

Nota técnica

Diseño sísmico de tuberías enterradas

Gustavo Ayala Milian¹
Instituto de Ingeniería, UNAM

Los daños que sufrió el sistema de aprovisionamiento de agua potable a la ciudad de México a raíz de los sismos de septiembre pasado han servido para impulsar la investigación sobre la vulnerabilidad tanto de este sistema, como del de distribución. En esta nota se exponen las características de las tuberías enterradas que resultaron perjudicadas y mediante un análisis se presenta un método simplificado de diseño sísmico para dichas tuberías.

La vulnerabilidad sísmica de líneas vitales, particularmente de sistemas de aprovisionamiento de agua potable, ha sido objeto de gran interés en los últimos años (O'Rourke, *et al*, 1985). Esto se debe a que en situaciones de desastre, tales como las ocasionadas por un sismo, la supervivencia de los centros de población afectados depende, en gran parte, de la correspondiente supervivencia de sistemas de aprovisionamiento de agua, de energía, de información y de drenaje, entre otros.

Durante los sismos de Michoacán del 19 y 20 de septiembre de 1985, el sistema de aprovisionamiento y distribución de agua potable a la ciudad de México se vio seriamente afectado al sufrir numerosos daños, tanto en líneas primarias como secundarias, hasta dejar a 4 ó 5 millones de habitantes sin el líquido vital. Las proporciones del daño experimentado ofrecen una magnífica oportunidad a los profesionales de la ingeniería sísmica para investigar la vulnerabilidad de estos sistemas, y definir criterios de diseño sísmico y de salvaguarda que garanticen su supervivencia y buen funcionamiento ante movimientos telúricos de gran magnitud.

Antecedentes

La literatura existente sobre daños en tuberías enterradas es abundante (O'Rourke, *et al*, 1985). Desde principios de siglo las ciudades que han sufrido severas consecuencias por sismos de gran magnitud y que han reportado específica-

mente daños en tuberías enterradas son:

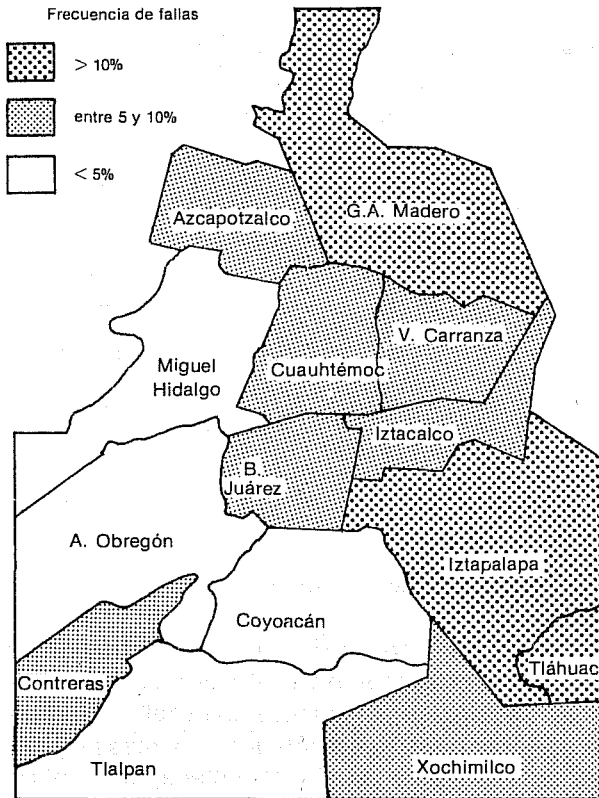
San Francisco	1906
Tokio (Kanto)	1923
Managua	1931
Alaska	1964
San Fernando	1971
Managua	1972
Orizaba	1973
Tangshen	1976
México	1979
México	1985

Particularmente en México, mucho antes de los sismos de Michoacán, durante el temblor de Orizaba de 1973 hubo numerosas fallas en la tubería de abastecimiento de la red de distribución de agua potable de dicha ciudad; en la vecina Córdoba, la línea principal de aprovisionamiento, formada por tubos de concreto reforzado de 36" de diámetro y juntas del tipo *lock joint*, presentó fallas en al menos 20 puntos a lo largo de sus 12 km de longitud (Ayala y Rascón, 1980).

