

## TERREMOTO: LA CORRELACIÓN ENTRE LOS DAÑOS A TUBERIAS Y EL AMBIENTE GEOLÓGICO

Reuben Kachadoorian

---

Un artículo de la Sec. de California, seleccionado por la JOURNAL AWWA, escrito por Reuben Kachadoorian, geólogo, Departamento del Interior de la USGS, Menlo Park, California. Traducido de la JOURNAL AWWA; pág. 165-167; Marzo 1976.

---

En este artículo se muestra que los daños a tuberías, causados por los efectos directos e indirectos de terremotos, son menores en la cama de roca, intermedios en los sedimentos de grano grueso, y máximo en los sedimentos de grano fino. Si se consideran la manutención y el costo de reparaciones después de un terremoto en la selección de la ruta para un conducto, puede ser que una ruta más costosa sea la más conveniente desde el punto de vista a largo plazo

Los ingenieros que trabajan en la faja circum-Pacífico, propensa a los terremotos, tienen que tomar en cuenta los efectos sísmicos tanto como los problemas normales del diseño, la construcción, y el mantenimiento de conductos. A la medida que crecen las ciudades, se espera del ingeniero el diseño de sistemas de conducto cada vez más complejos para suministrar al usuario el agua necesario, gas, petróleo, y otros productos. También, mientras los sistemas de conductos llegan a ser más complejos, se tornan más susceptibles a los daños por terremotos.

Fallas en los conductos durante terremotos son más frecuentes y esparcidos que comúnmente se de-cuenta y, en algunos casos, constituyen un impedimento para los servicios de emergencia. Estudios de los efectos de los terremotos de Alaska, San Fernando, y otros lugares muestran que la intensidad y la distribución de los daños, y la clase de falla que experimenta un conducto durante un terremoto son. (1) principalmente una función de la geología que está debajo de y alrededor del conducto, y (2) de la clase y el uso del conducto

### Factores Geológicos que Afectan la Intensidad de los Daños

Durante un terremoto, un sistema de conductos está sujeto a los efectos directos e indirectos del movimiento sísmico. Los efectos directos incluyen levantamiento regional, asiento regional, desplazamiento de fallas, y sacudidos sísmicos. Los efectos indirectos son movimientos masivos provocados sísmicamente e incluyen (1) derrumbes, (2) disyunciones, (3) desplazamiento lateral de sedimentos, (4) asentamiento diferencial de sedimentos, y (5) consolidación de sedimentos. El desplazamiento lateral y el asentamiento diferencial son debidos, en parte, a la licuefacción de sedimentos. La intensidad y la distribución de los daños de los efectos directos e indirectos son más extensos en los sedimentos no consolidados (arcilla, azolve, arena y grava) que en la cama de roca. Además, la naturaleza de los sedimentos también juega un papel importante en la intensidad y la distribución de los daños a conductos

El levantamiento regional y el asentamiento regional no juegan un papel importante en los daños a conductos. El conducto, sin embargo, generalmente está sujeto a tensión en la zona del

levantamiento y a compresión en la zona de asiento.

Hay una relación elemental entre la amplitud, la aceleración, y la frecuencia de los sacudidos sísmicos. Sin embargo, la duración del sacudimiento es el factor solo más importante en la producción de daños excesivos. Larga duración, aceleración, relativamente alta, y amplitudes de consideración son la combinación que produce la mayoría de los daños a estructuras. Estos daños son producidos no solamente por el sacudimiento sísmico también por los efectos indirectos provocados sísmicamente por el terremoto.

El fuerte sacudimiento sísmico puede durar varias veces más en los depósitos no consolidados que en la cama de roca, y las amplitudes sísmicas pueden ser hasta diez veces más grandes que la amplitud en la cama de roca. Las ondas menos dañinas de alta frecuencia se atenúan más rápidamente; no así con las ondas de baja frecuencia más dañinas. Por eso, porque hay una relación entre la amplitud, la aceleración, y la frecuencia, y debido a una duración más larga de sacudimiento, tales estructuras como los conductos en sedimentos no consolidados son sujetos a fuerzas más dañinas en el movimiento de la tierra que las que experimentan las estructuras sobre la cama de roca. El daño estructural durante el terremoto de Alaska del año 1964 y el terremoto de San Fernando en el año 1971 muestran con claridad esta relación.

