

01161  
les  
4

FACULTAD DE INGENIERIA  
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
SECCION DE ESTRUCTURAS

TESIS QUE PRESENTA

CELSO JOAQUIN MUÑOZ BLACK  
para obtener el grado de  
MAESTRO EN INGENIERIA

CREDITOS ASIGNADOS A LA TESIS 12

JURADO:

- M. EN C. ENRIQUE DEL VALLE CALDERON
- DR. OCTAVIO RASCON CHAVEZ
- DR. ENRIQUE BAZAN ZURITA
- M. EN C. JORGE PRINCE ALFARO
- ING. JULIO DAMY RIOS

*Enrique del Valle Calderon*  
*Rascon Ch.*  
*Jorge Prince Alfaro*  
*Julio Damy Rios*

01181  
1983

COORDINADOR DE LA SECCION

SECRETARIO ACADEMICO

*Rodriguez Cuevas*

*Gabriela Moeller de Jalife*

ING. NEPTALI RODRIGUEZ CUEVAS

M. EN I. GABRIELA MOELLER DE JALIFE

C.U., México, D.F., 11 de agosto de 1983

TESIS CON  
FALTA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## RESUMEN

1.	INTRODUCCION	1
2.	ANTECEDENTES	3
3.	ANALISIS ESTADISTICO DE LA INFORMACION	7
3.1	<i>Correlación entre aceleraciones y velocidades máximas del terreno</i>	8
3.2	<i>Periodos de recurrencia de las aceleraciones máximas del suelo</i>	9
3.3	<i>Aceleraciones de diseño</i>	12
4.	ANALISIS SISMICO DE TUBERIAS ENTERRADAS	14
4.1	<i>Método simplificado</i>	14
4.2	<i>Método directo</i>	17
4.3	<i>Método cuasiestático</i>	18
4.3.1	<i>Caso elástico</i>	19
4.3.2	<i>Caso elastoplástico</i>	21
4.4	<i>Método de juntas friccionantes</i>	25
4.4.1	<i>Formulación del modelo</i>	26
5.	OBTENCION Y ANALISIS DE RESULTADOS	33

5.1	<i>Métodos simplificado y directo</i>	33
5.1.1	Suelo blando	33
5.1.2	Suelo duro	39
5.2	<i>Métodos cuasiestático y de juntas friccionantes</i>	42
5.2.1	Rigideces del suelo	43
5.2.2	Rigideces del tubo	46
5.2.3	Fuerzas de fricción en las juntas	47
5.2.4	Rigideces de las juntas	48
5.2.5	Efecto de la rigidez del relleno de la zanja	49
5.2.6	Efecto del comportamiento elastoplástico del relleno de la zanja	51
5.2.7	Efecto de la rigidez de las juntas	52
5.2.8	Efecto de la fricción en las juntas	53
5.2.9	Efecto de la rigidez de los tubos	55
5.2.10	Efecto de la longitud de los tramos	56
5.2.11	Efecto de la velocidad de propagación del sismo	59
5.2.12	Efecto del cambio brusco del tipo de terreno	62

5.2.13	Resultados de los métodos cuasiestático y de juntas friccionantes	64
5.2.14	Resultados de los cuatro métodos	65
5.2.15	Efectos del tipo de apoyo	69
6.	CRUCE DE FALLAS ACTIVAS	72
6.1	Generalidades	72
6.2	Justificación de la distancia de 220 m	73
6.3	Holguras	74
6.4	Colocación del tubo dentro de otro de mayor diámetro	77
7.	RECOMENDACIONES DE DISEÑO SISMICO	79
7.1	Recomendaciones para el análisis sísmico de tuberías enterradas de concreto, con juntas tipo lock-joint	79
7.1.1	Procedimiento de análisis	80
7.2	Recomendaciones para el análisis sísmico de tuberías continuas	88
7.3	Recomendaciones para diseño de tuberías enterradas que crucen fallas geológicas activas	89
7.4	Ejemplo de aplicación de las recomendaciones para tuberías con juntas tipo lock-joint	91

8.	RECOMENDACIONES GENERALES	95
	REFERENCIAS	97
	AGRADECIMIENTOS	101
	TABLAS	
	FIGURAS	
	APENDICE	

## RESUMEN

Con el fin de contar con un método de análisis sísmico de tuberías enterradas, construidas a base de tramos con juntas tipo Lock-joint, en este trabajo se formula un modelo matemático que toma en cuenta que el temblor se propaga a lo largo de la tubería y considera la interacción entre tubo y suelo; se supone que ambos tienen comportamiento elástico lineal. Se considera que el efecto inercial es despreciable.

Debido a que las juntas se modelan como elementos de fricción, a este método se le denomina de *juntas friccionantes*; su operación es paso a paso.

Se hace un estudio paramétrico empleando diversos registros de sismos captados en el Distrito Federal, tanto en suelo duro como blando; los resultados se comparan con los otros métodos.

Asimismo, considerando los resultados del estudio paramétrico y los de un análisis estadístico de los datos sísmológicos disponibles en el Distrito Federal, se formulan recomendaciones sencillas para realizar el análisis sísmico de tuberías enterradas de concreto, con juntas lock-joint, y de tuberías continuas fabricadas de cualquier material.



## 1. INTRODUCCION

La ocurrencia de temblores ha sido la causa de multitud de fallas de sistemas de suministro de agua potable en diversas partes del mundo (ref 1). Dada la gran importancia social, política y de salud pública que estas fallas tienen, es indispensable lograr que el riesgo de que ellas ocurran sea bajo.

Hasta el momento de efectuar este trabajo no se conoce la existencia de normas oficiales que estén vigentes en alguna parte del mundo para el diseño sísmico de tuberías.

Por todo lo anterior, en este trabajo se desarrolla un modelo matemático para analizar tuberías enterradas construidas a base de tramos con juntas tipo Lock-joint, el cual, conjuntamente con otros modelos y con el análisis estadístico de la información sísmica existente, permite formular recomendaciones para el diseño de tuberías de concreto de este tipo que

se construyan en el Distrito Federal.

En este estudio se le dio mayor énfasis al problema que se tiene en tuberías desplantadas en terreno blando, ya que en este tipo de suelo se tienen deformaciones más grandes que en suelo duro y, por tanto, requieren de un análisis más cuidado so.

## 2. ANTECEDENTES

Durante el sismo del 14 de marzo de 1979 que se sintió en el Distrito Federal con intensidad máxima de VII en la escala de Mercalli modificada, se presentaron daños de consideración en la línea de suministro de agua ubicada en la zona de Xochimilco-Tlahuac.

Dicho acueducto está construido a base de tramos de tubo de concreto con juntas tipo Lock-joint, de 4.88 m (16 pies) de largo y diámetros diversos, hasta de 181 cm (72 pulg).

El diagnóstico acerca de la causa de la falla (ref 1) fue de que en las juntas no se contó con la holgura (separación) suficiente para absorber las deformaciones ocasionadas por el temblor, por lo que algunos tramos consecutivos entraron en contacto, sufriendo impactos en sus caras adyacentes que ocasionaron la ruptura en diez puntos de unión de tramos de la

tubería.

Por lo anterior, para evitar las fallas por choque de tramos contiguos, es indispensable dejar holguras suficientes en las juntas. El tamaño mínimo recomendable de dichas holguras dependerá de la historia de desplazamientos del sismo de diseño, de la compresibilidad del suelo de desplante, de la longitud y diámetro de los tramos, y de las rigideces de la tubería y de las juntas; con la separación adecuada de los tramos se logra, además, reducir considerablemente los esfuerzos en la propia tubería respecto a los que se tendrían si ésta fuera continua.

Del análisis de las fallas debidas a sismo que han ocurrido en tuberías de diversas partes del mundo, se ha concluido que la mayoría de ellas pueden atribuirse a alguna de las siguientes causas:

- 1) Propagación de ondas en suelo
- 2) Desplazamientos relativos de ambas caras de una falla geológica
- 3) Deslizamientos del suelo de soporte, ocasionados por fallas de taludes o por licuación de arenas

En este trabajo se dan recomendaciones para considerar las dos primeras. Respecto a la última, es aconsejable no construir tuberías a lo largo de taludes con bajo factor de seguridad ante la falla en caso de sismo, o de zonas con arenas

susceptibles de licuación, a menos que al suelo se le dé un tratamiento previo para eliminar esos problemas.

Con relación a la primera, en este trabajo se analizan tuberías de distintos diámetros utilizando los siguientes métodos de análisis, el último de los cuales se desarrolló como parte de esta investigación:

- a. Método simplificado
- b. Método directo
- c. Método cuasiestático
- d. Método de juntas friccionantes

Estos métodos se basan en la hipótesis de que en este tipo de estructuras los efectos inerciales son despreciables, en comparación con los ocasionados por los movimientos relativos que experimentan dos puntos cualesquiera del suelo situados a lo largo de la trayectoria de las ondas sísmicas (refs 2 y 3).

Los movimientos relativos antes citados se deben a que en cada instante los desplazamientos del suelo en dos puntos cualesquiera tienen amplitudes diferentes, ya que el temblor es un fenómeno de propagación de ondas en la tierra. Además, conforme el sismo se propaga, la historia de desplazamientos va sufriendo alteraciones debidas a los siguientes factores:

- a. El temblor se compone de distintos tipos de onda, cada uno de los cuales viaja a diferente velocidad. Ante la

imposibilidad de separar los distintos tipos de ondas que conforman el movimiento, en este trabajo se considera conservadoramente que todo el sismo se compone de ondas de cortante únicamente, por ser estas ondas de cuerpo las que ocasionan mayores efectos, aunque en tuberías poco profundas pudieran ser importantes también los debidos a ondas superficiales.

- b. Al propagarse las ondas sufren atenuación por el efecto de distancia a la fuente y por absorción viscosa en el suelo.
- c. Al viajar las ondas a través de medios que no son perfectamente homogéneos e isótropos, éstas sufren difracciones (en parte ocasionadas por la tubería misma), que alteran la forma y composición de las ondas sísmicas. En particular, al pasar las ondas por una interfase de suelo duro a blando, se presentan amplificaciones importantes en ellas.

En el cap 5 de este estudio se analizan someramente los efectos que estos últimos dos fenómenos ocasionan en las tuberías.

### 3. ANALISIS ESTADISTICO DE LA INFORMACION

Para alimentar con datos reales a los modelos matemáticos empleados en este trabajo para analizar tuberías, se recopiló y procesó la información existente sobre sismos ocurridos en el Distrito Federal, para los cuales se tuvieron registros de la aceleración del suelo (acelerogramas) ya procesados.

En la tabla 3.1 se consignan las fechas, ubicación del acelerógrafo, magnitud,  $M$ , en la escala de Richter, intensidad máxima en el Distrito Federal,  $I$ , en la escala de Mercalli modificada, orientación de la traza del registro, y aceleración,  $A_{máx}$ , velocidad,  $V_{máx}$ , y desplazamiento,  $D_{máx}$ , máximos del suelo (refs 15, 19 y 20).

### 3.1 Correlación entre aceleraciones y velocidades máximas del terreno

Como se verá en el siguiente capítulo, en el modelo simplificado para análisis sísmico de tuberías enterradas se requiere la velocidad máxima del terreno,  $V_{m\acute{a}x}$ . Debido a que el parámetro más común para caracterizar a un temblor es la aceleración máxima del suelo,  $\Lambda_{m\acute{a}x}$ , fue necesario encontrar la relación que existe entre dichos parámetros, para sismos registrados en suelos blando y duro del Distrito Federal.

Para lograr lo anterior se trazaron las gráficas de las figs 3.1 y 3.2, notándose en ellas que existe una relación lineal entre  $V_{m\acute{a}x}$  y  $\Lambda_{m\acute{a}x}$ , por lo que a cada serie de datos se le ajustó una recta por el método de mínimos cuadrados, con la restricción de que ésta pasara por el origen; estas rectas dan los valores esperados,  $\bar{V}_{m\acute{a}x}$ , de las velocidades máximas que corresponden a valores dados de  $\Lambda_{m\acute{a}x}$ .

Las ecuaciones de las rectas son, para suelo blando,

$$\bar{V}_{m\acute{a}x} = 0.3\Lambda_{m\acute{a}x} \quad (3.1)$$

y, para suelo duro,

$$\bar{V}_{m\acute{a}x} = 0.27\Lambda_{m\acute{a}x} \quad (3.2)$$

donde  $\Lambda_{m\acute{a}x}$  se da en  $\text{cm}/\text{seg}^2$  y  $V_{m\acute{a}x}$  en  $\text{cm}/\text{seg}$ .



### 3.2 Periodos de recurrencia de las aceleraciones máximas del suelo

Con el fin de estimar los periodos de recurrencia de los valores máximos de la aceleración del terreno durante un sismo, se escogió para cada temblor el valor más grande que se registró en suelo blando, por una parte, y en duro, por otra.

Con esta información se elaboraron dos tablas, una para cada tipo de suelo (tablas 3.2 y 3.3), en las que se ordenaron en forma decreciente los valores de  $\Lambda_{m\acute{a}x}$ , en  $\text{cm}/\text{seg}^2$ ; para cada valor se escribieron el número de veces que éste se observó  $n(\Lambda_{m\acute{a}x})$ , el número de veces que se observó un valor mayor o igual que él,  $N(\Lambda \geq \Lambda_{m\acute{a}x})$ , y el cociente

$$\lambda = N(\Lambda \geq \Lambda_{m\acute{a}x})/\tau$$

donde  $\tau$  es el lapso de observación en años y  $\lambda$  es la frecuencia por año con que se han observado temblores con aceleración mayor o igual que  $\Lambda_{m\acute{a}x}$ ; su recíproco,  $T = 1/\lambda$ , es el periodo de recurrencia, en años.

En la fig 3.3 se muestran los puntos  $(\Lambda_{m\acute{a}x}, \lambda)$  de las tablas anteriores, en escala bilogarítmica. Asimismo, se han dibujado las rectas respectivas que se ajustaron por mínimos cuadrados, aunque dicho método no sea estrictamente aplicable en este caso, ya que la variancia de  $\lambda$  cambia con  $\Lambda_{m\acute{a}x}$  y los valores de  $\lambda$  no son independientes entre sí.

Como puede observarse en la fig 3.3, para cada tipo de suelo se ajustaron dos rectas, ya que la tendencia de los puntos no fue lineal. Asimismo, a los datos de suelo blando se le ajustó además una parábola de segundo grado, la cual se aproxima mucho a la recta en valores grandes de  $\lambda_{\text{máx}}$  y es válida si  $\lambda_{\text{máx}} \geq 9 \text{ cm/sec}^2$ ; la ecuación de ésta es

$$\ln \lambda = -0.616 (\ln \lambda_{\text{máx}})^2 + 2.70 \ln \lambda_{\text{máx}} - 2.88 \quad (3.3)$$

Debido a que los acelerógrafos instalados en suelo duro fueron colocados años después de los de suelo blando, y a que los primeros no siempre se disparan al ocurrir un sismo por no excederse su sensibilidad, la información para suelo duro resulta incompleta.

Para subsanar esa deficiencia se decidió determinar la relación que existe entre las aceleraciones máximas registradas en suelo duro y las captadas en blando, utilizando las parejas de datos que se tienen en registros simultáneos. De esta manera, restringiendo a que la recta de regresión pasara por el origen, se obtuvo por el método de mínimos cuadrados, la siguiente ecuación

$$\lambda_D = 0.6 \lambda_B \quad (3.4)$$

donde  $\lambda_D$  y  $\lambda_B$  son las aceleraciones máximas correspondientes a suelos duro y blando, respectivamente.

Así, para los sismos que se registraron en suelo blando pero no en duro, la ecuación anterior proporciona los valores esperados de la aceleración máxima que se hubiera registrado en suelo duro, con base en el dato obtenido para blando, con lo cual se subsana la pérdida de información.

Las rectas correspondientes a valores grandes de  $\Lambda_{m\acute{a}x}$  se ajustaron con la restricción de que su pendiente fuera  $-2.7$ , porque el número de datos locales y el lapso de obtención de los mismos fueron relativamente pequeños, y por ser éste el valor que se obtuvo en la ref 22 usando datos de magnitudes de temblores ocurridos en diversas zonas del país en un período de observación mucho más largo.

De esta manera, las ecuaciones que relacionan a  $\lambda$  con  $\Lambda_{m\acute{a}x}$  y a  $\Lambda_{m\acute{a}x}$  con el período de recurrencia,  $T$ , resultan ser:

Para suelo blando

$$\ln \lambda = -2.7 \ln \Lambda_{m\acute{a}x} + 8.73 \quad \text{si } \Lambda_{m\acute{a}x} \geq 33 \text{ cm/seg}^2 \quad (3.5)$$

$$\Lambda_{m\acute{a}x} = 25.36 T^{0.37} \quad \text{si } T \geq 2 \text{ años} \quad (3.6)$$

$$\ln \lambda = -0.637 \ln \Lambda_{m\acute{a}x} + 1.52 \quad \text{si } \Lambda_{m\acute{a}x} < 33 \text{ cm/seg}^2 \quad (3.7)$$

$$\Lambda_{m\acute{a}x} = 10.79 T^{1.57} \quad \text{si } T < 2 \text{ años} \quad (3.8)$$

Para suelo duro

$$\ln \lambda = -2.7 \ln \Lambda_{m\acute{a}x} + 7.52 \quad \text{si } \Lambda_{m\acute{a}x} \geq 22.5 \text{ cm/seg}^2 \quad (3.9)$$

$$\Lambda_{m\acute{a}x} = 16.20 T^{0.37} \quad \text{si } T \geq 2.5 \text{ años} \quad (3.10)$$

$$\ln \lambda = -0.686 \ln \lambda_{\text{máx}} + 1.25 \text{ si } \lambda_{\text{máx}} < 22.5 \text{ cm/seg}^2 \quad (3.11)$$

$$\lambda_{\text{máx}} = 6.15 T^{1.46} \quad \text{si } T < 2.5 \text{ años} \quad (3.12)$$

### 3.3 Aceleraciones de diseño

Para el diseño sísmico de una tubería es necesario recomendar los valores de las holguras que se deben dejar en las juntas de los tubos y las deformaciones unitarias impuestas. Para calcular éstas es necesario escalar los sismos que se utilicen para el análisis correspondiente, de tal manera que cada temblor tenga aceleraciones máximas congruentes con las del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (ref 12), para los suelos blando y duro, y que correspondan a un mismo periodo de recurrencia.

En el mencionado reglamento se indica que los espectros de diseño de edificios deben amplificarse 1.3 veces cuando se trate de diseñar estructuras cuya sobrevivencia sea especialmente importante (tipo A); debido a que una línea de suministro de agua es no sólo importante sino vital, se decidió inicialmente en este trabajo emplear 1.5 en vez de 1.3. Los valores de la aceleración máxima del terreno están implícitos en los espectros de diseño, y corresponden a las cantidades  $a_0$  en ellos especificadas, las cuales valen 0.06g y 0.03g para suelos blando y duro, respectivamente, siendo g la aceleración de la gravedad.

Por otra parte, es necesario considerar también que en el lapso en que se han registrado sismos en la ciudad de México (de 1961 a la fecha), la aceleración máxima que se ha obtenido en suelo blando es de  $65 \text{ cm/seg}^2$ , el 24 de octubre de 1980 (ref 20), y de  $48 \text{ cm/seg}^2$ , en suelo duro, el 12 de julio de 1974 (ref 15), las cuales son mayores que  $0.06g$  y  $0.03g$ , respectivamente. Por tal motivo, en vez de estos últimos valores se usarían, en primera instancia,  $\Lambda_{\text{máx}} = 65 \times 1.5 = 98 \text{ cm/seg}^2$  y  $\Lambda_{\text{máx}} = 48 \times 1.5 = 72 \text{ cm/seg}^2$ .

Sin embargo, con el fin de seleccionar valores de diseño que tengan periodos de recurrencia adecuados, se decidió tomar 100 años como valor de éste; a partir de las ecs 3.6 y 3.10 se determinaron los valores  $\Lambda_{\text{máx}} = 139 \text{ cm/seg}^2$  en suelo blando, y  $\Lambda_{\text{máx}} = 89 \text{ cm/seg}^2$ , en suelo duro, los cuales superan a los calculados al final del párrafo anterior.

Por tanto, para fines de diseño se decidió tomar las aceleraciones máximas más grandes, es decir,

para suelo blando:  $\Lambda_{\text{máx}} = 139 \text{ cm/seg}^2$

para suelo firme:  $\Lambda_{\text{máx}} = 89 \text{ cm/seg}^2$ .

#### 4. ANÁLISIS SISMICO DE TUBERIAS ENTERRADAS

Como se indicó en el capítulo de antecedentes, en este trabajo se utilizan cuatro métodos para el análisis de tuberías enterradas excitadas por sismo; ellos son: simplificado, directo, cuasiestático y de juntas friccionantes. Este último fue desarrollado exprofeso como parte de este trabajo. En este capítulo se plantean los cuatro modelos; en el siguiente se presentan y discuten los resultados que se obtuvieron con ellos.

##### 4.1 Método simplificado

En el método simplificado para el análisis sísmico de tuberías enterradas se considera que la tubería es recta, de longitud indefinida, formada por un ensamble de tramos de longitud  $L$ , y que se encuentra enterrada en un semiespacio elástico;

se supone también que la tubería se mueve igual que el suelo, despreciándose los efectos de interacción tubería-suelo. Adicionalmente, se admite como hipótesis simplificadora que la tubería consiste de segmentos rígidos unidos por juntas flexibles.

Por otra parte, el desplazamiento relativo máximo  $U_{\text{máx}}^i$  y la máxima rotación de una junta  $i$ ,  $\theta_{\text{máx}}^i$ , están definidos, respectivamente, por

$$\begin{aligned} U_{\text{máx}}^i &= \epsilon_{\text{máx}}^i L \\ \theta_{\text{máx}}^i &= \phi_{\text{máx}}^i L \end{aligned} \quad (4.1)$$

donde  $\epsilon_{\text{máx}}$  y  $\phi_{\text{máx}}$  son los valores máximos de la deformación axial y la curvatura asociadas al movimiento del suelo, respectivamente.

Existen varios criterios para estimar el movimiento relativo máximo entre dos puntos. El más simple señala que la cota superior de la deformación unitaria que se produce durante un sismo está dada por la siguiente ecuación:

$$\epsilon_{\text{máx}} = \frac{V_{\text{máx}}}{c} \quad (4.2)$$

donde  $V_{\text{máx}}$  es la velocidad máxima del terreno durante el sismo y  $c$  es la velocidad aparente de propagación de las ondas sísmicas. En particular (ref 16) para ondas longitudinales (P) se tiene que la deformación axial,  $\epsilon$ , y la curvatura,  $\phi$ , se

calculan con las siguientes ecuaciones

$$\epsilon_p = \frac{V_{\text{máx}}}{v_p} \text{sen}^2 \alpha \quad (4.3)$$

$$\phi_p = \frac{\lambda_{\text{máx}}}{v_p^2} \text{sen}^2 \alpha \text{ cosa}$$

donde  $\alpha$  es el ángulo de incidencia respecto al eje perpendicular a la tubería,  $v_p$  es la velocidad de propagación de las ondas P en el medio de desplante de la tubería,  $\lambda_{\text{máx}}$  es la aceleración máxima del terreno y  $V_{\text{máx}}$  es la velocidad máxima del terreno, ambas en la dirección de incidencia. Como puede apreciarse, el valor máximo de  $\epsilon_p$  ocurre para  $\alpha = 90$ , es decir, cuando la onda viaja en la dirección del tubo, y vale

$$\epsilon_{p,\text{máx}} = V_{\text{máx}}/v_p \quad (4.4)$$

Por otra parte, para ondas de cortante (S) se obtiene

$$\epsilon_s = \frac{V_{\text{máx}}}{v_s} \text{cosa sena} \quad (4.5)$$

$$\phi_s = \frac{\lambda_{\text{máx}}}{v_s^2} \text{sen}^3 \alpha \quad (4.6)$$

donde  $v_s$  es la velocidad de propagación de las ondas S.

El valor máximo de  $\epsilon_s$  ocurre para  $\alpha = 45^\circ$  y vale

$$\epsilon_{s,\text{máx}} = \frac{V_{\text{máx}}}{2v_s} \quad (4.7)$$



El máximo de  $\phi_s$  ocurre para  $\alpha = 90^\circ$  y vale

$$\phi_{s,\text{máx}} = \frac{A_{\text{máx}}}{v_s^2} \quad (4.8)$$

Comparando las ecs 4.4 y 4.7 se percibe que la deformación axial máxima dominante depende de  $v_p$  y  $v_s$ . Así, en terreno duro  $v_p = 1.7v_s$ , por lo cual la ec 4.4 da la cota superior de la deformación. Por otra parte, en terreno blando  $v_p > 2v_s$ , ya que el módulo de Poisson,  $\nu$ , puede ser mayor que 0.4, por lo que la cota superior queda dada por la ec 4.7; tal es el caso del lago de Texcoco donde se han determinado valores de  $\nu$  de 0.49 y velocidades de propagación de las ondas S de 35 m/seg y de las P de 900 m/seg (ref 17), y en el propio caso de la zona de Xochimilco, donde se midieron velocidades de propagación de las ondas S y P de 170 y 1100 m/seg, respectivamente (ref 18). Por otra parte, la cota superior de la curvatura máxima queda dada, en ambos casos, mediante la ec 4.8.

#### 4.2 Método directo

El método directo se basa en las mismas hipótesis enunciadas en el primer párrafo de la sección 4.1. Consiste simplemente en una búsqueda sistemática del máximo del cociente

$$\delta = \Delta d / \Delta t \quad (4.9)$$

que se presenta en el registro de un sismo, siendo  $\Delta d$  la diferencia de desplazamiento del suelo en un lapso variable  $\Delta t$ ;

el registro que se utiliza para esto es de desplazamiento contra tiempo. En tal caso, si se supone conservadoramente que el sismo se propaga con velocidad  $v_s$ , la deformación unitaria axial máxima de la tubería es

$$\epsilon_{\text{máx}} = \delta/v_s \quad (4.10)$$

#### 4.3 Método cuasiestático

El método cuasiestático para análisis sísmico de tuberías enterradas y construidas a base de tramos, formulado en las refs 3 y 21, es más refinado que los anteriores, ya que toma en cuenta un mayor número de parámetros físicos, geotécnicos y sismológicos.

Los parámetros físicos son las propiedades geométricas y mecánicas del tubo y de la junta, tales como el diámetro, espesor, longitud del tramo y el módulo de elasticidad del tubo, y la rigidez de las juntas; los geotécnicos son la rigidez del suelo que envuelve al tubo y la velocidad de propagación del sismo, en tanto que los sismológicos se componen de la historia completa de desplazamientos del suelo. Como se indicó en el cap 2, se desprecia el efecto inercial de la tubería.

En este método se toma en cuenta, además, la manera en que ocurre la interacción del tubo con el suelo durante el temblor, y comprende los casos de comportamiento elástico y

elasto-plástico del suelo y de las juntas.

#### 4.3.1 Caso elástico

En la formulación del caso elástico se supone que los materiales que integran el sistema tubo-suelo permanecen en el rango elástico durante todo el movimiento sísmico.

En la fig 4.1 se presentan la forma de idealización de la tubería y los símbolos utilizados; ellos son:

$D_i(t)$ ( $i = 0, 1, \dots, n$ )	desplazamientos del suelo en los puntos de las juntas
$X_i(t)$ ( $i = 1, 2, \dots, 2n$ )	desplazamientos de los extremos de cada tramo
$K_{Si}$ ( $i = 1, 2, \dots, n$ )	rígidez del suelo, por unidad de longitud, alrededor del tramo $i$
$K_{Ji}$ ( $i = 0, 1, \dots, n$ )	rígidez de la junta $i$
$L_i$ ( $i = 1, 2, \dots, n$ )	longitud del tramo $i$
$t$	tiempo

El modelo matemático se elaboró mediante el método de energía, llegándose a que el sistema tubería-suelo queda representado por la siguiente expresión:

$$\{K^{\text{sistema}}\} \{X\} = \{K^{\text{suelo}}\} \{D\} \quad (4.11)$$

donde  $\{K^{\text{sistema}}\}$  y  $\{K^{\text{suelo}}\}$  son matrices tridiagonales simétricas

de orden  $2n \times 2n$ , cuyos elementos son:

Para  $\{K^{\text{sistema}}\}$ :

$$K_{2i-1, 2i-1}^{\text{sistema}} = \frac{9E_i A_i}{5L_i} + \frac{K_{Si} L_i}{3} + K_{J(i-1)}, \quad 1 \leq i \leq n$$

$$K_{2i-1, 2i}^{\text{sistema}} = K_{2i, 2i-1}^{\text{sistema}} = -\frac{9E_i A_i}{5L_i} + \frac{K_{Si} L_i}{6}, \quad 1 \leq i \leq n$$

$$K_{2i, 2i}^{\text{sistema}} = \frac{9E_i A_i}{5L_i} + \frac{K_{Si} L_i}{3} + K_{Ji}; \quad 1 \leq i \leq n$$

$$K_{2i, 2i+1}^{\text{sistema}} = K_{2i+1, 2i}^{\text{sistema}} = -K_{Ji}; \quad 1 \leq i \leq (n-1)$$

Para  $\{K^{\text{suelo}}\}$ :

$$K_{1,1}^{\text{suelo}} = \frac{K_{S1} L_1}{3} + K_{J0}$$

$$K_{2n, 2n}^{\text{suelo}} = \frac{K_{Sn} L_n}{3} + K_{Jn}$$

$$K_{2i-1, 2i-1}^{\text{suelo}} = \frac{K_{Si} L_i}{3} \quad 2 \leq i \leq n$$

$$K_{2i, 2i}^{\text{suelo}} = \frac{K_{Si} L_i}{3} \quad 1 \leq i \leq (n-1)$$

$$K_{2i,2i+1}^{\text{suelo}} = K_{2i+1,2i}^{\text{suelo}} = 0; \quad 1 \leq i \leq (n-1)$$

$$K_{2i-1,2i}^{\text{suelo}} = K_{2i,2i-1}^{\text{suelo}} = \frac{K_{Si}^L i}{6}; \quad 1 \leq i \leq n$$

Por su parte,  $\{X\}$  y  $\{D\}$  son vectores cuyos elementos son las  $X_i(t)$  y las  $D_i(t)$ , respectivamente.

En las expresiones anteriores,  $E_i$  es el módulo de elasticidad del tubo  $i$ -ésimo, y  $A_i$ , el área de la sección transversal del mismo.

#### 4.3.2 Caso elasto-plástico

En la formulación de este caso se tomó en cuenta el hecho de que tanto el suelo como las juntas se pueden comportar de manera elastoplástica. La resolución del problema se realiza mediante métodos energéticos.

En las figs 4.2 y 4.3 se muestran las idealizaciones del comportamiento elastoplástico del suelo y de la junta, respectivamente. En ellas puede observarse que:

$$f_{2i-1} = K_{Si} [X_{2i-1}(t) - D_{i-1}(t)] \quad 1 \leq i \leq n$$

$$f_{2i} = K_{Si} [X_{2i}(t) - D_i(t)] \quad 1 \leq i \leq n$$

$$f_p = K_{Si} y_{pi} \quad 1 \leq i \leq n$$

para la fuerza del suelo, y

$$F_i = K_{ji} [X_{2i+1}(t) - X_{2i}(t)] \quad 0 \leq i \leq n$$

$$F_p = K_{ji} d_{pi} \quad 0 \leq i \leq n$$

para la fuerza de la junta, donde  $y_{pi}$  es el desplazamiento de fluencia del suelo que rodea al  $i$ -ésimo tubo, y  $d_{pi}$  es el desplazamiento de fluencia de la  $i$ -ésima junta.

Por otra parte, en la fig 4.4 se muestran las distribuciones posibles de la fuerza del suelo; este modelo sólo considera el caso de deslizamiento invertido, ya que éste es válido para los otros si la longitud en la cual ocurre el deslizamiento es pequeña. Dicha longitud se calcula con la ecuación

$$z_{2i-1} = \frac{|f_{2i-1}| - f_p}{|f_{2i-1} - f_{2i}|} L_i; \quad 1 \leq i \leq n$$

para el extremo anterior del tubo, y con

$$z_{2i} = \frac{|f_{2i}| - f_p}{|f_{2i-1} - f_{2i}|} L_i; \quad 1 \leq i \leq n$$

para el extremo posterior.

