

"Documento original en mal estado"

Efectos sísmicos en tuberías subterráneas para agua potable en México

Raúl Flores Berrones

Dirección General de Captaciones y Conducciones de Agua, SARH

Las redes de distribución de agua potable fueron gravemente afectadas por los sismos que azotaron a la República Mexicana en septiembre de 1985. En este artículo se indican las diversas causas que originaron las fallas de las tuberías subterráneas. Los ejemplos que se presentan provienen de observaciones llevadas a cabo tanto en la capital del país como en el puerto industrial de Lázaro Cárdenas, en el estado de Michoacán, localidades que resultaron muy dañadas. Se comentan también algunas medidas preventivas que habrá que tomar en consideración desde la etapa del diseño, y por último se recomiendan algunas soluciones de emergencia que posibiliten la reparación rápida de las instalaciones dañadas.

Uno de los principales efectos que produjeron los sismos del 19 y 20 de septiembre de 1985 en la ciudad de México fue la rotura de numerosas tuberías en las redes primarias y secundarias de agua potable; a consecuencia de ello, se suspendió el suministro de este líquido a cerca de 5 millones de habitantes, hubo problemas de contaminación del agua y fue necesario adoptar medidas de emergencia para resolver en breve plazo la regularización de este vital servicio.

La ciudad de México, sin embargo, no fue la única que experimentó esta clase de efectos durante los sismos. Otras ciudades cercanas al epicentro, entre ellas la de Lázaro Cárdenas, Michoacán, sufrieron también daños serios en las tuberías de agua potable y en el alcantarillado.

Existen varias áreas urbanas sísmicas en el país donde se puede rebasar la intensidad VII de la escala de Mercalli (zonas 1, 2 y 3) y, consecuentemente, ocurrir daños graves en las tuberías de conducción y en las redes de agua potable (véase ilustración 1). Por tanto, es importante estudiar el comportamiento de los diversos tipos de tuberías durante y después de la ocurrencia de un sismo, a fin de tomar medidas preventivas y de emergencia en los acueductos y sistemas de distribución en funcionamiento o que están por construirse en las zonas más riesgosas del país.

Fallas en las tuberías durante los sismos de septiembre

Las causas que originaron daños en las tuberías de conducción de agua durante los sismos mencionados fueron fundamentalmente:

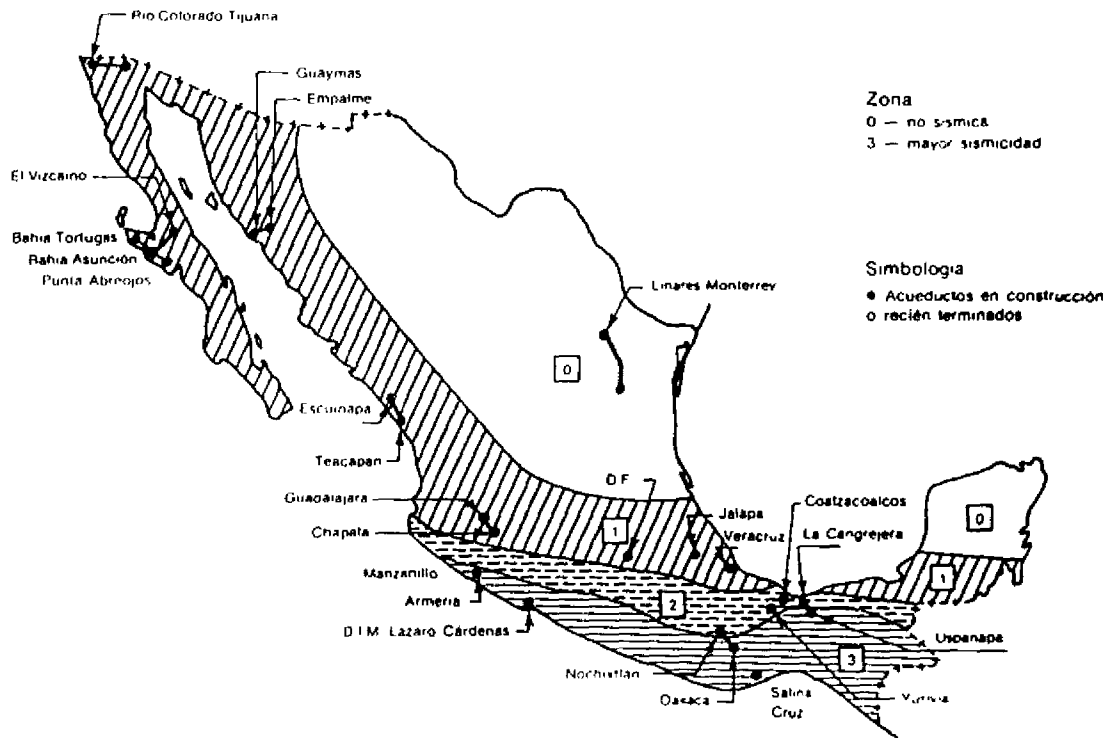
- Propagación de las ondas sísmicas a través del terreno donde se ubica la tubería.
- Cruzamiento de la línea por una falla del terreno que experimentó movimientos importantes durante el temblor.
- Licuación o densificación de materiales granulares en estado suelto y saturado.