Durante el sismo del 14 de marzo de 1979, la línea de aprovisionamiento de agua potable ubicada en el sur oriente de la ciudad de México presentó desperfectos de consideración en 10 puntos. La tubería es de concreto reforzado con juntas del tipo *lock joint*. Los daños ocurrieron en las juntas y consistieron en fallas de compresión, ocasionadas por el choque de dos tubos contiguos.

En el diagnóstico reportado se encontró que las fallas de este tipo de tuberías se deben, primordialmente, a que las juntas no permiten desa-

1. Daños en tuberías enterradas



rolar una ductilidad suficiente para absorber los desplazamientos relativos entre ellas, ocasionados por movimientos intensos en el suelo blando. Esto es lógico, ya que en el diseño de estas uniones no se consideran adecuadamente los efectos de los sismos (Ayala y Rascón, 1980).

Daños ocasionados por los sismos de Michoacán

La severidad de los temblores del 19 y 20 de septiembre pasado, se dejó sentir no sólo en el daño ocasionado a las edificaciones, sino también en el inmenso perjuicio al sistema de abastecimiento de agua potable a la ciudad de México.

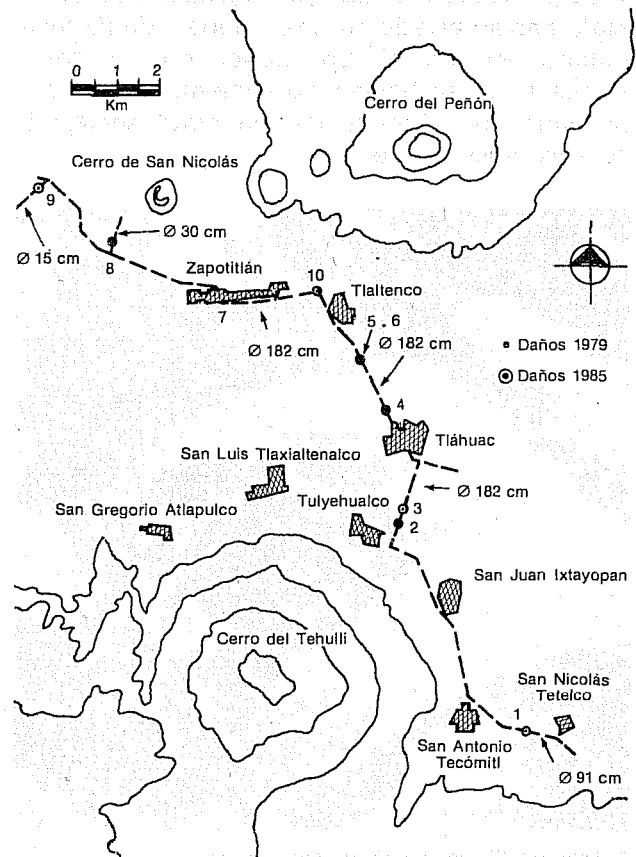
La magnitud del daño, en número de fallas mayor a 7 200 en tuberías con diámetro menor de 20", y de varias decenas de tubos de gran diámetro, ha despertado un gran interés por conocer más acerca del comportamiento sísmico de tuberías enterradas.

Las causas de un número tan elevado de fallas son atribuibles sólo al movimiento del terreno, que ocasionó desplazamientos relativos y asentamientos diferenciales de consideración. El deterioro ocurrió en sistemas primarios y secundarios, y se concentró principalmente en las zonas de suelo blando del sur y el oriente de la ciudad. En

las tuberías segmentadas de concreto y de asbesto-cemento, las fallas se presentaron en las juntas, generalmente en zonas cercanas a atraques, cambios de dirección y cajas. La falla más común fue la compresión, como ya había sido observado durante el temblor de 1979. La ilustración 1 señala la zona de mayor perjuicio a tuberías enterradas. Resulta de importancia el hecho de que aproximadamente de 3 000 fallas en tuberías de 4 a 6" de diámetro, el 90% de ellas ocurrieron en las juntas de tubos de asbesto-cemento, para las cuales no existe información que permita relacionar el daño ocasionado con las características de los movimientos sísmicos. El cuadro 1 detalla las estadísticas de daños en tuberías de concreto y de asbesto-cemento en las delegaciones políticas que forman el Distrito Federal.