La ecuación de equilibrio que se obtiene es:

$$\{K^{\text{sistema}} + K^{\text{sistema}(')}\} \{X\} = \{K^{\text{suelo}} + K^{\text{suelo}(')}\} \{D\} + \{K^{(')}\} \{Y_p\}$$

donde  $\{K^{\text{sistema}}\}$ ,  $\{K^{\text{suelo}}\}$ ,  $\{X\}$  y  $\{D\}$  son las mismas matrices y vectores, en su caso, que se obtuvieron para comportamiento elástico;  $\{Y_p\}$  es el vector cuyos elementos son las  $y_{pi}$ , y  $\{K^{\text{sistema}(')}\}$ ,  $\{K^{\text{suelo}(')}\}$  y  $\{K^{(')}\}$  son dos matrices tridimensionales y una diagonal, respectivamente, de orden  $2n \times 2n$ , cuyos elementos son:

$$K_{2i-1, 2i-1}^{\text{sistema}(')} = -\frac{K_{Si} L_i}{3} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{z_{2i-1}}{L_i} \right)^3 \right] - \frac{K_{Si} z_{2i}^3}{3L_i^2} - K_{Ji};$$

$$1 \leq i \leq n$$

$$K_{2i-1, 2i}^{\text{sistema}(')} = K_{2i, 2i-1}^{\text{sistema}(')} = -K_{Si} \left[ \frac{1}{2L_i} (z_{2i-1}^2 + z_{2i}^2) \right. \\ \left. - \frac{1}{3L_i^2} (z_{2i-1}^3 + z_{2i}^3) \right];$$

$$1 \leq i \leq n$$

$$K_{2i, 2i}^{\text{sistema}(')} = -\frac{K_{Si} L_i}{3} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{z_{2i}}{L_i} \right)^3 \right] - \frac{K_{Si} z_{2i-1}^3}{3L_i^2} - K_{Ji};$$

$$1 \leq i \leq n$$

$$K_{2i, 2i+1}^{\text{sistema}(')} = K_{2i+1, 2i}^{\text{sistema}(')} = K_{Ji};$$

$$1 \leq i \leq (n-1)$$

$$K_{1,1}^{\text{suelo}(')} = -\frac{K_{S1} L_1}{3} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{z_1}{L_1} \right)^3 \right] - \frac{K_{S1} z_2^3}{3L_1^2} - K_{J0}$$

$$K_{2n, 2n}^{\text{suelo}(')} = -\frac{K_{Sn} L_n}{3} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{z_{2n}}{L_n} \right)^3 \right] - \frac{K_{Sn} z_{2n-1}^3}{3L_n^2} - K_{Jn}$$

$$K_{2i-1, 2i-1}^{\text{suelo}(\cdot)} = -\frac{K_{Si} L_i}{3} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{z_{2i-1}}{L_i} \right)^3 \right] - \frac{K_{Si} z_{2i}^3}{3L_i^2};$$

$$2 \leq i \leq n$$

$$K_{2i, 2i}^{\text{suelo}(\cdot)} = -\frac{K_{Si} L_i}{3} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{z_{2i}}{L_i} \right)^3 \right] - \frac{K_{Si} z_{2i-1}^3}{3L_i^2};$$

$$1 \leq i \leq (n-1)$$

$$K_{2i, 2i+1}^{\text{suelo}(\cdot)} = K_{2i+1, 2i}^{\text{suelo}(\cdot)} = 0;$$

$$1 \leq i \leq (n-1)$$

$$K_{2i-1, 2i}^{\text{suelo}(\cdot)} = K_{2i, 2i-1}^{\text{suelo}(\cdot)} = -K_{Si} \left[ \frac{1}{2L_i} (z_{2i-1}^2 + z_{2i}^2) - \frac{1}{3L_i^2} (z_{2i-1}^3 + z_{2i}^3) \right];$$

$$1 \leq i \leq n$$

$$K_{1, 1}^{(\cdot)} = \frac{K_{S1}}{2L_1} (z_1^2 - z_2^2) - K_{S1} z_1 \bar{r} (K_{J0}) \left( \frac{d}{y_{p1}} \right)$$

$$K_{2n, 2n}^{(\cdot)} = -\frac{K_{Sn}}{2L_n} (z_{2n-1}^2 - z_{2n}^2) - K_{Sn} z_{2n} \bar{r} (-K_{Jn}) \left( \frac{d}{y_{pn}} \right)$$

$$K_{2i-1, 2i-1}^{(\cdot)} = \frac{K_{Si}}{2L_i} (z_{2i-1}^2 - z_{2i}^2) - K_{Si} z_{2i-1}; \quad 2 \leq i \leq n$$

$$K_{2i, 2i}^{(\cdot)} = -\frac{K_{Si}}{2L_i} (z_{2i-1}^2 - z_{2i}^2) - K_{Si} z_{2i}; \quad 1 \leq i \leq (n-1)$$



Los signos menos y más en las expresiones de  $K_{1,1}^{(')}$  y  $K_{2n,2n}^{(')}$  son para tomar en cuenta la contracción o extensión que puede sufrir la junta, respectivamente.

Cuando el sistema completo experimenta desplazamientos relativos pequeños y no se presenta la no-linealidad, todas las matrices con el signo ('') son nulas; en tal caso la ecuación de equilibrio es la misma que la de comportamiento elástico. Si no es así, los únicos valores no nulos de tales matrices serán aquellos que correspondan a los elementos que están en estado plástico.

#### 4.4 Método de juntas friccionantes

El método de juntas friccionantes que se presenta enseguida ha sido desarrollado como parte de esta investigación para tuberías con juntas tipo lock-joint; en él se toma en cuenta la interacción tubo-suelo considerando comportamiento elástico de ambos y se manejan las mismas hipótesis que en el método cuasiestático.

Cuando una tubería se aloja en zonas de suelo blando y se ve sujeta a un sismo intenso, los desplazamientos relativos que se tienen entre dos tramos consecutivos son relativamente grandes. Debido a que en tal caso el empaque de la junta no tiene posibilidad de deformarse todo lo necesario en la dirección axial del tubo, por el confinamiento que le da la

ranura donde se aloja, se consideró razonable modelar el comportamiento de la junta como un elemento friccionante, en el que la fuerza que se opone al deslizamiento se debe a la fricción entre el empaque y el tubo, en vez de hacerlo con un resorte, como lo supone el método cuasiestático.

El modelo puede manejar tanto la condición de empotramiento como de junta friccionante en cualquiera de los extremos de la tubería (fig 4.5). Varios símbolos que se utilizan son los mismos que en el método cuasiestático; los nuevos se definirán conforme aparezcan.

#### 4.4.1 Formulación del modelo

Para formular el modelo de juntas friccionantes se considerará en primer término un tubo intermedio cualquiera,  $k$ . En tal caso, los desplazamientos del suelo en sus extremos anterior y posterior son  $D_k(t)$  y  $D_{k+1}(t)$ , respectivamente, donde  $t$  denota tiempo, en tanto que los correspondientes desplazamientos del tubo en dichos extremos son  $X_{2k-1}(t)$  y  $X_{2k}(t)$  (figs 4.5 y 4.6a); todas estas coordenadas se miden respecto a la posición que tiene el tubo antes del temblor, es decir,  $X_{2k-1}(0) = X_{2k}(0) = 0$ .

Sean  $t_1, t_2, \dots$  los tiempos igualmente espaciados en que se discretiza la escala del tiempo, y sean  $\delta_{ak}$  y  $\delta_{pk}$  los desplazamientos relativos de los extremos anterior y posterior del tubo  $k$ , respectivamente (fig 4.6a), respecto al suelo.

Debido a que en cada instante durante el temblor los tubos  $k-1$ ,  $k$  y  $k+1$  tienen deformaciones diferentes, existe la tendencia a que los extremos de los tubos que inciden en cada una de las

dos juntas del tubo  $k$  se desplacen uno con respecto a otro; el que esto suceda depende de que la suma de fuerzas del tubo y del suelo, que corresponden a las deformaciones impuestas por el sismo, sea superior a la fricción que se tiene en cada junta.

En el instante  $t = t_{i-1}$  los desplazamientos  $\delta_{ak}(t_{i-1})$  y  $\delta_{pk}(t_{i-1})$  valen

$$\delta_{ak}(t_{i-1}) = X_{2k-1}(t_{i-1}) - D_k(t_{i-1})$$

$$\delta_{pk}(t_{i-1}) = X_{2k}(t_{i-1}) - D_{k+1}(t_{i-1})$$

Por tanto, en  $t = t_i$  la deformación del tubo  $k$ -ésimo,  $\Delta d_k(t_i)$ , es:

$$\begin{aligned} \Delta d_k(t_i) &= [ \delta_{ak}(t_{i-1}) + D_k(t_i) ] - [ \delta_{pk}(t_{i-1}) + D_{k+1}(t_i) ] \\ &= D_k(t_i) - D_{k+1}(t_i) - D_k(t_{i-1}) + D_{k+1}(t_{i-1}) + X_{2k-1}(t_{i-1}) \\ &\quad - X_{2k}(t_{i-1}) \end{aligned} \quad (4.13)$$

La fuerza impuesta sobre el tubo por esta deformación es

$$F_{Tk} = K_{Tk} \Delta d_k(t_i) \quad (4.14)$$

donde  $K_{Tk}$  es la rigidez del tubo  $k$ , en tanto que la de fricción que se opone al deslizamiento del tubo es

$$F_f = \mu p \quad (4.15)$$

donde

- $\mu$  coeficiente de fricción entre el empaque y el tubo
- $p$  fuerza entre empaque y tubo

El efecto del suelo es considerado mediante un elemento elástico longitudinal con rigidez,  $K_{Sk}$ , por unidad de longitud. Por lo tanto, suponiendo una variación lineal del desplazamiento relativo entre tubo y suelo, desde el centro del tubo hasta el extremo del mismo, la fuerza del suelo es

$$F_{Sk} = \{ K_{Sk} L_k / 4 \} \delta_{pk}(t_{i-1}) \quad (4.16)$$

donde  $L_k$  es la longitud del tramo  $k$ .

Si  $|F_{Tk} - F_{Sk}| \leq \mu p$ , entonces no ocurre ningún deslizamiento del tubo  $k$  relativo a los tramos  $k-1$  y  $k+1$  por lo que sus extremos tendrán las coordenadas

$$X_{2k-1}(t_i) = \delta_{ak}(t_{i-1}) + D_k(t_i) = X_{2k-1}(t_{i-1}) + D_k(t_i) - D_k(t_{i-1}) \quad (4.17)$$

$$X_{2k}(t_i) = \delta_{pk}(t_{i-1}) + D_{k+1}(t_i) = X_{2k}(t_{i-1}) + D_{k+1}(t_i) - D_{k+1}(t_{i-1}) \quad (4.18)$$

Si  $|F_{Tk} - F_{Sk}| > \mu p$  y  $F_{Tk} - F_{Sk} > 0$ , entonces la deformación del tubo  $k$  tendrá una recuperación,  $\Delta X_k(t_i)$ , de alargamiento (fig 4.6b); se supondrá que ésta se redistribuye equitativamente entre los dos extremos del tubo ( $\delta_{ak} = -\delta_{pk}$ ), con lo que los desplazamientos  $X_{2k-1}(t_i)$  y  $X_{2k}(t_i)$  quedan dados por

$$X_{2k-1}(t_i) = X_{2k-1}(t_{i-1}) + D_k(t_i) - D_k(t_{i-1}) - \Delta X_k(t_i)/2 \quad (4.19)$$

$$X_{2k}(t_i) = X_{2k}(t_{i-1}) + D_{k+1}(t_i) - D_{k+1}(t_{i-1}) + \Delta X_k(t_i)/2 \quad (4.20)$$

El valor de  $\Delta X_k(t_i)$  se calcula con la ecuación

$$\Delta X_k(t_i) = \frac{K_{Tk} \Delta d_k(t_i) - K_{Sk} L_k \delta_{pk}(t_{i-1})/4 - \mu p}{K_{Tk} + K_{Sk} L_k / \delta} \quad (4.21)$$

Esta ecuación se deduce partiendo del hecho de que al ocurrir la recuperación  $\Delta X_k(t_i)$  la fuerza impuesta sobre el tubo se convierte en

$$F'_{Tk}(t_i) = K_{Tk} \{ \Delta d_k(t_i) - \Delta X_k(t_i) \} \quad (4.22)$$

y la del suelo, en

$$F'_{Sk}(t_i) = \frac{K_{Sk} L_k}{4} (\delta_{pk}(t_{i-1}) + \frac{\Delta X_k(t_i)}{2}) \quad (4.23)$$

Por tanto, considerando que la recuperación ocurre hasta que el sistema de fuerzas queda en equilibrio, es decir, hasta que

$$F'_{Tk}(t_i) - F'_{Sk}(t_i) - \mu p = 0 \quad (4.24)$$

Considerando las ecs 4.22 y 4.23, la ec 4.24 toma la forma

$$K_{Tk} \Delta d_k(t_i) - K_{Tk} \Delta X_k(t_i) - K_{Sk} L_k \delta_{pk}(t_{i-1})/4 - K_{Sk} L_k \Delta X_k(t_i)/\delta - \mu p = 0$$

de donde, despejando a  $\Delta X_k(t_i)$  se obtiene la ec 4.21.

Procediendo de manera análoga se obtienen, para el caso de que

$|F'_{Tk} - F'_{Sk}| > \mu p$  y  $F'_{Tk} - F'_{Sk} < 0$ , las siguientes ecuaciones (fig 4.6c):

$$X_{2k-1}(t_i) = X_{2k-1}(t_{i-1}) + D_k(t_i) - D_k(t_{i-1}) + \Delta X_k(t_i)/2 \quad (4.25)$$

$$X_{2k}(t_i) = X_{2k}(t_{i-1}) + D_{k+1}(t_i) - D_{k+1}(t_{i-1}) - \Delta X_k(t_i)/2 \quad (4.26)$$

$$F_{Tk}^i(t_i) = K_{Tk} \{ \Delta d_k(t_i) + \Delta X_k(t_i) \} \quad (4.27)$$

$$F_{Sk}^i(t_i) = \frac{K_{Sk} L_k}{4} \left\{ \delta_{pk}(t_{i-1}) - \frac{\Delta X_k(t_i)}{2} \right\} \quad (4.28)$$

$$F_{Tk}^i(t_i) - F_{Sk}^i(t_i) + \nu p = 0 \quad (4.29)$$

$$\Delta X_k(t_i) = \frac{-K_{Tk} \Delta d_k(t_i) + K_{Sk} L_k \delta_{pk}(t_{i-1})/4 - \nu p}{K_{Tk} + K_{Sk} L_k / 8} \quad (4.30)$$

El desplazamiento relativo,  $\lambda$ , que ocurrirá en la junta  $j$ -ésima, entre los extremos de los tubos que inciden a ella, es

$$\lambda_j(t_i) = X_{2j-2}(t_i) - X_{2j-1}(t_i); \quad 2 \leq j \leq n \quad (4.31)$$

y para las juntas 1 y  $n+1$

$$\lambda_1(t_i) = D_1(t_i) - X_1(t_i) \quad (4.32)$$

$$\lambda_{n+1}(t_i) = X_{2n}(t_i) - D_{n+1}(t_i) \quad (4.33)$$

Las deformaciones unitarias,  $\epsilon$ , del tubo  $k$  son

$$\epsilon_k(t_i) = \{ X_{2k-1}(t_i) - X_{2k}(t_i) \} / L_k \quad (4.34)$$

Para los tramos primero y último de la tubería ( $k = 1$  y  $k = n$ ) se consideran dos condiciones de apoyo; empotramiento y junta

friccionante. En el último caso, los desplazamientos se calculan de igual manera que para un tramo intermedio, con las ecs 4.17 y 4.18, 4.19 y 4.20, o 4.25 y 4.26, según corresponda.

Si se trata de empotramiento, las recuperaciones  $\Delta X_1(t_i)$  y  $\Delta X_n(t_i)$ , si las hay, inciden en su totalidad en los desplazamientos  $X_2(t_i)$  y  $X_{2n-1}(t_i)$  (fig 4.7). En tal caso las expresiones para calcular los desplazamientos son:

Para el tubo 1:

a. En todos los casos

$$X_1(t_i) = D_1(t_i) \quad (4.35)$$

b. Si  $|F_{T1} - K_{S1} L_1 \delta_{p1}(t_{i-1})/2| \leq \mu p$

$$X_2(t_i) = X_2(t_{i-1}) + D_2(t_i) - D_2(t_{i-1}) \quad (4.36)$$

c. Si  $|F_{T1} - K_{S1} L_1 \delta_{p1}(t_{i-1})/2| > \mu p$  y  $F_{T1} - K_{S1} L_1 \delta_{p1}(t_{i-1})/2 > 0$

$$\Delta X_1(t_i) = \frac{K_{T1} \Delta d_1(t_i) - K_{S1} L_1 \delta_{p1}(t_{i-1})/2 - \mu p}{K_{T1} + K_{S1} L_1/2} \quad (4.37)$$

$$X_2(t_i) = X_2(t_{i-1}) + D_2(t_i) - D_2(t_{i-1}) + \Delta X_1(t_i) \quad (4.38)$$

d. Si  $|F_{T1} - K_{S1} L_1 \delta_{p1}(t_{i-1})/2| > \mu p$  y  $F_{T1} - K_{S1} L_1 \delta_{p1}(t_{i-1})/2 < 0$

$$\Delta X_1(t_i) = \frac{-K_{T1} \Delta d_1(t_i) + K_{S1} L_1 \delta_{p1}(t_{i-1})/2 - \mu p}{K_{T1} + K_{S1} L_1/2} \quad (4.39)$$

$$X_2(t_i) = X_2(t_{i-1}) + D_2(t_i) - D_2(t_{i-1}) - \Delta X_1(t_i) \quad (4.40)$$

Para el tubo n:

- a. En todos los casos

$$X_{2n}(t_i) = D_{n+1}(t_i) \quad (4.41)$$

- b. Si  $|F_{Tn} + K_{Sn}L_n\delta_{an}(t_{i-1})/2| \leq \mu p$

$$X_{2n-1}(t_i) = X_{2n-1}(t_{i-1}) + D_n(t_i) - D_n(t_{i-1}) \quad (4.42)$$

- c. Si  $|F_{Tn} + K_{Sn}L_n\delta_{an}(t_{i-1})/2| > \mu p$  y  $F_{Tn} + K_{Sn}L_n\delta_{an}(t_{i-1})/2 > 0$

$$\Delta X_n(t_i) = \frac{K_{Tn}\Delta d_n(t_i) + K_{Sn}L_n\delta_{an}(t_{i-1})/2 - \mu p}{K_{Tn} + K_{Sn}L_n/2} \quad (4.43)$$

$$X_{2n-1}(t_i) = X_{2n-1}(t_{i-1}) + D_n(t_i) - D_n(t_{i-1}) - \Delta X_n(t_i) \quad (4.44)$$

- d. Si  $|F_{Tn} + K_{Sn}L_n\delta_{an}(t_{i-1})/2| > \mu p$  y  $F_{Tn} + K_{Sn}L_n\delta_{an}(t_{i-1})/2 < 0$

$$\Delta X_n(t_i) = \frac{-K_{Tn}\Delta d_n(t_i) - K_{Sn}L_n\delta_{an}(t_{i-1})/2 - \mu p}{K_{Tn} + K_{Sn}L_n/2} \quad (4.45)$$

$$X_{2n-1}(t_i) = X_{2n-1}(t_{i-1}) + D_n(t_i) - D_n(t_{i-1}) + \Delta X_n(t_i) \quad (4.46)$$

Las ecuaciones anteriores se aplican en cada instante  $t_i$  para cada uno de los tramos a los cuales haya llegado el sismo, el cual se propaga a lo largo de la tubería del tramo i hacia el n. Para hacer esto se elaboró un programa de computadora que acepta como datos de la excitación a cualquier sismo, dado en términos de su historia de desplazamientos.



## 5. OBTENCION Y ANALISIS DE RESULTADOS

Con el fin de comparar los métodos estudiados en el cap 4, estudiar los efectos de los diversos parámetros que pueden afectar la respuesta sísmica de las tuberías y generar las bases para las recomendaciones que se presentan en el cap 7, en este capítulo se aplican dichos métodos, empleando como excitación diversos sismos registrados en los suelos duro y blando del Distrito Federal, y los resultados estadísticos del cap 3.

### 5.1 *Métodos simplificado y directo*

#### 5.1.1 Suelo blando

Las deformaciones unitarias máximas  $\epsilon_{m\acute{a}x}$  y  $\delta_{m\acute{a}x}$  se obtuvieron con los métodos simplificado y directo, respectivamente, considerando conservadoramente que el temblor se compone de ondas de cortante exclusivamente; los cálculos se hicieron utilizando

tres distintas velocidades de propagación: 35, 170 y 410 m/seg.

Las deformaciones unitarias que corresponden a los sismos que se han registrado en suelo blando se presentan en la tabla 5.1; como se esperaba, se aprecia en ella que las del método directo son menores que las del simplificado.

Con el fin de determinar si existe relación entre  $\delta_{m\acute{a}x}$  y  $\epsilon_{m\acute{a}x}$ , con los datos de la tabla 5.1 se elaboraron varias gráficas semejantes a la de la fig 5.1, una para cada velocidad de propagación. Como puede observarse, existe una tendencia de tipo lineal en la variación de  $\delta_{m\acute{a}x}$  con respecto a  $\epsilon_{m\acute{a}x}$ . La ecuación de la recta que las relaciona es

$$\bar{\delta}_{m\acute{a}x} = 0.585 \epsilon_{m\acute{a}x} \quad (5.1)$$

donde  $\bar{\delta}_{m\acute{a}x}$  es el valor esperado o esperanza de  $\delta_{m\acute{a}x}$ . Esta ecuación es válida para cualquier velocidad de propagación aunque, obviamente, los intervalos de valores usuales de  $\epsilon_{m\acute{a}x}$  serán diferentes.

En el cap 3 se señaló que la aceleración máxima del suelo que se usará en este trabajo para fines de diseño es  $A_{m\acute{a}x} = 139$  cm/seg<sup>2</sup>. Con este valor se puede calcular la velocidad máxima esperada del terreno,  $\bar{V}_{m\acute{a}x}$ , que se requiere para calcular  $\epsilon_{m\acute{a}x}$ , mediante la ec 3.1, que se dedujo en el cap 3 (ver fig 3.1):

$$\bar{V}_{m\acute{a}x} = 0.3 A_{m\acute{a}x}$$

Por tanto, sustituyendo  $\Lambda_{\text{máx}} = 139 \text{ cm/seg}^2$  en la ec 3.1 se obtiene

$$\tilde{V}_{\text{máx}} = 41.70 \text{ cm/seg}$$

Con este valor de  $\tilde{V}_{\text{máx}}$  se puede calcular la esperanza,  $\tilde{e}_{\text{máx}}$ , de la deformación unitaria axial máxima aplicando la ecuación

$$\tilde{e}_{\text{máx}} = \tilde{V}_{\text{máx}}/v_{\text{B}} \quad (5.2)$$

Esta expresión resulta de las ecs 4.2 y 4.7 al considerar que  $\tilde{V}_{\text{máx}}$  es la proyección horizontal de la amplitud máxima de las ondas sísmicas incidiendo a  $45^\circ$ , y que  $v_{\text{B}}$  es la velocidad aparente de propagación.

De esta manera se obtienen, para  $v_{\text{B}} = 35, 170$  y  $410 \text{ m/seg}$ ,  $\tilde{e}_{\text{máx}} = 0.011914, 0.002453$  y  $0.001017$ . A cada una de estas deformaciones unitarias le corresponde un desplazamiento esperado,  $\tilde{d}$ , de cada tramo de tubo dado por

$$\tilde{d} = \tilde{e}_{\text{máx}} L \quad (5.3)$$

donde  $L =$  longitud del tramo. Considerando  $L = 4.88 \text{ m}$  (16 pies), se obtienen  $\tilde{d} = 5.81, 1.20$  y  $0.50 \text{ cm}$ , respectivamente.

Por otra parte, el valor esperado de la deformación  $\tilde{\epsilon}_{\text{máx}}$ , que corresponde al método directo, se puede calcular aplicando la ec 5.1 sucesivamente para cada una de las  $\tilde{e}_{\text{máx}}$  antes calculadas. Al hacerlo se obtienen  $\tilde{\epsilon}_{\text{máx}} = 0.006970, 0.001435$  y  $0.0005951$ , para  $v_{\text{B}} = 35, 170$  y  $410 \text{ m/seg}$ , respectivamente.

Empleando las ecs 5.1, 5.2 y 3.1, los desplazamientos esperados de cada tramo que corresponden a cada una de las  $\ddot{\delta}_{\text{máx}}$  valen

$$\ddot{d}' = \ddot{\delta}_{\text{máx}} L = 0.585L\ddot{V}_{\text{máx}}/v_s = 0.1755L\ddot{A}_{\text{máx}}/v_s \quad (5.4)$$

Aplicando la ec 5.4 se obtienen los respectivos desplazamientos  $\ddot{d}' = 3.40, 0.70$  y  $0.29$  cm.

La deformación unitaria debida a la curvatura que el sismo, representado por ondas de cortante, induce sobre la tubería, se calcula utilizando la curvatura  $\phi_{s,\text{máx}}$  dada por la ec 4.8, es decir,

$$\phi_{s,\text{máx}} = \frac{\Lambda_{\text{máx}}}{v_s^2}$$

Sustituyendo en esta ecuación a  $\Lambda_{\text{máx}} = 139 \text{ cm/seg}^2$  y a las velocidades de propagación que se están empleando, se obtienen  $\phi_{s,\text{máx}} = 1.13 \times 10^{-5}, 4.81 \times 10^{-7}$  y  $8.27 \times 10^{-8} \text{ cm}^{-1}$ .

Aceptando la hipótesis de un estado plano de deformaciones, la deformación unitaria máxima,  $\epsilon_0$ , que estas curvaturas ocasionan, ocurren en las fibras exteriores del tubo, por lo cual

$$\epsilon_0 = \phi_{s,\text{máx}} D/2 \quad (5.5)$$

donde D es el diámetro exterior del tubo. Aplicando esta ecuación para las tuberías con diámetros interiores de 228.6 cm

(90 pulg), 152.4 cm (60 pulg) y 76.2 cm (30 pulg), se obtienen las deformaciones unitarias y los desplazamientos correspondientes,  $d_0$ , anotados en la tabla 5.2 (ec 4.1).

Comparando los desplazamientos  $d_0$  con los debidos a la deformación axial, se concluye que los primeros son muy pequeños y, por consiguiente, influyen muy poco en el desplazamiento relativo total que se tiene en las juntas. Por tanto, resulta ligeramente conservador sumar ambas contribuciones para obtener una estimación de dicho desplazamiento relativo,  $d_T$  o  $d_T'$ , es decir

$$d_T = \bar{d} + d_0 \quad (5.6)$$

$$d_T' = \bar{d}' + d_0 \quad (5.7)$$

donde  $d_T$  corresponde al método simplificado y  $d_T'$  al directo. Los resultados de aplicar las ecs 5.6 y 5.7 se presentan en la tabla 5.2.

Por otra parte, la capacidad mínima de giro que se debe tener en las juntas es la dada por la ec 4.1, es decir,

$$\theta_{m\acute{a}x} = \phi_{s,m\acute{a}x} L$$

En consecuencia, utilizando los  $\phi_{s,m\acute{a}x}$  antes calculados, los correspondientes ángulos de giro son, de acuerdo con la ec 4.1,  $\theta_{m\acute{a}x} = 5.51 \times 10^{-3}$ ,  $2.35 \times 10^{-4}$  y  $4.04 \times 10^{-5}$  rad, o sea,  $\theta_{m\acute{a}x} = 0.316^\circ$ ,  $0.013^\circ$  y  $0.0023^\circ$ .

Como se indicó, los cálculos anteriores se hicieron utilizando una aceleración máxima del terreno que corresponde a un período de recurrencia,  $T$ , de 100 años y tramos de  $L = 4.88$  m de longitud. Si se deseara diseñar una tubería para un período distinto, mayor de 2 años, la aceleración se calcularía con la ec 3.6, en la que  $T$  se da en años, y que a continuación se reproduce

$$\lambda_{\text{máx}} = 25.36 T^{0.37} \quad (5.8)$$

En tal caso, para el método simplificado la deformación unitaria axial y la curvatura máximas serían

$$\tilde{\epsilon}_{\text{máx}} = 0.3 \lambda_{\text{máx}} / v_s = 7.61 T^{0.37} / v_s \quad (5.9)$$

$$\tilde{\phi}_{\text{máx}} = \lambda_{\text{máx}} / v_s^2 = 25.36 T^{0.37} / v_s^2 \quad (5.10)$$

Para el método directo, considerando las ecs 5.1 y 5.9, se tendría la deformación unitaria

$$\tilde{\delta}_{\text{máx}} = 0.585 \tilde{\epsilon}_{\text{máx}} = 4.45 T^{0.37} / v_s \quad (5.11)$$

en tanto que la curvatura a usar sería la misma que en el método simplificado (ec 5.10).

Los desplazamientos relativos en las juntas,  $\tilde{d}$  o  $\tilde{d}'$ , se calcularían con la ec 5.3 o con la primera parte de la ec 5.4, según fuera el método usado, con las que se obtienen

$$\bar{d} = 7.61LT^{0.37}/v_s \quad (5.12)$$

$$\bar{d}' = 4.45LT^{0.37}/v_s \quad (5.13)$$

El ángulo de giro en radianes, sería, según la ec 4.1,

$$\bar{\theta}_{m\acute{a}x} = \bar{\phi}_{m\acute{a}x} L = 25.4LT^{0.37}/v_s^2 \quad (5.14)$$

donde L es la longitud de los tramos.

### 5.1.2 Suelo duro

En la fig 5.2 se muestra la relación lineal entre  $\epsilon_{m\acute{a}x}$  y  $\delta_{m\acute{a}x}$  que se obtuvo para una velocidad de propagación del sismo de 755 m/seg; la gráfica se trazó empleando los valores de  $\epsilon_{m\acute{a}x}$  y  $\delta_{m\acute{a}x}$  anotados en la tabla 5.3. La ecuación de la recta que define la esperanza de  $\delta_{m\acute{a}x}$  es la misma para cualquier  $v_s$ ; ella es

$$\bar{\delta}_{m\acute{a}x} = 0.57\epsilon_{m\acute{a}x} \quad (5.15)$$

Por otra parte la relación que se obtuvo entre la aceleración y la velocidad máxima del terreno es (ver fig 3.2):

$$\bar{v}_{m\acute{a}x} = 0.27a_{m\acute{a}x}$$

De acuerdo con esta ecuación, a una aceleración máxima para diseño de tuberías enterradas en suelo duro de 89 cm/seg<sup>2</sup>, le corresponde  $\bar{v}_{m\acute{a}x} = 24$  cm/seg.

Sustituyendo ese valor de  $\bar{v}_{m\acute{a}x}$  en la ec 5.2 y las velocidades

$v_g = 410, 755$  y  $1250$  m/seg se obtienen las deformaciones unitarias  $\bar{\epsilon}_{m\acute{a}x} = 0.000585, 0.000318$  y  $0.000192$ , respectivamente. Según la ec 5.3 a estos valores les corresponden los desplazamientos relativos en las juntas,  $\bar{d} = 0.29, 0.16$  y  $0.09$  cm.

De acuerdo con la ec 5.15, las deformaciones unitarias del tubo, según el método directo, serían  $\bar{\delta}_{m\acute{a}x} = 0.000333, 0.000181$  y  $0.000109$ , a las cuales les corresponden los desplazamientos relativos en las juntas  $\bar{d}' = 0.16, 0.09$  y  $0.05$  cm.

La capacidad mínima de giro que se debe tener en las juntas es la dada por la ec 4.1.

Los valores de  $\phi_{s,m\acute{a}x}$  que corresponden a la aceleración de diseño ( $89$  cm/seg<sup>2</sup>) y las tres velocidades de propagación ( $410, 755$  y  $1250$  m/seg) son, de acuerdo con la ec 4.8,  $\phi_{s,m\acute{a}x} = 5.29 \times 10^{-8}, 1.56 \times 10^{-8}$  y  $5.70 \times 10^{-9}$  cm<sup>-1</sup>, respectivamente. En consecuencia, los correspondientes ángulos de giro son (ec. 4.1),  $\theta_{m\acute{a}x} = 2.58 \times 10^{-5}, 7.61 \times 10^{-6}$  y  $2.78 \times 10^{-6}$  rad, o sea,  $\theta_{m\acute{a}x} = 1.48 \times 10^{-3}, 4.36 \times 10^{-4}$  y  $1.59 \times 10^{-4}$  grados.

Por otra parte, las deformaciones unitarias máximas,  $\epsilon_0$ , asociadas a las curvaturas se calculan con la ec 5.5 y se resumen también en la tabla 5.2 junto con los correspondientes desplazamientos relativos,  $d_0$ , y los desplazamientos relativos totales en las juntas,  $d_T$  y  $d_T'$ .

Los cálculos anteriores se realizaron para una aceleración de



diseño de 89 cm/seg<sup>2</sup>, que tiene un periodo de recurrencia de 100 años, aproximadamente, y tramos de 4.88 m de longitud.

Sí el diseño se desea hacer para un periodo distinto, mayor que 2.5 años, la aceleración máxima del terreno se calcula con la siguiente expresión, que corresponde a la ec 3.10 y en la que T se da en años:

$$A_{\text{máx}} = 16.2 T^{0.37} \quad (5.16)$$

Tomando en cuenta esta ecuación y la ec 3.2, la deformación unitaria axial y la curvatura máximas correspondientes al método simplificado son:

$$\tilde{\epsilon}_{\text{máx}} = 0.27 A_{\text{máx}}/v_s = 4.37 T^{0.37}/v_s \quad (5.17)$$

$$\tilde{\phi}_{\text{máx}} = A_{\text{máx}}/v_s^2 = 16.2 T^{0.37}/v_s^2 \quad (5.18)$$

Para el método directo, considerando las ecs 5.15 y 5.17, la deformación unitaria axial máxima es

$$\tilde{\epsilon}_{\text{máx}} = 0.57 \tilde{\epsilon}_{\text{máx}} = 2.49 T^{0.37}/v_s \quad (5.19)$$

en tanto que la curvatura a usar es la misma que en el método simplificado (ec 5.18).

Por tanto, los desplazamientos y giros relativos en las juntas son

$$\tilde{d} = 4.37 LT^{0.37}/v_s \quad (5.20)$$

$$\tilde{d}' = 2.49 LT^{0.37}/v_s \quad (5.21)$$

$$\bar{\theta}_{\text{máx}} = 16.2 \text{ LT}^{0.37} / v_{\text{S}}^2 \quad (5.22)$$

## 5.2 Métodos cuasiestático y de juntas friccionantes

Para cuantificar los valores de las deformaciones en la tubería con los métodos cuasiestático y de juntas friccionantes, se seleccionaron los registros captados en suelo blando y en suelo duro, del temblor del 14 de marzo de 1979, que se enumeran en la sec 5.2.11 de este informe.