La duración del movimiento de la tierra varía no solamente entre la cama de roca y los depósitos no consolidados sino también según la clase de los depósitos no consolidados. Durante el terremoto de Alaska, el sacudimiento de la tierra en los azolves y las arenas debajo de Portage duró unos 15 minutos; en azolves, y arenas con grava en Anchorage, unos cinco minutos, y en la grava en Whittier, unos dos y medio a tres minutos.

Efectos indirectos o movimientos masivos de la tierra provocados sísmicamente, con la excepción de derrumbes, ocurren en los sedimentos no consolidados. Con pocas excepciones, los efectos indirectos son responsables para la mayoría de los daños a sistemas de conductos durante un terremoto. La Tabla 1 muestra la incidencia relativa de los efectos directos e indirectos de un terremoto en la cama de roca y en sedimentos no consolidados.

Cuando ocurre desplazamiento a lo largo de una falla, esto inicia un sacudimiento sísmico que, a su vez, genera los efectos indirectos descritos arriba. Generalmente una estructura está sujeta a los efectos directos y los efectos indirectos al mismo tiempo. En la presentación que sigue, en la cual se habla del daño específico a conductos, en algunos casos de menciona solamente la causa principal del daño, con el entendimiento de que las estructuras también son sujetas a otras fuerzas menos dañinas.

TABLA 1: Incidencia relativa de los efectos directos e indirectos de un terremoto en la cama de roca y en sedimentos no consolidados

Efecto	Incidencia		
	Cama de roca	Sedimentos	
		De grano fino	De grano grueso
Directo			
Levantamiento regional	común	común	común
Asentamiento regional	común	común	común
Desplazamiento de la tierra	común	común	común
Disyunción tectónica	común	común	común
Sacudimiento sísmico	común	común	común
da alta frecuencia	abundante	raro	raro
da baja frecuencia	raro	abundante	abundante
Indirecto			
Derrumbes (giratorio)	común	común	raro a común
Derrumbes (de translación)	ninguno	abundante	ninguno
Asentamiento diferencial	ninguno	abundante	común
Desplazamiento lateral	ninguno	abundante	común
Consolidación	ninguno	abundante	común
Disyunciones	raro	abundante	raro a común

**TABLA 2: La intensidad relativa de los daños a un conducto en la cama de roca y en sedimentos no consolidados**

Causa de los daños	Intensidad relativa de los daños		
	Cama de roca	Sedimentos no consolidados	
		De grano fino (arcilla, azolve, azolve, arena)	De grano grueso (grava)
Levantamiento regional	nada a leve	nada a leve	nada a leve
Asentamiento regional	nada a leve	nada a leve	nada a leve
Desplazamiento tectónico y disyunciones tectónicas	moderada a intensa	moderada a intensa	moderada a intensa
Disyunciones (no tectónicas)	leve	moderada a intensa	moderada
Sacudimiento sísmico	leve	intensa	moderada a intensa
Derrumbes (giratorios)	moderada	moderada a intensa	moderada a intensa
Derrumbes (de translación)	nada	intensa	nada a leve
Desplazamiento lateral	nada		
Conducto enterrado		leve a moderada	leve
Conducto superficial		moderada a intensa	moderada
Asentamiento diferencial	nada	moderada	leve
Consolidación	nada	moderada	leve

Hasta este punto, solamente se han considerado las generalidades. Para lo que sigue, los factores geológicos han sido dividido en tres categorías principales (1) la cama de roca, (2) sedimento no consolidados de grano fino (arcilla, azolve, y arena), y (3) sedimentos de grano grueso (del tamaño de grava o más grande).

Hay muy pocos datos disponibles acerca de conductos dañados en la cama de roca. No es de sorprenderse, ya que casi todos los conductos están en los sedimentos no consolidados y relativamente hay menos daños a conductos en la cama de roca que en los sedimentos durante un terremoto dado. También, las publicaciones y artículos sobre daños estructuras durante un terremoto raramente documentan el daño a sistemas de conductos.

**Daños en la cama de roca.** Durante el terremoto en Mechering, Australia Oeste, el 14 de Octubre de 1968, el oleoducto Goldfields fue dañada severamente por el desplazamiento de fallas. El conducto superficial fue comprimido 1.3 metros.