Como ocurrió en 1979, los acueductos del sur oriente de la ciudad sufrieron numerosas fallas en tubos con juntas *lock joint*. Adicionalmente, hubo roturas en tuberías de concreto reforzado coladas *in situ*, lo cual no se había observado con anterioridad. La ilustración 2 muestra la localización de los acueductos dañados y los puntos de falla para los sismos de 1979 y 1985.

2. Fallas en los acueductos

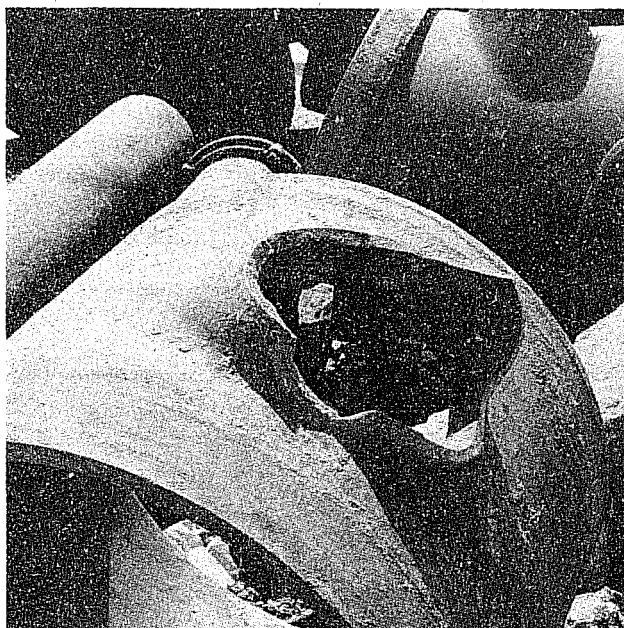


1. Daños en tuberías durante los sismos de Michoacán

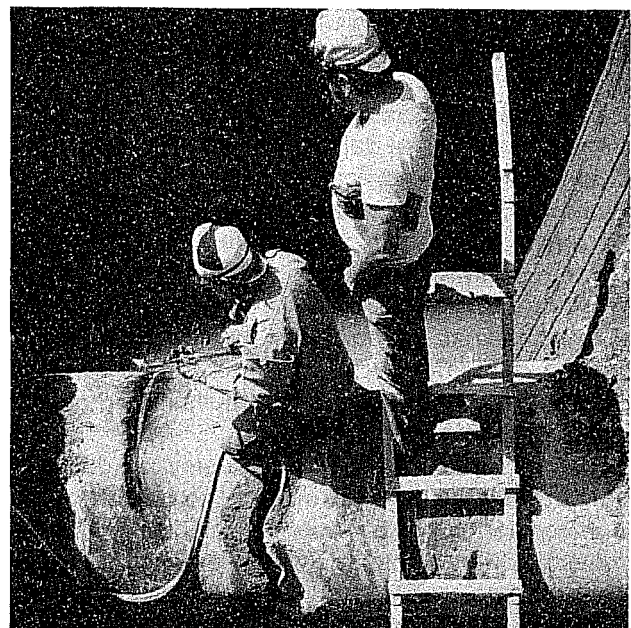
Delegación	Diámetros en pulgadas																			Otros	Total
	2	2.5	3	4	6	8	10	12	14	16	18	20	24	30	32	36	42	48	72		
Azcapotzalco	8	0	0	53	15	1	0	11	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	236	327
Cuajimalpa	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	3
Tlalpan	0	0	0	56	6	1	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	73
Tláhuac	14	0	0	587	79	3	0	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	75	773
Coyoacán	0	0	1	27	11	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	34	81
Miguel Hidalgo	3	0	0	44	8	0	0	5	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	103	164
Magdalena Contreras	5	0	0	28	7	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	227	269
Alvaro Obregón	0	0	0	65	9	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26	104
Benito Juárez	5	0	2	110	31	2	0	13	0	0	0	0	0	0	0	8	0	1	0	95	267
Xochimilco	1	0	0	414	16	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	29	468
Cuauhtémoc	24	0	0	74	117	1	1	26	0	0	0	4	0	0	8	10	0	9	0	119	393
Iztacalco	6	0	1	196	95	0	1	34	0	1	0	5	0	2	0	1	0	11	0	103	456
Venustiano Carranza	8	2	1	177	64	2	0	18	0	2	0	10	0	0	7	16	0	4	0	23	334
Iztapalapa	5	0	7	241	94	1	0	40	0	1	0	2	0	1	0	1	3	22	0	374	792
Gustavo A. Madero	16	0	1	341	64	3	5	51	0	0	0	13	0	0	0	6	0	13	0	303	816
Totales	95	2	13	2414	616	14	8	233	0	4	1	35	0	3	15	48	3	61	0	1755	5320