Para aplicar el método cuasiestático se adaptó un programa de computadora proporcionado por su autor; para el de juntas friccionantes se elaboró el programa cuyo listado aparece en el Apéndice A, con la descripción de los datos de entrada y los resultados que se obtienen.

Los cálculos se hicieron para las mismas velocidades de propagación de las ondas sísmicas que se usaron en los métodos simplificado y directo.

Asimismo, para los registros de Sosa Texcoco N00E y de la Alberca Olímpica N90W (ambos de suelo blando), se consideraron cuatro distintas rigideces para el suelo de relleno de la zanja donde se ubica el tubo, para abarcar otros tantos niveles de compactación del mismo, y tuberías de 76.2, 152.4 y 228.6 cm (30, 60 y 90 pulg) de diámetro.

### 5.2.1 Rigideces del suelo

Para tener una base para estimar las rigideces del suelo, la compañía GHI realizó una prueba estándar de placa en la zona de Xochimilco, a 0.8 m de profundidad, en el sitio donde se midió una velocidad de propagación de las ondas de cortante de 170 m/seg (ref 18); de esta prueba se obtuvo la gráfica de la fig 5.3, a partir de la cual se calculó el módulo de reacción del terreno,  $K_v$ , obteniéndose para deformaciones grandes un valor de  $1.4 \text{ kg/cm}^2/\text{cm}$ .

Para calcular el módulo de rigidez del terrono asociado a suelos con otras propiedades se siguió el razonamiento que se describe a continuación.

En términos de  $K_v$ , el módulo de elasticidad del suelo,  $E$ , se obtiene con la siguiente ecuación, la cual se deduce a partir de relaciones fuerza-deformación presentadas en la ref 24,

$$E = \frac{\pi}{4} D_p (1 - \nu^2) K_v = 2G(1 + \nu) \quad (5.23)$$

donde

$D_p$  = diámetro de la placa utilizada en la prueba

$\nu$  = módulo de Poisson del suelo

$G$  = módulo de cortante del suelo

Despejando a  $K_v$  de la ec 5.23 y considerando que la rigidez del suelo por unidad de longitud,  $K_g$ , se relaciona con  $K_v$

mediante la expresión

$$K_s = K_v \pi D$$

y que

$$G = \rho v_s^2$$

donde

$D$  = diámetro exterior del tubo

$\rho$  = densidad específica del suelo

se obtienen

$$K_v = 8v_s^2 \rho / (\pi D_p (1 - v)) \quad (5.24)$$

$$K_s = 8\rho v_s^2 D / (D_p (1 - v)) \quad (5.25)$$

Si se tienen dos suelos y a los parámetros de uno le ponemos un índice 1, y a los del otro, un índice 2, entonces

$$\frac{K_{s1}}{K_{s2}} = \frac{8v_{s1}^2 \rho_1 D / (D_p (1 - v_1))}{8v_{s2}^2 \rho_2 D / (D_p (1 - v_2))} \quad (5.26)$$

De esta ecuación se puede despejar a  $K_{s1}$  resultando la expresión

$$K_{s1} = K_{s2} \left( \frac{v_{s1}}{v_{s2}} \right)^2 \left( \frac{\rho_1}{\rho_2} \right) \frac{(1 - v_2)}{(1 - v_1)} \quad (5.27)$$

Al calcular  $K_s$  para los otros suelos, se tomó como suelo 2 al de la prueba de placa, para el cual se determinaron también los parámetros  $v_{s2} = 170$  m/seg,  $\rho_2 = 0.114$  ton-s<sup>2</sup>/m<sup>4</sup> y  $v_2 = 0.49$ , mediante los trabajos de prospección sísmica realizados como parte de este estudio (ref 18).

Otros dos suelos para los que se calculó  $K_s$  corresponden a un sitio por donde pasa el acueducto de Xochimilco, cerca de San Antonio Tecomitl, D.F., y a la zona del lago de Texcoco. Para el primero, mediante prospección sísmica (ref 18) se obtuvieron los siguientes resultados:

$$v_s = .410 \text{ m/seg, } v = 0.45 \text{ y } \rho = 0.156 \text{ ton-s}^2/\text{m}^4$$

para el segundo (ref 17):

$$v_s = 35 \text{ m/seg, } v = 0.49 \text{ y } \rho = 0.121 \text{ ton-s}^2/\text{m}^4.$$

Aplicando la ec 5.27 se obtuvieron las rigideces consignadas en la tabla 5.4, para los tubos con diámetros de 76.2 y 152.4 y 228.6 cm (30, 60 y 90 pulg, respectivamente). Estas rigideces corresponderían al caso en que la zanja se rellenara con el mismo suelo que la rodea, o con otro con un grado de compactación que diera rigideces equivalentes.

Finalmente, para el caso de rellenar la zanja con algún material granular compacto, se utilizaron las rigideces anotadas en la quinta columna de la tabla 5.4, que corresponden a

$$v_s = 620 \text{ m/seg, } v = 0.4 \text{ y } \rho = 0.2 \text{ ton-s}^2/\text{m}^4.$$

### 5.2.2 Rigideces del tubo

El cálculo de la rigidez de los tubos se realizó mediante el método de la ref 23, para tubos de concreto presforzado con un cilindro de acero embebido, en el cual se involucran los siguientes parámetros (ver fig 5.4):

- $t_y$     espesor del cilindro de acero
- $t_c$     espesor total del tubo sin considerar el recubrimiento protector
- $t_{yr}$     distancia radial, desde el interior del alma de concreto al centroide del cilindro de acero
- $D'$     diámetro interior del tubo;  $R = D'/2$
- $t_w$     espesor total del tubo considerando el recubrimiento protector
- $n_r$     relación del módulo de elasticidad del acero entre el del concreto
- $E_{cr}$     módulo efectivo de elasticidad
- $L$     longitud del tubo

Las expresiones que se obtuvieron para determinar la rigidez del tubo,  $K_T$ , correspondientes a las cotas inferior (agrietamiento total) y superior (agrietamiento nulo), son:

Agrietamiento total

$$K_T = \frac{E}{L} \left[ t_c (t_c + 2R) + 2t_y (n_r - 1) (R + t_{yr}) \right] \quad (5.28)$$

$$K_T = \frac{E_{CR}}{L} \pi \{ t_w (t_w + 2R) + 2t_y (n_r - 1) (R + t_{yr}) \} \quad (5.29)$$

Para fines de cálculo, en este trabajo se consideró conservadoramente que el recubrimiento se agrieta totalmente. Las rigideces obtenidas para los tubos de 76.2, 152.4 y 228.6 cm de diámetro interior, se presentan en la tabla 5.4.

### 5.2.3 Fuerzas de fricción en las juntas

Para aplicar el método de juntas friccionantes, la determinación de la fuerza de fricción entre empaque y tubo ( $F_f = \mu p$ ) se hizo utilizando los datos de la ref 23:

$\mu$  = coeficiente de fricción entre el empaque de hule y el anillo de acero = 0.70

$w$  = ancho del empaque comprimido = 1.91 cm

$p_e$  = presión efectiva de contacto del hule = 15.12 kg/cm<sup>2</sup> (215 lb/pulg<sup>2</sup>), para una presión interna de 10.55 kg/cm<sup>2</sup> (150 lb/pulg<sup>2</sup>)

El producto  $w p_e$  da una fuerza por unidad de longitud; para obtener  $p$  deberá multiplicarse ésta por el perímetro del empaque de la junta, el cual se calcula usando un diámetro igual al exterior del cilindro de acero más dos veces el espesor del empaque comprimido, el cual se ha considerado aproximadamente igual a 0.95 cm. De esta manera se obtienen los valores anotados en la tabla 5.4.

#### 5.2.4 Rigideces de las juntas

Para aplicar el método cuasiestático se deben conocer las rigideces de las juntas; éstas se calcularon de dos maneras: una, basada en la ref 24, consiste en dividir la fuerza de fricción que se utiliza en el método de juntas friccionantes, entre un desplazamiento permisible de máxima extensión que impide que la junta deje de ser hermética; los valores que se obtuvieron son 5,715 y 4464 kg/cm para los tubos con diámetros de 76.2 y 152.4 cm, respectivamente (tabla 5.4). Este criterio es muy debatible por utilizar el desplazamiento disponible y no el que sufre el empaque.

La otra manera de calcular la rigidez de la junta es mediante el cociente de la fuerza cortante máxima que obra sobre el hule, entre la deformación que ésta le produce. En tal caso dicha rigidez,  $K_J$ , resulta ser

$$K_J = \pi D G b / t \quad (5.30)$$

donde

- D    diámetro exterior del tubo
- G    módulo de rigidez al cortante del empaque de hule
- t    espesor del empaque ya colocado
- b =  $\frac{\pi}{4t}(t_o^2 - t^2)$  ancho del empaque ya colocado
- t<sub>o</sub>   diámetro del empaque antes de ser colocado



Considerando que  $t = 1$  cm (0.375 pulg),  $G = 16.6$  kg/cm<sup>2</sup> (ref 25) y  $t_o = 2.16$  cm (0.85 pulg), con la cc 5.30 se obtuvieron rigideces de las juntas iguales a 12,606, 24,449 y 35,946 kg/cm, para los tubos de 76.2, 152.4 y 228.6 cm de diámetro interior, respectivamente (tabla 5.4).

La rigidez adicional de 16,000 kg/cm para la tubería de 228.6 cm de diámetro, se utilizó con el fin de analizar la sensibilidad de los resultados a una reducción considerable del valor de ésta.

#### 5.2.5 Efecto de la rigidez del relleno de la zanja

Con el fin de analizar la influencia del suelo de relleno de la zanja sobre la respuesta sísmica de las tuberías, se consideraron las rigideces antes calculadas para cuatro tipos de suelo.

En la tabla 5.5 se presentan los máximos absolutos de los diversos resultados obtenidos usando el método cuasiestático con el registro de Sosa Texcoco, N00E (suelo blando), tramos de 488 cm de largo y velocidad de propagación de 35 m/seg.

Al comparar entre sí los desplazamientos relativos en las juntas, correspondientes a los diversos diámetros y un mismo tipo de suelo, se nota que éstos varían relativamente poco y sin exhibir alguna tendencia general, lo cual permite concluir que para fines prácticos dichos desplazamientos son independientes de la rigidez del suelo de relleno, en el rango

de rigideces estudiado.

Por su parte, al comparar los desplazamientos relativos entre el tubo y el suelo, se nota que para un mismo diámetro éstos tienden a decrecer conforme aumenta la rigidez del suelo,  $K_s$ . Esto trae por consiguiente que crezcan las deformaciones unitarias que sufre la tubería, lo cual se constata al comparar entre sí los valores anotados en la última columna de la tabla 5.5 y observar la fig 5.5. En esta figura se nota también que para un mismo suelo las deformaciones unitarias decrecen conforme aumenta el diámetro de la tubería, en proporción inversa a la relación de diámetros (el mayor entre el menor), aproximadamente.

A las mismas conclusiones de los dos párrafos anteriores se llegó al aplicar el método cuasiestático al registro del Hospital ABC, NOOE, de suelo duro y velocidad de propagación de 410 m/seg (ver fig 5.6).

Por otro lado, al utilizar el método de juntas friccionantes con el mismo sismo de Sosa Texcoco, se obtuvieron desplazamientos relativos en las juntas y entre tubo y suelo que tendieron a decrecer al aumentar la rigidez de este último; el grado de disminución fue menor conforme aumentó el diámetro. Por su parte, las deformaciones unitarias crecieron al aumentar la rigidez del suelo, como se nota en la tabla 5.6 y en la fig. 5.7.

Por tanto, se concluye que con el método de juntas friccionantes se confirma la inconveniencia de tener alta compacidad del relleno de la zanja de la tubería.

Con el registro captado en suelo duro (Hospital ABC), en el intervalo estudiado de rigideces del suelo, se tuvieron cambios muy pequeños (centésimas de milímetro) en el desplazamiento, y cambios relativamente grandes en la deformación unitaria (fig 5.6).

Asimismo, con el método de juntas friccionantes se verifica también, para suelos blando y duro, que las deformaciones unitarias decrecen de manera inversamente proporcional a la relación de diámetros. En consecuencia; con ambos métodos se concluye que si se conoce la deformación,  $\epsilon_0$ , para un diámetro dado,  $D_0$ , la que corresponde a otro diámetro,  $D_1$ , será

$$\epsilon_1 = \epsilon_0 / (D_1 / D_0) \quad (5.31)$$

Los resultados obtenidos con los demás sismos procesados, aunque no se presentan en este informe, dieron pauta a conclusiones semejantes a las anteriores.

#### 5.2.6 Efecto del comportamiento elastoplástico del relleno de la zanja

Con el fin de verificar si el comportamiento inelástico del suelo de relleno de la zanja en que se aloja la tubería es benéfico, se procesaron diversos casos empleando el método

cuasiestático, al registro de Sosa Texcoco N00E y una velocidad de propagación de 35 m/seg. El desplazamiento de plastificación del suelo se tomó de 0.6 cm.

En la tabla 5.7 se presentan los resultados. Se nota, para cada diámetro, que al haber plastificación los desplazamientos relativos en las juntas decrecieron para las dos rigideces del suelo más pequeñas y creció para la más grande. Por su parte, las deformaciones unitarias en la tubería decrecieron en todos los casos, siendo esto más pronunciado para los suelos de mayor rigidez, lográndose valores del 40 por ciento de los elásticos.

Las reducciones antes señaladas, sin embargo, no resultaron tan importantes al incrementar la rigidez de la tubería a un poco menos del doble; éstas fueron tan solo del 14 por ciento como máximo.

Por lo anterior, se concluye que si bien es cierto que el comportamiento elastoplástico resulta benéfico, también lo es que si se quiere tomar en cuenta, será necesario contar de antemano con las características geométricas y mecánicas del tubo y del suelo, y aplicar con ellas el método cuasiestático. El no hacerlo, entonces, resultará conservador.

#### 5.2.7 Efecto de la rigidez de las juntas

Con el fin de analizar el efecto de la rigidez de las juntas, se calculó la respuesta de la tubería ante el sismo registrado

en Texcoco, componente N00E (suelo blando), empleando el método cuasiestático y las rigideces anotadas en la tabla 5.4. Los desplazamientos relativos máximos en las juntas y la deformación unitaria máxima de los tubos se presentan en la tabla 5.8.

Al comparar los dos resultados anotados para cada diámetro se nota que al crecer la rigidez de las juntas, el desplazamiento relativo decrece y la deformación unitaria aumenta, pero las diferencias son pequeñas. Se concluye, por tanto, que un cambio en la rigidez en cuestión, semejante a los aquí considerados, no afecta la respuesta sísmica de la tubería de manera importante.

Se estima que lo anterior se debe a que los tubos de concreto aquí analizados tienen rigideces que son tres órdenes de magnitud mayores que las de las juntas, por lo que sería riesgoso generalizar esta conclusión a casos en los que la rigidez del tubo no sea muy superior a la de la junta.

#### 5.2.8 Efecto de la fricción en las juntas

Con el fin de analizar el efecto de la magnitud de la fuerza de fricción que se presenta en las juntas de los tubos, se aplicó el método de juntas friccionantes utilizando los valores de ésta calculados anteriormente y otros tres veces más grandes, los registros Sosa Texcoco N00E (suelo blando) y Ciudad Universitaria N00E (suelo duro), un solo tipo de suelo

de relleno y velocidad aparente de propagación de 35 m/seg para el suelo blando, y 410 m/seg para el duro. Los resultados se muestran en la tabla 5.9.

Al comparar los resultados que se obtuvieron para cada diámetro con cada par de fuerzas friccionantes, en el caso de suelo blando se concluye que los desplazamientos relativos y las deformaciones unitarias casi no variaron.

En el caso de suelo duro, se observa que al triplicarse la fuerza de fricción los desplazamientos relativos disminuyeron en un 29, 12 y 7 por ciento para los diámetros de 76.2, 152.4 y 228.6 cm, respectivamente, en tanto que las correspondientes deformaciones unitarias aumentaron en 76, 72 y 72 por ciento.

Por lo anterior se concluye, para los tubos aquí analizados y el intervalo de fuerzas de fricción empleado, que en suelo blando el desplazamiento relativo máximo entre juntas es independiente de la fuerza de fricción, en tanto que en suelo duro decrece conforme ésta aumenta, siendo esto más pronunciado para los tubos de menor diámetro.

En lo referente a las deformaciones unitarias, se concluye que en suelo blando también se tiene independencia entre éstas y la fricción en las juntas, no así en terreno firme donde las deformaciones crecen al incrementarse la fuerza de fricción, teniendo casi el mismo crecimiento en los diferentes diámetros

del tubo; el promedio del aumento fue de 73 por ciento.

### 5.2.9 Efecto de la rigidez de los tubos

Para analizar el efecto de la rigidez de los tubos en la respuesta sísmica de la tubería, se tomaron arbitrariamente valores adicionales de ésta iguales a 5/9 de los anotados en la tabla 5.4, manteniendo fija la longitud de los tramos.

Los resultados que se obtuvieron utilizando el registro de Sosa Texcoco, N00E, tramos de 488 cm de largo y velocidad de propagación de 35 m/seg, se presentan en las tablas 5.10a, para el método cuasiestático, y 5.10b, para el de juntas friccionantes; en ellas  $d_1$  y  $\epsilon_1$  son, respectivamente, el desplazamiento relativo entre juntas y la deformación unitaria del tubo correspondientes a la rigidez  $K_{T1}$ , en tanto que  $d_2$  y  $\epsilon_2$  significan lo mismo pero corresponden a la rigidez  $K_{T2}$  ( $K_{T1} > K_{T2}$ ).

Al observar cada tabla se nota que los desplazamientos entre juntas asociadas a ambas rigideces del tubo resultaron casi iguales ( $d_1/d_2$  es próximo a uno), excepto en los casos de mayor rigidez del suelo asociada a cada diámetro.

Por su parte, las relaciones  $\epsilon_1/\epsilon_2$  de deformaciones unitarias obtenidas con el método cuasiestático resultaron ser casi inversamente proporcionales a la relación de rigideces (0.56) e independientes de la rigidez del suelo, es decir

$$\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \doteq \frac{1}{\frac{K_{T1}}{K_{T2}}} = \frac{K_{T2}}{K_{T1}} \quad (5.32)$$

Por su parte, con el método de juntas friccionantes la relación de deformaciones unitarias,  $c_1/c_2$ , crece ligeramente al aumentar la rigidez del suelo, con valores iguales a  $K_{T2}/K_{T1} = 0.56$  cuando se tienen rigideces muy pequeñas de éste. Sin embargo, para fines prácticos se puede considerar que esta variación no es importante y tomar como válida también a la ec 5.32.

#### 5.2.10 Efecto de la longitud de los tramos

Para estudiar el efecto de la longitud de los tramos de la tubería en la respuesta sísmica de ésta, se tomaron valores de 244, 488 y 732 cm, manteniendo la misma sección transversal, y se aplicó el método de juntas friccionantes. Para suelo blando se emplearon registros de Sosa Texcoco y Atizapán S6-tano, N00E, y velocidad aparente de propagación de 35 m/seg; se tomaron los rellenos tipo 2 y 4.

En la fig 5.8a se muestran los resultados. En el eje horizontal se tiene la relación  $488/L_2$  ( $L_2$  en cm), y en el vertical a  $d_{488}/d_{L_2}$  y a  $c_{488}/c_{L_2}$ , donde los índices de d y c se refieren a la longitud de los tramos.

En la fig 5.8a se observa que para el relleno tipo 2 los resultados correspondientes a cada diámetro son casi iguales y para el tipo 4 se tienen diferencias en las deformaciones unitarias hasta del 24 por ciento para los diámetros de 90 y 30 pulg. Sin embargo, por simplicidad, para definir las



tendencias se trazaron conservadoramente las envolventes inferiores de los desplazamientos relativos y las deformaciones unitarias.

La envolvente de los desplazamientos queda así definida por las ecuaciones

$$d_{488}/d_{L_2} = 0.81(488/L_2) + 0.19, \text{ si } 0.67 \leq \frac{488}{L_2} \leq 1$$

y

$$d_{488}/d_{L_2} = 0.40(488/L_2) + 0.60, \text{ si } 1 \leq \frac{488}{L_2} \leq 2$$

Por tanto, si se conoce  $d_{488}$ ,  $d_{L_2}$  se calcula despejándola de la ecuación correspondiente, quedando así

$$d_{L_2} = d_{488}/\{0.40(488/L_2) + 0.60\}, \text{ si } 1 \leq 488/L_2 \leq 2$$

Las ecuaciones para la envolvente de las deformaciones son

$$\epsilon_{488}/\epsilon_{L_2} = 1.50(488/L_2) - 0.50, \text{ si } 0.67 \leq 488/L_2 \leq 1$$

$$\epsilon_{488}/\epsilon_{L_2} = 1.84(488/L_2) - 0.84, \text{ si } 1 < 488/L_2 < 2$$

de las cuales

$$\epsilon_{L_2} = \epsilon_{488}/\{1.50(488/L_2) - 0.50\}, \text{ si } 0.67 \leq 488/L_2 \leq 1 \quad (5.33a)$$

$$\epsilon_{L_2} = \epsilon_{488}/\{1.84(488/L_2) - 0.84\}, \text{ si } 1 < 488/L_2 < 2 \quad (5.33b)$$

Para analizar la influencia de la longitud de los tramos en tuberías enterradas en terreno duro, se empleó el procedimiento anterior con los registros del Hospital ABC y Ciudad Universitaria, N00E, y velocidad aparente de propagación del sísmo de 410 m/seg. En la fig 5.8b se presentan los resultados.

Al analizar la fig 5.8b se nota que los desplazamientos relativos correspondientes al relleno tipo 2 son iguales entre sí, y varían según una recta a 45°, y los del relleno tipo 4 difieren en 20 por ciento como máximo; también se notan diferencias de un relleno al otro. Sin embargo, en aras de la simplicidad si se toma una sola envolvente, ahí trazada, se tendrá una relación conservadora independiente del diámetro y del tipo de relleno. Las ecuaciones correspondientes son

$$d_{488}/d_{L_2} = 488/L_2, \text{ si } 0.67 \leq 488/L_2 \leq 1$$

$$d_{488}/d_{L_2} = 0.48(488/L_2) + 0.52, \text{ si } 1 \leq 488/L_2 \leq 2$$

En lo referente a las deformaciones unitarias, en la fig 5.8b se nota que éstas dependen marcadamente del suelo de relleno. Asimismo, se constata que para el relleno tipo 2 no se presenta variación con el diámetro, en tanto que para el tipo 4 sí, con diferencias hasta de 25 por ciento. Para este último caso, la relación entre  $\epsilon_{488}/\epsilon_{L_2}$  y  $488/L_2$  es, conservadoramente,

la envolvente inferior definida por las rectas

$$\epsilon_{488}/\epsilon_{L_2} = 1.26(488/L_2) - 0.26, \text{ si } 0.67 \leq 488/L_2 \leq 1 \quad (5.34a)$$

$$\epsilon_{488}/\epsilon_{L_2} = 0.48(488/L_2) + 0.52, \text{ si } 1 \leq 488/L_2 \leq 2 \quad (5.34b)$$

Por su parte, para el relleno tipo 2 resulta

$$\epsilon_{488}/\epsilon_{L_2} = 0.3(488/L_2) + 0.7, \text{ si } 0.67 \leq 488/L_2 \leq 1 \quad (5.35a)$$

$$\epsilon_{488}/\epsilon_{L_2} = 0.07(488/L_2) + 0.93, \text{ si } 1 < 488/L_2 \leq 2 \quad (5.35b)$$

Debido a que la relación de deformaciones depende del tipo de relleno de la zanja, para fines prácticos y considerando que en suelo duro las deformaciones unitarias no son grandes, si no se requiere mayor refinamiento, se propone conservadamente que para diseño se utilice la ec 5.34a si  $L > 488$  cm, y que  $\epsilon_{488}/\epsilon_{L_2} = 1$  si  $L \leq 488$  cm, indistintamente del tipo de relleno.

#### 5.2.11 Efecto de la velocidad de propagación del sismo

Con el fin de analizar el efecto de la velocidad aparente de propagación del sismo,  $v_s$ , en la magnitud de los desplazamientos relativos en las juntas, en el eje vertical de la fig 5.9 se presentan los correspondientes a 35 m/seg,  $d_{35}$ , divididos

entre los asociados a 170 y a 410 m/seg,  $d_{v_s}$ ; en el eje horizontal se tiene la relación de velocidades  $v_s/35$ .

Los puntos anotados en la fig 5.9a corresponden al procesamiento de ocho registros sísmicos de suelo blando con el método de juntas friccionantes y tubería de 152.4 cm de diámetro. Los registros fueron: dos de Sosa Texcoco, dos del lago Texcoco, dos de Lotería Nacional, uno de Alberca Olímpica y otro del sótano del edificio Atizapán, todos ellos del sismo del 14 de marzo de 1979; éstos fueron escalados a una aceleración máxima de  $139 \text{ cm/seg}^2$ , que corresponde a un periodo de recurrencia de 100 años.

Se decidió usar como término de escalamiento a dicha aceleración, y no a la velocidad máxima del terreno, porque los promedios de los factores correspondiente a los registros aquí procesados resultaron parecidos con ambos criterios (2.45 contra 2.53) y por ser la aceleración el parámetro más accesible de los dos. Sin embargo, para suelo duro esto no sucedió, por lo que se empleó a la velocidad máxima del terreno como término de escalamiento.

En la fig 5.9a se ha trazado aproximadamente la recta que relaciona a  $d_{35}/d_{v_s}$  con  $v_s/35$ , notándose que se aproxima bastante a una con inclinación de  $45^\circ$ . Esto permite concluir que los desplazamientos relativos varían casi de manera inversamente proporcional a la  $v_s$  correspondiente, es decir

$$d_{v_s} = \frac{35}{v_s} d_{35} \quad (5.36)$$

Conviene hacer notar también que los resultados de los ocho registros son bastante parecidos y presentan poca dispersión.

Aunque en este trabajo no se presentan los respectivos resultados, con el método cuasiestático se llega a esta misma conclusión.

Un análisis semejante a éste se hizo con los resultados de dos registros captados en suelo duro: Hospital ABC N00E y Ciudad Universitaria N00E, escalados a una velocidad máxima del terreno de 24 cm/seg, habiéndose llegado a la misma conclusión que para suelo blando, en el caso del método cuasiestático. Por su parte con el método de juntas friccionantes (fig 5.10) la relación de desplazamientos relativos depende del diámetro de la tubería, decreciendo al aumentar éste; se aprecia también que los resultados de ambos sismos son distintos.

En lo referente a las deformaciones unitarias, en el eje vertical de la fig 5.9b se tiene la relación de la deformación correspondiente a una velocidad de propagación de 35 m/seg,  $c_{35}$ , entre la asociada a 170 y 410 m/seg,  $c_{v_s}$ , obtenidas con los dos métodos empleando los registros de suelo blando antes mencionados.

En dicha figura se nota que para el método cuasiestático se tiene una tendencia recta con pendiente próxima a 45° y poca dispersión. Para el de juntas friccionantes se obtuvo una

línea quebrada para cada uno de los cuatro tipos de suelo de relleno estudiados, con poca dispersión de los resultados de cada uno. Con el fin de generalizar los resultados para fines de diseño, mediante interpolaciones lineales se obtuvieron puntos para otros suelos, clasificados mediante las velocidades de propagación de las ondas de cortante en ellas ( $v_{sR}$ ); se aprecia que conforme disminuye  $v_{sR}$  la poligonal correspondiente se aproxima a la unidad.

Para suelo duro la relación de deformaciones unitarias obtenidas con el método cuasiestático resultó ser recta con una pendiente de  $45^\circ$ . Para el método de juntas friccionantes se trazaron en la fig 5.10 gráficas semejantes a las de la fig 5.9.b; se aprecia que para  $v_{sR} < 170$  m/seg la relación  $c_{410}/c_{v_s}$  es próxima a la unidad y que se obtuvo una diferencia del 15 por ciento en los resultados con los registros de Cd. Universitaria y Hospital ABC; sin embargo, para fines de diseño resultan conservadores los resultados de este último.

#### 5.2.12 Efecto del cambio brusco del tipo de terreno

Existe evidencia teórica de que si la tubería atraviesa una interfase vertical de un tipo de terreno a otro, se produce en ella un efecto de amplificación de la respuesta sísmica (ref 16). Considerando que el temblor está formado exclusivamente por ondas de cortante, se obtuvieron factores de amplificación de 1.5 cuando el sismo pasaba de suelo duro a blando, y de 2.5 cuando pasaba de blando a duro, tomando como referencia al esfuerzo que se producía en el segmento de tubo situado en el

lado de terreno blando.

Para verificar lo anterior, en este trabajo se calculó la respuesta de una tubería compuesta por 50 tramos, la cual era excitada por un sismo en sus primeros 25 tramos (122 m), y por otro sismo, en los restantes, con el fin de simular, aunque sea burdamente, un cambio hipotético del tipo de suelo.

Para el cálculo antes citado se emplearon los métodos cuasies-tático y de juntas friccionantes; en la tabla 5.11 se presentan los factores de amplificación que se obtuvieron, correspondientes a diversas combinaciones de acelerogramas y velocidades de propagación.

En la tabla 5.11 se nota que en los últimos cuatro casos se usa el mismo sismo pero se cambia la velocidad de propagación de un medio al otro; en ellos el factor de amplificación fue 1.0 con los dos métodos. En los demás casos las amplificaciones alcanzaron valores hasta de 3.01. El promedio global fue 1.7.

Debido a que con los tres procedimientos de cálculo se cuantificaron amplificaciones hasta de 2.5 a 3.0, resulta recomendable que las holguras que se dejen en las juntas de los tubos cercanos a la interfase sean mayores que en el resto de la tubería. Así por ejemplo, si dichas holguras fueran 1.5 veces las normales, se requerirían al menos seis holguras de esas en los tubos consecutivos situados a cada lado de la interfase.

### 5.2.13 Resultados de los métodos cuasiestático y de juntas friccionantes

Con el fin de comparar los resultados de los métodos cuasiestáticos y de juntas friccionantes, con ambos se calculó la respuesta sísmica de las tuberías utilizando los ocho registros obtenidos en suelo blando y dos en duro enumerados en la sec 5.2.11.

En la tabla 5.12 se presentan los desplazamientos relativos en las juntas y las deformaciones unitarias obtenidas con el registro de Sosa Texcoco N00E, para tubos de 488 cm de largo, velocidad aparente de propagación de 35 m/seg, tres diámetros y cuatro rigideces del suelo. Las observaciones que se hacen en los dos párrafos siguientes son adicionales a las señaladas en las demás secciones.

Al comparar los desplazamientos relativos en las juntas, se nota que los calculados con el método cuasiestático son ligeramente más pequeños cuando la rigidez del suelo asociada a cada diámetro es la menor; esta relación se invirtió para los demás casos, apreciándose que la diferencia decreció al aumentar el diámetro del tubo.

Por su parte, las deformaciones unitarias del cuasiestático resultan mucho menores, teniendo diferencias mayores al aumentar la rigidez del suelo; esto se deduce también al comparar la fig 5.5 con la 5.7.



A las conclusiones de los dos párrafos anteriores se llega también con los resultados presentados en la tabla 5.13, correspondientes a los ocho registros sísmicos y tres velocidades de propagación, pero sólo un diámetro (152.4 cm) y una rigidez del suelo (6000 kg/cm/cm). Dichos registros se escalaron para tener una aceleración máxima del terreno con periodo de recurrencia de 100 años.

#### 5.2.14 Resultados de los cuatro métodos

En la tabla 5.13 se presentan los desplazamientos relativos escalados que se obtuvieron con los cuatro métodos descritos en este trabajo, empleando diversos registros de temblores y velocidades aparentes de propagación del sismo.

Como puede observarse en dicha tabla, los desplazamientos relativos obtenidos con el método simplificado,  $d$ , tienen valores ligeramente mayores que los del cuasiestático,  $d_1$ , y del de juntas friccionantes,  $d_0$ , no así el directo que da valores mucho más pequeños.

Por otra parte, en las figs 5.11a y 5.11b se tiene la razón de desplazamientos  $d_0/d$ , contra  $(LK_s/4)/K_T$  para suelos blando y duro, respectivamente, correspondientes a los tres diámetros que se han usado en este trabajo. Se observa en ambas figuras que existe tendencia a decrecer  $d_0/d$  al crecer  $(LK_s/4)/K_T$ .

En la fig 5.11a, al observar los puntos correspondientes al

sismo de Sosa Texcoco N00E y  $v_g = 35$  m/seg, se nota que  $d_o/d$  depende tanto del diámetro del tubo como del tipo de suelo de relleno. Sin embargo, como las diferencias para cada diámetro no son grandes y no se tiene gran dispersión con los resultados de otros sismos, y tipos de relleno, u otros valores de  $v_g$  y  $K_T$ , para fines de diseño se propone, por simplicidad, considerar sólo la envolvente. En tal caso:

$$d_o/d = -0.31 \left( \frac{LK_S/4}{K_T} \right) + 1.0 \quad \text{si} \quad \frac{LK_S/4}{K_T} \leq 1.1 \quad (5.37)$$

$$d_o/d = -0.19 \left( \frac{LK_S/4}{K_T} \right) + 0.87 \quad \text{si} \quad 1.1 < \frac{LK_S/4}{K_T} \leq 2.5 \quad (5.38)$$

Por su parte, en la fig 5.11b, al observar los puntos correspondientes al sismo del Hospital ABC y  $v_g = 410$  m/seg, se nota que  $d_o/d$  depende del diámetro de la tubería pero no del tipo de relleno según segmentos de rectas paralelas que decrecen al aumentar el valor de la abscisa. También se aprecia que  $d_o/d$  varía de manera inversa con  $v_g$ , al comparar los trazos correspondientes a 410 y 755 m/seg. Algo semejante se concluye al observar los puntos asociados al sismo de Ciudad Universitaria, teniendo éstos, a su vez, ordenadas mayores que las del Hospital ABC. Sin embargo, debido a que en terreno duro los desplazamientos relativos son bastante pequeños, para fines de diseño, si se desea, puede omitirse el considerar estas relaciones y tomar conservadoramente  $d_o/d = 1$ , o la envolvente global.