Propagación de ondas

Uno de los principales daños en la red primaria para agua potable en la ciudad de México fue el rompimiento de la tubería de concreto tipo *lock joint* (véase ilustración 2), la cual predomina en la mayor parte de la capital, con diámetros que varían de 30 a 72 pulgadas, algunas zonas arcillosas clasificadas como blandas y muy blandas en las que se ha empleado este tipo de tubería sufrieron daños de importancia (véanse ilustraciones 3 y 4).

Una falla similar ocurrió en la tubería de concreto pretensado de 180 m de diámetro para agua potable en el puerto de Lázaro Cárdenas, el

1. Zonificación sísmica



problema fue provocado por el material de las tuberías o de sus juntas que, al ser sometidas a esfuerzos provocados por el movimiento del terreno durante la transmisión de las ondas sísmicas, se rompen. A medida que éstas se propagan a lo largo de la tubería, por el desplazamiento relativo entre ésta y el suelo, se desarrollan deformaciones axiales y curvaturas, el cálculo de los esfuerzos axiales inducidos se hace considerando el equilibrio entre las fuerzas de fricción suelo-tubería y las fuerzas axiales que producen la deformación en los tubos. Esta deformación se obtiene a partir del cálculo de la deformación máxima del terreno durante un sismo, que está dada por la expresión:

$$E_g = \frac{V_{\max}}{\alpha_1 C} \quad (1)$$

donde $V_{\max}$ = velocidad máxima del terreno

C = velocidad de propagación de las ondas sísmicas, dependiente del tipo de onda y clase de terreno. (Hall y Newmark, 1977).

α_1 = coeficiente que depende del tipo de onda y del ángulo de incidencia (ASCE, 1984)

La tubería tiende a seguir estas deformaciones, en cuyo caso la máxima es igual a la señalada por la expresión (1); sin embargo, cuando el terreno es relativamente blando puede haber deslizamiento entre el suelo y la tubería, por lo que la máxima deformación está dada por la fórmula:

$$E_{\max} = \frac{T L}{4 E_i A_p} \quad (2)$$

donde T = resistencia axial última por unidad de longitud del suelo que rodea a la tubería.

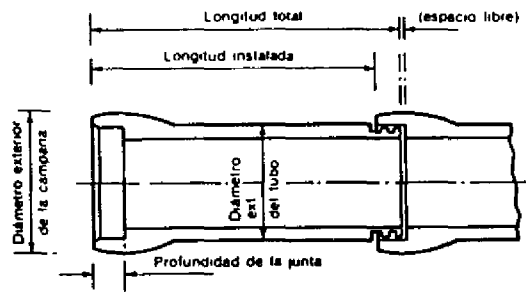
L = longitud aparente de la onda sísmica predominante asociada con la velocidad máx. Esta longitud es igual a la velocidad C por el periodo T de esta onda ($L = CT$).