El terremoto en San Fernando el 9 de Febrero de 1971 dañó severamente una porción de la sección superficial del Segundo Acueducto de Los Angeles. Miedema y Olsen describieron el daño y la reparación subsiguiente en una disertación dada en la reunión de ASCE, Ingenieros Estructurales Nacionales, en San Francisco, California, el 9-13 Abril de 1973.

El acueducto descansa sobre pilas y tirantes en la cama de roca sobre la falda norte de Terminal Hill desde Magazine Canyon, a una altura de 435 metros, hasta la cresta de una colina a una altura de 545 metros. Durante el terremoto se desarrollaron varias fracturas debido al hundimiento de la cama de roca entre la altura de 518 metros y la cresta de la colina. Hubo un desplazamiento vertical cumulativo de 0.6 metro y un desplazamiento horizontal cumulativo de 0.5 metro. El acueducto fue dañado por tensión y también por compresión. Aparentemente las fracturas no se extienden a la profundidad del Primer Acueducto de Los Angeles que es un túnel que atraviesa Terminal Hill a una altura de 441 metros. Surge la pregunta de si el acueducto sufrirá más daños si se sujeta otra vez a un terremoto de la misma magnitud del terremoto de San Fernando. En la opinión del autor, ocurrirá más hundimiento en el lado norte de Terminal Hill que puede dañar otra vez el acueducto superficial; además, puede dañarse también el Primer Acueducto del Los Angeles si las fracturas del hundimiento se extienden hasta su profundidad.

**Daños en sedimentos de grano grueso.** Los daños a un conducto en sedimento de grano grueso ocurren mayormente como resultado del desplazamiento tectónico de la tierra y las fracturas asociadas, derrumbes giratorios, sacudimiento sísmico, y desplazamiento lateral de sedimentos, si el conducto está sobre soportes tirantes cerca o junto a una frente libre como, por ejemplo, a la orilla de arroyos, barrancas, y otras depresiones topográficas (Tabla 2). Generalmente, áreas superficiales encima de sedimentos de grano grueso son relativamente planas, dado al origen de los sedimentos (p. ej. grava de arroyos) y los derrumbes giratorios no son comunes. Hay, sin embargo, una excepción principal: depósitos deltaicos de grano grueso en las playas de lagos profundos y fiordos. Durante el terremoto de Alaska ocurrieron derrumbes grandes en tales sedimentos en las ciudades de Whittier, Valdez y Seward, y en áreas inhabitadas.

Durante el terremoto de Alaska, dos conductos de acero fueron dañados por el sacudimiento sísmico en Whittier. El conducto fue enterrado en grava fluvial y grava cribada glacial fuera del cauce. La ruptura no fue descubierta por un tiempo porque la demanda en los conductos fue mínima, y el agua de las rupturas se escurrió a la grava porosa y nunca llegó a la superficie.

Una ruptura mayor ocurrió en un conducto de 1295 mm a la intersección de las calles Elmer y Landale durante el terremoto de San Fernando. El conducto fue enterrado en grava pobremente cribada de Tujunga Wash. La ruptura probablemente fue causada por el sacudimiento sísmico junto con el asentamiento diferencial de las gravas debajo de los soportes del conducto.

Un factor principal en los daños estructurales durante un terremoto es el desplazamiento lateral de sedimentos provocado por el sacudimiento sísmico. Este desplazamiento ocurre tanto en sedimentos de grano grueso y de fino como en rellenos diseñados. Cuando las ondas terrestres sísmicas pasan por la tierra, imparten a los sedimentos una moción similar a la que imparte una mesa vibrante a los desechos sobre ella. Los sedimentos se desplazan lateralmente por la inclinación o hacia una frente libre.

El terremoto de Alaska dañó severamente puentes de carreteras y ferrocarriles porque los contrafuertes y los pilas de soporte se movieron hacia el centro de arroyos. Un desplazamiento horizontal máximo de 1.8 metros de los contrafuertes, causado por extensión lateral, ocurrió a dos puentes de la carretera del Río Cobre. Después del terremoto la cubierta de los puentes quedó esencialmente 1.8 metros más larga que la distancia entre los contrafuertes. Los puentes descansaron sobre grava glacial fuera del cauce pobremente cribada.