Como resultado práctico de lo expuesto, se puede señalar que para tuberías como las aquí analizadas la holgura que se debe

dejar en las juntas,  $d_o$ , se puede calcular en términos del desplazamiento relativo del método simplificado, y luego modificarla para tomar en cuenta la relación  $(LK_s/4)/K_T$ , despejándola de la ecuación correspondiente. En tal caso se toman  $\tilde{V}_{m\acute{a}x}$  y  $\tilde{\Lambda}_{m\acute{a}x}$  como los valores máximos en dirección horizontal del sismo, incidiendo éste con ángulo  $\alpha = 45^\circ$ , en cuyo caso la velocidad aparente de propagación será  $v_s = v'_s/0.7$ , siendo  $v'_s$  la velocidad de propagación real de las ondas de cortante, determinada por prospección sísmica.

Por su parte, las deformaciones unitarias para diseño se pueden obtener aprovechando los resultados del método de juntas friccionantes, por ser más conservadoras que las del cuasies-tático y, sobre todo, por considerar que con él se modela mejor el efecto de las juntas lock-joint.

Como paso previo a la definición de las curvas de diseño, se aplicó el método de juntas friccionantes utilizando los sismos anotados en la tabla 5.13, con  $v_s = 35$  m/seg,  $D' = 152.4$  cm,  $L = 488$  cm y relleno tipo 3, cada uno de ellos normalizado para que tuviera una aceleración máxima igual a la del registro de Sosa Texcoco, NOOE, o de Hospital ABC, NOOE, según correspondieran a suelo blando o duro, respectivamente; esto se hizo con el fin de estimar el coeficiente de variación, que en suelo blando resultó de 11 por ciento. Debido al bajo valor de éste, se decidió trazar una envolvente a la cual correspondió una probabilidad de excedencia de 5 por ciento, suponiendo distribución gaussiana. Para suelo duro el caso más desfavorable fue el del Hospital ABC, por lo que éste se tomó como base.

Las envolventes antes mencionadas se escalaron para que correspondieran a sismos que ocurrieran, en promedio, cada 100 años.

Por lo indicado en la sec 5.2.11, para escalar los registros se tomó como base a la aceleración máxima del terreno, para suelo blando, y a la velocidad máxima, para duro. Aun cuando hay un efecto no lineal debido a la fricción en las juntas, se verificó con los mismos sismos de la tabla 5.13, debidamente escalados, que éste no es importante para efectos del escalamiento, conceptualmente esto se justifica por el hecho de que las fuerzas ocasionadas por la deformación del tubo y suelo son mucho mayores que la de fricción.

En las figs 5.6 y 5.7 se muestran las curvas de diseño correspondientes a un periodo de recurrencia de 100 años, tubo de 152.4 cm de diámetro interior y longitud de los tramos de 488 cm.

Las ecuaciones respectivas son, para suelo blando:

$$c = 24.25 \times 10^{-5} K_S^{0.62}, \text{ si } K_S \leq 0.81 \text{ ton/cm/cm} \quad (5.39)$$

$$c = 25.76 \times 10^{-5} K_S^{0.91}, \text{ si } K_S > 0.81 \text{ ton/cm/cm} \quad (5.40)$$

y, para suelo duro:

$$c = 8.46 \times 10^{-5} K_S^{0.21}, \text{ si } K_S \leq 6.0 \text{ ton/cm/cm} \quad (5.41)$$

$$c = 5.84 \times 10^{-5} K_S^{0.42}, \text{ si } K_S > 6.0 \text{ ton/cm/cm} \quad (5.42)$$

### 5.2.15 Efectos del tipo de apoyo

Los análisis anteriores se hicieron para tuberías en las que el tipo de apoyo de los tubos extremos (o algún otro) es de junta friccionante; para los casos en que están empotrados, lo cual puede suceder al incidir el tubo en alguna planta de bombeo o en algún atraque, los resultados son diferentes.

El efecto de dicho empotramiento se estudió mediante las gráficas que se muestran en las figs 5.12, 5.13 y 5.14, en cuyas ordenadas aparece la relación de desplazamientos relativos,  $d_e$ , o deformaciones,  $\epsilon_e$ , de los tubos extremos con empotramiento, entre los desplazamientos,  $d_i$ , o deformaciones,  $\epsilon_i$ , de los tubos intermedios; en las abscisas se encuentra la relación  $\rho = (LK_E/4)/K_T$ . Las conclusiones se comentan en los párrafos siguientes.

En la fig 5.12 se muestra la relación  $d_e/d_i$ , utilizando algunos resultados obtenidos con los registros de terreno blando y duro y con los diferentes parámetros de la tubería y suelo de relleno, notándose que  $d_e/d_i$  varía en forma exponencial con ordenada en el origen de 1.5. Por tanto, una vez que se conozca el valor del desplazamiento  $d_i$ , se puede determinar a  $d_e$  mediante la ecuación

$$d_e = (0.9 + 0.6e^{-2\rho})d_i \quad (5.43)$$

A diferencia de lo sucedido en los desplazamientos, la relación de deformaciones unitarias se comportó de manera

diferente para cada tipo de terreno, por lo que se trazó una gráfica para cada uno.

En lo que respecta a suelo blando, en la fig 5.13 puede verse que con valores de la relación de rigideces,  $\rho$ , mayores que 0.1 la relación  $c_e/c_i$  decrece de manera muy similar en los casos en que se mantienen constantes la longitud y el tipo de relleno con diámetro variable, la longitud y el diámetro con tipo de relleno variable, o el diámetro y el tipo de relleno con longitud variable. Para relaciones de rigideces menores que 0.1 la variación que presenta  $c_e/c_i$  al disminuir el diámetro es también decreciente, pero de manera más pronunciada que antes; y en el caso de tener las mismas condiciones de diámetro y longitud, o de diámetro y tipo de relleno,  $c_e/c_i$  crece rápidamente con pequeños incrementos de  $\rho$ . Con respecto al cambio de los otros parámetros, tales como la sección transversal del tubo, fuerza de fricción en las juntas, o el uso de diferentes registros de temblores, no se percibe una dispersión considerable en el valor de  $c_e/c_i$ ; por su parte, cuando se varía la velocidad de propagación del sismo se presenta una dispersión que tiende a disminuir al crecer  $\rho$  (por ejemplo, el rango pasa de  $3.1 - 2.68 = 0.42$  a  $1.93 - 1.84 = 0.09$ , al cambiar la relación de rigideces de 0.21 a 1.11).

En relación con lo ocurrido en suelo duro, en la fig 5.14 se muestra el decremento de  $c_e/c_i$  al disminuir el diámetro, siendo esta reducción más pronunciada para valores de  $\rho$  menores que 0.4. Para el caso en que se varía la longitud o el tipo

de relleno, la relación  $\epsilon_e/\epsilon_i$  se incrementa inicialmente al aumentar el valor de  $\rho$  y luego disminuye. Por otra parte, un cambio del registro utilizado, de la fuerza de fricción, o de la velocidad de propagación, produce una gran dispersión de los valores de  $\epsilon_e/\epsilon_i$ .

Sin embargo puede demostrarse, mediante las ecuaciones mencionadas en la sección 4.4.1, que la relación  $\epsilon_e/\epsilon_i$  está dada por

$$\epsilon_e/\epsilon_i = \frac{2\rho |D_1(t_j) - D_{1+1}(t_j)| + (\mu\rho/K_T) (1+0.5\rho)}{0.5\rho |D_k(t_n) - D_{k+1}(t_n)| + (\mu\rho/K_T) (1+2\rho)} \quad (5.44)$$

donde  $D_1(t_j) - D_{1+1}(t_j)$  y  $D_k(t_n) - D_{k+1}(t_n)$  son los desplazamientos relativos del suelo adyacente al tubo empotrado y al tubo intermedio, respectivamente, en los instantes  $t_j$  y  $t_n$ . Por otro lado, para ser congruentes con el hecho de que  $\epsilon_e$  y  $\epsilon_i$  son las deformaciones unitarias máximas del tubo, estos desplazamientos deben ser los máximos.

Por tanto, tomando en cuenta que

$$\{D_1(t_j) - D_{1+1}(t_j)\}_{\text{máx}} = \{D_k(t_n) - D_{k+1}(t_n)\}_{\text{máx}} = \frac{v_{\text{máx}}}{v_s} L$$

la expresión 5.44 resulta ser

$$\epsilon_e/\epsilon_i = \frac{2\rho (v_{\text{máx}}/v_s)L + (\mu\rho/K_T) (1+0.5\rho)}{0.5\rho (v_{\text{máx}}/v_s)L + (\mu\rho/K_T) (1+2\rho)} \quad (5.45)$$

## 6. CRUCE DE FALLAS ACTIVAS

Las recomendaciones que se hacen en este trabajo acerca del cruce de tuberías a través de fallas activas se basan en las consideraciones que se describen a continuación.

### 6.1 Generalidades

Las recomendaciones que se refieren al ángulo de incidencia del tubo al llegar a una falla geológica activa, a la compacidad del relleno de la cepa y al diámetro de la tubería, se basan en los estudios hechos con modelos matemáticos para tuberías continuas de acero que crucen fallas activas (refs 4 y 5). Con ellos se encontró que los esfuerzos axiales ocasionados por el deslizamiento relativo de ambas caras de la falla se reducen conforme al ángulo de incidencia se acerca a  $90^\circ$ , el ángulo de fricción interna del relleno de la zanja es menor y el diámetro del tubo se reduce.



## 6.2 Justificación de la distancia de 220 m

La distancia de 220 m que se cita en diversos puntos de las recomendaciones, se basa en las consideraciones que se hacen en los tres párrafos siguientes. Como se verá, corresponde al punto en que se considera que los esfuerzos inducidos por la deformación que ocurre en la corteza terrestre, a uno y otro lado de la falla, empiezan a ser pequeños en comparación con los que obran en el plano mismo de la falla y, por tanto, a partir de él las deformaciones producidas por la transmisión de las ondas sísmicas son más importantes.

De acuerdo con el modelo matemático que representa un estado de esfuerzos cortantes enmarcado en un círculo (ref 7, pág 51), se tiene que en un punto situado sobre una recta perpendicular a él que pase por su centro, a una distancia igual a su diámetro la magnitud del esfuerzo cortante es aproximadamente del 15 por ciento del aplicado. Este modelo se usa en sismología para idealizar el estado de esfuerzos en la zona de la falla geológica que produce un temblor, siendo el diámetro del círculo igual a la longitud de ruptura de la falla,  $L$ .

Para lo anterior, la longitud esperada de ruptura de la falla,  $L$ , para un sismo de magnitud dada,  $M$ , se puede estimar mediante una ecuación que se obtuvo con un modelo de regresión que utiliza datos de sismos reales (ref 8). Dicha expresión es

$$\bar{L} = e^{2.34(M - 5.65)} \quad (6.1)$$

la cual da  $L = 220$  m para  $M = 5$ . Esta es la cifra que se utiliza en diversas partes de las recomendaciones de este informe.

La magnitud 5 utilizada en el párrafo anterior se seleccionó por corresponder ésta a la magnitud máxima que podría esperarse (ref 6) en el sistema de fallas actualmente identificado en el Valle de México, y por no haber evidencia histórica de que en el pasado se haya originado en el citado sistema de fallas un temblor con magnitud mayor a esa (ref 13). En la fig 6.1 se presenta un mapa que muestra las fallas geológicas que hasta ahora han sido identificadas en el Distrito Federal y sus inmediaciones que fue elaborado por F. Mossor; éstas se trazaron sobre uno previo del DDF.

### 6.3 Holguras

Para definir la holgura adicional que es necesario dejar en las juntas de los tubos, se consideró que desde antes de que la falla se rompa y, con ello, se genere el temblor, a cada lado de ella se produce un estado creciente de esfuerzos cortantes que ocasiona deformaciones lentas en la corteza terrestre. Para que la tubería las soporte sin fallar, ésta debe tener la capacidad adecuada de deformación, la cual, en el caso de tuberías a base de tramos, se debe lograr mediante holguras suficientes en sus juntas.

Para calcular la amplitud de las holguras antes mencionadas,

se estimó el desplazamiento relativo máximo,  $\Delta$ , que ocurriría en el plano de la falla al ocurrir el temblor. Para esto se utilizó la expresión

$$\log \Delta = 0.38 M - 0.61 \quad (6.2)$$

que se deduce combinando diversas ecuaciones de las ref 9 y 10.

Con esta ecuación se obtiene  $\Delta = 20$  cm para  $M = 5$ . Con esto, la amplitud de las holguras se puede determinar si se idealiza a la tubería como una viga doblemente empotrada, con un empotramiento en el plano de la falla y, el otro, en un punto donde los esfuerzos cortantes sean pequeños; este último se consideró razonable a una distancia  $L = 220$  m, por lo citado en un párrafo anterior (el esfuerzo cortante ahí es del 15 por ciento del que se tiene en el plano de la falla).

De esta manera, si un empotramiento se mueve 20 cm, la deformación unitaria máxima asociada a la curvatura del tubo sería  $\epsilon = 1.24 \times 10^{-5} D$ , donde  $D$  es el diámetro de la tubería, en metros; para liberar esta deformación en un tramo de 5 m de tubo con diámetro de 229 cm (90 pulg), se requeriría una holgura de  $1.24 \times 10^{-5} \times 5 \times 229 = 0.014$  cm, que es una cantidad sumamente pequeña, mucho menor que la que se requiere para liberar las deformaciones axiales debidas a la propagación del sismo mismo.

Por otra parte, el estado de esfuerzos cortantes en el plano de la falla produce un esfuerzo en la dirección del eje del tubo que, de acuerdo con el modelo de la ref 7, en una distancia  $L = 220$  m tiene un promedio de  $0.27q$ , donde  $q$  es el esfuerzo cortante aplicado. Para cada temblor el valor de  $q$  depende de la resistencia del terreno del plano de la falla y del tamaño de la zona de ruptura. Sin embargo, se estima (ref 6) que es poco probable que la caída de esfuerzos (diferencia de los esfuerzos que se tienen en la falla antes y después del sismo) exceda de  $100 \text{ kg/cm}^2$ . (En los sismos de los días 4 y 7 de febrero, 1981, en el Distrito Federal, la caída de esfuerzos fue de  $10 \text{ kg/cm}^2$ , ref 11.) Por tanto, con  $q = 100 \text{ kg/cm}^2$  el esfuerzo axial sería  $0.27 \times 100 = 27 \text{ kg/cm}^2$ , que ocasiona una deformación unitaria del tubo, tomando un módulo de elasticidad de  $330,000 \text{ kg/cm}^2$ , igual a  $27/330,000 = 0.000082$ , por lo que se requiere una holgura de  $0.000082 \times 500 \text{ cm} = 0.041 \text{ cm}$ , que es muy pequeña.

Por lo anterior, se concluye que afuera del plano de la falla geológica, las deformaciones impuestas sobre la tubería por el proceso lento de la acumulación de esfuerzos en ella y que ocasiona finalmente un temblor de magnitud 5 en el Distrito Federal son muy pequeñas; bastaría dejar una holgura adicional de  $0.1 \text{ cm}$  ( $0.014 + 0.041 = 0.055 \approx 0.1 \text{ cm}$ ) para absorberlas.

Lo que realmente resulta grave es el desplazamiento relativo que ocurre súbitamente entre ambas caras de la falla en el

momento en que sucede el temblor, ya que dicho desplazamiento se lleva a cabo prácticamente en el plano de la misma; esto trae consigo que el tubo no tenga posibilidad de soportar la deformación, sino que tiende a romperse súbitamente junto con la falla, ante una acción semejante a la de una guillotina. Por tanto, si no se toma alguna alternativa como la señalada en el siguiente párrafo, lo único que se puede aconsejar es que se deje la holgura máxima permisible por el fabricante del tubo.

#### 6.4 Colocación del tubo dentro de otro de mayor diámetro

Con la intención de reducir el riesgo de que suceda lo señalado en el párrafo anterior, en la literatura se recomienda que el tubo se coloque dentro de otro de mayor diámetro, para que sea este último el que se deforme y rompa, en su caso, dejando libertad de movimiento del que interesa. Es por esto que aquí se propone usar un tubo protector con un diámetro interior de al menos 40 cm mayor que el diámetro exterior del tubo de interés, para dejar un margen diametral mínimo de 20 cm, que es el desplazamiento esperado en la falla.

Por todo lo señalado en este capítulo, se observa que las recomendaciones del cap 7 que de él emanan tienen bases teóricas, experimentales y de sentido común; la intención de ellas es imponer medidas razonables para reducir en lo posible el riesgo de que la tubería se rompa en la vecindad de una falla geológica al ocurrir un temblor. Sin embargo, dada la

aleatoriedad de los fenómenos sísmicos y de sus efectos, no es posible garantizar que la tubería no sufrirá daño alguno, por lo que es recomendable diseñar planes de emergencia para que, en su caso, se pueda reparar de inmediato.

## 7. RECOMENDACIONES DE DISEÑO SISMICO

En este capítulo se formulan las recomendaciones para el análisis sísmico de tuberías enterradas con juntas flexibles tipo lock-joint y continuas. Estas se basan en los resultados que se han obtenido y discutido en los capítulos anteriores.

### 7.1 Recomendaciones para el análisis sísmico de tuberías enterradas de concreto, con juntas tipo lock-joint

Para el diseño sísmico de tuberías es necesario cuantificar los efectos que los temblores futuros ocasionarán a la tubería, es decir, realizar el análisis sísmico de la misma. Para tuberías enterradas construidas a base de tramos con juntas tipo lock-joint, los efectos de interés son el máximo de los desplazamientos relativos que se presentan entre cada dos tubos adyacentes que llegan a cada junta, y la deformación

unitaria inducida al tubo.

Para que el procedimiento que se recomienda a continuación sea aplicable, se requiere que las holguras de las juntas no se rellenen con mortero o material rígido alguno; se pueden rellenar, por ejemplo, con estopa alquitranada o con pastas que no endurezcan con el tiempo; si se dejan sin rellenar, deberán cubrirse circunferencialmente con una tira de plástico para evitar que se les introduzca tierra.

#### 7.1.1 Procedimiento de análisis

1. Seleccionar el periodo de recurrencia,  $T$ , del temblor de diseño. Para acueductos se recomienda tomar 100 años o más.
2. Calcular los valores esperados de la aceleración y la velocidad máximas horizontales del terreno,  $\ddot{A}_{\text{máx}}$  (cm/seg<sup>2</sup>) y  $\dot{V}_{\text{máx}}$  (cm/seg), respectivamente, con las siguientes ecuaciones, en las que  $T$  se da en años.
  - a. Para suelo blando, si  $T \geq 2$  años:

$$\ddot{A}_{\text{máx}} = 25.4 T^{0.37}$$

$$\dot{V}_{\text{máx}} = 7.6 T^{0.37}$$

Si  $T = 100$  años, entonces  $\ddot{A}_{\text{máx}} = 139$  cm/seg<sup>2</sup> y

$$\dot{V}_{\text{máx}} = 42$$
 cm/seg.



b. Para suelo duro, si  $T \geq 2.5$  años:

$$\tilde{\lambda}_{\text{máx}} = 16.2 T^{0.37}$$

$$\tilde{V}_{\text{máx}} = 4.4 T^{0.37}$$

Si  $T = 100$  años, entonces  $\tilde{\lambda}_{\text{máx}} = 89 \text{ cm/seg}^2$  y

$$\tilde{V}_{\text{máx}} = 24 \text{ cm/seg.}$$

3. Determinar mediante prospección sísmica la velocidad de propagación de las ondas de cortante,  $v'_s$ , en el suelo de desplante de la tubería. Un valor conservador de dicha velocidad se puede obtener si mediante alguna prueba estática se determina el valor del módulo de rigidez al cortante  $G$ , con la ecuación:

$$v'_s = \sqrt{G/\rho}$$

donde  $\rho$  es la densidad específica del suelo.

Algunos valores indicativos son los siguientes:

$v'_s = 35 \text{ m/seg}$ , en suelo sumamente blando, como en el lago de Texcoco y centro de la ciudad de México

$v'_s = 170 \text{ m/seg}$ , en suelo blando, como la zona lacustre de Xochimilco

$v'_s = 410 \text{ m/seg}$ , en suelos medianamente compactos

$v'_s = 710 \text{ m/seg}$ , en suelo firme o roca fracturada

Calcular la velocidad aparente de propagación del sismo en dirección horizontal,  $v_s$  :

$$v_s = v_s' / 0.7$$

4. Determinar el módulo de deformación volumétrica,  $K_v$ , del material con que se rellenará la zanja en que se alojara la tubería. Para esto deberá producirse en el laboratorio una muestra que tenga el grado de compactación especificado para dicho material, y realizar con ella una prueba estándar de placa; esa compactación debe ser la mínima que permitan las demás cargas.
5. Calcular la rigidez por unidad de longitud de tubo,  $K_s$ , del material de relleno de la zanja, mediante la fórmula

$$K_s = \sqrt{DK_v}$$

6. Calcular el valor esperado del máximo desplazamiento relativo,  $\bar{d}_T$ , que se tendrá en las juntas, en la dirección axial:

$$\bar{d}_T = \{ \bar{v}_{\text{máx}} / v_s + (\bar{a}_{\text{máx}} / v_s^2) (D/2) \} L f_0$$

donde

- D      diámetro exterior del tubo  
 L      longitud de los tramos de tubo  
 $f_0$     factor correctivo por efecto de la relación  
 $\rho = (LK_s/4) / K_T$

$K_T$  rigidez axial de un tramo de tubería

El valor de  $f_o$  se calcula con la ecuación que corresponda, de entre las siguientes, para suelo blando:

Si  $\rho \leq 1.1$ :

$$f_o = -0.31\rho + 1.0$$

Si  $\rho > 1.1$

$$f_o = -0.19\rho + 0.87$$

Para suelo duro,  $f_o = 1$  en todos los casos; o si se desea mayor refinamiento, con la envolvente global:

$$f_o = -0.22\rho + 0.98$$

Si algún tramo de tubo tiene un extremo empotrado (sin junta flexible), en la junta de su otro extremo sufrirá un desplazamiento relativo,  $d_T^i$ , de magnitud

$$d_T^i = \{0.9 + 0.6e^{-2\rho}\} \tilde{d}_T$$

Para evitar el choque de los tubos que inciden a cada junta, se deberá dejar en ellas una holgura igual o mayor que  $\tilde{d}_T$  o  $d_T^i$ , según sea el caso. Este mismo margen deberá dejarse por la parte interior, para evitar el desplazamiento al presentar se efectos de tensión.

7. Si la tubería cruza una interfase de dos suelos de rigidez distinta, habrá que multiplicar el  $\tilde{d}_T$  correspondiente al más blando por 1.5 y usar el valor resultante en las seis

juntas adyacentes a cada lado de la interfase.

Si se tienen problemas para dejar las holguras que resulten, se pueden usar tramos más cortos en esa zona y calcular el  $\bar{d}_T$  que le corresponde.

8. Calcular el valor esperado de la deformación unitaria en dirección axial,  $\bar{\epsilon}_{60}$ , que el sismo de diseño con periodo de recurrencia de 100 años, le induciría a una tubería de 152.4 cm (60 pulg) de diámetro interior y tramos de 488 cm de largo, con las ecuaciones ( $K_S$ , corresponde a  $D = 179.4$  cm)

Para suelo blando:

$$\bar{\epsilon}_{60} = 24.25 \times 10^{-5} K_S^{0.62}, \text{ si } K_S \leq 0.81 \text{ ton/cm/cm}$$

$$\bar{\epsilon}_{60} = 25.76 \times 10^{-5} K_S^{0.91}, \text{ si } K_S > 0.81 \text{ ton/cm/cm}$$

Para suelo duro:

$$\bar{\epsilon}_{60} = 8.46 \times 10^{-5} K_S^{0.21}, \text{ si } K_S \leq 6.0 \text{ ton/cm/cm}$$

$$\bar{\epsilon}_{60} = 5.84 \times 10^{-5} K_S^{0.42}, \text{ si } K_S > 6.0 \text{ ton/cm/cm}$$

Si se utiliza un periodo de recurrencia distinto, las ecuaciones para  $\bar{\epsilon}_{60}$  se obtienen escalando las curvas de las figs 5.6 y 5.7, como se indica en la sección 5.2.14 de este informe.

9. Calcular el valor esperado de la deformación unitaria axial,

$\bar{E}$ , para la tubería de interés, con la siguiente fórmula

$$\bar{E} = \{E_{60}/(D/D_{60})\}f_1$$

donde

D diámetro exterior de la tubería de interés, en cm

$D_{60}$  diámetro exterior de la tubería de 152.4 cm  
(60 pulg) de diámetro interior, en cm

$f_1$  factor correctivo por efecto de la longitud de  
los tramos

Para suelo blando, el valor de  $f_1$  se calcula con una de  
las siguientes ecuaciones:

$$f_1 = \{1.50(488/L_2) - 0.50\}^{-1}, \text{ si } 0.667 \leq 488/L_2 \leq 1$$

$$f_1 = \{1.84(488/L_2) - 0.84\}^{-1}, \text{ si } 1 < 488/L_2 \leq 2$$

Para suelo duro,

$$f_1 = \{1.26(488/L_2) - 0.26\}^{-1}, \text{ si } 0.667 \leq 488/L_2 < 1$$

$$f_1 = 1, \text{ si } 488/L_2 > 1$$

10. Calcular la rigidez,  $K_{T2}$ , de un tramo de tubería, tomándolo de 488 cm de largo. Si ésta difiere de

$$K_{T1} = 0.163(D')^2$$

donde  $D'$  es el diámetro interior del tubo, en cm, entonces

la deformación unitaria  $\bar{\epsilon}$  se tendrá que multiplicar por el factor

$$f_2 = K_{T1}/K_{T2}$$

La ecuación anterior para  $K_{T1}$  resulta del ajuste de una parábola a los valores de las rigideces empleadas en la sec 5.2.9 (tabla 5.4).

11. Si el terreno de desplante de la tubería tiene una velocidad aparente de propagación de ondas de cortante,  $v_s$ , diferente de 35 m/seg, en el caso de suelo blando, o de 410 m/seg, en el caso de suelo duro, habrá que encontrar las relaciones  $\epsilon_{35}/\epsilon_{v_s}$  o  $\epsilon_{410}/\epsilon_{v_s}$ , las cuales están en función de las razones  $v_s/35$  o  $v_s/410$ , y de la velocidad en el suelo de relleno,  $v_{sR}$ . Dichas relaciones, se determinan mediante las figs 5.9b o 5.10 para terreno blando o duro, respectivamente; una vez que se cuenta con el valor de esta relación, bastará con dividir a  $\bar{\epsilon}$  entre dicho valor. El cálculo de  $v_{sR}$  puede hacerse en función de la rigidez  $K_s$  mediante la expresión

$$v_{sR} = 6 K_s^{0.5}$$

donde  $K_s$ , (kg/cm/cm) corresponde a  $D = 179.4$  cm.

Los anterior resulta del ajuste de una curva que proviene de graficar los valores de  $v_{\varepsilon_R}$  contra la rigidez del suelo de relleno correspondiente, mencionados en la sección 5.2.1.

Si algún tramo de tubo tiene un extremo empotrado, la deformación unitaria asociada a dicho tubo será:

$$\varepsilon' = \frac{(2\rho (v_{\text{máx}}/v_s) L + (\mu\rho/K_T)) (1 + 0.5\rho)}{(0.5\rho (v_{\text{máx}}/v_s) L + (\mu\rho/K_T)) (1 + 2\rho)} \varepsilon$$

12. Calcular el esfuerzo axial inducido en la tubería, correspondiente a la deformación unitaria antes calculada, así como el esfuerzo tangencial debido al efecto de Poisson. Para fines de diseño, éstos se adicionarán, de acuerdo con las especificaciones AWWA, a los ocasionados por las demás cargas que obren sobre la tubería, tomándolos con el signo más desfavorable (tensión o compresión).
13. Calcular la capacidad de giro,  $\tilde{\theta}$ , que se debe tener en las juntas, mediante la ecuación

$$\tilde{\theta} = L \tilde{\Lambda}_{\text{máx}} / v_s^2$$

## 7.2 Recomendaciones para el análisis sísmico de tuberías continuas

Para realizar el análisis sísmico de tuberías continuas (a base de tramos soldados o con juntas rígidas), se procede inicialmente como en los puntos 1 a 3 de las recomendaciones para tuberías con juntas flexibles (sec 7.1), y luego se hace lo siguiente:

1. Calcular la deformación,  $\tilde{\epsilon}$ , que en dirección axial inducirá en la tubería el sismo de diseño, mediante la ecuación

$$\tilde{\epsilon} = \tilde{V}_{\text{máx}}/v_s + (\tilde{A}_{\text{máx}}/v_s^2)(D/2)$$

donde:

- $\tilde{V}_{\text{máx}}$  velocidad máxima del terreno
- $\tilde{A}_{\text{máx}}$  aceleración máxima del terreno
- $v_s$  velocidad aparente de propagación de las ondas de cortante
- D diámetro exterior de la tubería

2. Calcular el esfuerzo axial en la tubería, asociado a  $\tilde{\epsilon}$ , y el tangencial correspondiente debido al efecto de Poisson. Para fines de diseño, éstos se adicionarán de acuerdo con las especificaciones AWWA a los esfuerzos ocasionados por las demás cargas que obren sobre la tubería, tomándolos con el sentido más desfavorable (tensión o compresión).
3. Si la tubería cruza una interfase vertical o inclinada de dos suelos de distinta rigidez, los esfuerzos sísmicos de diseño de la tubería, en la zona de la interfase, serán



al menos 2.5 veces los que se obtengan en el inciso anterior.

7.3 *Recomendaciones para diseño de tuberías enterradas que crucen fallas geológicas activas*

1. Si la tubería cruza una falla geológica con potencial para generar temblores, deberá procurarse que aquella forme con el plano de la falla un ángulo de  $90^\circ$ , o cercano a él.
2. El relleno de la zanja deberá ser de material fino no cohesivo y con ángulo de fricción bajo, con la mínima compactación que permitan las demás condiciones de carga, en una longitud de 220 m a cada lado de la zona de cruce.
3. Se dejará el tubo con el menor recubrimiento de tierra que permitan el proyecto geométrico y las condiciones de carga externa.
4. En las juntas de los tramos de tubería que se sitúen a menos de 220 m a cada lado de la falla, se dejarán holguras iguales a la mitad de la distancia disponible para ello, según lo señale el fabricante, con el fin de que la tubería tenga la mayor capacidad posible para absorber las deformaciones axiales de tensión o compresión y las debidas a momento flexionante, que sean ocasionadas por los desplazamientos relativos verticales o laterales entre ambas caras de la falla.

5. En adición a lo anterior, se debe considerar la conveniencia de situar el tubo concéntricamente dentro de otro con diámetro interior que sea al menos 40 cm mayor que el diámetro exterior del tubo de interés, en una longitud de 220 m a cada lado del plano de la falla, apoyándolo sobre una capa de arena poco densa (fig 7.1)
6. Con el fin de reducir la probabilidad de que se corte por completo el suministro de agua, se debe considerar la posibilidad de cruzar la falla con una bifurcación previa de la tubería, que se inicie y termine a no menos de 220 m del plano de la falla, y tal que los dos ramales queden separados al menos 220 m entre sí en los puntos de cruce de la falla (fig 7.2) y uno la cruce con ángulo de 90°.
7. Deberá colocarse una válvula de control a 220 m aguas arriba del plano de la falla. Además, si se hace la bifurcación señalada en el punto anterior, cada rama deberá contar con su respectiva válvula situada lo más cerca posible del punto de reunión con la tubería principal (fig 7.2).
8. Debido a que es conveniente permitir el movimiento libre de la tubería para que las deformaciones se repartan entre un mayor número de holguras, no se deben colocar atraques a distancias menores de 220 m del plano de la falla.

9. De ser posible, en una longitud de 220 m a cada lado del plano de falla la tubería se deberá integrar a base de tramos más cortos que en el resto de la misma; mientras más cortos, mejor.

