otros usos (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 pre-sedimentación
- tanques de aeración
- tanques de mezcla rápida
- floculadores – paletas o deflectores
- tanques de sedimentación y clarificadores

- filtros – gravedad y 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
- instalaciones de 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
- 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
- iluminación.

Edificios

- edificios de operaciones
- edificios de mantenimiento
- edificios de almacenamiento de cloro
- edificios que albergan otras unidades de tratamiento
- 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 diésel de reserva, un banco de baterías y tanques de almacenamiento de combustible diésel, 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, y alternativas de mitigación

Las estructuras de los tanques, los canales y los conductos grandes en las plantas de tratamiento de agua son vulnerables al asentamiento diferencial, al incremento en las presiones laterales del suelo y a la flotación (ver figura 3-6). Los deslizamientos también pueden ser un problema en algunos sitios.

El asentamiento diferencial tiene mayor probabilidad de ocurrir cuando una estructura se ubica sobre suelos sujetos a la densificación, o sobre suelos o cimientos que son 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.

La instalación debe estar ubicada lejos de suelos que podrían densificarse. Las estructuras deben ubicarse sobre cimientos totalmente consistentes. De lo contrario, las estructuras deben ser diseñadas para resistir los desprendimientos o el movimiento diferencial esperado.

Los sismos incrementarán las presiones laterales del terreno de las obras de tierra. Los métodos desarrollados por Mononobe y Okabe (Seed 1970) brindan pautas

de diseño en caso se incrementen las presiones activas del terreno. Las presiones pasivas del suelo pueden ser activadas 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. Para evitar que floten, mantenga los tanques llenos. Para más información sobre medidas de mitigación de la licuefacción, consulte el capítulo 2.

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.



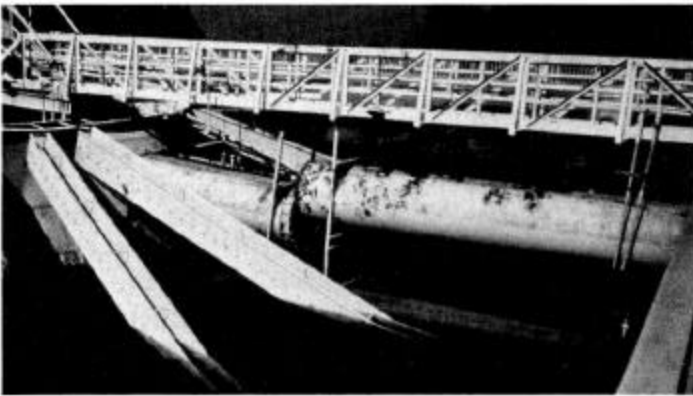
Figura 3-6 Tanque de aguas residuales que flotó debido a la licuefacción en Niigata, Japón

Versión Preliminar



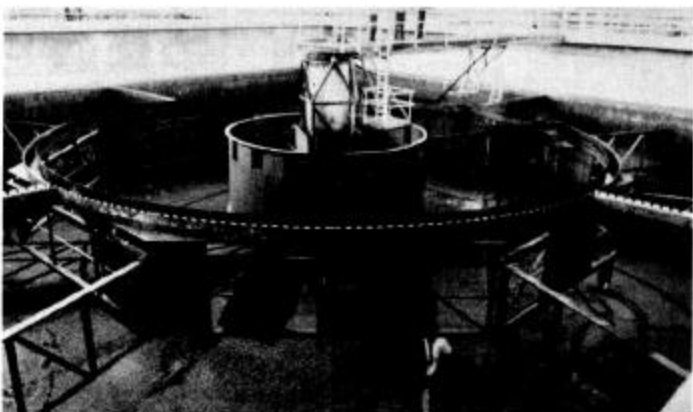
Fuente: D.B. Ballantyne.

Figura 3-7 Los deflectores del floculador y las placas inclinadas del clarificador que resultaron dañados en la planta de tratamiento de agua de Limón, Costa Rica.



Fuente: Kennedy/Jenks Consultants.

Figura 3-8 La presión hidráulica dañó seriamente el reactor-clarificador en la planta de tratamiento de agua en Rinconada (California).



Fuente: Kennedy/Jenks Consultants.

Figura 3-9 Deflectores dañados en clarificador secundario debido al terremoto de Loma Prieta (California).