E_i = Módulo inicial de elasticidad de la tubería, y

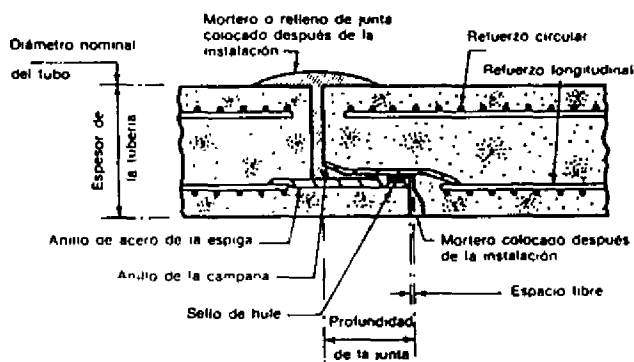
A_p = Área transversal de la pared de la tubería

De manera semejante, la curvatura máxima que puede ocurrir en la tubería se obtiene a partir de la expresión

2a. Dimensiones de un tubo



2b. Unión entre tubos de concreto (Lock joint)



$$K_{\text{máx}} = K_0 = \frac{a}{(\alpha_2 C)^2} \quad (3)$$

donde

- a = máxima aceleración de terreno.
- K_0 = curvatura sísmica máxima del terreno y
- α_2 = coeficiente de curvatura que depende del ángulo de incidencia de la onda sísmica y del tipo de ésta.



4. Tubería dañada

Cabe señalar que el tipo de frecuencia de las ondas que llegan a un cierto lugar depende en gran medida de la distancia entre éste y el epicentro. Así, para sitios cercanos, como fue el caso de Lázaro Cárdenas en los sismos de septiembre, las ondas predominantes fueron las de cuerpo (compresionales y de corte) con frecuencias altas, mientras que en lugares distantes, como la ciudad de México, las ondas superficiales fueron de mayor impacto (tipo Rayleigh y Love) y predominaron las frecuencias relativamente bajas con periodos altos (véanse ilustraciones 5 y 6).

Fallas del terreno

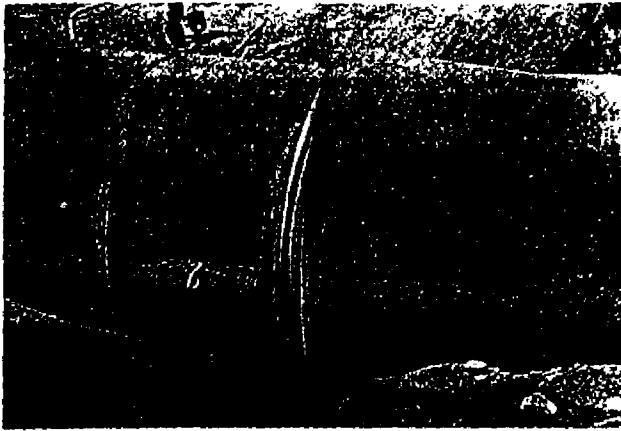
En la ciudad de México este tipo de fallas ocurrió en zonas cercanas a pozos de bombeo, como las aledañas al Acueducto Tláhuac (véase ilustración 7), donde se produjeron importantes daños en las tuberías. La ilustración 8 muestra una de estas fallas, que sin duda está ligada al proceso de consolidación provocado por el fuerte abatimiento de los acuíferos utilizados para el suministro



3. Tubería en zona blanda



5. Efecto sísmico en una tubería, Lázaro Cárdenas, Mich.



6. Detalle de junta abierta por el sismo

tro de agua a la ciudad. En la ilustración 9 aparece otra localizada en las calles con tuberías de agua potable y drenaje, y que está íntimamente ligada al desplazamiento del terreno sobre fallas geológicas activas que, aunque no se observaron en el área urbana del Valle de México, seguramente existieron en otras partes localizadas entre el epicentro y la gran metrópoli.