En la zona cercana al aeropuerto ocurrieron fallas de particular importancia en una línea de abastecimiento a ciudad Nezahualcóyotl, formada por tubos de acero de 42" de diámetro.

Como en los otros casos, la causa probable de al menos 12 rupturas fue lo intenso de los movimientos. En el centro de la ciudad se rompieron tuberías de fierro colado, que desde principios del siglo habían estado en una galería y en perfecto estado estructural. Los daños que sufrieron nunca antes se habían experimentado, aun con movimientos telúricos de magnitud semejante (véanse ilustraciones 3 y 4).



3. Falla en "T" en tubería de fierro colado



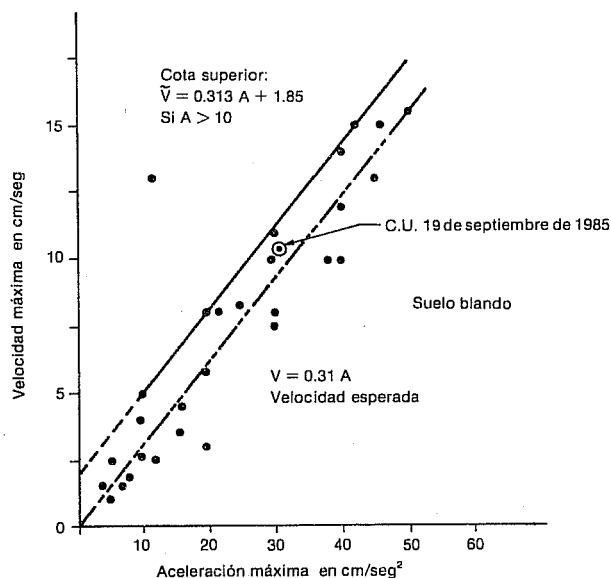
4. Falla por compresión en tubería de acero

2. Aceleraciones y velocidades máximas del terreno ²

Sitio	Orientación	Aceleración máxima gals	Velocidad máxima cm/s
Central de Abastos	NS	80.63	24.85
Frigorífico	EO	94.62	37.57
Central de Abastos	NS	69.16	37.99
Oficinas	EO	80.40	41.86
Ciudad Universitaria	NS	28.10	10.21
Laboratorios	EO	33.45	9.38
Ciudad Universitaria	NS	31.71	10.25
Patio	EO	34.65	9.37
Ciudad Universitaria	NS	37.36	9.19
Mesa vibradora	EO	38.83	11.01
Tacubaya	NS	84.40	14.29
	EO	33.22	9.81
Secretaría de Comunicaciones y Transportes	NS	97.97	38.74
	EO	167.92	60.50
	NS	44.11	11.49
Viveros	EO	42.42	12.20
Tláhuac	NS	135.88	64.10
Bombas	EO	106.67	44.61
Tláhuac	NS	117.67	34.90
Deportivo	EN	115.55	36.06

marzo de 1979, se encontraron deformaciones axiales máximas de 0.26% (Ayala y Rascón, 1980), mismas que fueron suficientes para ocasionar 10 fallas en la tubería. Con los datos obtenidos del sismo del 19 de septiembre, se detectaron deformaciones axiales del 1.00%, valor que excede en un 400% a la anterior, lo que justifica ampliamente el daño observado.

5. Aceleración y velocidad máxima en suelo blando



Análisis sísmico simplificado

Las mediciones de campo durante sismos intensos han demostrado que el movimiento de las tuberías enterradas sigue aproximadamente al del terreno (Tsukamoto, *et al*, 1984), lo que permite evaluar los desplazamientos relativos en tuberías, con sólo observar los desplazamientos correspondientes del terreno.