7.4 Ejemplo de aplicación de las recomendaciones para tuberías con juntas tipo Lock-joint

A continuación se calculan los desplazamientos relativos máximos entre juntas y la deformación unitaria máxima del tubo, siguiendo el procedimiento de análisis mencionado en 7.1.1. para tuberías enterradas con juntas lock-joint.

a) Datos del tubo y empaque

$D'$	=	228.6	cm
$R$	=	114.3	cm
$D$	=	269.2	cm
$L$	=	366	cm
$t_y$	=	0.14	cm
$t_{yr}$	=	6.3	cm
$t_c$	=	16.5	cm
$E_c$	=	$0.173 \times 10^6$	kg/cm <sup>2</sup>
$E_s$	=	$2 \times 10^6$	kg/cm <sup>2</sup>
$\mu$	=	0.7	
$w$	=	1.91	cm
$P_e$	=	15.12	kg/cm <sup>2</sup>

## b) Datos de los suelos

$$v'_s = 50 \text{ m/seg}$$

$$k_v = 4 \text{ kg/cm}^2/\text{cm}$$

Cálculo de la rigidez del tubo con

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2 \times 10^6}{0.173 \times 10^6} = 11.56; \text{ se tomará } n = 11$$

aplicando la ec 5.28 se obtiene

$$K_T = \frac{173000}{366} (3.142) \{ 16.5 [16.5 + 2(114.3)] + 2(0.14)(11-1)(114.3 + 6.3) \} = 6,507,688 \text{ kg/cm}$$

Fuerza de fricción. El diámetro exterior del tubo de acero es

$$2(R + t_{yr} + \frac{t_y}{2}) = 2(114.3 + 6.3 + \frac{0.14}{2}) = 241.34 \text{ cm}$$

considerando que el espesor del empaque comprimido es de 0.95 cm y que  $W_{P_e} = 1.91(15.12) \approx 28.9 \text{ kg/cm}$ , se obtiene

$$FF = 28.9(3.142) \{ 241.34 + 2(0.95) \} \approx 22087 \text{ kg}$$

### Procedimiento de análisis

El análisis se hará siguiendo los pasos señalados en la ec 7.1.1

1. Se tomará  $T = 100$  años
2. Puesto que  $v'_s = 50 \text{ m/seg}$  se trata de suelo blando, para el cual

$$\tilde{A}_{m\acute{a}x} = 139 \text{ cm/seg}^2 \quad \text{y} \quad \tilde{V}_{m\acute{a}x} = 42 \text{ cm/seg}$$

3.  $v_s = v'_s / 0.7 = 50 / 0.7 = 71.43 \text{ m/seg} = 7143 \text{ cm/seg}$

4. Para este ejemplo  $k_v$  se da como dato:  $k_v = 4 \text{ kg/cm}^2/\text{cm}$
5.  $K_S = K_v \cdot D = 4(3.142)(269.2) \approx 3383 \text{ kg/cm/cm}$
6.  $\rho = \frac{Lk_s/4}{K_T} = \frac{366 \times 3383 \div 4}{6,507,688} = 0.05 < 1$ , por tanto  $f_o = 1 - 0.31(0.05) = 0.985$
- $$\tilde{d}_T = \left\{ \frac{42}{7143} + \frac{139}{(7143)^2} \frac{269.2}{2} \right\} \times 366 \times 0.985 = 2.25 \text{ cm}$$
- $$d_T' = (0.9 + 0.6e^{-2\rho}) \tilde{d}_T = (0.9 + 0.6e^{-0.1}) 2.25 = 3.25 \text{ cm}$$
7. Se considera, para este ejemplo, que la tubería no cruza una interfase de dos suelos de rigidez distinta
8. Puesto que  $K_{S1} = 4(3.142)(179.4) = 2254.70 \text{ kg/cm/cm}$   
 $\approx 2.25 \text{ ton/cm/cm} > 0.81$
- $$\tilde{c}_{60} = 25.76 \times 10^{-5} (2.25)^{0.91} = 5.39 \times 10^{-4}$$
9.  $\frac{488}{L_2} = \frac{488}{366} = 1.33$ ,  $1 < 1.33 < 2$ ; por tanto
- $$f_1 = \frac{1}{1.84 \left( \frac{488}{366} \right) - 0.84} = 0.62$$
- $$\tilde{c} = \frac{5.39 \times 10^{-4}}{\left( \frac{269.2}{179.4} \right)} (0.62) = 2.23 \times 10^{-4}$$
10.  $K_T = 6,507,688 \text{ kg/cm}$  para  $L = 366 \text{ cm}$ , entonces
- $$K_{T2} = \frac{366}{488} (6,507,688) = 4,880,766 \text{ kg/cm} \approx 4,881 \text{ ton/cm}$$
- Por otra parte
- $$K_{T1} = 0.163 (228.6)^2 \approx 8,518 \text{ ton/cm} \neq K_{T2}$$

Por tanto

$$f_2 = \frac{8518}{4881} = 1.75$$

$$\tilde{c} = 2.23 \times 10^{-4} \times 1.75 \approx 3.9 \times 10^{-4}$$

11. Con  $v_s/35 = 71.43/35 = 2.04$  y  $v_{BR} = 6K_s^{0.5} = 6(2250)^{0.5} \approx 285$  m/seg

$$e_{35}/c_{v_1} = 1.7 \text{ (de la fig 5.9b)}$$

$$\tilde{c} = \frac{3.9 \times 10^{-4}}{1.7} \approx 2.3 \times 10^{-4}$$

$$e' = \frac{\{2(0.05)(42/71.43)(366) + (22087/6507688)\}\{1 + 0.5(0.05)\}}{(0.5(0.05)(42/71.43)(366) + (22087/6507688))\{1+2(0.05)\}}$$

$$\times 2.3 \times 10^{-4} \approx 8.57 \times 10^{-4}$$

Los valores de  $\tilde{d}_m$ ,  $\tilde{d}_T$ ,  $\tilde{c}$ , y  $e'$ , obtenidos con el método de juntas friccionantes en el apéndice, sec A.3, son 1.71 cm, 2.11 cm,  $1.21 \times 10^{-4}$  y  $4.24 \times 10^{-4}$ , respectivamente, que son menores que los correspondientes valores obtenidos siguiendo las recomendaciones aquí propuestas, en un 32, 33, 90, y 102 por ciento. Esta gran diferencia se debe a que el sismo usado para esta comparación (S. Texcoco, N00E) es el menos desfavorable.

## 8. RECOMENDACIONES GENERALES

Para actualizar en el futuro las recomendaciones de diseño sísmico presentadas en el capítulo anterior, será necesario procurar que los fabricantes de tuberías proporcionen la información de tipo experimental siguiente:

- a. Rigidez axial de los tubos o, si es posible, curvas fuerza-deformación.
- b. Rigidez de las juntas flexibles cuando no sean tipo lock-joint, o, si lo son, la fuerza de fricción en las juntas.

Asimismo, para validar los modelos teóricos para análisis, es recomendable instrumentar algunas tuberías enterradas mediante medidores de deformaciones unitarias y de desplazamientos relativos en las juntas, e instalando acelerógrafos que registren

el sismo en cada punto instrumentado; todas las señales se deberán registrar en una grabadora para tener una misma base de tiempo o, en su defecto, se deberá enviar una señal de tiempo común a cada grabadora.

Por otra parte, es conveniente realizar estudios tendientes a cuantificar la velocidad aparente de propagación de los sismos en el valle de México.



#### REFERENCIAS

1. Ayala, G y Rascón, O A, "Evaluación sísmica del acueducto dañado durante el sismo del 14 de marzo de 1979", *Ingeniería Sísmica*, No. 21 (ago, 1980), pp 17-32
2. Wriqth, J P y Takada, S, "Earthquake response characteristics of jointed and continuous buried lifelines", *Weidlinger Associates, Consulting Engineers*, informe 15 (ene, 1980)
3. Wang, L R, "Quasi-static analysis formulation for straight buried piping systems", *Rensselaer Polytechnic Institute* (jul, 1978)
4. Newmark, N y Hall, W J, "Pipeline design to resist large fault displacement", *Proc. of the U S Natl. Conf. on Earthq. Engng.*, Ann Arbor, Mich., E U A (1975)

5. Kennedy, R P y Chow, A W, "Fault movement effects on buried oil pipeline", *Proc. ASCE*, Vol. 103, TE5 (sep, 1977)
6. Havskov, J, comunicación personal
7. Poulos, H G y Davis, E H, "Elastic solutions for soil and rock mechanics", *John Wiley* (1974)
8. Tocher, D, "Earthquake energy and ground breakage", *Bull. Seism. Soc. of Am.*, Vol 48, pp 147-153
9. Singh, S K y Havskov, J, "On moment-magnitude Scale", *Bull. Seism. Soc. of Am.*, Vol 70, (feb, 1980) pp 379-383
10. Singh, S K, Bazán, E y Esteva, L, "Expected earthquake magnitude from a fault", *Bull. Seism. Soc. of Am.*, Vol 70 (jun, 1980), pp 903-914
11. Havskov, J y otros, "Estudio de los temblores locales ocurridos en el Distrito Federal en febrero, 1981" trabajo en desarrollo, *Instituto de Ingeniería, UNAM*
12. "Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal", dic 15, 1976, título IV", *Series del Instituto de Ingeniería, UNAM*, No. 400 (jul 1977)
13. "Figueroa, J, "Sismicidad en la cuenca del Valle de México", *Series del Instituto de Ingeniería, UNAM*, No. 289 (jul, 1971)
14. Alonso, L, Espinoza, J M, Mora, I, Murid, D y Prince, J, "Informe preliminar sobre el sismo del 14 de marzo de 1979

- cerca de la costa de Guerrero. Parte A", informe interno, *Instituto de Ingeniería, UNAM* (mar, 1979)
15. Prince, J, "Los temblores de julio de 1974 en el sur de la ciudad de México", series del *Instituto de Ingeniería, UNAM*, No. IPS-1 (oct, 1974)
  16. Hindy, A y Novak, M, "Earthquake response of underground pipelines" *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol 7 (1979), pp 457-476
  17. Martínez, B, León J L, Rascón O A y Villarreal, A, "Determinación de las propiedades dinámicas, de la arcilla en el vaso de Texcoco", *Ingeniería*, Vol 44, No. 2 (abr-jun, 1974), pp 182-203
  18. Martínez, B y Brito, R, "Caracterización del subsuelo en la zona de fallas del nuevo acueducto de Xochimilco, mediante prospección sísmica", informe del *Instituto de Ingeniería, UNAM*, a la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, DDF (mar, 1981)
  19. Rascón, O, Chávez, M, Alonso, L y Palencia, V, "Registros y espectros de temblores en las ciudades de México y Acapulco, 1961-1968", *Series del Instituto de Ingeniería* No. 385 (feb, 1977)
  20. Archivo de sismos, Sección de Ingeniería Sísmica, *Instituto de Ingeniería, UNAM*.

21. Serna, R A, "Quasi-static elasto-plastic analysis of buried pipelines" *Rensselaer Polytechnic Institute* (dic, 1980)
22. Esteva, L, "Regionalización sísmica de México para fines de ingeniería", *Series del Instituto de Ingeniería, UNAM*, No. 246 (abr 1970)
23. Kratky, R G y Salvadori, M G, "Strength and dynamic characteristics of gasket-jointed concrete water pipelines", *Weidlinger Assoc., Consulting Engineers* (jun 1978)
24. Barkan, D D, "Dynamics of bases and foundations", *McGraw-Hill Co. Inc.* (1962)
25. Kratky, R G y Salvadori, M G, "Strength and dynamic characteristics of mechanically jointed cast-iron water pipelines", *Weidlinger Assoc., Consulting Engineers* (jun 1978)

TABLA 3.1 RELACION DE REGISTROS DE SISMOS EMPLEADOS

Sitio de registro	Fecha (*)	Componente	Aceleración máxima, $a_{ndk}^*$ cm/sec	Velocidad máxima, $v_{ndk}^*$ cm/sec	Desplazamiento máximo, $d_{ndk}^*$ cm	M	I	Tipo de suelo
Alameda	10-XII-1961 (310)	N10°46'W	17.37	3.4076	8.1099	5.6	III-IV	Blando
Alameda	10-XII-1961 (310)	N79°14'E	20.559	3.0819	4.3618	5.6	III-IV	Blando
Alameda	11-V-1962 (315)	N10°46'W	47.208	12.601	14.393	6.7	VI-VII	Blando
Alameda	11-V-1962 (315)	N79°14'E	41.073	10.401	11.308	6.7	VI-VII	Blando
Alameda	19-V-1962 (320)	N10°46'W	39.646	9.5781	9.279	6.3	VI	Blando
Alameda	19-V-1962 (320)	N79°14'E	28.326	10.9	9.4255	6.5	VI	Blando
Alameda	30-XI-1962 (230)	N10°46'W	6.5984	1.4797	2.6402	5.5	IV	Blando
Alameda	30-XI-1962 (230)	N79°14'E	5.19	1.0741	1.3682	5.5	IV	Blanda
Edif. M. González	6-VII-1964 (220)	N-S	29.124	7.6908	3.897	6.7	VI	Blando
Edif. M. González	6-VII-1964 (220)	E-W	28.196	7.343	3.4282	6.7	VI	Blando
Patio Edif. Hidalgo	6-VII-1964 (220)	N-S	36.683	7.228	9.2279	6.7	VI	Blando
Patio Edif. Hidalgo	6-VII-1964 (220)	E-W	42.721	12.108	9.7851	6.7	VI	Blando
Cimen. Edif. Hidalgo	6-VII-1964 (220)	E-W	46.347	14.406	10.81	6.7	VI	Blando
Cimen. Edif. Atizapán	6-VII-1964 (220)	N-S	24.391	8.0248	3.958	6.7	VI	Blando
Cimen. Edif. Atizapán	6-VII-1964 (220)	E-W	19.39	5.491	3.1657	6.7	VI	Blando
Cimen. Edif. Atizapán	23-VIII-1965 (395)	N-S	21.161	6.212	11.318	6.9	VI	Blando
Cimen. Edif. Atizapán	23-VIII-1965 (395)	E-W	9.2951	4.6113	8.244	6.9	VI	Blando
Cimen. Edif. Atizapán	9-XII-1965 (350)	N-S	6.9105	2.4465	3.367	6.8	V	Blando
Cimen. Edif. Atizapán	1-VII-1968 (260)	N-S	12.18	11.51	19.787	5.8	V	Blando
Cimen. Edif. Atizapán	1-VII-1968 (260)	E-W	14.859	4.8107	5.9516	5.8	V	Blando
Cimen. Edif. Atizapán	2-VIII-1968 (365)	N-S	25.554	8.8051	16.067	6.5	V-VI	Blando
Patio Edif. Atizapán	2-VIII-1968 (365)	N-S	30.68	10.576	19.032	6.5	V-VI	Blando
Patio Edif. Atizapán	2-VIII-1968 (365)	E-W	44.074	14.822	29.288	6.5	V-VI	Blando
Cd. Universitaria	6-VII-1964 (220)	N-S	20.451	4.8467	10.186	6.7	VI	Duro
Cd. Universitaria	6-VII-1964 (220)	E-W	14.429	2.8949	2.1707	6.7	VI	Duro
Cd. Universitaria	23-VIII-1965 (395)	N-S	4.043	1.489	3.1902	6.9	VI	Duro
Cd. Universitaria	23-VIII-1965 (395)	E-W	2.7877	1.3975	2.8497	6.9	VI	Duro
Cd. Universitaria	2-VIII-1968 (365)	N-S	14.378	9.9725	3.8186	6.5	V-VI	Duro
Cd. Universitaria	2-VIII-1968 (365)	E-W	11.241	4.5422	6.008	6.5	V-VI	Duro
Cd. Universitaria A	29-XI-1978 (560)	N00E	17.764	5.759	3.09	6.5	V	Duro
Cd. Universitaria A	29-XI-1978 (560)	N90W	18.01	7.654	4.394	6.5	V	Duro
Cd. Universitaria B	29-XI-1978 (560)	N00E	2.239	0.392	0.18	5.3	IV	Duro
Cd. Universitaria B	29-XI-1978 (560)	N90W	1.897	0.428	0.19	5.3	IV	Duro
Cd. Universitaria C	29-XI-1978 (560)	N00E	4.809	0.879	0.328	6.5	VI-V	Duro
Cd. Universitaria C	29-XI-1978 (560)	N90W	4.073	0.837	0.328	6.5	VI-V	Duro
Hospital ABC A	29-XI-1978 (560)	N00E	4.692	1.315	0.866	6.5	V	Duro
Hospital ABC A	29-XI-1978 (560)	N90W	3.364	1.023	0.579	6.5	V	Duro
Chimalhuacán	14-III-1979 (390)	N00E	31.862	7.384	2.907	6.57	VI-VII	Duro
Chimalhuacán	14-III-1979 (390)	N90W	22.413	5.127	1.422	6.57	VI-VII	Duro
Alberca Olímpica	14-III-1979 (390)	N00E	30.731	9.209	6.089	6.57	VI-VII	Blando
Alberca Olímpica	14-III-1979 (390)	N90W	37.079	9.451	3.575	6.57	VI-VII	Blando
Centro Lago A+B	14-III-1979 (390)	N00E	41.223	12.94	7.035	6.57	VI-VII	Blando
Centro Lago A+B	14-III-1979 (390)	N90W	48.188	16.014	6.99	6.57	VI-VII	Blando
Lotería Nacional	14-III-1979 (390)	N00E	38.648	10.586	4.715	6.57	VI-VII	Blando
Lotería Nacional	14-III-1979 (390)	N90W	32.35	9.499	1.69	6.57	VI-VII	Blando
Rosa Texcoco	14-III-1979 (390)	N00E	54.884	13.294	4.531	6.57	VI-VII	Blando
Rosa Texcoco	14-III-1979 (390)	N90W	51.894	15.366	5.5	6.57	VI-VII	Blando
Atizapán sótano	14-III-1979 (390)	N00E	41.565	14.188	4.395	6.57	VI-VII	Blando
Atizapán sótano	14-III-1979 (390)	N90W	33.166	11.284	4.681	6.57	VI-VII	Blando
SNROP	14-III-1979 (390)	N00E	37.408	8.38	3.636	6.57	VI-VII	Blando
SNROP	14-III-1979 (390)	N90W	30.143	6.28	2.827	6.57	VI-VII	Blando
Cd. Universitaria	14-III-1979 (390)	N-S	16.562	3.957	1.518	6.57	VI-VII	Duro
Cd. Universitaria	14-III-1979 (390)	E-W	13.676	2.611	1.152	6.57	VI-VII	Duro
Hospital ABC	14-III-1979 (390)	N00E	9.265	1.877	1.026	6.57	VI-VII	Duro
Hospital ABC	14-III-1979 (390)	N90W	13.062	2.967	1.242	6.57	VI-VII	Duro
Cd. Universitaria	22-VI-1979 (550)	N-S	3.105	0.954	0.514	6.3	IV	Duro
Cd. Universitaria	22-VI-1979 (550)	E-W	3.423	0.982	0.472	6.3	IV	Duro
SNROP	22-VI-1979 (550)	N-S	8.481	2.384	1.024	6.3	IV	Blando
SNROP	22-VI-1979 (550)	E-W	24.571	7.45	6.5	6.3	IV	Blando
M. Hidalgo A y B	29-XI-1979 (510)	N90W	11.0	0	0	6.5	IV-V	Blando
Edif. M. González	9-XII-1965 (390)	N00E	13.26	0	0	6.8	VI	Blando
Edif. M. González	30-XI-1973 (366)	N90W	10.0	0	0	6.7	VII	Blando
Edif. M. González	28-VIII-1973 (283)	N90W	20.0	0	0	6.8	V	Blando
Alberca Olímpica	12-VII-1974 (5-B)	E-W	35.0	0	0	3.5	V	Blando
Alberca Olímpica	19-III-1978 (316)	N00E	21.0	0	0	5.8	IV	Blando
Alberca Olímpica	24-X-1980 (190)	N-S	65.0	0	0	6.5	VII	Blando
Atizapán sótano	2-VII-1968 (259)	N00E	13.17	0	0	6.2	IV	Blando
Atizapán sótano	7-VI-1976 (315)	N90W	35.0	0	0	6.2	IV-V	Blando
Rosa Texcoco	22-II-1973 (474)	N00E	13.84	0	0	5.6	IV-V	Blando
Centro Lago A+B	19-XI-1975 (313)	N90W	61.94	0	0	6.5	IV-VI	Blando
Lotería Nacional	22-VI-1979 (550)	N00E	35.0	0	0	6.3	IV	Blando
P. de los Doctores	1-II-1976	N00E	9.0	0	0	6.2	IV-V	Blando
Cd. Universitaria	3-II-1968 (350)	N90W	6.0	0	0	5.5	IV-V	Duro
Cd. Universitaria	12-VII-1974 (5-B)	N-S	48.0	0	0	3.5	V	Duro
Cd. Universitaria	1-II-1976	N00E	5.0	0	0	6.2	IV-V	Duro
Cd. Universitaria	7-VI-1976 (315)	N00E	18.0	0	0	6.2	IV-V	Duro
Chimalhuacán	22-VI-1979 (550)	N00E	15.0	0	0	6.3	IV	Duro
Chimalhuacán	24-X-1980 (190)	E-W	36.0	0	0	6.5	VII	Duro

\*Distancia epicentral aproximada, en Km.

TABLA 3.2 RELACION DE  $\lambda$  CON  $\Lambda_{m\acute{a}x}$ . SUELO BLANDO DEL D.F.

$\Lambda_{m\acute{a}x}$ cm/seg <sup>2</sup>	Fecha	$n(\Lambda_{m\acute{a}x})$	$N(\Lambda \geq \Lambda_{m\acute{a}x})$	$\lambda$	T años
65.0	24-X-1980	1	1	0.050	20.0
61.96	15-XI-1975	1	2	0.101	9.901
54.884	14-III-1979	1	3	0.151	6.623
47.208	11-V-1962	1	4	0.202	4.950
46.347	6 -VII-1964	1	5	0.252	3.968
44.074	2 -VIII-1968	1	6	0.303	3.300
39.666	19-V-1962	1	7	0.353	2.833
35.0	12-VII-1974/7-VI-1976	2	9	0.454	2.203
24.57	29-XI-1978	1	10	0.504	1.852
21.161	23-VIII-1965	1	11	0.555	1.802
21.0	19-III-1978	1	12	0.605	1.653
20.559	10-XII-1961	1	13	0.656	1.524
20.0	28-VIII-1973	1	14	0.706	1.416
16.0	30-I-1973	1	15	0.756	1.323
15.0	22-VI-1979	1	16	0.807	1.239
14.859	1 -VII-1968	1	17	0.857	1.167
13.84	22-I-1973	1	18	0.908	1.101
13.26	9 -XII-1965	1	19	0.958	1.044
13.17	2 -VII-1968	1	20	1.009	0.991
11.0	28- I -1979	1	21	1.059	0.944
9.0	1 -II-1976	1	22	1.109	0.902
6.698	30-XI-1962	1	23	1.160	0.862

 TABLA 3.3 RELACION DE  $\lambda$  CON  $\Lambda_{m\acute{a}x}$ . SUELO DURO DEL D.F.

$\Lambda_{m\acute{a}x}$ cm/seg <sup>2</sup>	Fecha	$n(\Lambda_{m\acute{a}x})$	$N(\Lambda \geq \Lambda_{m\acute{a}x})$	$\lambda$	T años
48	12-VII-1974	1	1	0.053	18.868
36	24-X-1980	1	2	0.106	9.434
31.862	14-III-1979	1	3	0.159	6.289
20.451	6 -VII-1964	1	4	0.212	4.717
18.01	29-XI-1978	1	5	0.266	3.759
18.0	7 -VI-1976	1	6	0.319	3.135
15.0	22-VI-1979	1	7	0.372	2.698
14.378	2 -VIII-1968	1	8	0.425	2.353
6.0	3 -II-1968	1	9	0.478	2.092
5.0	1 -II-1976	1	10	0.531	1.893
4.043	23-VIII-1965	1	11	0.584	1.712

TABLA 5.1 DEFORMACIONES UNITARIAS MAXIMAS CALCULADAS CON LOS METODOS DIRECTO ( $\epsilon_{mRx}$ )  
Y SIMPLIFICADO ( $\epsilon_{mSx}$ ) PARA SUELO BLANDO

Sitio de registro	Fecha	Componente	$v_a = 35 \text{ m/seg}$		$v_b = 170 \text{ m/seg}$		$v_g = 410 \text{ m/seg}$	
			$\epsilon_{mRx} (\times 10^{-3})$	$\epsilon_{mSx} (\times 10^{-3})$	$\epsilon_{mRx} (\times 10^{-3})$	$\epsilon_{mSx} (\times 10^{-3})$	$\epsilon_{mRx} (\times 10^{-3})$	$\epsilon_{mSx} (\times 10^{-3})$
Alemeda	10-XII-1961	N10°46'W	0.60907	0.9736	0.12557	0.20045	0.05296	0.09311
"	"	N79°14'E	0.2304	0.68054	0.04764	0.18129	0.01987	0.07117
"	"	Vertical	0.79355	0.48591	0.06044	0.19904	0.02364	0.14148
"	11-V-1962	N10°46'W	1.9132	3.60039	0.7411	0.78124	0.26344	0.30734
"	"	N79°14'E	0.03901	2.97171	0.4108	0.61182	0.17406	0.25309
"	"	Vertical	0.36682	0.0014	0.07552	0.16470	0.07321	0.07841
"	19-V-1962	N10°46'W	1.68163	2.7366	0.34622	0.56342	0.14355	0.23301
"	"	N79°14'E	1.69538	3.11429	0.34905	0.64118	0.14423	0.25575
"	"	Vertical	0.32076	0.72766	0.06765	0.14981	0.02964	0.07212
"	30-XI-1962	N10°46'W	0.14209	0.42777	0.02725	0.09704	0.01312	0.03755
"	"	N79°14'E	0.14148	0.42777	0.03366	0.09699	0.01386	0.02720
"	"	Vertical	0.20437	0.43023	0.04208	0.09044	0.01745	0.0375
Edif. H. González	6-VII-1964	N-S	1.39356	2.19737	0.26079	0.4524	0.11145	0.18799
"	"	E-W	1.23885	2.098	0.23262	0.43194	0.09645	0.1701
"	"	Vertical	0.2901	0.71496	0.05073	0.14719	0.02476	0.06103
Fatio Edif. Hidalgo	"	N-S	1.88914	2.42514	0.37206	0.60234	0.15427	0.24071
"	"	E-W	1.25411	3.45943	0.44349	0.71274	0.18391	0.29532
"	"	Vertical	0.39714	1.26797	0.08176	0.25105	0.0330	0.08924
Cimen. Edif. Hidalgo	"	E-W	2.233	4.116	0.45974	0.84741	0.19062	0.35137
"	"	Vertical	0.37988	1.078	0.07821	0.21194	0.03243	0.09202
Cimen. Edif. Atizapán	"	N-S	1.43036	2.2920	0.28449	0.49205	0.1221	0.19573
"	"	E-W	0.07521	1.56486	0.19031	0.322	0.03478	0.13393
"	"	Vertical	0.43152	1.14383	0.08864	0.23549	0.03061	0.0716
"	23-VIII-1965	N-S	1.00772	2.37484	0.29754	0.48604	0.08604	0.20273
"	"	E-W	0.82621	1.31751	0.16888	0.37125	0.03902	0.11243
"	"	Vertical	0.24767	0.71194	0.05059	0.14658	0.02114	0.06759
"	9-XII-1965	N-S	0.39351	0.699	0.00102	0.14391	0.03359	0.05767
"	1-VII-1968	N-S	1.43107	3.20837	0.29463	0.67706	0.12216	0.20732
"	"	E-W	0.70385	1.37440	0.16314	0.28793	0.06777	0.11733
"	2-VIII-1968	N-S	0.86961	2.51574	0.17904	0.51795	0.07474	0.21470
"	"	Vertical	0.6871	1.56614	0.14146	0.32244	0.05945	0.12444
Fatio Edif. Atizapán	"	N-S	1.95485	3.05711	0.40247	0.62212	0.14698	0.25745
"	"	E-W	2.65536	4.26371	0.54669	0.87782	0.23668	0.36396
"	"	Vertical	0.94659	2.47817	0.19489	0.51021	0.09091	0.21155
Fatio Edif. Hidalgo	29-XI-1978	N-S	1.219	1.4086	0.251	0.3724	0.1041	0.1544
"	"	E-W	0.9643	1.4371	0.1905	0.2959	0.0923	0.1227
Alberca Olimpic	14-III-1979	N-S	1.7371	2.6311	0.3576	0.5417	0.1403	0.2246
"	"	E-W	1.7857	2.7929	0.2676	0.5565	0.1524	0.2307
Centro Lago A+B	"	N-S	3.7048	3.6991	0.6991	0.6567	0.2309	0.3156
"	"	E-W	2.8571	4.5751	0.5882	0.9410	0.2439	0.3906
Lotería Nacional	"	N-S	1.6571	3.0257	0.3412	0.6779	0.1415	0.2593
"	"	E-W	1.2857	2.714	0.2647	0.5508	0.1090	0.2317
Sons Texcoco	"	N-S	2.5357	3.7971	0.5223	0.7818	0.2105	0.3241
"	"	E-W	2.0571	4.3914	0.5882	0.9041	0.2439	0.3749
Atizapán antiguo	"	N-S	3.4429	4.0543	0.6471	0.8387	0.2983	0.3983
"	"	E-W	2.0408	3.1443	0.4202	0.6468	0.142	0.2744
"	"	Vertical	0.6	0.864	0.1235	0.1779	0.0512	0.0730
SMIDP	"	N-S	1.7403	2.0057	0.3583	0.5776	0.1406	0.2395
"	"	E-W	1.2919	2.3943	0.266	0.4924	0.1103	0.2044
"	"	Vertical	0.4571	0.7886	0.0941	0.1624	0.030	0.0673

TABLA 5.2 DEFORMACIONES UNITARIAS Y DESPLAZAMIENTOS RELATIVOS TOTALES PARA T=100 AÑOS, METODOS DIRECTO Y SIMPLIFICADO

Velocidad de propagación m/seg	Diámetro exterior, cm	Curvatura máxima, $\phi_{s,máx}, cm^{-1}$	Deformación unitaria máxima $\epsilon_0$	Desplazamiento máximo $d_0, cm$	Desplazamientos máximos totales, $cm$ $d_T$	
35	91.76	$1.13 \times 10^{-5}$	$5.21 \times 10^{-4}$	$2.54 \times 10^{-1}$	6.064	3.654
	179.39	$1.13 \times 10^{-5}$	$1.02 \times 10^{-3}$	$4.96 \times 10^{-1}$	6.306	3.896
	265.75	$1.13 \times 10^{-5}$	$1.51 \times 10^{-3}$	$7.35 \times 10^{-1}$	6.545	4.135
170	91.76	$4.81 \times 10^{-7}$	$2.21 \times 10^{-5}$	$1.08 \times 10^{-2}$	1.2108	0.7108
	179.39	$4.81 \times 10^{-7}$	$4.31 \times 10^{-5}$	$2.10 \times 10^{-2}$	1.2210	0.7210
	265.75	$4.81 \times 10^{-7}$	$6.39 \times 10^{-5}$	$3.12 \times 10^{-2}$	1.2312	0.7312
410	91.76	$8.27 \times 10^{-8}$	$3.79 \times 10^{-6}$	$1.85 \times 10^{-3}$	0.50185	0.29185
	179.39	$8.27 \times 10^{-8}$	$7.42 \times 10^{-6}$	$3.62 \times 10^{-3}$	0.50362	0.29362
	265.75	$8.27 \times 10^{-8}$	$1.10 \times 10^{-5}$	$5.36 \times 10^{-3}$	0.50536	0.29536
410	91.76	$5.29 \times 10^{-8}$	$2.43 \times 10^{-6}$	$1.18 \times 10^{-3}$	0.29118	0.16118
	179.39	$5.29 \times 10^{-8}$	$4.75 \times 10^{-6}$	$2.32 \times 10^{-3}$	0.29232	0.16232
	265.75	$5.29 \times 10^{-8}$	$7.04 \times 10^{-6}$	$3.43 \times 10^{-3}$	0.29343	0.16343
755	91.76	$1.56 \times 10^{-8}$	$7.16 \times 10^{-7}$	$3.49 \times 10^{-4}$	0.160349	0.090349
	179.39	$1.56 \times 10^{-8}$	$1.40 \times 10^{-6}$	$6.83 \times 10^{-4}$	0.160683	0.090683
	265.75	$1.56 \times 10^{-8}$	$2.07 \times 10^{-6}$	$1.01 \times 10^{-3}$	0.161010	0.091010
1250	91.76	$5.70 \times 10^{-9}$	$2.61 \times 10^{-7}$	$1.27 \times 10^{-4}$	0.090127	0.050127
	179.39	$5.70 \times 10^{-9}$	$5.11 \times 10^{-7}$	$2.49 \times 10^{-4}$	0.090249	0.050249
	265.75	$5.70 \times 10^{-9}$	$7.57 \times 10^{-7}$	$3.69 \times 10^{-4}$	0.090369	0.050369



TABLA 5.3 DEFORMACIONES UNITARIAS MAXIMAS CALCULADAS CON LOS METODOS DIRECTO ( $\delta_{máx}$ )  
 Y SIMPLIFICADO ( $c_{máx}$ ) PARA SUELO DURO