Las estrategias para analizar este efecto son de dos tipos: el determinístico, que requiere del diseño del cruzamiento de la tubería por cada falla, a fin de resistir los movimientos de la misma durante la vida útil de la obra, y el probabilístico, el cual conlleva un bajo riesgo de ruptura de la tubería, con las consecuencias que ello implicaría, así como tomar las medidas pertinentes para reducir al mínimo dichas consecuencias. La estrategia que se elija depende de varios factores, tales como el tipo y la localización de la falla, la probabilidad y el nivel de riesgo, el costo y las consecuencias de una ruptura, etc. Los detalles sobre estos enfoques se pueden ver en ASCE, 1984 y ASCE, 1985.



7. Falla de carpeta asfáltica



8. Falla por sobreexplotación de acuíferos

Licuación o densificación de suelos granulares

Este efecto es uno de los que causa mayor daño a las tuberías localizadas en depósitos granulares saturados, como acontece con las áreas costeras de nuestro país sujetas a movimientos sísmicos (Coatzacoalcos, Veracruz, Salina Cruz y Lázaro Cárdenas).



9. Falla por desplazamiento del terreno

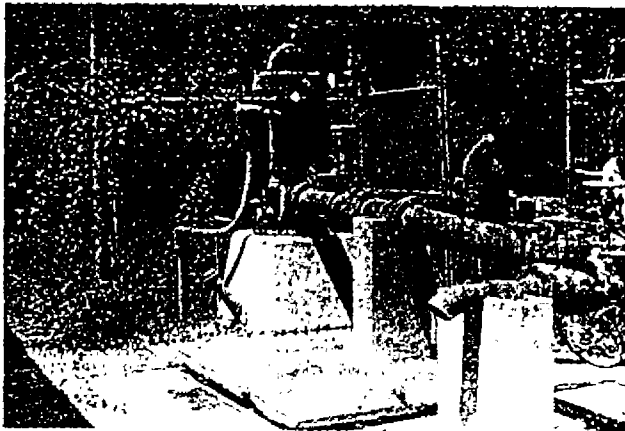
Cuando ocurre el fenómeno de la licuación, es decir, cuando físicamente el material que rodea a una tubería se licua por la pérdida substancial de su resistencia al cortante, la tubería puede dañarse por:

- Desplazamiento lateral del terreno junto con la tubería, creando esfuerzos de tensión o compresión que estén por arriba de la capacidad de la misma
- Asentamientos o movimientos bruscos del terreno como consecuencia de la falla por la capacidad de carga de cimentaciones continuas en los sitios donde se encuentra la tubería
- Flotación de la tubería

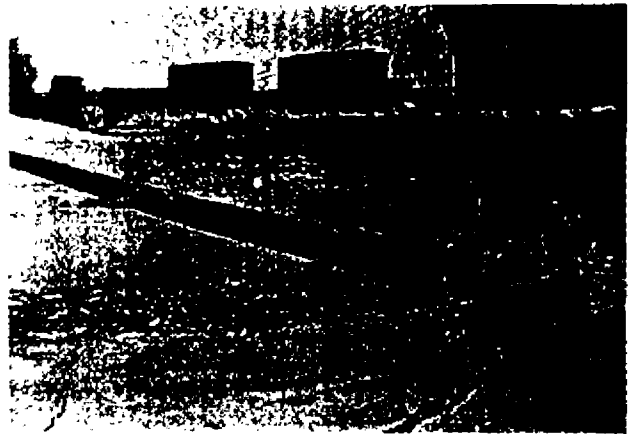
El daño causado por cualquiera de estos efectos puede ser muy grave, su análisis se hace determinando la susceptibilidad de los depósitos a la licuación (ASCE, 1984 y National Academy, 1985).