Existen varios criterios para calcular el movimiento relativo máximo entre dos puntos. Christian (1976) comparó desplazamientos relativos entre dos puntos medidos de registros de temblores reales, con los correspondientes a los distintos criterios y encontró que una cota superior de los valores medidos se obtiene mediante:

$$U = \frac{V_{\text{máx}}}{C} L \quad (1)$$

donde V es la velocidad máxima de terreno, C , la velocidad aparente de propagación y L , la distancia entre los puntos de referencia.

Con base en la teoría elemental de la propagación de las ondas elásticas, es posible demostrar que una cota superior para el cambio angular entre dos puntos, θ , resulta ser

$$\theta_{\text{máx}} = \frac{A_{\text{máx}}}{C^2} L \quad (2)$$

donde $A_{\text{máx}}$ es la aceleración máxima del terreno.

Los valores de desplazamiento y cambio angular presentados en las ecuaciones 1 y 2 son rigurosamente válidos sólo para ondas de cuerpo. Para el caso de ondas superficiales, SH y de Rayleigh, es posible derivar cotas superiores de desplazamiento relativo y de cambio angular, que permitan analizar situaciones donde el movimiento sea fundamentalmente ocasionado por este tipo de ondas.

En la obtención de los resultados anteriores no se consideró el efecto de la topografía y el suelo locales; sin embargo, se reconoció que las condiciones locales pueden ocasionar amplificaciones notables de los valores aquí propuestos.

En un estudio detallado es necesario contar, para cada una de las localidades que se desea estudiar, con datos estratigráficos que permitan definir la geología local. Estos datos deberán contener los valores de la velocidad de propagación de las ondas de corte y del peso específico de cada una de las capas.

Conclusiones

La vulnerabilidad de las tuberías segmentadas ante sismos puesta a prueba durante los de 1979 y 1985, evidencia la falta de recomendaciones adecuadas de diseño sísmico que garanticen su supervivencia ante tales fenómenos. Parte de la información requerida para definir recomendaciones sobre tramos rectos existe en la literatura especializada; sin embargo, es necesario que dicha información se presente a los fabricantes de manera tal que la puedan aprovechar.

Por otro lado, las zonas de reconocida susceptibilidad al daño tales como codos, *Tes*, atraques y cajas no pueden ser incluidas en los modelos existentes, por lo que es necesario estudiarlas más a fondo.

Antes de que ocurrieran los sismos de Michoacán, se consideraba que el diseño sísmico de las tuberías continuas de acero no presentaba mayor dificultad, ya que los procedimientos existentes de análisis sísmicos predecían un comportamiento adecuado. Sin embargo, los daños ocasionados en este tipo de tuberías crean la necesidad de investigar más en el tema.

Referencias

Ayala, G. y Rascón O. "Evaluación sísmica del acueducto dañado durante el sismo del 14 de marzo de

1979". *Ingeniería Sísmica*, No. 21, agosto, 1980, pp. 17-31.

Christian J.T. "Relative Motion of two Points During an Earthquake". J. Geotechnical Division, ASCE, 1976, vol. 102, Núm. GT11, pp. 1911-1994.

Mena E., Carmona C., Delgado R., Alcántara L. y Domínguez O. "Catálogo de resultados del proceso de acelerogramas del sismo del 19 de septiembre de 1985, parte I, Cd. de México y Tláhuac", en prensa, Instituto de Ingeniería, UNAM, 1986.

O'Rourke, T.D., Grigoriu, M.D. y Khater M.M. "Seismic Response of Buried Pipe Lines". *Pressure Vessel and Piping Technology 1985 - A decade of progress*, Nueva York, Sundararajan C., ASME, 1985, pp. 281-323.

Tsukamoto K., Nishio N., Satake M., y Nagao S. "Observations of Pipeline Behavior at Geographically Complex Site During Earthquakes". *Memorias de la VIII WCEE*, Prentice-Hall, San Francisco, 1984, vol. II, pp. 247-254.

¹ El autor agradece la valiosa información proporcionada por personal de la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica del Departamento del Distrito Federal, de la Dirección General de Captaciones y Conducciones de Agua de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos y de la Comisión Estatal de Agua y Saneamiento del Gobierno del estado de México. Así mismo, agradece a Roberto Gómez la revisión crítica del manuscrito, y a Rodolfo Miranda y Guillermo Guerrero el haber proporcionado las fotografías.

² Los datos del cuadro 2 fueron tomados de Mena E. et al.