Durante el terremoto de San Fernando los soportes tirantes, descansando sobre sedimentos de grano grueso, de una línea auxiliar de 1372 mm del reservorio Van Norman, se movieron hacia el centro de la depresión baja topográfica que la línea atravesó. Se dañó, en una forma similar, la Línea Alta Chatsworth de 1245 mm, cerca de la intersección de la Calle Rinaldi y la avenida Wilbur.

**Daños en sedimentos de grano fino.** Conductos enterrados en o descansando sobre sedimentos de grano fino son más propensos a daños por eventos sísmicos que los conductos descansando sobre sedimentos de grano grueso o la cama de roca (Tablas 1 y 2). Los daños son los resultados de sacudimiento sísmico, derrumbes de translación, asentamientos diferenciales, desplazamientos laterales de sedimentos, consolidación, y disyunciones. Varios de estos efectos pueden ocurrir simultáneamente durante un terremoto.

La moción de la tierra que resulta del sacudimiento sísmico tiene magnitudes más grandes, más larga duración, y más ondas dañinas de frecuencia baja en los sedimentos de grano fino que en los sedimentos de grano grueso o en la cama de roca. Estos efectos son magnificados apreciablemente si los sedimentos están saturados o si el retallo de derrame está cerca de la superficie. Estos factores jugaron un papel importante en los daños a conductos durante los terremotos de Alaska y de San Fernando. Ocurrió más daño a los conductos por sacudimiento sísmico durante el terremoto de San Fernando porque el epicentro fue más cerca de los sistemas de conductos. El sacudimiento sísmico puso a una parte del conducto en tensión mientras la otra parte estaba en compresión a la vez. Donde los conductos estuvieron en tensión, trataron de partirse usualmente en las uniones; en compresión, los conductos pandearon o, si ya se habían partido, trataron de reasentarse. En algunos casos donde los conductos no fallaron bajo compresión, la presión interna del agua, esencialmente no compresible, llegó a ser tan alta que hizo reventar las válvulas.

Daños extensos y severos a conductos, de derrumbes junto con sacudimientos sísmicos, ocurrieron durante los terremotos de Alaska y San Fernando. La mayoría de los daños fue por los derrumbes giratorios (derrumbes en terreno relativamente llano con planos levemente inclinados o esencialmente horizontales a los costados). En Anchorage, ocurrieron cinco derrumbes principales, tres fueron translacionales y dos fueron giratorios. Los derrumbes

translacionales se desarrollaron cuando sedimentos se licuaron por el sacudimiento sísmico. Licuación y el movimiento subsiguiente de los sedimentos ocurrieron cuando la presión de los poros en los sedimentos, aumentado a un valor que se aproximó a la presión litostática durante la sacudida, y la resistencia de la tierra fue reducido prácticamente a zero.

En el terremoto de San Fernando, el derrumbe de Juvenile Hall y los derrumbes en la zona del Reservorio Upper Van Norman fueron de translación y causadas por la licuación parcial o total de los sedimentos.

Disyunciones extensas generalmente ocurren en los sedimentos de grano fino más allá de los escarpes de los derrumbes de translación. Así fue el caso en los derrumbes de Turnagan, Calle L, y Avenida 4 en Anchorage, y en algunos de los derrumbes en la zona del Reservorio Upper Van Norman. Esta clase de disyunción fué responsable del daño a conductos en ambos terremotos.

Los efectos del desplazamiento lateral de sedimentos a un conducto ya han sido descritos. La intensidad del daño, sin embargo, es aún más severa en los sedimentos de grano fino que en los sedimentos de grano grueso.

Estructuras que descansan sobre sedimentos de grano fino, especialmente si están saturados, están sujetas a daños intensos causados por consolidación y asentamiento diferencial. Muchos puentes de carreteras y ferrocarriles y muchos caminos sufrieron esta clase de daños durante el terremoto de Alaska. Es razonable suponer que la misma intensidad relativa de daños se puede esperar en los conductos sobre sedimentos de grano fino. Un asentamiento máximo de 3.4 metros ocurrió en el Snow River Crossing de la carretera Seward-Anchorage durante el terremoto de Alaska. El relleno de la carretera se desapareció en los azolves y las arenas debajo de la carretera. El asiento del relleno de la carretera entre los sedimentos fue debido a la consolidación, licuación parcial, y desplazamiento lateral de los azolves y las arenas debajo de la carretera.