La densificación puede ocurrir tanto en suelos saturados como en materiales parcialmente saturados o secos, pero sucede con más frecuencia en suelos granulares cuya densidad relativa es menor al 70%. Este tipo de daños no se observó en la ciudad de México durante los sismos de 1985, pero sí fue notorio en el puerto de Lázaro Cárdenas, donde fue el problema fundamental. La ilustración 10 muestra claramente el asentamiento del terreno alrededor de un pozo usado para suministrar agua potable, que fue de 15 a 20 cm; la tubería de asbesto-cemento de 20" de diámetro sufrió serios daños; conviene notar que el ademe del pozo funcionó como una especie de pilote, lo que causó que "emergiera" el brocal.

En la ilustración 11 se aprecia el asentamiento ocurrido en el muelle de carga general en Lázaro Cárdenas y en la siguiente (12) se puede obser-



10 Asentamiento del terreno



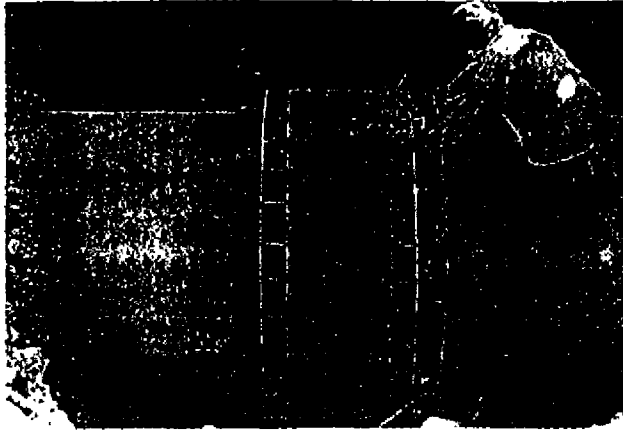
11 Asentamientos en muelle de carga y falla de losas

var la gran cantidad de arena que fluyó durante los sismos mencionados (Comisión Nacional Coordinadora, 1985)

También se detectó otro par de efectos que puede dañar las tuberías; uno es el de las grietas en el terreno, que incluyen fisuras, separaciones y desplazamientos asociados con las vibraciones sísmicas (véase ilustración 13). El otro es el producido por el deslizamiento de taludes naturales



12 Agrietamiento en la junta de construcción



18. Reparación con silletas

- Actualmente existen métodos analíticos que permiten considerar en el diseño la interacción tubería-suelo que ocurre durante las vibraciones o desplazamientos producidos por los sismos.
- Debe considerarse la utilización de tuberías dúctiles como las de acero o polietileno en zonas de alta sismicidad, las tuberías de concreto, de asbesto-cemento o de PVC resultan relativamente frágiles y su empleo en zonas sísmicas queda limitado por la capacidad que tengan sus uniones o juntas para absorber las

deformaciones provocadas por las vibraciones sísmicas.

- Conviene tomar en cuenta, durante la etapa de diseño, las diversas consideraciones que permitan prevenir daños en las tuberías localizadas en terrenos inestables o sujetos a desplazamientos.

Referencias

- ASCE "Guidelines for the Seismic Design of Oil and Gas Pipeline Systems", Committee on Gas and Liquid Fuel Lifelines, 1984
- ASCE "Advisory Notes on Lifeline Earthquake Engineering", 1983.
- Comisión Nacional Coordinadora de Puertos "Informe técnico sobre los daños en el puerto industrial de Lázaro Cárdenas", octubre, 1985.
- Flores-Berrones, R. "El efecto sísmico de los acueductos y sistemas de distribución de agua potable", XIII Congreso Nacional de Ingeniería Civil, 1985.
- Hall, W. J., y N. M. Newmark. "Seismic Design Criteria for Pipelines and Facilities", *Proceedings*, Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering Specialty Conference, Los Angeles, California, ASCE, pp 18-34, 1977.
- National Academy of Sciences Committee on Earthquake Engineering Commission on Engineering and Technical Systems, National Research Council, "Liquefaction of Soils During Earthquakes", National Academy Press, Washington, D.C., 1985