Sitio de registro	Fecha	Compo- nente	$v_g = 410$ m/seg		$v_g = 755$ m/seg		$v_g = 1250$ m/seg	
			$\delta_{máx} (\times 10^{-5})$	$c_{máx} (\times 10^{-5})$	$\delta_{máx} (\times 10^{-5})$	$c_{máx} (\times 10^{-5})$	$\delta_{máx} (\times 10^{-5})$	$c_{máx} (\times 10^{-5})$
Cd. Universitaria	6-VII-1964	N-S	5.74	11.82	3.12	6.42	1.88	3.88
"	"	E-W	3.2	7.06	1.74	3.83	1.05	2.32
"	"	Vertical	2.32	6.83	1.26	3.71	0.76	2.24
"	23-VIII-1965	N-S	2.32	3.63	1.26	1.97	0.76	1.19
"	"	N-W	2.04	3.41	1.11	1.85	0.67	1.12
"	"	Vertical	1.29	2.27	0.7	1.23	0.42	0.74
"	2-VIII-1968	N-S	5.25	9.69	2.85	5.26	1.72	3.18
"	"	E-W	4.80	7.82	2.61	4.25	1.57	2.56
"	"	Vertical	4.05	7.82	2.2	4.25	1.33	2.56
Cd. Universitaria B	29-XI-1978	NOOE	0.65	0.96	0.35	0.52	0.21	0.31
"	"	N90W	0.56	0.86	0.3	0.52	0.18	0.31
"	"	Vertical	0.23	0.45	0.12	0.25	0.07	0.15
Cd. Universitaria C	"	NOOE	1.10	2.14	0.64	1.16	0.39	0.7
"	"	N90W	1.18	2.04	0.64	1.11	0.39	0.67
"	"	Vertical	0.46	0.93	0.25	0.5	0.15	0.3
Chimalhuacán	14-III-1979	NOOE	11.36	18.01	6.17	9.78	3.73	5.71
"	"	N90W	7.44	12.5	4.04	6.79	2.44	4.1
"	"	Vertical	3.47	6.06	1.88	3.29	1.14	1.99
Cd. Universitaria	"	NOOE	6.23	9.65	3.38	5.24	2.04	3.17
"	"	N90W	4.2	6.37	2.28	3.46	1.30	2.09
"	"	Vertical	3.73	5.59	2.02	3.03	1.22	1.83
Hospital ABC	"	NOOE	2.51	4.58	1.36	2.49	0.82	1.5
"	"	N90W	3.1	7.23	1.69	3.92	1.02	2.37
"	"	Vertical	3.29	5.85	1.79	3.10	1.08	1.92

TABLA 5.4 RIGIDECES Y FUERZAS DE FRICCIÓN

Diámetro cm	Rigidez del suelo, Kg/cm/cm				Rigidez del tubo, Kg/cm	Rigidez de las juntas, Kg/cm	Fuerza de fricción, Kg
	Suelo 1 ( $v_s = 35$ m/seg)	Suelo 2 ( $v_s = 170$ m/seg)	Suelo 3 ( $v_s = 410$ m/seg)	Suelo 4 ( $v_s = 620$ m/seg)			
76.2	18	407	3,004	8,100	892,898	5,715 12,606	5,443
152.4	35	813	6,008	16,200	3,571,594	4,464 24,449	9,979
228.6	53	1,220	9,012	24,300	8,928,984	16,000 35,946	14,969

TABLA 5.5 EFECTO DE LA RIGIDEZ DEL SUELO CON REGISTRO DE SOSA TEXCOCO N00E  
 Y  $v_g = 35$  m/seg. METODO CUASISTATICO

Diámetro, cm	Rigidez del suelo, kg/cm/cm	Desp.relativo en juntas, cm	Desplazamiento relativo entre suelo y tubo, cm		Deformación unitaria
			Extremo anterior	Extremo posterior	
91.76	18 (suelo 1)	1.52	1.09	1.13	$1.24 \times 10^{-5}$
	407 (suelo 2)	1.74	0.94	0.94	$5.09 \times 10^{-5}$
	3,004 (suelo 3)	1.65	0.86	0.87	$2.80 \times 10^{-4}$
	8,100 (suelo 4)	1.47	0.77	0.77	$6.58 \times 10^{-4}$
179.39	35 (suelo 1)	1.66	1.04	1.06	$3.12 \times 10^{-6}$
	813 (suelo 2)	1.77	0.93	0.93	$2.19 \times 10^{-5}$
	6,008 (suelo 3)	1.71	0.90	0.90	$1.42 \times 10^{-4}$
	16,200 (suelo 4)	1.62	0.84	0.84	$3.57 \times 10^{-4}$
265.75	53 (suelo 1)	1.54	1.09	1.13	$3.55 \times 10^{-6}$
	1,220 (suelo 2)	1.76	0.94	0.95	$1.52 \times 10^{-5}$
	9,012 (suelo 3)	1.74	0.91	0.91	$8.84 \times 10^{-5}$
	24,300 (suelo 4)	1.68	0.88	0.88	$2.24 \times 10^{-4}$

TABLA 5.6 EFECTO DE LA RIGIDEZ DEL SUELO CON REGISTRO DE SOSA TEXCOCO NOOR  
 Y  $v_s = 35$  m/seg. METODO DE JUNTAS FRICCIONANTES

Diámetro, cm	Rigidez del suelo, kg/cm/cm	Desp. relativo en juntas, cm	Desplazamiento relativo entre suelo y tubo, cm		Deformación unitaria
			Extremo anterior	Extremo posterior	
91.76	18 (suelo 1)	1.78	0.93	0.93	$1.71 \times 10^{-5}$
	407 (suelo 2)	1.73	0.90	0.90	$1.15 \times 10^{-4}$
	3,004 (suelo 3)	1.48	0.77	0.77	$6.60 \times 10^{-4}$
	8,100 (suelo 4)	1.15	0.60	0.60	$1.37 \times 10^{-3}$
179.39	35 (suelo 1)	1.78	0.93	0.93	$8.01 \times 10^{-6}$
	813 (suelo 2)	1.76	0.92	0.92	$5.79 \times 10^{-5}$
	6,008 (suelo 3)	1.62	0.84	0.84	$3.66 \times 10^{-4}$
	16,200 (suelo 4)	1.40	0.73	0.73	$8.32 \times 10^{-4}$
265.75	53 (suelo 1)	1.78	0.93	0.93	$4.81 \times 10^{-6}$
	1,220 (suelo 2)	1.77	0.93	0.93	$3.50 \times 10^{-5}$
	9,012 (suelo 3)	1.69	0.88	0.88	$2.22 \times 10^{-4}$
	24,300 (suelo 4)	1.53	0.80	0.80	$5.46 \times 10^{-4}$

TABLA 5.7 RESULTADOS OBTENIDOS PARA LOS CASOS ELASTICO Y PLASTICO CON EL METODO CUASIELASTICO

D (cm)	$K_{T1}$ (ton/cm)	$K_{T2}$ (ton/cm)	$K_B$ (ton/cm/cm)	Desplazamiento relativo entre juntas (rigidez del tubo= $K_{T1}$ ), cm		Deformación unitaria del tubo (rigidez del tubo= $K_{T1}$ ) $\times 10^{-5}$		Desplazamiento relativo entre juntas (rigidez del tubo= $K_{T2}$ ), cm		Deformación unitaria del tubo (rigidez del tubo= $K_{T2}$ ) $\times 10^{-5}$	
				Caso elástico	Caso elastoplástico	Caso elástico	Caso elastoplástico	Caso elástico	Caso elastoplástico	Caso elástico	Caso elastoplástico
91.76	496.1	892.9	0.018	1.517	1.248	2.225	1.719	1.521	1.477	1.239	1.187
			0.407	1.725	1.709	9.074	4.792				
			3.004	1.558	1.671	47.665	21.486	1.649	1.661	28.036	24.759
179.39	1984.2	3571.6	0.035	1.657	1.501	0.561	0.433	1.658	1.627	0.312	0.295
			0.813	1.758	1.752	3.931	1.747				
			6.008	1.665	1.730	24.824	10.133	1.715	1.722	14.201	12.183
265.75	4960.5	8929.0	0.053	1.534	1.262	0.638	0.490				
			1.220	1.755	1.727	2.727	1.404				
			9.012	1.707	1.744	15.630	6.445				

TABLA 5.8 EFECTO DE LA RIGIDEZ DE LAS JUNTAS

Dímetro, cm	Rigidez de las juntas, kg/cm	Desplazamiento relativo en juntas, cm	Deformación unitaria del tubo, $\times 10^{-4}$
76.2	5,715	1.4744	6.5787
	12,606	1.4687	6.6824
152.4	4,464	1.6152	3.5683
	24,449	1.6099	3.6567
228.6	16,000	1.6767	2.2422
	35,946	1.6741	2.2800

TABLA 5.9 EFECTO DE LA FRICCIÓN EN LAS JUNTAS

Diámetro cm	Fuerza de fricción en las juntas, kg	Sosa Texcoco	(suelo blando)	C. Universitaria (suelo duro)	
		Desplazamiento relativo en juntas, cm	Deformación uni- -taria <sub>3</sub> del tubo, X 10 <sup>-3</sup>	Desplazamiento relativo en juntas, cm	Deformación uni- -taria <sub>3</sub> del tubo, X 10 <sup>-3</sup>
76.2	5,443	1.15	1.368	0.0352	0.0273
	16,329	1.15	1.384	0.0251	0.0480
152.4	9,979	1.40	0.832	0.0414	0.0144
	29,937	1.40	0.841	0.0364	0.0248
228.6	14,969	1.53	0.546	0.0441	0.0090
	44,907	1.53	0.552	0.0409	0.0155

TABLA 5.10a EFECTO DE LA RIGIDEZ DE LOS TUBOS. METODO CUASIESTATICO

Diámetro, cm	Rigidez del suelo, kg/cm/cm	Desplazamiento relativo entre juntas, cm		Deformación unitaria del tubo		$\frac{d_1}{d_2}$	$\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}$	$\frac{K_{T2}}{K_{T1}}$
		$d_1$	$d_2$	$\epsilon_1 (\times 10^{-5})$	$\epsilon_2 (\times 10^{-5})$			
76.2 ( $K_{T1}=892.9$ y $K_{T2}=496.1$ , ton/cm)	18	1.52	1.52	1.239	2.225	1.0	0.56	
	407	1.74	1.72	5.095	9.074	1.0	0.56	0.56
	3,004	1.65	1.56	28.036	47.665	1.1	0.59	
152.4 ( $K_{T1}=3,571.6$ y $K_{T2}=1,984.2$ , ton/cm)	35	1.66	1.66	0.312	0.561	1.0	0.56	
	813	1.77	1.76	2.194	3.931	1.0	0.56	0.56
	6,008	1.71	1.67	14.201	24.824	1.0	0.57	
228.6 ( $K_{T1}=8,929.0$ y $K_{T2}=4,960.5$ , ton/cm)	53	1.54	1.53	0.355	0.638	1.0	0.56	
	1,220	1.76	1.76	1.520	2.727	1.0	0.56	0.56
	9,012	1.74	1.71	8.844	15.630	1.0	0.57	



TABLA 5.10b EFECTO DE LA RIGIDEZ DE LOS TUBOS. METODO DE JUNTAS FRICCIONANTES

Diámetro, cm	Rigidez del suelo, kg/cm/cm	Desplazamiento relativo entre juntas, cm		Deformación unitaria del tubo		$\frac{d_1}{d_2}$	$\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}$	$\frac{K_{T2}}{K_{T1}}$
		$d_1$	$d_2$	$\epsilon_1 (\times 10^{-5})$	$\epsilon_2 (\times 10^{-5})$			
76.2 ( $K_{T1}=892.9$ y $K_{T2}=496.1$ , ton/cm)	18	1.78	1.78	1.706	3.068	1.0	0.56	0.56
	407	1.73	1.70	11.534	20.326	1.0	0.57	
	3,004	1.48	1.30	66.040	104.628	1.1	0.63	
	8,100	1.15	0.89	136.817	191.675	1.3	0.71	
152.4 ( $K_{T1}=3,571.6$ y $K_{T2}=1,984.2$ , ton/cm)	35	1.78	1.78	0.801	1.442	1.0	0.56	0.56
	813	1.76	1.74	5.794	10.319	1.0	0.56	
	6,008	1.62	1.50	36.604	60.386	1.1	0.61	
	16,200	1.40	1.19	83.177	127.607	1.2	0.65	
228.6 ( $K_{T1}=8,929.0$ y $K_{T2}=4,960.5$ , ton/cm)	53	1.78	1.78	0.481	0.866	1.0	0.56	0.56
	1,220	1.77	1.76	3.498	6.252	1.0	0.56	
	9,012	1.69	1.60	22.150	38.640	1.1	0.57	
	24,300	1.53	1.37	54.646	88.311	1.1	0.62	

TABLA 5.11 EPECTO DEL CAMBIO BRUSCO DEL TIPO DE TERRENO

Sismo 1 (Veloc.1,m/seg)	Sismo 2 (Veloc.2,m/seg)	Factor de amplificación	
		Método de juntas Friccionantes	Método Cuasiestático
Centro Lago A+B (35)	Sosa Texcoco (35)	2.52	2.53
Sosa Texcoco (35)	Centro Lago A+B (35)	1.98	---
Sosa Texcoco (35)	Alberca O. (170)	3.01	---
Alberca O. (170)	Sosa Texcoco (35)	2.12	---
Sosa Texcoco (35)	Sosa Texcoco (410)	1.00	1.00
Sosa Texcoco (410)	Sosa Texcoco (35)	1.00	1.00
Sosa Texcoco (35)	Sosa Texcoco (170)	1.00	1.00
Sosa Texcoco (170)	Sosa Texcoco (35)	1.00	1.00
Promedio		1.70	

TABLA 5.12 COMPARACION DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON LOS METODOS CUASIESTATICO  
 Y DE JUNTAS FRICCIONANTES. REGISTRO DE SOSA TEXCOCO N00E,  $v_s = 35$  m/seg

Diámetro, cm	Rigidez del tubo, kg/cm	Rigidez del suelo, kg/cm/cm	Desplazamiento relativo en juntas, cm		Deformación <sub>s</sub> unitaria $\times 10^5$	
			Cuasiestático	Juntas friccionantes	Cuasiestático	Juntas friccionantes
76.2	892,898	18	1.52	1.78	1.24	1.71
		407	1.74	1.73	5.09	11.53
		3,004	1.65	1.48	28.04	66.04
		8,100	1.47	1.15	65.79	136.82
152.4	3,571,594	35	1.66	1.78	0.31	0.80
		813	1.77	1.76	2.19	5.79
		6,008	1.71	1.62	14.20	36.60
		16,200	1.62	1.40	35.68	83.18
228.6	8,928,984	53	1.54	1.78	0.35	0.48
		1,220	1.76	1.77	1.52	3.50
		9,012	1.74	1.69	8.84	22.15
		24,300	1.68	1.53	22.42	54.65

TABLA 5.13 DESPLAZAMIENTOS RELATIVOS Y DISTORCIONES UNITARIAS OBTENIDOS PARA TUNOS DE 157.4 cm DE DIAMETRO Y SUELO TIPO 3.

S I S T E M A	Característico		Fricción		$\frac{d_0}{d_1}$	Simplificado d cm	Directo d' cm	$\frac{d_0}{d}$
	$d_1$ cm	$\epsilon \times 10^{-4}$	$d_0$ cm	$\epsilon \times 10^{-4}$				
Suelo blando. Velocidad aparente de propagación = 35 m/seg								
Sosa Texcoco								
H00E	4.34	3.60	4.10	4.27	0.94	4.69	3.13	0.87
H90W	5.23	4.37	4.97	11.25	0.94	5.74	3.74	0.87
Lotería Nacional								
H00E	4.84	4.00	4.55	10.20	0.94	5.32	2.91	0.84
H90W	5.70	4.33	4.98	11.04	0.94	5.70	2.70	0.87
Centro Lago A+B								
H00E	5.71	4.60	5.37	11.63	0.94	6.08	4.45	0.88
H90W	6.09	4.92	5.65	12.44	0.94	6.43	4.02	0.88
Alberca Olímpica								
H90W	4.54	3.77	4.27	9.71	0.94	5.11	3.27	0.84
Atlixpán SSt.								
H00E	6.17	5.08	5.80	13.08	0.94	6.61	5.12	0.88
Suelo blando. Velocidad aparente de propagación = 170 m/seg								
Sosa Texcoco								
H00E	0.95	0.77	0.89	2.06	0.94	0.97	0.61	0.92
H90W	1.15	0.93	1.08	2.49	0.94	1.18	0.77	0.92
Lotería Nacional								
H00E	1.05	0.85	0.99	2.34	0.94	1.09	0.60	0.91
H90W	1.14	0.91	1.07	2.50	0.94	1.17	0.56	0.91
Centro Lago A+B								
H00E	1.20	0.96	1.13	2.53	0.94	1.25	0.92	0.90
H90W	1.30	1.05	1.22	2.77	0.94	1.32	0.83	0.92
Alberca Olímpica								
H90W	0.99	0.80	0.93	2.20	0.94	1.02	0.67	0.91
Atlixpán SSt.								
H00E	1.34	1.07	1.26	2.94	0.94	1.36	1.05	0.93
Suelo blando. Velocidad aparente de propagación = 410 m/seg								
Sosa Texcoco								
H00E	0.40	0.32	0.37	0.93	0.93	0.40	0.27	0.93
H90W	0.48	0.38	0.45	1.10	0.93	0.49	0.32	0.92
Lotería Nacional								
H00E	0.45	0.35	0.42	1.08	0.93	0.45	0.25	0.93
H90W	0.48	0.38	0.44	1.17	0.92	0.49	0.23	0.90
Centro Lago A+B								
H00E	0.50	0.40	0.47	1.15	0.93	0.52	0.38	0.90
H90W	0.55	0.43	0.51	1.24	0.93	0.55	0.34	0.93
Alberca Olímpica								
H90W	0.42	0.33	0.39	1.02	0.93	0.42	0.28	0.93
Atlixpán SSt.								
H00E	0.56	0.44	0.52	1.35	0.93	0.56	0.44	0.93
Suelo duro. Velocidad aparente de propagación = 410 m/seg								
C. Universitaria								
H00E	0.28	0.22	0.25	0.88	0.89	0.29	0.18	0.86
Hospital ABC								
H00E	0.28	0.22	0.23	1.22	0.82	0.29	0.16	0.79
Suelo duro. Velocidad aparente de propagación = 755 m/seg								
C. Universitaria								
H00E	0.15	0.12	0.13	0.62	0.87	0.16	0.10	0.81
Hospital ABC								
H00E	0.15	0.12	0.11	0.97	0.71	0.15	0.09	0.71

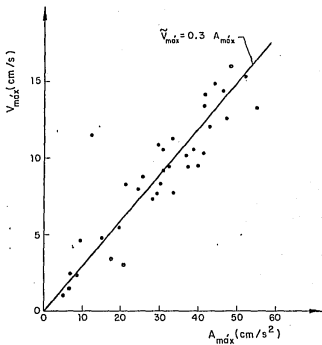


Fig 3.1 Relación lineal entre  $V_{máx}$  y  $A_{máx}$ . Suelo blando

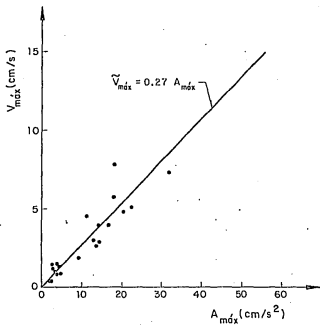


Fig 3.2 Relación lineal entre  $V_{máx}$  y  $A_{máx}$ . Suelo duro

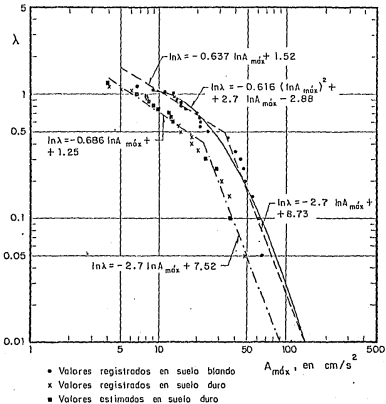


Fig 3.3 Frecuencia de ocurrencia de  $A_{m\acute{o}x}$ . Suelos blando y duro

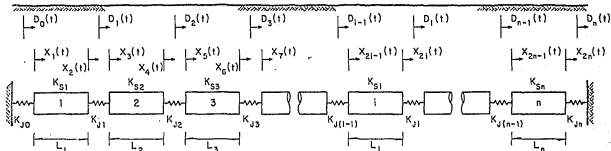
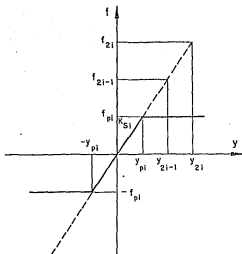


Fig 4.1 Idealización de la tubería en el método cuasiestático

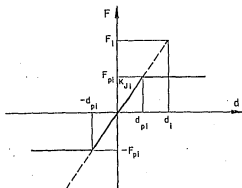




$$y_{2l-1} = x_{2l-1}(t) - D_{l-1}(t)$$

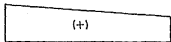
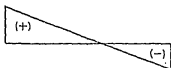
$$y_{2l} = x_{2l}(t) - D_l(t)$$

Fig 4.2 Deformación elastoplástica del suelo

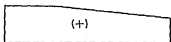


$$d_l = x_{2l+1}(t) - x_{2l}(t)$$

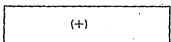
Fig 4.3 Deformación elastoplástica de las juntas



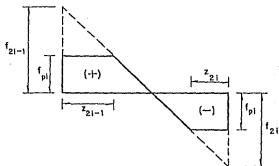
a) Distribuciones elásticas



b) Distribución plástica en un extremo



c) Distribución plástica total



d) Distribución plástica en ambos extremos

Fig 4.4 Distribuciones posibles de la fuerza del suelo

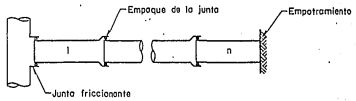
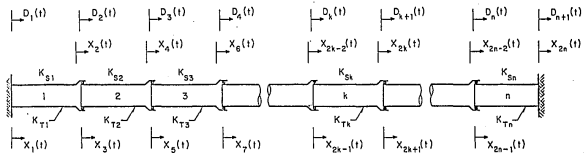
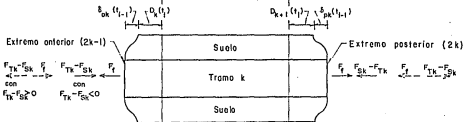
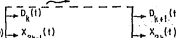


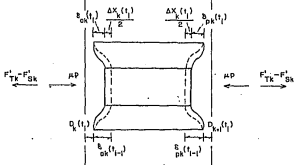
Fig 4.5 Idealización de la tubería en el método de juntas friccionantes

Sismo

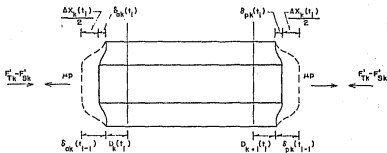
Posición original del tubo  
( $t = \text{tiempo en que } D_k = D_{k+1} = 0$ )



a) Deformación del tubo si  $|F_{Tk} - F_{Sk}| \leq \mu p$



b) Deformación del tubo si  $|F_{Tk} - F_{Sk}| > \mu p$  y  $F_{Tk} - F_{Sk} > 0$



c) Deformación del tubo si  $|F_{Tk} - F_{Sk}| > \mu p$  y  $F_{Tk} - F_{Sk} < 0$

Fig 4.6 Alternativas de deformación de un tramo intermedio

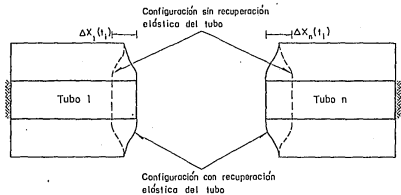


Fig 4.7 Alternativas de deformación de los tramos extremos empotrados

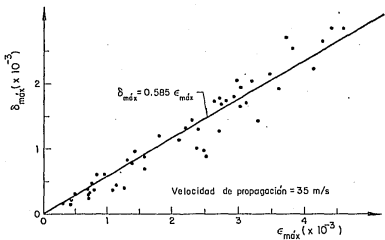


Fig 5.1 Relación lineal entre  $\delta_{\text{máx}}$  y  $\epsilon_{\text{máx}}$  (suelo blando)

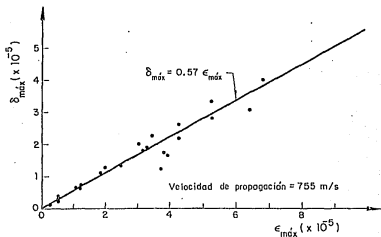


Fig 5.2 Relación lineal entre  $\delta_{\text{máx}}$  y  $\epsilon_{\text{máx}}$  (suelo duro)

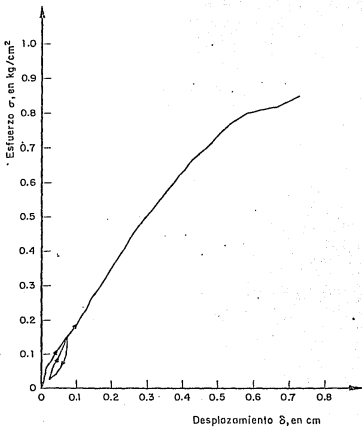


Fig 5.3 Gráfica esfuerzo vertical-desplazamiento del subsuelo, obtenida mediante la prueba de carga

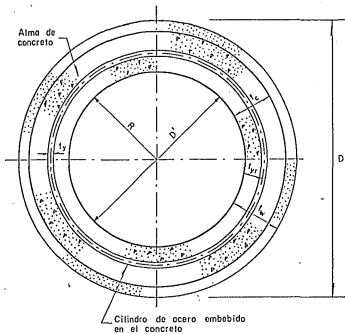


Fig 5.4 Sección transversal del tubo



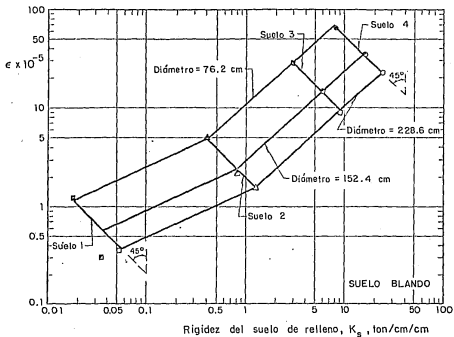


Fig 5.5 Variación de la deformación unitaria con la rigidez del suelo. Método cuasiestático (registro Sosa Texcoco, NOOE,  $v_s = 35$  m/s)

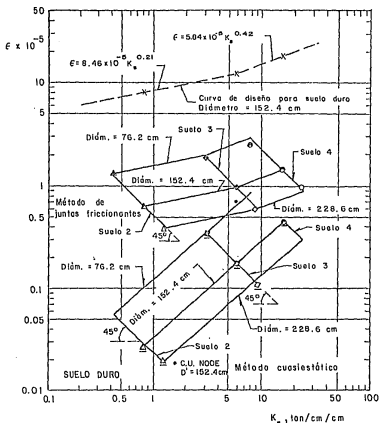


Fig 5.6 Variación de la deformación unitaria del tubo con la rigidez del suelo. Métodos de juntas friccionadas y cuasiestático (registro Hospital ABC, NOOE,  $v_s = 410 \text{ m/s}$ )

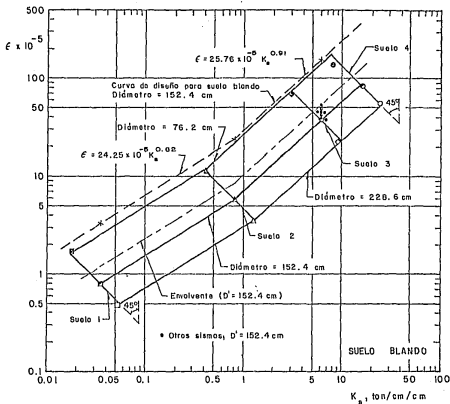


Fig 5.7 Variación de la deformación unitaria del tubo con la rigidez del suelo. Método de juntas friccionadas (registro Sosa Texcoco, NOOE,  $v_s = 35$  m/s)

$\frac{d_{488}}{d_{L2}}$   
 $\delta$   
 $\frac{f_{488}}{f_{L2}}$

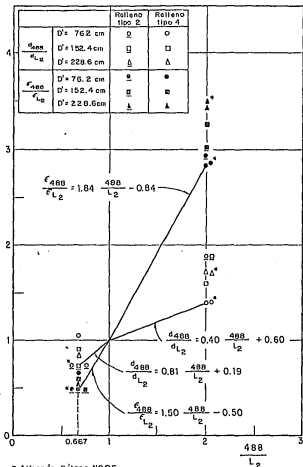


Fig 5.8a Efecto de la longitud de los tramos. Tubería en terreno blando. Método de juntas friccionantes.

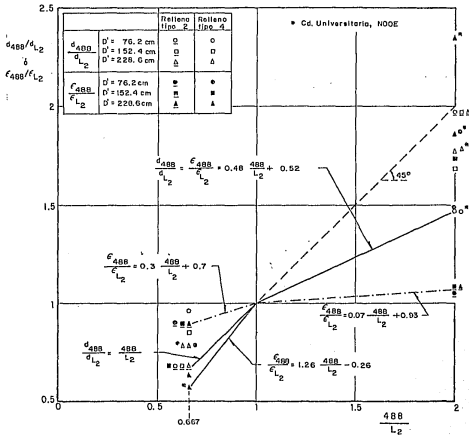


Fig 5.8b. Efecto de la longitud de los tramos. Tubería en terreno duro. Método de juntas friccionantes

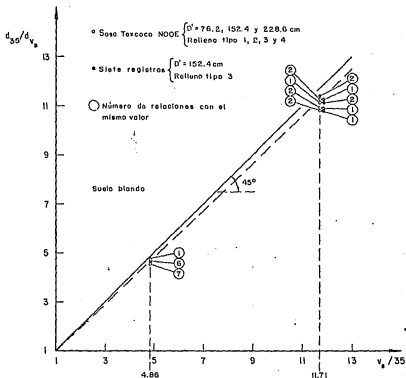


Fig 5.9a Variación de los desplazamientos relativos con la velocidad aparente de propagación del sismo. Método de juntas friccionantes

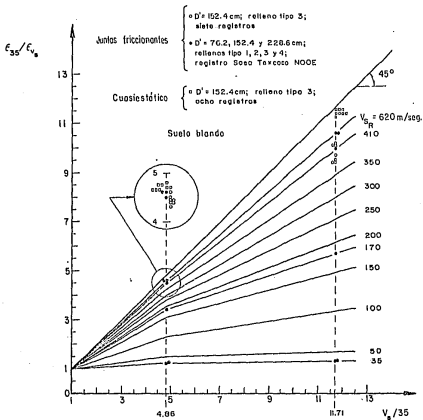


Fig 5.9b Variación de las deformaciones unitarias con la velocidad aparente de propagación del sismo. Métodos de juntas friccionantes y cuasiestático.

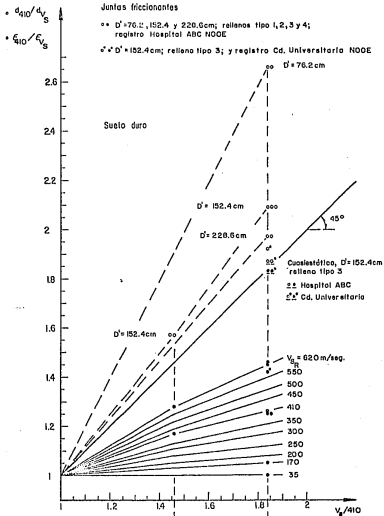


Fig. 5.10 Variación de los desplazamientos relativos y las deformaciones unitarias con la velocidad aparente de propagación del sismo. Método de juntas friccionantes y cuasiesférico.



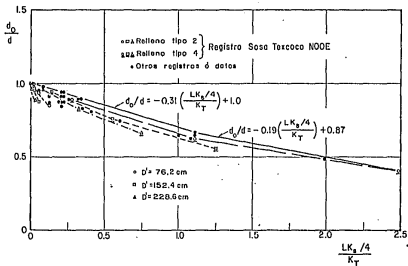


Fig 5.11a. Relación de desplazamientos relativos obtenidos con los métodos simplificado y de juntas friccionantes. Terreno blando

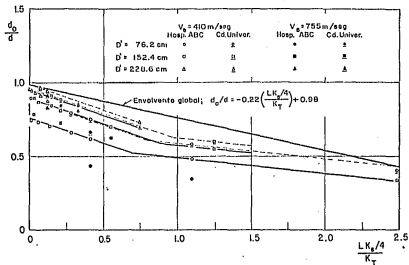


Fig 5.11b. Relación de desplazamientos relativos obtenidos con los métodos simplificado y de juntas friccionantes. Terreno duro

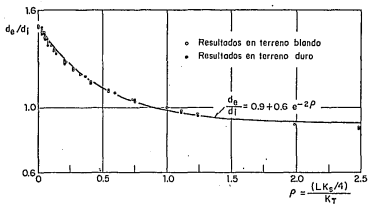


Fig 5.12 Efecto del tipo de apoyo en los desplazamientos relativos entre juntas, con el método de juntas friccionantes. Tubería en terrenos blando y duro.

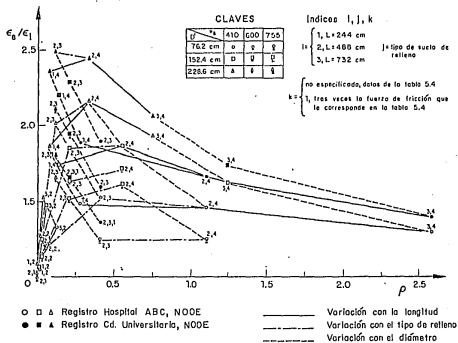


Fig. 5.14 Efecto del tipo de apoyo en las deformaciones unitarias del tubo, con el método de juntas friccionantes. Tubería en terreno duro.