## Resumen y Recomendaciones

En el estado actual de la técnica de la construcción de conductos, no hay tal cosa como un conducto a prueba de terremotos. Sin embargo, la tecnología actual en conductos, junto con investigaciones geológicas adecuadas, pueden resultar en una estructura a prueba de terremotos. Las siguientes recomendaciones pueden ayudar al ingeniero en su búsqueda de un conducto más resistente a los terremotos

1. Los daños a conductos durante un terremoto ocurren donde hay máximo desplazamiento de la tierra, sacudimiento sísmicos, disyunciones de la tierra, derrumbes, desplazamiento lateral de los sedimentos, asentamiento diferencial, y consolidación. Estos efectos dañinos ocurren menos en la cama de roca y más en los sedimentos de grano fino. Por eso, la intensidad relativa de los daños a conductos será mínima en la cama de roca, intermedia en los sedimentos de grano grueso, y máxima en los sedimentos de grano fino. Cuando sea posible, los conductos, especialmente las líneas más esenciales, deben de ser colocados en el mejor ambiente geológico posible.

2. Algunas formaciones de cama de roca son más propensas a derrumbes que otras durante un terremoto. Estas formaciones generalmente son de rocas sedimentarias como piedra de azolve, piedra de arena, conglomerado, y esquisto. Sin embargo, algunas piedras ígneas y metamórficas también son susceptibles a derrumbes. Por lo tanto, una evaluación geológica de inclinaciones de cama de roca, atravesadas por conductos, debe realizarse.

3. Areas situadas sobre sedimentos saturados no consolidados, especialmente los sedimentos de grano fino, deben ser eludidos cuando sea posible.

4. Donde los conductos van paralelamente con depresiones topográficas, ellos no deben de ser colocados cerca de frentes libres, como las playas de lagos, arroyos, barrancas, y otras depresiones topográficas. Durante un terremoto los sedimentos pueden licuarse, especialmente los de grano fino y no cohesivos, y generar derrumbes de translación. Generalmente, disyunciones se desarrollan más allá de los escarpes de los derrumbes.

5. Donde sea posible, los rellenos diseñados y las estructuras que sostienen los conductos no deben de colocarse sobre sedimentos de grano fino. Los sedimentos son susceptibles al asentamiento e al desplazamiento lateral que se deben en parte a licuación. Los rellenos diseñados y otras estructuras de sostén pueden asentarse lo suficiente para dañar al conducto.

6. Los soportes tirantes no deben de colocarse en el borde de lagos, arroyos, barrancas u otras depresiones topográficas sobre sedimentos de grano grueso o fino o sobre rellenos diseñados, donde el conducto atraviesa la depresión. Durante un terremoto, los sedimentos y

rellenos serán desplazados lateralmente y hacia abajo sobre la inclinación o hacia la frente libre, y de esta manera, dañarán al conducto por compresión. Los soportes sujetadores deben de colocarse a una distancia suficiente de la frente libre de tal modo que no se dañan por el desplazamiento lateral de los sedimentos.

7. Si un conducto tiene que cruzar una depresión topográfica susceptible a desplazamiento lateral y si es necesario usar soportes sujetadores, el complejo de sujeción debe de diseñarse para permitir un poco de movimiento independiente del bloque o pila y el conducto durante la carga dinámica de un terremoto.

8. Las características geológicas, hidrológicas y de diseño de la ruta para un conducto deben de ser investigadas y evaluadas. Esto requiere la combinación de los talentos del ingeniero de geología, hidrólogo, y el ingeniero de conductos. En algunos casos, los factores geológicos e hidrológicos pueden requerir la selección de una ruta que inicialmente sea más costosa que una ruta basada en un estudio económico. Sin embargo, si los costos de mantenimiento y los costos de reparación después de un terremoto se consideran, el costo total a largo plazo de la ruta puede ser sustancialmente menos que el de una ruta basada únicamente sobre consideraciones económicas.

## **Reconocimientos**

Ingenieros del Departamento de Agua y Fuerza de Los Angeles, Compañía de Gas de California del Sur, Cuerpo de Ingenieros, la Carretera de Alaska, y otros, tanto en el sector público como en el privado, han colaborado suministrando generosamente los datos usados en esta evaluación. El autor también agradece a A. T. Ovenshine, USGS, y a S. H. Mayeda, Departamento de Agua y Fuerza de Los Angeles, su repaso crítico de este artículo.