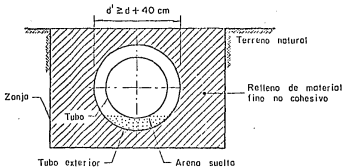


Fig 7.1 Colocación del tubo dentro de otro de mayor diámetro para cruzar una falla geológica activa

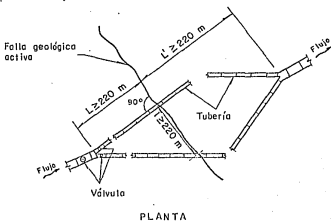


Fig 7.2 Cruce de una falla geológica con una bifurcación

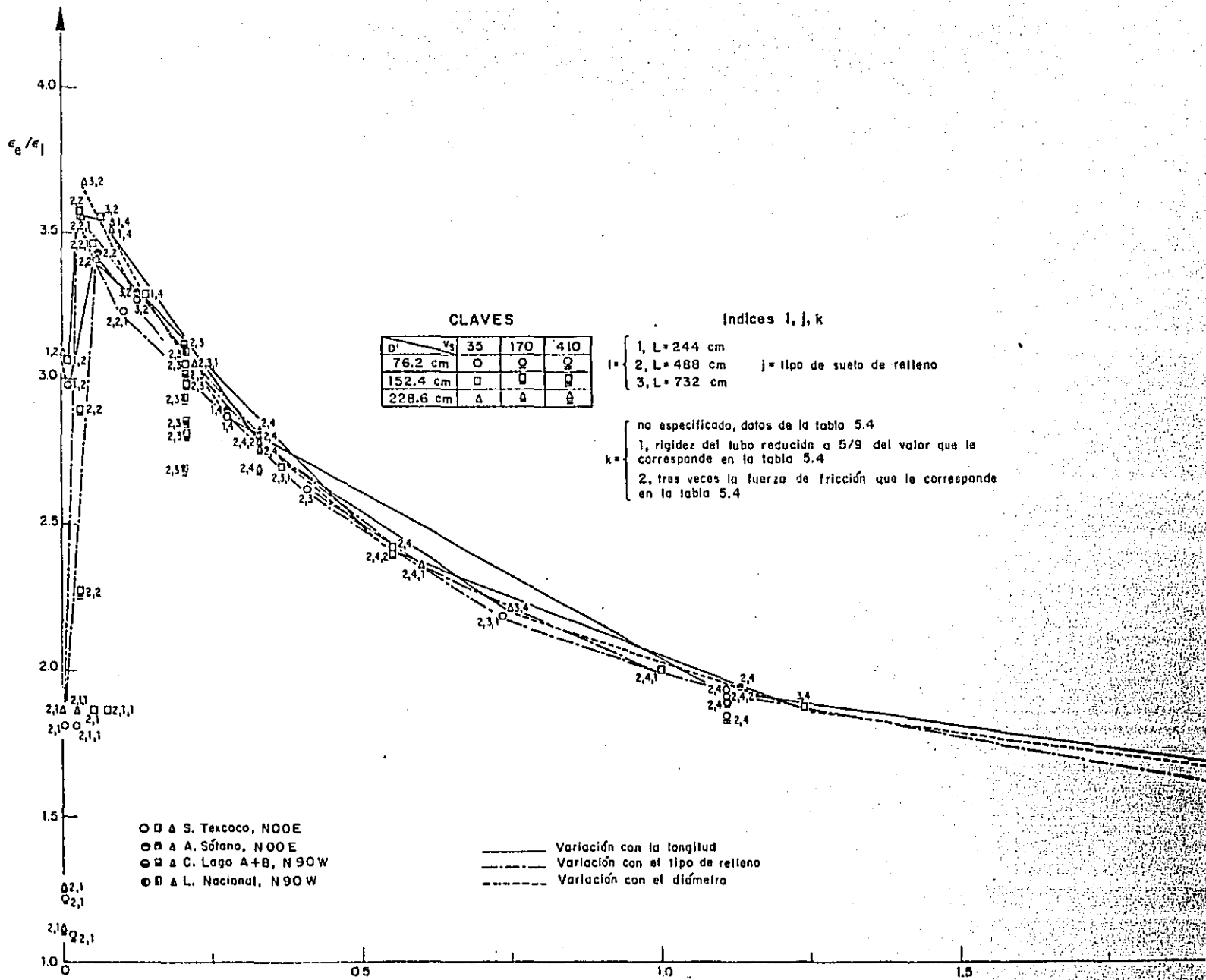


Fig 5.13 Efecto del tipo de apoyo en las deformaciones unitarias del tubo, con el método de juntas friccionadas.

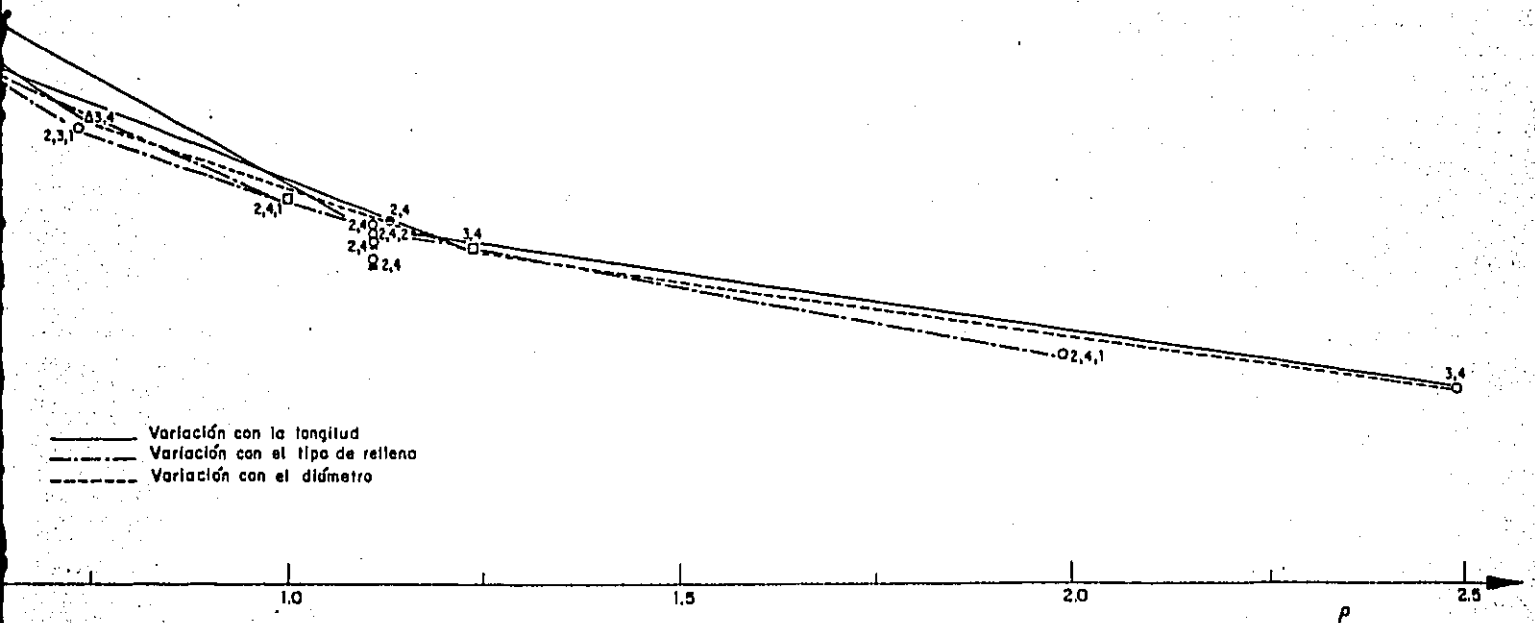
CLAVES

i	35	170	410
h	○	□	△
m	△	△	△

Indices i, j, k

i = { 1, L=244 cm  
2, L=488 cm  
3, L=732 cm } j = tipo de sueta de relleno

k = { no especificado, datos de la tabla 5.4  
1, rigidez del tubo reducida a 5/9 del valor que le corresponde en la tabla 5.4  
2, tres veces la fuerza de fricción que le corresponde en la tabla 5.4



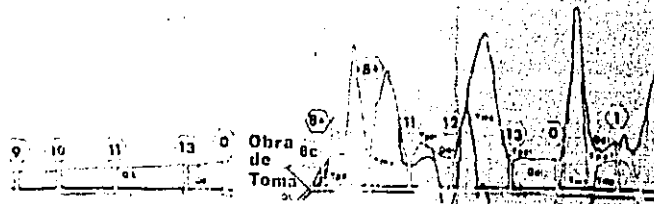
en las deformaciones unitarias del tubo, con el método de juntas friccionantes. Tubería en terreno blando

W. 30

W. 15

E. W. 0

E. 15



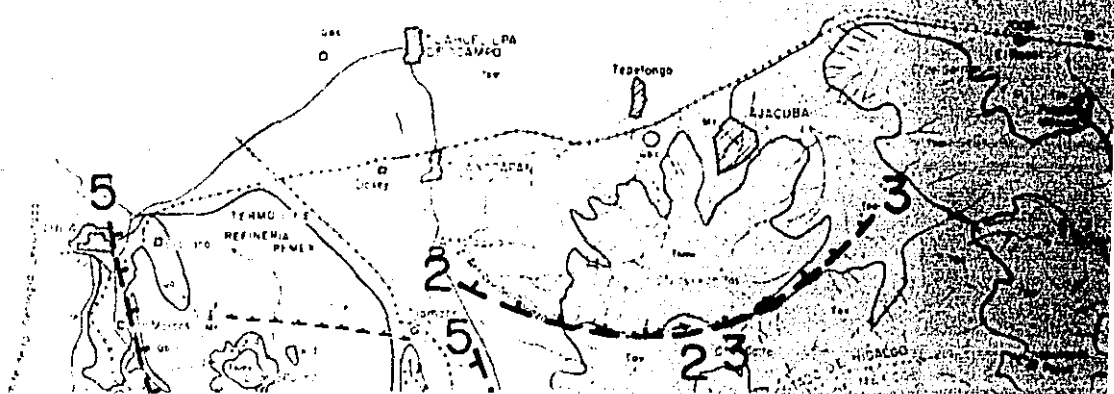
Int. Central — Int. Oriente

# FRACTURAMIENTO TE

N. 75

## SIGNOS CONVENCIONALES

- Linea de parte aguas
- Contacto geológico
- Firma



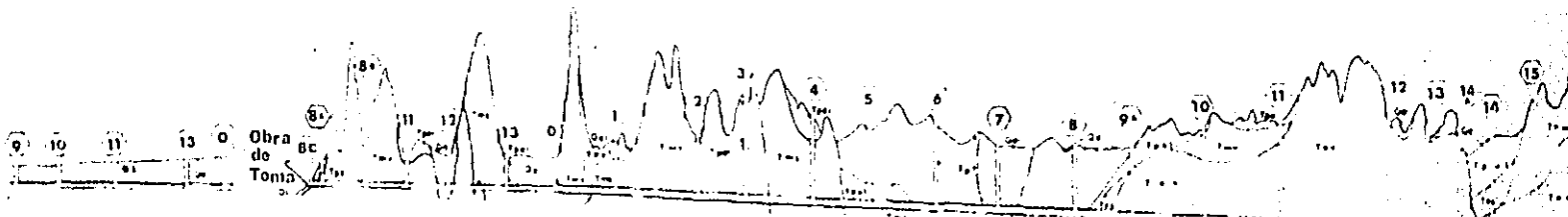


EW-0

E-15

E-30

E-45

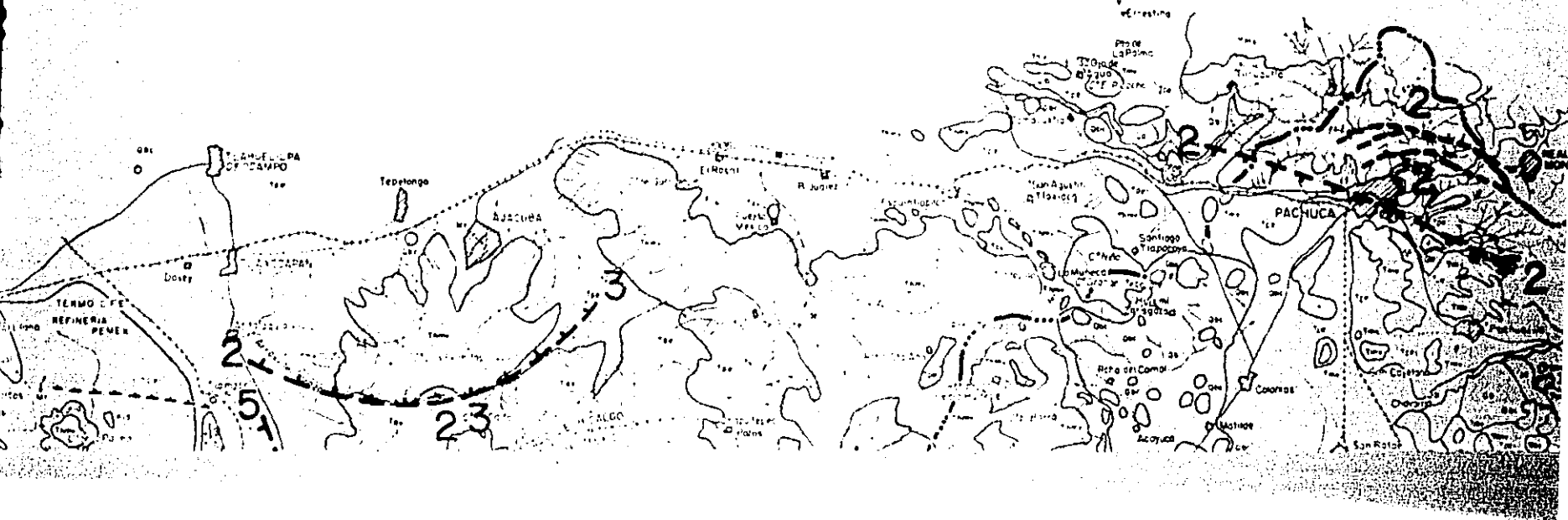


Int. Central

Int. Oriente

Emisor Central

# ACTURAMIENTO TECTONICO DE LA



E-60

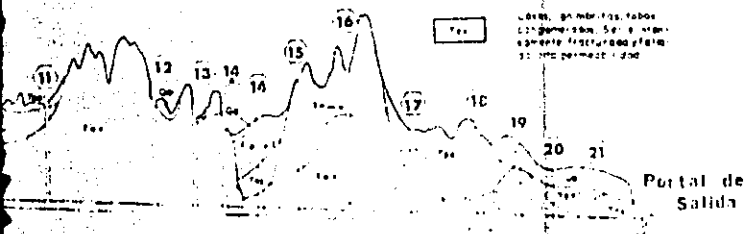
E-60



Tras las montañas con-  
panden Sierra Huachalanga

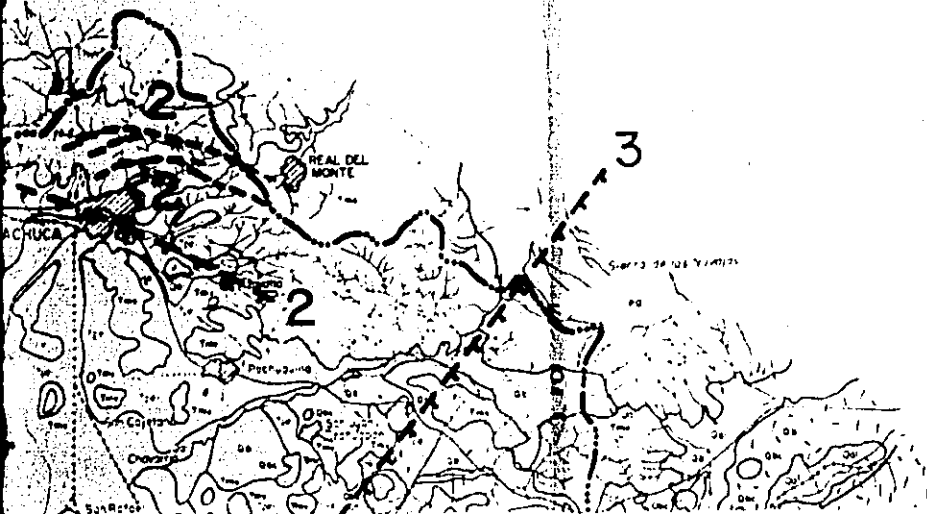


Los ríos, quebradas, rios,  
córcheros, etc. y otros  
elementos frías de agua  
se ven por el lado



# DE LA CUENCA DE MEXICO

N-90



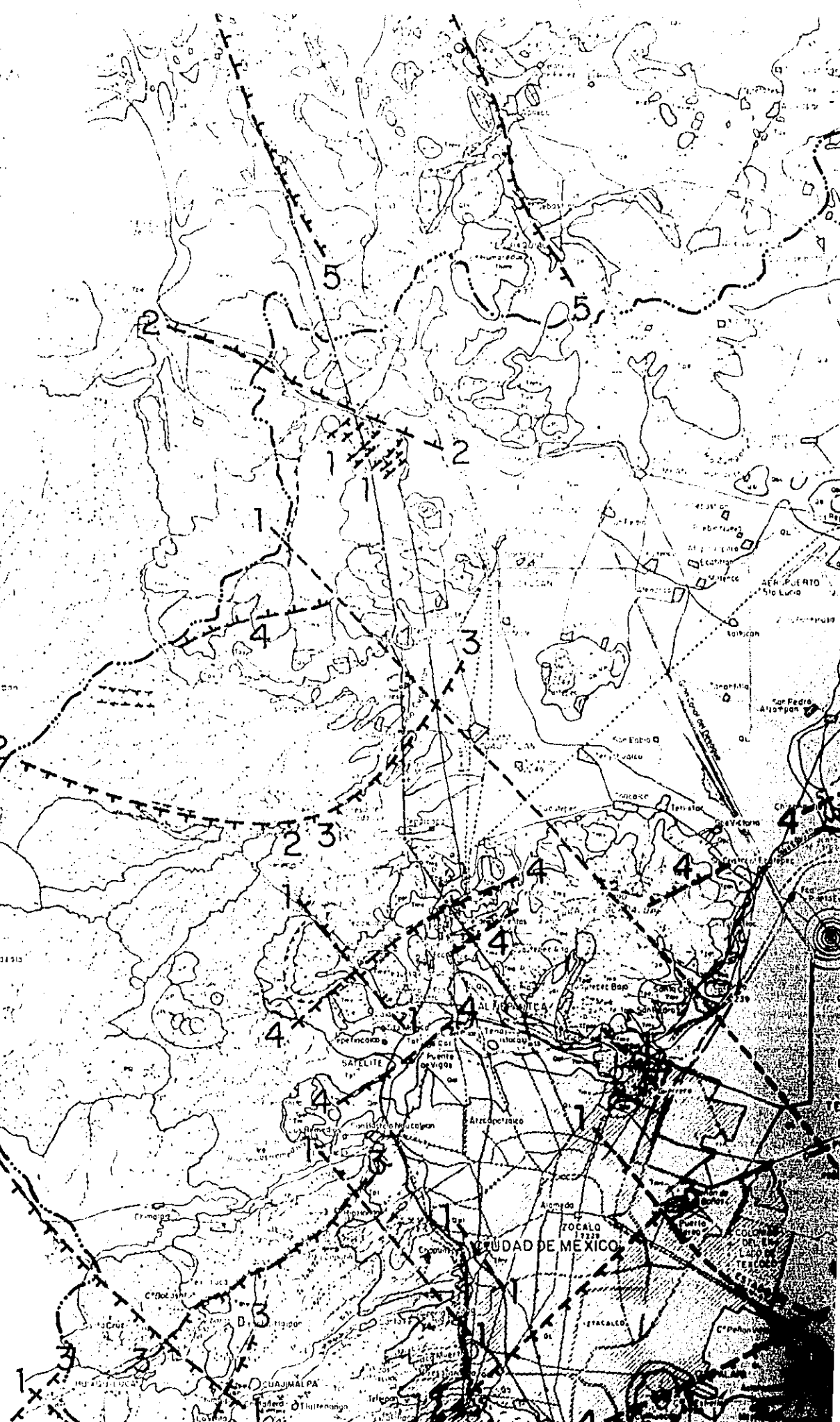
1:75

Legend  
1. Contour lines  
2. Dashed lines  
3. Dotted lines  
4. Solid lines  
5. Thick dashed lines

N 30

N 15

N 5 0







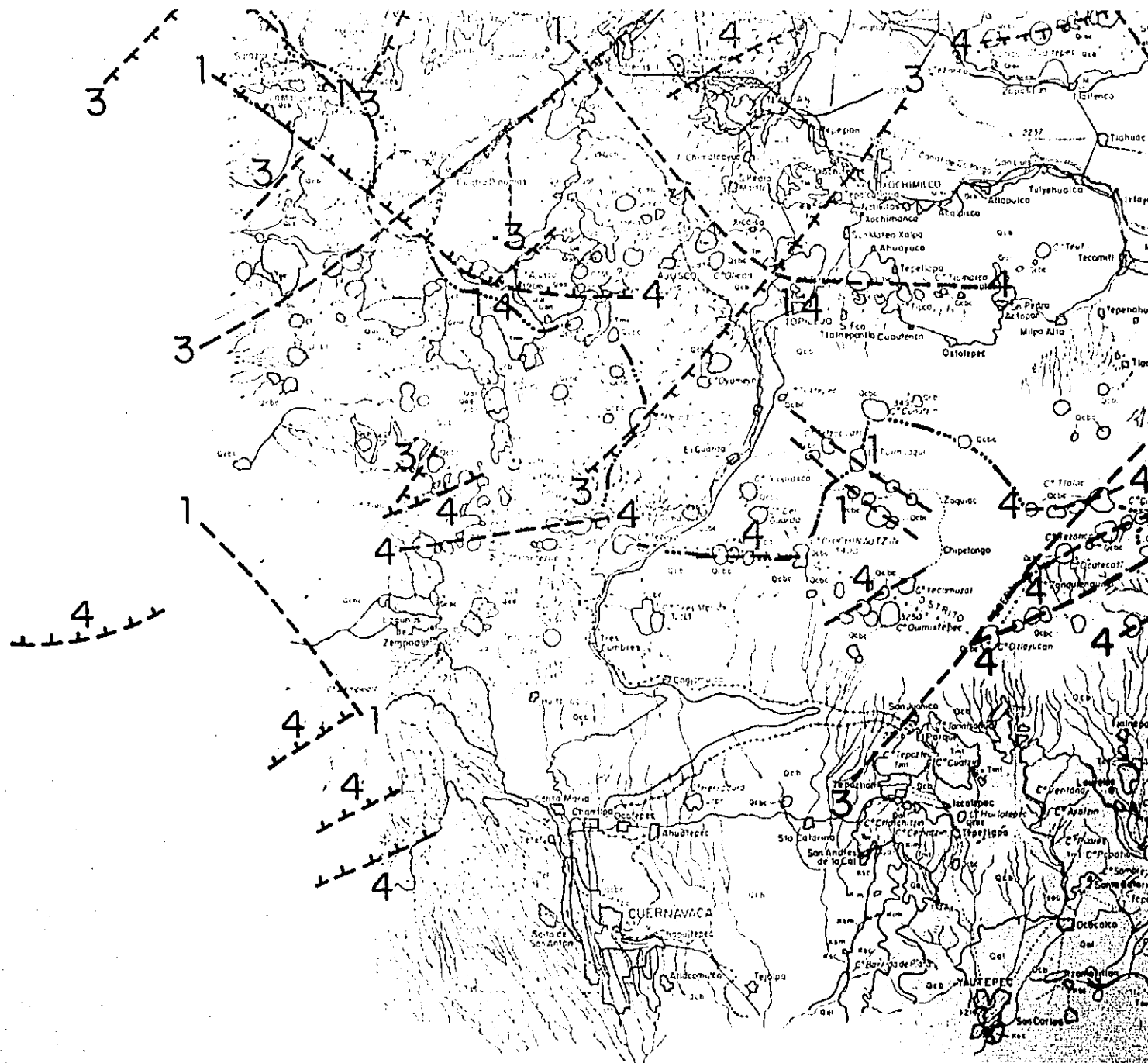
S 15

S 30

S 45

S 60

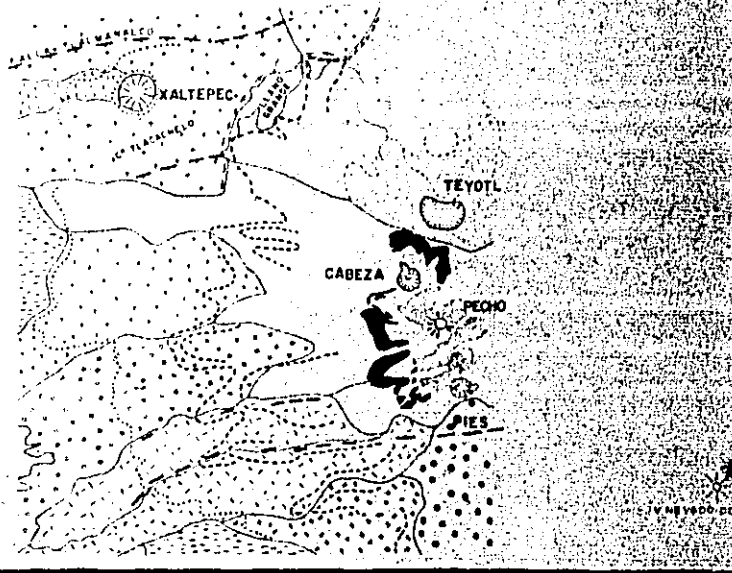
S 75



GLACIACIONES DEL  
FLANCO PONIENTE DEL  
IZTACCHUATL.

RECONSTRUCCION DEL  
SEGUNDA ETAPA (SEGUN  
LORENZO 1964)

- MORRIS
- LÍMITE DE LA GLACIACION
- LÍMITE DE LA GLACIACION
- LÍMITE DE LA GLACIACION



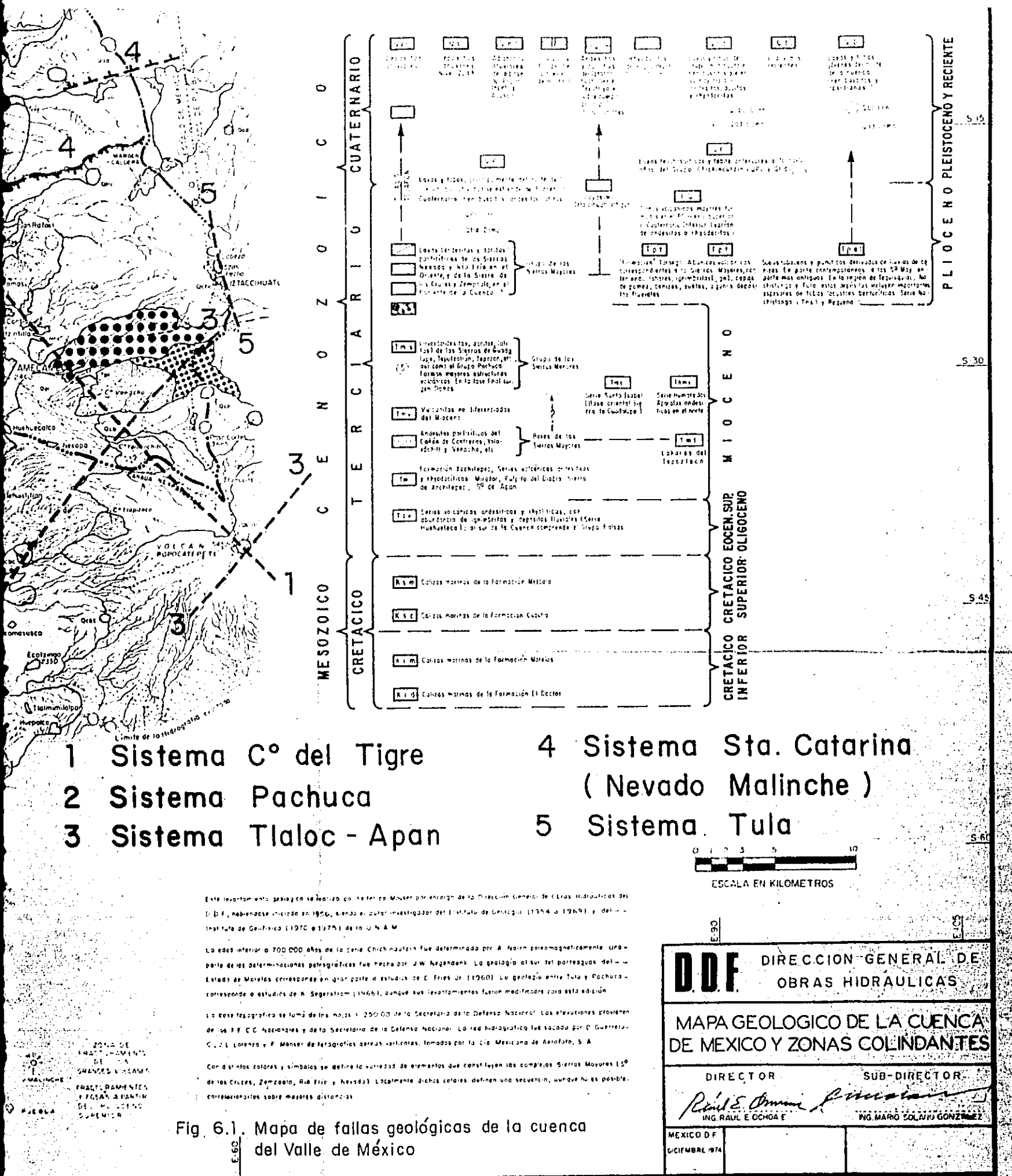
FORMA:  
**F. Kooser**  
Ing. Federico Mooser

DISEÑO:  
**R. Galicia**  
Rodrigo Galicia Segura

92









## APENDICE A. INSTRUCTIVO DEL PROGRAMA, LISTADO Y EJEMPLO

Este programa opera con dos archivos:

- a) El archivo 5 contiene los datos necesarios para el programa.
- b) En el archivo 6 se imprimen los resultados del programa.

### A.1 Datos de la excitación, del tubo y suelo

#### Tarjeta 1

Contenido: NS, IAI, IAF, FF

NS = número de segmentos de la tubería

IAI = indicador de la condición de apoyo del primer tramo (1 si está empotrado; 0 si tiene junta flexible)

IAF = indicador de la condición de apoyo del último tramo (el mismo criterio que para IAI)

FF = fuerza de fricción entre tubo y empaque

Formato: (3I5, F15.5)

#### Tarjeta 2

Contenido: REG, COM, NP, DT, TI, TF, FESC

REG = nombre del registro

COM = componente del sismo

NP = número de puntos de la historia de desplazamientos del sismo

- DT = intervalo de digitación de la historia de desplazamientos
- TI = tiempo al inicio del sismo, para el cual su desplazamiento se aproxima a cero
- TF = tiempo al final del sismo, para el cual su desplazamiento se aproxima a cero
- FESC = factor de escala para amplificar o reducir los desplazamientos del sismo, si se desea

Formato: (3A6, 2A6, I10, 4F10.5)

#### Primer bloque de tarjetas

Contenido: Historia de desplazamientos del sismo

Formato: (8F10.5)

El número de tarjetas debe ser tal que contenga los NP puntos de que está compuesta la historia de desplazamientos.

#### Segundo bloque de tarjetas

El número de tarjetas de este bloque debe ser igual a NS; el contenido de la tarjeta  $i$ -ésima se refiere al tubo  $i$ -ésimo.

Contenido: RT, RS, LON, VEL

RT = rigidez del tubo

RS = rigidez del suelo que rodea al tubo, por unidad de longitud

LON = longitud del tubo

VEL = velocidad de propagación de las ondas sísmicas en el suelo de desplante del tubo

Formato: (4E15.5)

## A.2 Listado del programa de computadora

ANSISTURENT.

C\*\*\*\*\*

C  
C PROGRAMA PARA EL ANALISIS SISMICO DE TUBERIAS ENTERRADAS CON  
C EL METODO DE JUNTAS FRICCIONANTES

C

REAL LON  
COMMON A(2000)  
DIMENSION D(3000),REG(3),COM(2) ;

C

NTOT1=3000  
NTOT2=2000  
READ(5,1000)MS,IAI,IAF,FF  
READ(5,1100) (REG(L),L=1,?), (COM(M),M=1,2),NP,DT,TI,YF,FESC  
IF(NP.GT.NTOT1) GO TO 10

MS1=MS-1

MS2=?+MS

NJ=NS+1

NJ1=NJ+1

NJ2=?+NJ

NJ3=NJ+MS

NJ4=NJ2+MS

NJ5=NJ4+MS

NA=NJ5+MS

N7=NA+MS

NS=?+N7

```

NS=NS+NS2
N10=N9+NJ5
N11=N10+NJ5+4
IF(N1).GT.NTOT2) GO TO 11
READ(5,1200)D
KIC=INT(TI/DT+0.1)
KFC=INT((TF+0.)*DT)/DT+0.1)
IF(KIC.EQ.0) GO TO 12
DO 200 I=1-KIC
200 D(I)=0.
12 IF(KFC.GT.NP) GO TO 13
DO 300 I=KFC.NP
300 D(I)=0.
13 IF(FESC.EQ.1.) GO TO 14
KIC=KIC+1
KFC=KFC-1
DO 400 I=KIC,KFC
400 D(I)=FESC*D(I)
14 WRITE(6,5000)NS,NJ,IA1,IAP,FF,(REG(L),L=1,3),(COM(M),M=1,2),DT,TI,
*TF,FESC
CALL INICIA(A(1),A(NJ),A(NJ3),A(NJ4),A(NJ5),A(N6),A(N7),A(N8),
*A(N9),A(N10),NS,NS2,NJ,NJ1,NJ2,NJ5,TF,DT)
IDT=-1
16 IDT=IDT+1
TJ=TI+IDT*DT
IF(TJ.GT.TF) GO TO 15
CALL INTER(A(N6),A(N7),D,NJ,NJ2,TJ,DT)
CALL DESPL(A(1),A(NJ),A(NJ5),A(N7),A(N9),A(N9),NS,NS2,NJ1,NJ1,NJ3,
*NJ2,NJ5,IA1,IAP,FF)
CALL DERE(A(N7),A(N8),A(N9),NS,NS1,NS2,NJ,NJ1,NJ2,*NJ3,NJ4,NJ5,IA1,
*IAF)
CALL ALKA(A(N9),A(N10),NJ,NJ1,NJ2,NJ5,IA1,IAP,TI,TJ)
GO TO 16
15 CALL RESU(TI,REG(1),A(N9),A(N9),NS,NJ1,NJ2,NJ5)

```

```

10 WRITE(6,/) "INCREMENTA LAS DIMENSIONES DEL ARREGLO D"
STOP
11 WRITE(6,/) "INCREMENTA LAS DIMENSIONES DEL ARREGLO A"
STOP
1000 FORMAT(315,F15.5)
1100 FORMAT(3A6,2A6,110,4F10.5)
1200 FORMAT(8F10.5)
5000 FORMAT("1",77/"0", 29X,49(" "), 2(/, 30X, " ", 47X, " ", /, 30X, " ", 3X,
+"DATOS GENERALES DE LA TUBERIA:", 14X, " ", /, 30X, " ", 47X, " ", /, 30X,
+" ", 3X, "NUMERO DE SEGMENTOS", 122, 3X, " ", /, 30X, " ", 47X, " ", /, 30X,
+" ", 3X, "NUMERO DE JUNTAS", 125, 3X, " ", /, 30X, " ", 47X, " ", /, 30X, " ",
+3X, "CONDICION DE APOYO INICIAL", 115, 3X, " ", /, 30X, " ", 47X, " ", /,
+30X, " ", 3X, "CONDICION DE APOYO FINAL", 117, 3X, " ", /, 30X, " ", 47X,
+" ", /, 30X, " ", 3X, "FUERZA DE FRICCION", F03, 0, 3X, " ", /, 30X, " ",
+47X, " ", /, 30X, " ", 3X, "DATOS DEL SISMO:", 28X, " ", /, 30X, " ", 47X,
+" ", /, 30X, " ", 3X, "REGISTRO", 15X, 3A6, 3X, " ", /, 30X, " ", 47X, " ", /,
+30X, " ", 3X, "COMPONENTE", 19X, 3A6, 3X, " ", /, 30X, " ", 47X, " ", /, 30X,
+" ", 3X, "INTERVALO DE DIGITACION", F18, 2, 3X, " ", /, 30X, " ", 47X, " ", /,
+30X, " ", 3X, "TIEMPO INICIAL", F27, 2, 3X, " ", /, 30X, " ", 47X, " ", /, 30X,
+" ", 3X, "TIEMPO FINAL", F29, 2, 3X, " ", /, 30X, " ", 47X, " ", /, 30X, " ",
+3X, "FACTOR DE ESCALA", F25, 2, 3X, " ", /, 30X, " ", 47X, " ", /, 30X,
+49(" "))
END

```

\*\*\*\*\*

```

C
C SUBROUTINA QUE LEE LAS PROPIEDADES DEL TUBO Y DEL SUELO, CALCULA LA
C SUMA DE RIGIDECES DE AMBOS, Y DETERMINA EL TIEMPO DE RETRASO
C
SUBROUTINE TIMEA(RT, PS, LON, VEL, SR, SUM, DS, X, S, SM, NS, NS2, NJ, NJ1, NJ2,
+ NJ5, TF, DT)
C
REAL LON
DIMENS(2) N, DT(NS), NS(NS), LON(NS), VEL(NS), SR(NS), SUM(NJ), DS(NS2),
+ X(NS2), S(NS2), SM(NS2),

```

C

```
SUA=0.
SUM(1)=0.
DO 100 I=1,NS
100 READ(5,1000)RT(I),RS(I),LON(I),VEL(I)
WRITE(6,5000)
DO 200 I=1,NS
WRITE(6,5100)I,RT(I),LON(I),I,RS(I),VEL(I)
RS(I)=RS(I)*LON(I)
SR(I)=RT(I)+RS(I)
TR=LON(I)/VEL(I)
SUA=SUA+TR
SUM(I+1)=SUA
200 CONTINUE
DO 300 I=NUJ1,NUJ2
300 DS(I)=0.
DO 400 I=1,NS2
400 X(I)=0.
DO 500 J=1,NUJ
500 S(I)=0.
DO 600 I=1,NUJ5
DO 600 J=1,4
600 SM(I,J)=0.
TF=TF+(AINT(SUM(NUJ)/DT)+1.)*DT
RETURN
1000 FORMAT(4E15,5)
5000 FORMAT("1",13X,28(" "),22X,29(" "),/,13X,"*",26X,"*",22X,"*",27X,
1(" ",/,13X,"*",3X,"PROPIEDADES DEL TUBO",3X,"*",22X,"*",3X,"SECCIONES
2ADES DEL SUELO",3X,"*",/,13X,"*",26X,"*",22X,"*",27X,"*",/,13X,28(
3" "),22X,29(" "),3(/),13X,"TUBO",4X,"RIGIDEZ",5X,"LONGITUD",16X,
4"SECCION",4X,"RIGIDEZ",4X,"VEL. DE PROP.",2(/))
5100 FORMAT(9X,17,2(3X,F10,5),15X,17,2(5X,F10,5))
END
```

C\*\*\*\*\*

C  
C SUBROUTINA PARA CALCULAR LOS DESPLAZAMIENTOS DEL SUELO EN EL SISTEMA  
C DE REFERENCIA ORIGINAL

C  
C SUBROUTINE INTER(SUM,DS,D,NJ,NJ2,TJ,DT)

C  
C DIMENSION SUM(NJ),DS(NJ2)  
C DIMENSION D(3000)

C  
C EPS=0.000000001  
C DO 100 I=1,NJ  
100 DS(I)=0.  
C DO 200 I=1,NJ  
C ST=TJ+DT-SUM(I)  
C IF(ST.LE.EPS) GO TO 200  
C ST1=(ST-DT)/DT  
C IF(ST1.LT.0.) GO TO 10  
C ST2=ST1  
C F=AINT(ST1)+1.-ST2  
C N=INT(ST2)  
C DS(1)=(D(N+1)-D(N+2))\*F+D(N+2)  
C GO TO 200  
C 10 DS(1)=(1.+ST1)\*D(1)  
C 200 CONTINUE  
C RETURN  
C END

C\*\*\*\*\*

C  
C SUBROUTINA QUE CALCULA LOS DESPLAZAMIENTOS DE LOS EXTREMOS DEL TURRO

C  
C SUBROUTINE DESPL(RT,RS,SP,DS,Y,Z,NS,NS2,NJ,NJ1,NJ2,NJ3,NJ4,TJ,DT,  
C +,FF)

DIMENSION RT(NS),FS(NS),SR(NS),DS(NJ2),X(NS2),S(NS5)

LOGICAL L1,L2,L3,L4

Y=DS(1)-DS(NJ1)

DO 100 I=1,NS

I1=NJ+I

I2=I+1

I3=NJ+I2

I4=NJ3+I

L1=DS(I).EQ.0..AND.DS(I1).EQ.0.

L2=DS(I2).EQ.0..AND.DS(I3).EQ.0.

L3=I.EQ.1..AND.IA1.EQ.1

L4=1.EQ.NS..AND.IAF.EQ.1

IF(L1..AND.L2) GO TO 100

K=2+I

J=I-1

X(J)=Y+X(J)

Y=DS(I2)-DS(I3)

X(K)=Y+X(K)

DS=Y(J)-X(K)

IF(L3) GO TO 10

IF(L4) GO TO 11

FE=RT(I)+NS-DS(I)\*S(I4)/4.

FE1=FE

FP=ABS(FE)

IF(FP..LE..FF) GO TO 100

DX=(FP-FE)/(RT(I)+RS(I)/8.)

IF(FE1) 12,100,13.

10 X(J)=X(J)-DX/2.

X(K)=X(K)+DX/2.

GO TO 100

12 X(J)=X(J)+DX/2.

Y(K)=X(K)-DX/2.

GO TO 100



```

10 FE=RT(I)+DPS-RS(I)*S(I)/2.
   FE1=FE
   FP=ABS(FE)
   IF(FP,LE,FF) GO TO 100
   DX=(FP-FF)/(RT(I)+RS(I)/2.)
   IF(FF) 14,100,15
15 X(K)=X(K)+DX
   GO TO 100
14 X(K)=X(K)-DX
   GO TO 100
11 FE=RT(I)+DPS+RS(I)*S(I)/2.
   FE1=FE
   FP=ABS(FE)
   IF(FP,LE,FF) GO TO 100
   DX=(FP-FF)/(RT(I)+RS(I)/2.)
   IF(FF) 16,100,17
17 X(J)=X(J)-DX
   GO TO 100
16 X(J)=X(J)+DX
100 CONTINUE
   DO 200 I=1,N,I
200 DS(NJ+I)=DS(I)
   RETURN
   END

```

C\*\*\*\*\*

```

C
C SUBROUTINE PARA CALCULAR LOS DESPLAZAMIENTOS RELATIVOS ENTRE JUNTAS
C Y LOS DESPLAZAMIENTOS RELATIVOS ENTRE TUBO Y SUELO
C
C SUBROUTINE DERE(DS,X,S,NS,NS1,NS2,NJ,NJ1,NJ2,NJ3,NJ4,NJ5,I41,I4F)
C
C DIMENSION DS(NJ2),X(NS2),S(NJ5)
C
C DO 100 I=1,NS

```

```

      J=2*I-2
      S(1)=X(J)-X(J+1)
100  CONTINUE
      DO 200 I=2,NS
      J=2*I-1
      K=I+NJ
      S(K)=X(J)-DS(I)
200  CONTINUE
      IF(1AI.EQ.1) GO TO 10
      S(NJ1)=X(1)-DS(1)
      S(1)=-S(NJ1)
10  DO 300 I=1,NS1
      J=I+1
      K=2*I
      L=I+NJ3
      S(L)=X(K)-DS(J)
300  CONTINUE
      IF(1AF.EQ.1) GO TO 11
      S(NJ4)=X(NS2)-DS(NJ)
      S(NJ)=S(NJ4)
11  DO 400 I=1,NS
      J=I+NJ4
      K=2*I
      S(J)=X(K-1)-X(K)
400  CONTINUE
      RETURN
      END

```

C\*\*\*\*\*

C  
C SUPROUTINA PARA ALMACENAR LOS DESPLAZAMIENTOS RELATIVOS MAXIMOS  
C Y EL TIEMPO EN QUE ESTE SUCEDEO

C

SUBROUTINE ALMA(S,SN,M,I,J1,N,M,MJ5,IAI,IAF,TT,T,1)

C



SMAX=AMAX1(SMAX,SH(I,1))

SMIN=AMIN1(SMIN,SH(I,3))

100 CONTINUE

WRITE(6,5200)SMAX,SMIN

SMAX=0.

SMIN=0.

WRITE(6,5300)

DO 200 I=1,NS

K=NJ+I

WRITE(6,5100)I,(SH(K,J),J=1,4)

SMAX=AMAX1(SMAX,SH(K,1))

SMIN=AMIN1(SMIN,SH(K,3))

200 CONTINUE

WRITE(6,5200)SMAX,SMIN

SMAX=0.

SMIN=0.

WRITE(6,5400)

DO 300 I=1,NS

K=MJ+I

WRITE(6,5100)I,(SH(K,J),J=1,4)

SMAX=AMAX1(SMAX,SH(K,1))

SMIN=AMIN1(SMIN,SH(K,3))

300 CONTINUE

WRITE(6,5200)SMAX,SMIN

SMAX=0.

SMIN=0.

WRITE(6,5500)

DO 400 I=1,NS

K=NJ+I

SH(K,1)=SH(K,1)/LOW(I)

SH(K,3)=SH(K,3)/LOW(I)

WRITE(6,5100)I,(SH(K,J),J=1,4)

SMAX=AMAX1(SMAX,SH(K,1))

```

SMIN=AMIN) (SHIN, SM(K, 3))
400 CONTINUE
WRITE(6, 5700) SMA, SMIN
STOP
5000 FORMAT("J", 32X, 44(" "), /, 33X, " ", 42X, " ", /, 33X, " ", 3X, "DESPLAZAMIE
INTO RELATIVO ENTRE JUNTAS", 3X, " ", /, 33X, " ", 42X, " ", /, 33X, 44(" "),
23(/), 20X, "JUNTA", 8X, "CONTRACCIÓN", 6X, "TIEMPO", 11X, "EXTENSION", 7X,
3"TIEMPO", /)
5100 FORMAT(17X, I6, 2(7X, E15, 8, 5X, F6, 2))
5200 FORMAT(2(/), 37X, 36(" "), /, 37X, " ", 34X, " ", /, 37X, " ", 3X, "VALOR MAX.
1 POS.", E13, 5, 3X, " ", /, 37X, " ", 34X, " ", /, 37X, " ", 3X, "VALOR MAX. NEG
2.", E13, 5, 3X, " ", /, 37X, " ", 34X, " ", /, 37X, 36(" "))
5300 FORMAT("I", 20X, 66(" "), /, 21X, " ", 64X, " ", /, 21X, " ", 3X, "DESPLAZAMIE
INTO RELATIVO ENTRE TUBO Y SUELO. BORDE ANTERIOR", 3X, " ", /, 21X, " ",
244X, " ", /, 21X, 66(" "), 3(/), 20X, "TUBO", 10X, "POSITIVO", 8X, "TIEMPO",
311X, "NEGATIVO", 8X, "TIEMPO", 2(/))
5400 FORMAT("I", 20X, 67(" "), /, 21X, " ", 65X, " ", /, 21X, " ", 3X, "DESPLAZAMIE
INTO RELATIVO ENTRE TUBO Y SUELO. BORDE POSTERIOR", 3X, " ", /, 21X, " "
2, 65X, " ", /, 21X, 67(" "), 3(/), 20X, "TUBO", 10X, "POSITIVO", 8X, "TIEMPO",
311X, "NEGATIVO", 8X, "TIEMPO", 2(/))
5500 FORMAT("I", 34X, 35(" "), /, 37X, " ", 33X, " ", /, 37X, " ", 3X, "DEFORNACIÓN
1 MAYIMA DEL TUBO", 3X, " ", /, 37X, " ", 33X, " ", /, 37X, 35(" "), 3(/), 20X,
2"TUBO", 9X, "CONTRACCIÓN", 6X, "TIEMPO", 11X, "EXTENSION", 7X, "TIEMPO",
32(/))
END

```

### A.3 Ejemplo

```

*****
*
* DATOS GENERALES DE LA TUBERIA:
*
* NUMERO DE SEGMENTOS 50
*
* NUMERO DE JUNTAS 51
*
* CONDICION DE APOYO INICIAL 1
*
* CONDICION DE APOYO FINAL 1
*
* FUERZA DE FRICCION 22087.
*
* DATOS DEL SISMO:
*
* REGISTRO SOSA TEX. 14/03/79
*
* COMPONENTE M00E
*
* INTERVALO DE DIGITACION 0.03
*
* TIEMPO INICIAL 0.24
*
* TIEMPO FINAL 29.43
*
* FACTOR DE ESCALA 2.53
*
*****

```

\*\*\*\*\*  
 \* PROPIEDADES DEL TURO \*  
 \*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*  
 \* PROPIEDADES DEL SUTLO \*  
 \*\*\*\*\*

TURO	RIGIDEZ	LONGITUD	SEGMENTO	RIGIDEZ	VEL. DE PROP.
1	.65077E+07	.36576E+03	1	.33833E+04	.71430E+04
2	.65077E+07	.36576E+03	2	.33833E+04	.71430E+04
3	.65077E+07	.36576E+03	3	.33833E+04	.71430E+04
4	.65077E+07	.36576E+03	4	.33833E+04	.71430E+04
5	.65077E+07	.36576E+03	5	.33833E+04	.71430E+04
6	.65077E+07	.36576E+03	6	.33833E+04	.71430E+04
7	.65077E+07	.36576E+03	7	.33833E+04	.71430E+04
8	.65077E+07	.36576E+03	8	.33833E+04	.71430E+04
9	.65077E+07	.36576E+03	9	.33833E+04	.71430E+04
10	.65077E+07	.36576E+03	10	.33833E+04	.71430E+04
11	.65077E+07	.36576E+03	11	.33833E+04	.71430E+04
12	.65077E+07	.36576E+03	12	.33833E+04	.71430E+04
13	.65077E+07	.36576E+03	13	.33833E+04	.71430E+04
14	.65077E+07	.36576E+03	14	.33833E+04	.71430E+04
15	.65077E+07	.36576E+03	15	.33833E+04	.71430E+04
16	.65077E+07	.36576E+03	16	.33833E+04	.71430E+04
17	.65077E+07	.36576E+03	17	.33833E+04	.71430E+04
18	.65077E+07	.36576E+03	18	.33833E+04	.71430E+04
19	.65077E+07	.36576E+03	19	.33833E+04	.71430E+04
20	.65077E+07	.36576E+03	20	.33833E+04	.71430E+04
21	.65077E+07	.36576E+03	21	.33833E+04	.71430E+04
22	.65077E+07	.36576E+03	22	.33833E+04	.71430E+04
23	.65077E+07	.36576E+03	23	.33833E+04	.71430E+04
24	.65077E+07	.36576E+03	24	.33833E+04	.71430E+04
25	.65077E+07	.36576E+03	25	.33833E+04	.71430E+04
26	.65077E+07	.36576E+03	26	.33833E+04	.71430E+04
27	.65077E+07	.36576E+03	27	.33833E+04	.71430E+04
28	.65077E+07	.36576E+03	28	.33833E+04	.71430E+04
29	.65077E+07	.36576E+03	29	.33833E+04	.71430E+04
30	.65077E+07	.36576E+03	30	.33833E+04	.71430E+04
31	.65077E+07	.36576E+03	31	.33833E+04	.71430E+04
32	.65077E+07	.36576E+03	32	.33833E+04	.71430E+04
33	.65077E+07	.36576E+03	33	.33833E+04	.71430E+04
34	.65077E+07	.36576E+03	34	.33833E+04	.71430E+04
35	.65077E+07	.36576E+03	35	.33833E+04	.71430E+04
36	.65077E+07	.36576E+03	36	.33833E+04	.71430E+04
37	.65077E+07	.36576E+03	37	.33833E+04	.71430E+04
38	.65077E+07	.36576E+03	38	.33833E+04	.71430E+04
39	.65077E+07	.36576E+03	39	.33833E+04	.71430E+04
40	.65077E+07	.36576E+03	40	.33833E+04	.71430E+04
41	.65077E+07	.36576E+03	41	.33833E+04	.71430E+04
42	.65077E+07	.36576E+03	42	.33833E+04	.71430E+04
43	.65077E+07	.36576E+03	43	.33833E+04	.71430E+04
44	.65077E+07	.36576E+03	44	.33833E+04	.71430E+04
45	.65077E+07	.36576E+03	45	.33833E+04	.71430E+04
46	.65077E+07	.36576E+03	46	.33833E+04	.71430E+04
47	.65077E+07	.36576E+03	47	.33833E+04	.71430E+04
48	.65077E+07	.36576E+03	48	.33833E+04	.71430E+04
49	.65077E+07	.36576E+03	49	.33833E+04	.71430E+04
50	.65077E+07	.36576E+03	50	.33833E+04	.71430E+04

\*\*\*\*\*  
 \* DESPLAZAMIENTO RELATIVO ENTRE JUNTAS \*  
 \*\*\*\*\*

JUNTA	CONTRACCION	TIEMPO	EXTENSION	TIEMPO
1	0.	0.24	0.	0.24
2	.21857092E+01	11.22	-.24417994E+01	5.40
3	.15365051E+01	11.28	-.17085026E+01	5.46
4	.15251077E+01	11.34	-.17082380E+01	5.52
5	.15167474E+01	11.37	-.17036715E+01	5.58
6	.15250163E+01	11.43	-.17041493E+01	5.61
7	.15277932E+01	11.49	-.17116274E+01	5.67
8	.15212619E+01	11.55	-.17033971E+01	5.73
9	.15231388E+01	11.58	-.17010353E+01	5.76
10	.15275493E+01	11.64	-.17103951E+01	5.80
11	.15239974E+01	11.70	-.17068372E+01	5.86
12	.15202913E+01	11.73	-.17022714E+01	5.94
13	.15256395E+01	11.79	-.17060219E+01	5.97
14	.15266329E+01	11.85	-.17100735E+01	6.03
15	.15201016E+01	11.91	-.17033264E+01	6.09
16	.15239734E+01	11.94	-.17026992E+01	6.17
17	.15286899E+01	12.00	-.17123844E+01	6.18
18	.15227871E+01	12.06	-.17094374E+01	6.24
19	.15218152E+01	12.09	-.17008712E+01	6.30
20	.15268028E+01	12.15	-.17079113E+01	6.38
21	.15259726E+01	12.21	-.17084794E+01	6.39
22	.15189413E+01	12.27	-.17037597E+01	6.45
23	.15248113E+01	12.30	-.1702331E+01	6.48
24	.15281881E+01	12.36	-.17122687E+01	6.56
25	.15214268E+01	12.42	-.17040578E+01	6.60
26	.15228770E+01	12.45	-.17066895E+01	6.63
27	.15259840E+01	12.51	-.17093008E+01	6.68
28	.15243125E+01	12.57	-.17072792E+01	6.75
29	.15197929E+01	12.60	-.17027117E+01	6.81
30	.15252467E+01	12.66	-.17054275E+01	6.84
31	.15269978E+01	12.68	-.17105189E+01	6.90
32	.15266145E+01	12.72	-.1703293E+01	6.96
33	.15237099E+01	12.81	-.17019928E+01	6.99
34	.15284244E+01	12.87	-.17116905E+01	7.05
35	.15231520E+01	12.93	-.17058760E+01	7.11
36	.15213827E+01	12.96	-.17013117E+01	7.17
37	.15261005E+01	13.02	-.17073170E+01	7.20
38	.15258975E+01	13.08	-.17091187E+01	7.26
39	.15193042E+01	13.14	-.17034028E+01	7.32
40	.15245478E+01	13.17	-.17032167E+01	7.35
41	.15265230E+01	13.23	-.17123595E+01	7.41
42	.15198178E+01	13.26	-.17068774E+01	7.47
43	.15276984E+01	13.32	-.17002825E+01	7.50
44	.15247897E+01	13.38	-.17099045E+01	7.56
45	.15244772E+01	13.44	-.17077194E+01	7.62
46	.15193165E+01	13.47	-.17031521E+01	7.68
47	.15252549E+01	13.53	-.17088335E+01	7.71
48	.15273627E+01	13.59	-.17109592E+01	7.77
49	.15208314E+01	13.65	-.17030277E+01	7.83
50	.21855972E+01	13.68	-.24401317E+01	7.86
51	0.	0.24	0.	0.24

\*\*\*\*\*  
 \* VALOR MAX. POS. .21857E+01 \*  
 \* VALOR MAX. NEG. -.24418E+01 \*  
 \*\*\*\*\*



\*\*\*\*\*  
 \* DESPLAZAMIENTO RELATIVO ENTRE TUBO Y SUELO. BORDE ANTERIOR \*  
 \* \*\*\*\*\*

TUBO	POSITIVO	TIEMPO	NEGATIVO	TIEMPO
1	0.	0.24	0.	0.24
2	85150295E+00	5.46	-76072080E+00	11.29
3	85700354E+00	5.46	-76578495E+00	11.29
4	85688860E+00	5.52	-76590871E+00	11.29
5	85141799E+00	5.61	-76179541E+00	11.43
6	85273155E+00	5.61	-76320884E+00	11.43
7	85283163E+00	5.67	-76785710E+00	11.49
8	85262874E+00	5.74	-76307095E+00	11.55
9	85134551E+00	5.82	-76065745E+00	11.72
10	85884929E+00	5.87	-74459188E+00	11.84
11	85504856E+00	5.88	-76850507E+00	11.70
12	85144453E+00	5.97	-76153113E+00	11.59
13	85457272E+00	5.97	-76832840E+00	11.79
14	85388749E+00	6.03	-76855648E+00	11.85
15	85210394E+00	6.09	-76260574E+00	11.91
16	85189897E+00	6.18	-76176497E+00	11.97
17	86069565E+00	6.18	-76799995E+00	12.00
18	853A0173E+00	6.27	-763614A4E+00	12.06
19	85148928E+00	6.33	-76026683E+00	12.18
20	85A47300E+00	6.33	-76543595E+00	12.14
21	85644379E+00	6.39	-76867585E+00	12.31
22	85158211E+00	6.48	-76194144E+00	12.27
23	85215100E+00	6.48	-76287251E+00	12.30
24	86028577E+00	6.54	-76773722E+00	12.26
25	85270988E+00	6.63	-76801606E+00	12.42
26	85183204E+00	6.69	-76040253E+00	12.51
27	85326878E+00	6.69	-76654396E+00	12.51
28	85549981E+00	6.75	-76478519E+00	12.57
29	85143074E+00	6.84	-76147715E+00	12.66
30	85399675E+00	6.84	-7639800A E+00	12.66
31	85884183E+00	6.90	-76684658E+00	12.72
32	85226804E+00	6.96	-76255174E+00	12.78
33	85157381E+00	7.05	-76141662E+00	12.54
34	86011453E+00	7.05	-76765108E+00	12.87
35	85405887E+00	7.11	-76389456E+00	12.82
36	85147452E+00	7.20	-76101285E+00	13.02
37	85584250E+00	7.20	-76508741E+00	12.92
38	85739786E+00	7.26	-76595595E+00	12.98
39	85174623E+00	7.35	-76208747E+00	13.14
40	85161957E+00	7.41	-76252417E+00	13.20
41	86073991E+00	7.41	-76801734E+00	13.32
42	85229540E+00	7.47	-76316208E+00	13.29
43	85151879E+00	7.56	-76054884E+00	13.32
44	85769826E+00	7.56	-76619516E+00	13.38
45	85598395E+00	7.62	-76806831E+00	13.44
46	85141699E+00	7.71	-76162318E+00	13.53
47	85341628E+00	7.71	-76363172E+00	13.58
48	85929592E+00	7.77	-76712670E+00	13.59
49	85243318E+00	7.86	-76289779E+00	13.65
50	15922213E+01	7.92	-14250192E+01	13.71

\*\*\*\*\*  
 \* VALOR MAX. POS. .15922E+01 \*  
 \* VALOR MAX. NEG. -1.4250E+01 \*  
 \* \*\*\*\*\*

DESPLAZAMIENTO RELATIVO ENTRE TUBO Y SUELO. BORDE POSTERIOR

TUBO	POSITIVO	TIEMPO	NEGATIVO	TIEMPO
1	.14272561E+01	11.19	-.15951656E+01	8.30
2	.76072080E+00	11.28	-.85150205E+00	5.46
3	.74578429E+00	11.38	-.85700354E+00	5.46
4	.74539571E+00	11.34	-.85489960E+00	5.52
5	.76179541E+00	11.43	-.85141799E+00	5.61
6	.76322086E+00	11.43	-.85273152E+00	5.61
7	.74745710E+00	11.49	-.85843145E+00	5.67
8	.76287003E+00	11.65	-.85243574E+00	5.76
9	.76065742E+00	11.64	-.85154581E+00	5.82
10	.76685184E+00	11.64	-.85849295E+00	5.82
11	.76450507E+00	11.70	-.85804544E+00	5.88
12	.76133112E+00	11.77	-.85144435E+00	5.97
13	.76423840E+00	11.79	-.85457727E+00	6.07
14	.76654446E+00	11.85	-.85632769E+00	6.03
15	.76240574E+00	11.91	-.85210294E+00	6.12
16	.76174497E+00	11.97	-.85158957E+00	6.18
17	.76796439E+00	12.00	-.86049505E+00	6.18
18	.76261444E+00	12.06	-.85260173E+00	6.27
19	.76084443E+00	12.15	-.85148829E+00	6.33
20	.76543594E+00	12.15	-.85442302E+00	6.33
21	.76567583E+00	12.21	-.85494375E+00	6.39
22	.76194144E+00	12.27	-.85158211E+00	6.48
23	.76287251E+00	12.30	-.85215100E+00	6.48
24	.76773722E+00	12.36	-.86028577E+00	6.54
25	.76301404E+00	12.42	-.85275658E+00	6.63
26	.76080252E+00	12.41	-.85153705E+00	6.69
27	.76454250E+00	12.41	-.85226878E+00	6.69
28	.76478194E+00	12.57	-.85549981E+00	6.75
29	.76147715E+00	12.66	-.85143074E+00	6.84
30	.76398004E+00	12.66	-.85399675E+00	6.84
31	.76484458E+00	12.72	-.85384138E+00	6.90
32	.76255174E+00	12.78	-.85226806E+00	6.99
33	.76141662E+00	12.84	-.85157581E+00	7.05
34	.76765107E+00	12.87	-.86011482E+00	7.08
35	.76389454E+00	12.93	-.85405587E+00	7.11
36	.76101285E+00	12.92	-.85147452E+00	7.20
37	.76508741E+00	12.93	-.85584230E+00	7.20
38	.76398395E+00	12.96	-.85728789E+00	7.26
39	.76208747E+00	12.94	-.85174423E+00	7.35
40	.76252417E+00	12.96	-.85151957E+00	7.41
41	.76891734E+00	13.00	-.86073991E+00	7.41
42	.76316205E+00	13.06	-.85285400E+00	7.50
43	.76074357E+00	13.06	-.85151829E+00	7.56
44	.76419514E+00	13.09	-.85748824E+00	7.56
45	.76304631E+00	13.14	-.85575739E+00	7.62
46	.76162318E+00	13.13	-.85141638E+00	7.71
47	.76363177E+00	13.13	-.85341423E+00	7.71
48	.76712678E+00	13.19	-.86029957E+00	7.77
49	.76269779E+00	13.16	-.85243218E+00	7.86
50	0.	0.74	0.	0.74

\* VALOR MAX. POS. .142726+01 \*  
 \* VALOR MAX. NEG. -.159517-01 \*  
 \* \* \* \* \*

\*\*\*\*\*  
 \* DEFORMACION MAXIMA DEL TUBO \*  
 \*\*\*\*\*

TUBO	CONTRACCION	TIEMPO	EXTENSION	TIEMPO
1	.39028935E-03	11.19	-.42394209E-03	5.97
2	.08152258E-03	11.25	-.11991171E-03	5.46
3	.10381070E-03	11.28	-.12046674E-03	5.46
4	.0874020E-03	11.34	-.12059948E-03	5.52
5	.08299225E-03	11.40	-.11994079E-03	5.58
6	.05477522E-03	11.43	-.12011151E-03	5.61
7	.09028122E-03	11.49	-.12103453E-03	5.67
8	.02431022E-03	11.55	-.12009774E-03	5.73
9	.08144436E-03	11.58	-.11985740E-03	5.83
10	.09954458E-03	11.64	-.12090584E-03	5.88
11	.08444444E-03	11.70	-.12041256E-03	5.88
12	.08231018E-03	11.76	-.11994623E-03	5.97
13	.08362147E-03	11.78	-.12085141E-03	5.97
14	.08912234E-03	11.85	-.12084466E-03	6.03
15	.08371582E-03	11.81	-.12009944E-03	6.09
16	.08288993E-03	11.84	-.11943004E-03	6.18
17	.08588604E-03	12.00	-.12114455E-03	6.18
18	.08538659E-03	12.06	-.12025441E-03	6.24
19	.08171524E-03	12.12	-.11984993E-03	6.24
20	.08765432E-03	12.17	-.12059131E-03	6.33
21	.08796605E-03	12.21	-.12063899E-03	6.33
22	.08311238E-03	12.27	-.11996212E-03	6.45
23	.08432252E-03	12.30	-.12003608E-03	6.48
24	.09064538E-03	12.36	-.12109336E-03	6.54
25	.08450906E-03	12.42	-.12011910E-03	6.54
26	.08111222E-03	12.48	-.11985841E-03	6.69
27	.08908385E-03	12.51	-.12083170E-03	6.69
28	.08680848E-03	12.57	-.12047171E-03	6.75
29	.08250898E-03	12.63	-.11994285E-03	6.84
30	.08576208E-03	12.66	-.12037594E-03	6.84
31	.08948778E-03	12.72	-.12090527E-03	6.90
32	.08390564E-03	12.78	-.12005127E-03	6.96
33	.08243028E-03	12.81	-.11996130E-03	7.05
34	.09005333E-03	12.87	-.12107110E-03	7.05
35	.08565098E-03	12.93	-.12038344E-03	7.11
36	.08190548E-03	12.99	-.11996819E-03	7.20
37	.08720198E-03	13.02	-.12051858E-03	7.20
38	.08383018E-03	13.08	-.12071803E-03	7.26
39	.08330218E-03	13.14	-.11998345E-03	7.32
40	.08386497E-03	13.23	-.11994799E-03	7.41
41	.09100948E-03	13.23	-.12115239E-03	7.41
42	.08469825E-03	13.29	-.12014061E-03	7.47
43	.08130503E-03	13.35	-.11999881E-03	7.56
44	.08384105E-03	13.38	-.12078875E-03	7.56
45	.08717225E-03	13.44	-.12052034E-03	7.62
46	.08269878E-03	13.50	-.11994044E-03	7.71
47	.08530928E-03	13.53	-.12020050E-03	7.71
48	.0898518E-03	13.59	-.12064471E-03	7.77
49	.08405748E-03	13.65	-.12007260E-03	7.83
50	.37918797E-03	13.68	-.42317145E-03	7.92

\*\*\*\*\*  
 \* VALOR MAX. POS. .39029E-03 \*  
 \* VALOR MAX. NEG. -.42396E-03 \*  
 \*\*\*\*\*